

TA/TL/2025/2002



JURUSAN
TEKNIK LINGKUNGAN

TUGAS AKHIR

Uji Toksisitas Sungai Citarum Bagian Tengah Menggunakan Metode *Fish Embryo Toxicity* (FET) Pada *Zebrafish Embryos*

Kanza Kania Chairunisa Hamdani

21513181

Dosen Pembimbing 1:

Any Juliani, S.T., M.Sc (Res Eng)., Ph.D

Dosen Pembimbing 2:

Dr. apt Farida Hayati, S.Si., M. Si.

Program Studi Teknik Lingkungan

Fakultas Teknik Sipil Dan Perencanaan

Universitas Islam Indonesia

2025



DEPARTMENT
ENVIRONMENTAL ENGINEERING

BACHELOR THESIS

Toxicity Test of The Middle Section Citarum River Using *Fish Embryo Toxicity (FET) Method on Zebrafish Embryos*

Kanza Kania Chairunisa Hamdani

21513181

Supervisor 1:

Any Juliani, S.T., M.Sc (Res Eng)., Ph.D

Supervisor 2:

Dr. apt Farida Hayati, S.Si., M. Si.

Environmental Engineering Bachelor Program

Faculty of Civil Engineering and Planning

Universitas Islam Indonesia

2025

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

Uji Toksisitas Sungai Citarum Bagian Tengah Menggunakan Metode *Fish Embryo Toxicity (FET) Pada Zebrafish Embryos*

Tugas akhir ini disusun dan diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) pada Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.

Kanza Kania Chairunisa Hamdani

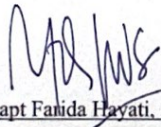
21513181

Tugas akhir ini telah diuji pada tanggal 22 Juli 2025 dan disetujui oleh:




Any Juliani, S.T., M.Sc (Res Eng.), Ph.D

(Pembimbing 1)



Dr. apt Fanida Hayati, S.Si., M. Si.

(Pembimbing 2)



22/ 25
/ 7

Dr. Supria Rahmawati, S.T., M.T.

(Penguji)

Mengetahui,

Ketua Prodi Teknik Lingkungan Program Sarjana



Any Juliani, S.T., M.Sc (Res.Eng.), Ph.D.

PERNYATAAN

Saya, penyusun tugas akhir ini, menyatakan bahwa:

1. Karya tulis ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik apapun, baik di Universitas Islam Indonesia, maupun di perguruan tinggi lainnya.
2. Karya tulis ini merupakan gagasan, rumusan, dan studi saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan dosen pembimbing.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama penulis dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Perangkat lunak atau program komputer yang digunakan dalam tugas akhir ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab saya. Bukan tanggung jawab Universitas Islam Indonesia.
5. Tidak ada penggunaan kecerdasan buatan (*artificial intelligence*, AI) dalam penyusunan karya tugas akhir ini kecuali:
 - a. untuk membantu dalam kadar yang wajar (seperti membantu mengoreksi, mencari ide, dan mencari referensi), dan
 - b. tercantum dan dijelaskan perihal penggunaannya secara eksplisit di dalam karya tugas akhir ini.Implikasi dari penggunaan AI tersebut menjadi tanggung jawab saya sepenuhnya.
6. Pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya. Apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, saya bersedia menerima sanksi akademik dengan pencabutan gelar yang sudah diperoleh serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi.

Yogyakarta, 22 Juli 2025
Yang membuat pernyataan,



Kanza Kania Chairunisa Hamdani
21513181

PRAKARTA

Assalamu'alaikum Warabmatullahi Wabarakatuh

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas karunia dan rahmat-Nya Tugas Akhir yang dilaksanakan dengan judul "Uji toksisitas Sungai Citarum bagian tengah menggunakan metode *Fish Embryo Toxicity* (FET) pada *zebrafish embryos*. Dalam penyusunan Tugas Akhir, penulis telah mendapatkan bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada:

1. Kepada panutanku, Ayahanda Hamdan, yang meskipun belum sempat merasakan bangku perkuliahan, namun selalu berusaha dan melakukan apa pun demi pendidikan anak gadis bungsunya. Terima kasih atas segala doa, kerja keras, dan dukungan yang tiada henti Ayah berikan kepada penulis. Semoga Ayah senantiasa diberi kesehatan dan umur panjang agar dapat terus menemani setiap langkah dan pencapaian penulis di masa depan.
2. Kepada pintu surgaku, Ibunda Roja Seli, yang telah mengubur begitu banyak mimpi demi menumbuhkan dan menghidupkan mimpi-mimpi penulis. Gelar sarjana ini penulis persembahkan untuk Ibu, sebagai bentuk terima kasih yang tak terhingga atas segala nasihat, kesabaran, dan kebesaran hati dalam menghadapi penulis yang keras kepala dan sulit diatur. Ibu adalah penguat dan pengingat paling hebat dalam hidup ini, serta tempat ternyaman untuk pulang. Semoga Ibu senantiasa diberi kesehatan dan umur panjang, agar bisa terus menemani setiap perjalanan dan pencapaian penulis.
3. Kepada kakak dan abang kandung yang penulis sayangi, Zoraida Hamdani dan Muhammad Reza Hamdani terima kasih atas dukungan dan motivasi yang tak pernah putus. Terima kasih telah menjadi pengingat setia, yang dengan sabar mendorong penulis untuk terus maju dan menyelesaikan tugas akhir ini, meski sering kali terjebak dalam rasa malas dan lelah. Kehadiran kalian adalah kekuatan tersendiri bagi si bungsu dalam menyelesaikan perjuangan ini. Semoga segala kasih sayang dan semangat yang kalian berikan menjadi kebaikan yang kembali kepada kalian dalam bentuk apapun itu.

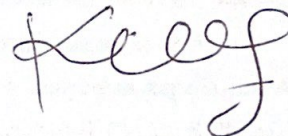
4. Kepada kakak sepupu tersayang, Aprilia Rozalista terima kasih telah menjadi sahabat serta teman cerita selama proses penyusunan tugas akhir ini. Terima kasih karena selalu hadir untuk mendengarkan, memastikan penulis tetap dalam keadaan sehat wal afiat. Dukungan beliau menjadi penguat tersendiri di tengah perjalanan yang tak selalu mudah ini. Semoga kelak kita berdua dapat menjadi kebanggaan keluarga seperti selama ini yang kita impikan bersama.
5. Sahabat Penulis, Kintan Parenza Yasa dan Annisa Muthmainnah yang selalu membantu penulis dalam segala hal dari pertama kali perkuliahan hingga akhir dan banyak mendegarkan keluh kesah, serta membantu mengerjakan progres tugas besar bersama. Terima kasih telah menjadi teman yang tidak hanya hadir dalam tawa tetapi juga dalam letih dan air mata. Perjalanan ini menjadi lebih bermakna karena dilalui bersama kalian
6. Kepada rekan-rekan penulis seperjuangan, Indita Ratna Pratiwi, Febianda Rachmadhati, Hana Fadiyah Dwi Ningrum, terima kasih atas motivasi, dukungan, serta bantuan yang kalian berikan selama proses penyusunan tugas akhir ini.
7. Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya penulis sampaikan kepada Ibu Any Juliani S.T., M.Sc. (Res.Eng.), Ph.D. dan Ibu Dr. apt Farida Hayati, S.Si., M. Si. selaku dosen pembimbing yang dengan penuh kesabaran telah membimbing, memberikan masukan, arahan, serta dukungan selama penyusunan tugas akhir. Terima kasih atas waktu, perhatian dan ilmu yang ibu berikan dengan tulus. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada Ibu Dr. Suphia Rahmawati, S.T., M.T, selaku dosen penguji atas masukan dan arahan yang membangun selama proses penyelesaian tugas akhir ini. Segala bimbingan dan kontribusi Ibu bertiga menjadi bagian penting dalam keberhasilan penulisan tugas akhir ini.
8. Ibu Any Juliani S.T., M.Sc. (Res.Eng.) selaku Ketua Prodi Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia dan Bapak Adam Rus Nugroho., S.T., M.T, selaku koordinator Tugas Akhir.
9. Kepada seluruh dosen Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat selama masa perkuliahan bagi penulis.
10. Kepada diri sendiri terima kasih telah bertahan sejauh ini. Terima kasih sudah memilih untuk terus melangkah meski lelah, tetap berdiri meski sering ingin menyerah. Terima kasih telah menjaga diri tetap sehat, tetap waras dan terus percaya bahwa setiap usaha akan berbuah hasil. Tidak mudah, tapi kamu berhasil

sampai titik ini. Tugas akhir ini menjadi bukti bahwa kamu mampu melewati segala rintangan. Semoga rasa bangga hari ini menjadi pengingat bahwa kamu layak untuk segala pencapaian baik yang akan datang nanti.

Penulis menyadari dalam penyusunan Tugas Akhir masih banyak kekurangan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan demi menyempurnakan Tugas Akhir ini. Penulis berharap semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi para pembaca dan dapat ditindaklanjuti dengan pengimplementasian saran.

Wassalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Yogyakarta, 22 Juli 2025



Kanza Kania Chairunisa Hamdani

Uji Toksisitas Sungai Citarum Bagian Tengah Menggunakan Metode *Fish Embryo Toxicity (FET)* Pada *Zebrafish Embryos*

Mahasiswa : Kanza Kania Chairunisa Hamdani
NIM : 21513181
Program Studi : Teknik Lingkungan - Program Sarjana
Pembimbing 1 : Any Juliani, S.T., M.Sc (Res Eng)., Ph.D
Pembimbing 2 : Dr. apt Farida Hayati, S.Si., M. Si.

Abstrak

Sungai Citarum merupakan sungai terpanjang dan terbesar di Provinsi Jawa Barat. Hulu Sungai Citarum berawal dari Gunung Wayang, Kabupaten Bandung dan berakhir di muara Laut Jawa yang terletak di Muara Gembong, Kabupaten Bekasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat toksisitas dan kadar kualitas air pada Sungai Citarum. Metode penelitian ini menggunakan metode FET. *Fish Embryo Toxicity* yang dikembangkan untuk menilai tingkat toksisitas akut dari bahan kimia terhadap embrio ikan, khususnya menggunakan *zebrafish (Danio rerio)*. Metode ini digunakan sebagai alternatif pengujian toksisitas pada ikan dewasa, dengan tujuan utama untuk mengurangi penggunaan hewan dalam penelitian dan meningkatkan efisiensi pengujian toksikologi. Hasil penelitian uji toksisitas menunjukkan bahwa sampel koagulasi sebagai parameter utama toksisitas terdeteksi paling tinggi pada sampel 1, pada konsentrasi terendah (6,25%). Hal ini mengindikasikan bahwa air sungai di titik tersebut mengandung zat beracun yang dapat mengganggu perkembangan embrio ikan, sehingga menunjukkan adanya pencemaran yang berdampak biologis. Hasil penelitian uji parameter kimia menunjukkan bahwa kadar COD (85,1 mg/L) dan kadmium (0,093 mg/L) melebihi standar baku mutu yang telah ditetapkan. Hasil ini menunjukkan adanya potensi toksisitas akut pada air Sungai Citarum di beberapa lokasi.

Kata Kunci: Sungai Citarum, toksisitas, *Fish Embryo Toxicity (FET)*, kualitas air

Toxicity Test of The Middle Section Citarum River Using Fish Embryo Toxicity (FET) Method on Zebrafish Embryos

Student : Kanza Kania Chairunisa Hamdani
Student Number : 21513181
Study Program : Enviromental Engginering – Bacholer Program
Supervisor 1 : Any Juliani, S.T., M.Sc (Res Eng)., Ph.D
Supervisor 2 : Dr. apt Farida Hayati, S.Si., M. Si.

Abstract

*The Citarum River is the longest and largest river in West Java Province. The upper reaches of the Citarum River originate from Mount Wayang in Bandung Regency and end at the Java Sea estuary located in Muara Gembong, Bekasi Regency. This study aims to determine the toxicity level and water quality of the Citarum River. The research method used the FET method. Fish Embryo Toxicity was developed to assess the acute toxicity of chemicals on fish embryos, specifically using zebrafish (*Danio rerio*). This method is used as an alternative to toxicity testing on adult fish, with the main objective of reducing the use of animals in research and improving the efficiency of toxicology testing. The toxicity test results showed that coagulation, as the primary toxicity parameter, was detected at the highest level in sample 1, at the lowest concentration (6.25%). This indicates that the river water at that point contains toxic substances that can disrupt fish embryo development, thereby indicating biological contamination. The results of the chemical parameter tests showed that the levels of COD (85.1 mg/L) and cadmium (0.093 mg/L) exceeded the established quality standards. These results indicate the potential for acute toxicity in the Citarum River water at several locations.*

Keywords: Citarum River, toxicity, Fish Embryo Toxicity (FET), water quality

DAFTAR ISI

PERNYATAAN	1
PRAKARTA	2
Abstrak	5
Abstract	6
DAFTAR ISI	7
DAFTAR TABEL	9
DAFTAR GAMBAR	10
BAB I PENDAHULUAN	11
1.1 Latar Belakang	11
1.2 Rumusan Masalah	13
1.3 Tujuan Penelitian	13
1.4 Manfaat Penelitian	13
1.5 Ruang Lingkup	14
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	15
2.1 Daerah Aliran Sungai Citarum	15
2.2 Uji Toksisitas	17
2.3 Ikan Zebra (Danio rerio)	17
2.4 Metode Fish Embryo Toxicity (FET)	20
2.5 Parameter Uji Kimia	21
2.5.1 Sulfat (SO₄²⁻)	21
2.5.2 Oxygen Demand Chemical (COD)	22
2.5.3 Kromium Heksavalen (Cr VI)	23
2.5.4 Logam Berat Kadmium (Cd)	24
2.6 Baku Mutu Air	25
2.7 Konsentrasi Kematian LC₅₀	26
2.8 Penelitian Terdahulu	27
BAB III METODE PENELITIAN	29
3.1 Diagram Alir Penelitian	29
3.2 Waktu dan Lokasi Penelitian	30
3.2.1 Lokasi Sampling	30
3.2.2 Lokasi Uji	32
3.3 Alat dan Bahan	33

3.3.1 Uji Toksisitas	33
3.3.2 Parameter Uji Kimia	36
3.4 Prosedur Pengambilan Data	37
3.4.1 Uji Toksisitas	38
3.4.2 Parameter Uji Kimia	48
3.5 Analisis Data.....	49
3.5.1 Uji Toksisitas	49
3.5.2 Uji Parameter Kimia	50
3.5.3 Keterkaitan Antara Kedua Hasil Uji	51
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	52
4.1 Uji Toksisitas	52
4.1.1 Data Uji Validitas.....	52
4.1.2 Karakteristik Parameter Uji Toksisitas.....	53
4.1.3 Hasil Uji Parameter Toksisitas	59
4.1.4 Konsentrasi Kematian (LC ₅₀)	67
4.1.5 Evaluasi Hasil Uji Toksisitas pada Tiga Sampel.....	67
4.2 Uji Parameter Kimia	69
4.2.1 Sulfat	69
4.2.2 Chemical Oxygen Demand (COD)	71
4.2.3 Krom Heksavalen.....	72
4.2.4 Kadmium (Cd)	73
4.2.5 Evaluasi Hasil Uji Parameter Kimia pada Tiga Sampel.....	75
4.3 Perbandingan per Titik pada Lokasi Sampel Uji Paramater Kimia	76
4.4 Perbandingan Kualitas Air dengan Sungai Lain.....	77
4.5 Hubungan antara Uji Toksisitas dengan Uji Parameter Kimia.....	78
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	86
5.1 Kesimpulan.....	86
5.2 Saran	86
DAFTAR PUSTAKA.....	87
RIWAYAT HIDUP	107

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Karakteristik Ikan Zebra Jantan dan Betina (Schilling, 2002).....	19
Tabel 2. 2 Klasifikasi Kelas Air Menurut Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021.....	25
Tabel 2. 3 Referensi Penelitian Terdahulu	27
Tabel 3. 1 Alat dan bahan yang digunakan untuk Peminjahan (<i>breeding</i>)	34
Tabel 3. 2 Alat dan bahan yang digunakan untuk Pengamatan	35
Tabel 3. 3 Alat yang digunakan untuk uji parameter kimia	36
Tabel 3. 4 Bahan yang digunakan untuk uji parameter kimia.....	37
Tabel 3. 5 Kriteria Toksisitas LC ₅₀ Bahan Kimia terhadap Lingkungan	50
Tabel 3. 6 Tabel Baku mutu Air Sungai dan Sejenisnya	51
Tabel 4. 1 Hasil Data Koagulasi dan Fertil Embrio Sampel 1	59
Tabel 4. 2 Hasil Data Koagulasi dan Fertil Embrio Sampel 2	60
Tabel 4. 3 Hasil Data Koagulasi dan Fertil Embrio Sampel 3	61
Tabel 4. 4 Persentase (%) Kelainan pada Embrio <i>Zebrafish</i> setelah 96 Jam	56
Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Sulfat Pada Sungai Citarum bagian Tengah	69
Tabel 4. 6 Hasil Pengujian Chemical Oxygen Demand (COD) Pada Sungai Citarum bagian Tengah.....	71
Tabel 4. 7 Hasil Pengujian Kromium Heksavalen Pada Sungai Citarum bagian Tengah	72
Tabel 4. 8 Hasil Pengujian Kadmium (Cd) Pada Sungai Citarum bagian Tengah	74

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Daerah Aliran Sungai Citarum	16
Gambar 2. 2 Ilustrasi Ikan Zebrafish Jantan (A), Ikan betina (B,C), (Avdesh, 2012)	19
Gambar 2. 3 Anatomi Tubuh Embrio Ikan Zebrafish (Fleming, 2017)	19
Gambar 2. 4 Perkembangan Embrio Normal Pada Suhu 26°C (OECD, 2013).	21
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian.....	29
Gambar 3. 2 Titik Pengambilan Sampel Air Sungai Citarum Sumber: Google Earth, 2024	30
Gambar 3. 3 Jembatan Daraulin Sektor – 8 Sumber: Google Earth, 2024	31
Gambar 3. 4 Jembatan Leuwi Sapi Nanjung Sektor – 9 Sumber: Google Earth, 2024	31
Gambar 3. 5 Jembatan BBS Nanjung Sumber: <i>Google Earth</i> , 2024.....	32
Gambar 3. 6 Seleksi Ikan Zebra	39
Gambar 3. 7 Proses Pemijahan (<i>breeding</i>) Ikan Zebra Tampak Samping	41
Gambar 3. 8 Proses Pemijahan (<i>breeding</i>) Ikan Zebra Tampak Atas	42
Gambar 3. 9 Hasil Embrio yang sudah selesai <i>breeding</i>	42
Gambar 3. 10 Seleksi Embrio menggunakan Mikroskop.....	43
Gambar 3. 11 Pemaparan Embrio menggunakan sampel air Sungai Citarum	45
Gambar 3. 12 1-5= lima konsentrasi (100%; 50%; 25%; 12,5; 6,25%) / bahan kimia; nC = kontrol negatif (air pengenceran); iC = kontrol pelat internal (air pengenceran); pC = kontrol positif (3,4-DCA 4mg / L); sC = solvent control.....	45
Gambar 3. 13 Parameter pengamatan embrio ikan zebra diberikan larutan uji: (a) koagulasi embrio (b) pembentukan somit (c) kegagalan lepasnya bagian tail-bud dari yolk (d) detak jantung (OECD, 2013).	47
Gambar 3. 14 Perkembangan ikan zebra mulai jam ke-22 sampai ke-48 (OECD, 2013).....	47
Gambar 3. 15 Skema uji toksisitas pada embrio ikan zebra (OECD, 2013)	48
Gambar 4. 1 Grafik Hasil Pengamatan Kontrol	53
Gambar 4. 2 Koagulasi pada Embrio	53
Gambar 4. 3 Pembentukan Somit pada Embrio	54
Gambar 4. 4 Pelepasan Tail-Bud pada Embrio	55
Gambar 4. 5 Detak Jantung pada Embrio.....	55
Gambar 4. 6 Penetasan (<i>hatching</i>) pada Embrio Ikan.....	56
Gambar 4. 7 Beberapa Kelainan pada <i>Embryo Zebrafish (Danio rerio)</i> setelah 96 jam	57
Gambar 4. 8 Grafik Koagulasi dan Embrio Fertil pada Sampel 1	59
Gambar 4. 9 Grafik Koagulasi dan Embrio Fertil pada Sampel 2	60
Gambar 4. 10 Grafik Koagulasi dan Embrio Fertil pada Sampel 3	61
Gambar 4. 11 Grafik Perkembangan Terbentuknya Embrio pada Sampel 1	62
Gambar 4. 12 Grafik Kelainan pada Parameter Uji Toksisitas pada Sampel 1.....	62
Gambar 4. 13 Grafik Perkembangan Terbentuknya Embrio pada Sampel 2	64
Gambar 4. 14 Grafik Kelainan pada Parameter Uji Toksisitas pada Sampel 2.....	64
Gambar 4. 15 Grafik Perkembangan Terbentuknya Embrio pada Sampel 3	66
Gambar 4. 16 Grafik Kelainan pada Parameter Uji Toksisitas pada Sampel 3.....	66
Gambar 4. 17 Grafik Hasil Perhitungan Sulfat pada air Sungai Citarum bagian Tengah.....	70
Gambar 4. 18 Grafik Hasil Perhitungan Chemical Oxygen Demand (COD) pada air Sungai Citarum bagian Tengah.....	71
Gambar 4. 19 Grafik Hasil Perhitungan Kromium Heksavalen pada air Sungai Citarum bagian Tengah.....	73
Gambar 4. 20 Grafik Hasil Perhitungan Kadmium pada air Sungai Citarum.....	74
Gambar 4. 21 Grafik (%) Koagulasi dan Parameter Sulfat.....	80
Gambar 4. 22 Grafik (%) Koagulasi dan Parameter COD	81
Gambar 4. 23 Grafik (%) Koagulasi dan Parameter Krom Heksavalen	83
Gambar 4. 24 Grafik (%) Koagulasi dan Parameter Kadmium	85

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sungai Citarum merupakan sungai terpanjang dan terbesar di wilayah Provinsi Jawa Barat, dengan panjang sekitar 300 km. Sungai ini memiliki peran yang sangat strategis di tingkat nasional karena mendukung kehidupan perkotaan dan industri di Pulau Jawa dan Bali, terutama melalui pemanfaatan tiga waduk besar Saguling, Cirata, dan Jatiluhur yang dapat menghasilkan tenaga listrik. Sungai Citarum terbagi menjadi tiga wilayah utama, yaitu hulu, tengah dan hilir. Daerah hulu merupakan wilayah tangkapan air yang dimulai dari mata air Cisanti di Gunung Wayang hingga ke Waduk Saguling, daerah tengah mencakup tiga waduk kaskade: Saguling, Cirata dan Jatiluhur dan daerah hilir mencakup wilayah yang berada di bawah Waduk Jatiluhur (Restorasi Citarum Hulu, 2018).

Potensi air di wilayah Sungai Citarum ini sangat melimpah sebesar 410,65 m³/dtk atau 12,95 milyar m³/tahun. Hal ini karena curah hujan di wilayah Sungai Citarum memang tergolong tinggi, namun hanya 7,65 milyar m³/tahun yang dapat dimanfaatkan (irigasi 86,7% air baku 6% industri 2% municipal 0,3% dan pemeliharaan 5%) dan sisanya 5,3 milyar m³/tahun tidak dimanfaatkan (terbuang ke laut). Penerima manfaat dari sumber daya air ini 80% penduduk DKI Jakarta untuk kebutuhan air bakunya yang dipenuhi melalui Saluran Tarum Barat/ *West Tarum Canal* (WTC) (BBWSC, 2022).

Pertumbuhan penduduk yang semakin besar dan pesat tidak sebanding dengan perkembangan fasilitas penunjang kehidupan masyarakat, kondisi ini memunculkan berbagai masalah, seperti kesenjangan sosial ekonomi, kepadatan penduduk, persampahan dan masalah kesehatan. Salah satu masalah yang timbul akibat pesatnya pertumbuhan masyarakat adalah pengelolaan sampah domestik dan non-domestik (limbah). Fasilitas yang kurang memadai serta rendahnya kesadaran masyarakat untuk menjaga kebersihan lingkungan memperburuk dampak negatif yang dihasilkan limbah.

Limbah yang tidak dikelola dengan baik dapat mencemari air, tanah, dan udara. Air yang terkontaminasi oleh limbah dapat mengalir ke badan air, seperti sungai, dan menurunkan kualitasnya. Ketika limbah dibuang langsung ke sungai atau badan air lainnya, pencemaran dapat merusak habitat biota air. Penggunaan air sungai secara terus-menerus tanpa pengendalian juga memperburuk kondisi badan air, karena limbah domestik, industri, dan pertanian terus masuk. Akumulasi pencemaran ini tidak hanya menurunkan kualitas air, tetapi juga mengancam keanekaragaman hayati dan kesehatan manusia yang menggunakan air tersebut untuk kebutuhan sehari-hari.

Kualitas air dapat dipengaruhi oleh ada atau tidaknya pencemaran. Pencemaran air terjadi ketika zat seperti cairan, padatan, gas, organisme patogen, atau bahan lainnya masuk ke dalam air dan mengganggu kondisi alamnya, sehingga air menjadi berbahaya bagi kesehatan, keselamatan, serta kesejahteraan manusia dan lingkungan (Marese dkk,2012). Secara umum, pencemaran air disebabkan oleh aktivitas manusia, seperti kegiatan industri manufaktur,

pertanian, pertambangan, serta pengelolaan limbah perkotaan yang tidak efektif. Limbah dari industri memiliki dampak paling besar terhadap kualitas air permukaan, yang pada akhirnya dapat membahayakan kesehatan manusia dan merusak ekosistem (Earnhart, 2013).

Perubahan tata guna lahan dapat memengaruhi kualitas air. Menurut Arnold dan Gibbons (1996) dalam Pullanikkatil et al. (2015), perubahan penggunaan lahan yang disertai dengan pertumbuhan populasi dapat menunjukkan adanya kerentanan terhadap penurunan kualitas air di wilayah tangkapan. Hilangnya vegetasi alami dan pengalihfungsian lahan menjadi area perkotaan dapat meningkatkan limpasan dan muatan sedimen, sehingga mempermudah perpindahan polutan dari tanah ke badan air.

Wilayah hulu Daerah Aliran Sungai (DAS) Citarum merupakan kawasan konservasi dengan kerapatan drainase yang tinggi dan didominasi oleh lereng dengan kemiringan lebih dari 15%. Namun, perubahan penggunaan lahan di wilayah ini terjadi sangat cepat, padahal wilayah hulu memiliki peran penting dalam menjaga kualitas dan ketersediaan air (Asdak, 2014).

Permasalahan Daerah Aliran Sungai Citarum karena masalah pencemaran air yang mana terbagi menjadi dua yang diakibatkan karena limbah, persampahan dan banjir. Limbah berasal dari pabrik, domestik, peternakan dan pertanian, sedangkan sampah biasanya berasal dari sampah domestik. Banjir ini terjadi karena erosi permukaan tanah longsor, eksploitasi air tanah, dan okupasi bantaran/ sempadan sungai.

Sebagian besar pencemaran di Sungai Citarum berasal dari berbagai jenis limbah, dengan komposisi sekitar 60% berasal dari limbah rumah tangga, 30% dari limbah cair industri kimia, dan 10% dari limbah pertanian serta peternakan. Di wilayah hulu Sungai Citarum, khususnya di sekitar Kabupaten Bandung, volume sampah yang dihasilkan telah mencapai sekitar 500.000 m³/tahun. Kondisi ini menunjukkan bahwa tekanan terhadap kualitas lingkungan di kawasan hulu sangat tinggi dan memerlukan penanganan yang serius (BBWSC, 2016).

Peninjauan pencemaran air sangat penting untuk menjaga kualitas lingkungan, dengan melakukan monitoring kualitas air dimana kegiatan ini untuk memastikan air tetap aman dan sesuai dengan standar yang ada. Adapun salah satu cara untuk memantau pencemaran adalah menggunakan hewan uji, seperti *zebrafish* yang sensitif terhadap perubahan lingkungan.

Pengujian menggunakan *zebrafish* dapat menunjukkan tingkat toksisitas limbah dalam badan air, sehingga mempermudah upaya monitoring pencemaran dan menjaga kualitas badan air, tak hanya itu pengujian kimia juga penting dilakukan untuk memastikan kualitas air sesuai dengan standar dalam PP No. 22 Tahun 2021 tentang Pengelolaan dan Perlindungan Lingkungan Hidup, berbagai parameter, seperti sulfat, *chemical oxygen demand* (COD), kromium heksavalen (Cr VI), kandungan logam berat, dan bahan pencemar lainnya, dapat diukur. Hasil pengujian ini membantu mengidentifikasi tingkat pencemaran dan memberikan dasar untuk menindaklanjuti pengelolaan serta pemulihan yang akan dilakukan.

Dalam penelitian ini, pengambilan sampel dilakukan dengan metode *grab sampling*, yaitu pengambilan langsung dari badan air yang menggambarkan kondisi air pada saat pengambilan untuk lokasi pengambilan sampel berada di Kabupaten Bandung.

Uji toksisitas terdiri atas dua jenis, yaitu uji toksisitas umum (akut, subakut/subkronis, kronis) dan uji toksisitas khusus (teratogenik, mutagenik, karsinogenik). Salah satu metode yang sering digunakan dalam uji toksisitas akut adalah *Fish Embryo Acute Toxicity (FET)*

menggunakan embrio *zebrafish* (*Danio rerio*) mengacu dari (OECD, 2013). *Zebrafish* sering digunakan karena memiliki gen yang mirip dengan manusia (sekitar 60–70%), yang memungkinkan pemetaan efek toksik secara lebih akurat (Harper, 2011).

Selain itu, *zebrafish* memiliki struktur dan fungsi organ utama yang mirip dengan manusia, seperti sistem kardiovaskular, ginjal, dan hati. Siklus hidupnya yang pendek dan embrio yang transparan memudahkan pengamatan selama uji toksisitas. Berdasarkan protokol OECD NO. 236 tahun 2013, pengujian embrio *zebrafish* bertujuan menentukan batas keamanan suatu bahan yang dipaparkan pada embrio tersebut. Perkembangbiakan *zebrafish* yang cepat dan kemampuannya menghasilkan ratusan telur transparan menjadikannya model yang ideal untuk penelitian (Hardianti et al., 2021).

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dan menentukan tingkat toksisitas perairan Sungai Citarum dengan menggunakan metode *Fish Embryo Toxicity* (FET). Metode ini dipilih karena mampu memberikan gambaran mengenai dampak toksikan terhadap perkembangan embrio ikan, sehingga dapat menjadi indikator biologis yang efektif dalam menilai kualitas lingkungan perairan. Dengan mengetahui tingkat toksisitas tersebut, diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi dalam upaya pengelolaan dan perbaikan kualitas air Sungai Citarum secara berkelanjutan. Untuk itu perlu dilakukannya uji toksisitas Sungai Citarum menggunakan suatu spesies ikan tertentu yang digunakan sebagai hewan uji, khususnya pada penelitian ini ikan yang hidup di air tawar yaitu ikan zebra (*Danio Rerio*) untuk mengetahui tingkat toksisitas dan kualitas air pada sungai tersebut.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian diatas maka dapat ditarik rumusan masalah sebagai berikut:

- 1) Bagaimana tingkat toksisitas sampel air di Sungai Citarum dengan metode *Fish Embryo Toxicity* (FET)?
- 2) Bagaimana kadar kualitas air pada sampel Sungai Citarum berdasarkan hasil uji parameter kimia?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini sebagai berikut:

- 1) Untuk mengetahui tingkat toksisitas air Sungai Citarum dengan menggunakan metode *Fish Embryo Toxicity* (FET) pada embrio ikan *zebrafish* (*Danio rerio*)
- 2) Untuk mengetahui kualitas air pada Sungai Citarum dengan menggunakan peraturan pemerintah No. 22 tahun 2021

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

- 1) Meningkatkan pengetahuan untuk mengembangkan pemahaman ilmiah dan keterampilan mahasiswa.

- 2) Memberikan informasi yang mudah dipahami kepada masyarakat sekitar mengenai kondisi kualitas air di lingkungan mereka, yang mana masyarakat dapat hidup yang lebih ramah lingkungan, seperti mengurangi pembuangan limbah ke badan air.
- 3) Memberikan masukan serta evaluasi dan pengembangan kepada pemerintah terkait kualitas air di Sungai Citarum dalam pengambilan keputusan dan kebijakan terkait pengelolaan lingkungan, khususnya pengendalian pencemaran air.

1.5 Ruang Lingkup

Ruang lingkup penelitian ini meliputi:

- 1) Uji Toksisitas Air Sungai Citarum menggunakan metode *Fish Embryo Toxicity* (FET).
- 2) Uji toksisitas menggunakan hewan uji yaitu, *embryo* ikan zebra (*Danio rerio*) yang didapatkan dari peternak ikan di daerah Bantul.
- 3) Sampel yang digunakan berasal dari Sungai Citarum bagian tengah pada daerah Daraulin, Leuwi Sapi, Nanjung, yang berlokasi di Kabupaten Bandung.
- 4) Pengambilan sampel dilakukan dengan *grab sampling*.
- 5) Uji Toksisitas dengan metode uji *Fish Embryo Toxicity* (FET)
- 6) Parameter secara kimia yang akan diuji adalah Sulfat, *Oxygen Demand Chemical* (COD), Crom Heksavalen (VI) dan Logam berat yaitu Cadmium (Cd).

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Daerah Aliran Sungai Citarum

Daerah Aliran Sungai (DAS) Citarum merupakan salah satu DAS terbesar di Provinsi Jawa Barat. WS Citarum sekitar 11.325 km² mencakup 14 wilayah administrasi kabupaten/kota di lingkungan Provinsi Jawa Barat, yaitu: Kabupaten Bandung, Kabupaten Bandung Barat, Kabupaten Garut, Kabupaten Cianjur, Kabupaten Sumedang, Kabupaten Bogor, Kabupaten Purwakarta, Kabupaten Bekasi, Kabupaten Karawang, Kabupaten Indramayu, Kabupaten Subang, Kabupaten Sukabumi, Kota Bandung, dan Kota Cimahi. Sungai Citarum memiliki 19 DAS dimana aliran sungai ini membentang sepanjang 297 km dari hulunya yaitu di Situ Cisanti yang terletak di kaki Gunung Wayang (berada di sebelah selatan Kota Bandung), dan bermuara di Pantai Utara Pulau Jawa tepatnya di Muara Gembong Kabupaten Bekasi (BBWSC, 2022).

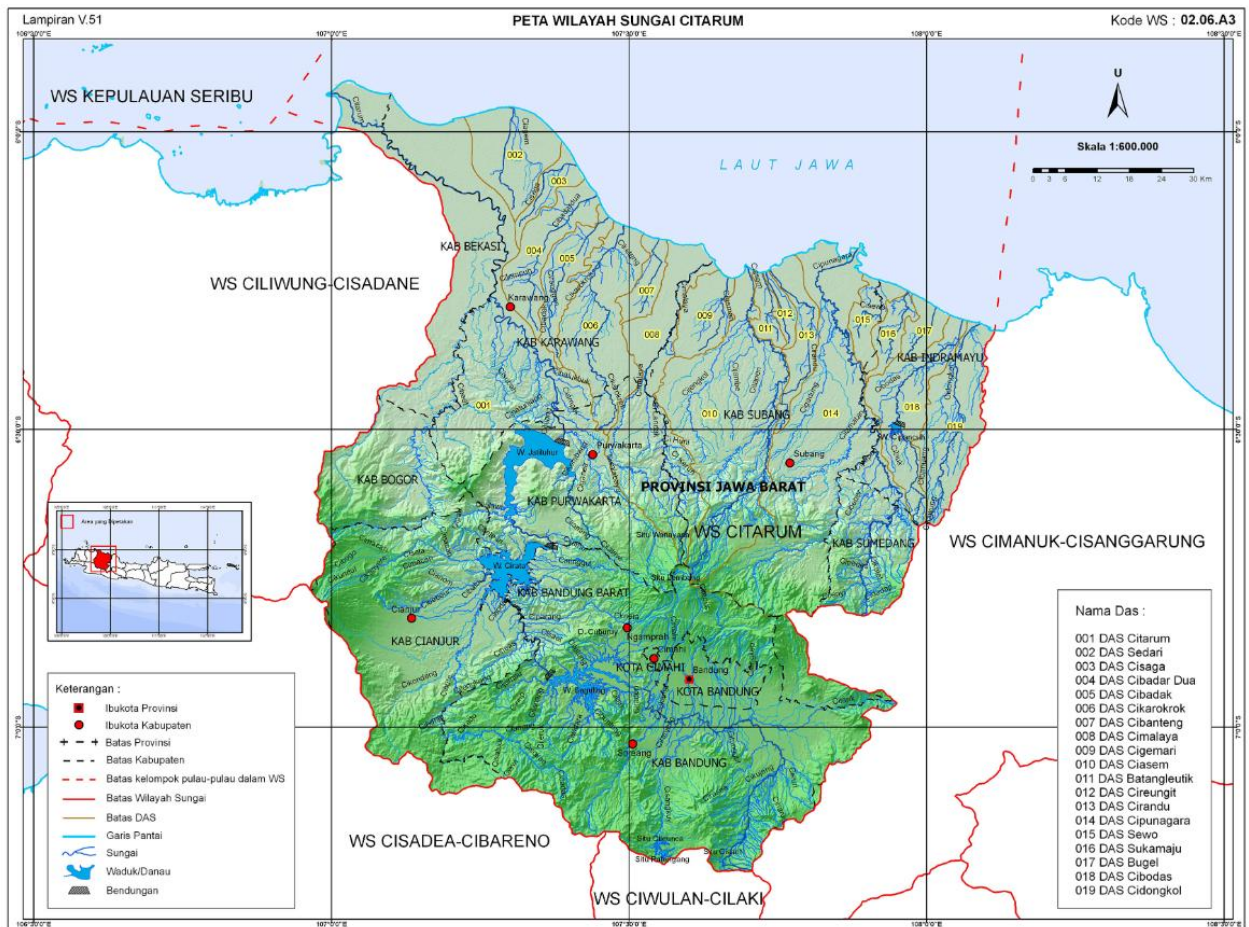
Sungai Citarum ditetapkan menjadi wilayah sungai strategis nasional bersama dengan 28 wilayah sungai lainnya di Indonesia melalui Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 04/PRT/M/2015 tentang Kriteria dan Penetapan Wilayah Sungai. Sungai Citarum juga dimanfaatkan untuk sumber air irigasi pertanian, pendukung kegiatan industri, kegiatan perikanan dan tambak, penggerak turbin Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) untuk energi Jawa-Bali, sumber utama air baku ibu kota negara (BBWSC, 2022).

Menurut UU No. 17 Tahun 2019 Daerah Aliran Sungai adalah suatu wilayah daratan yang merupakan satu kesatuan dengan sungai dan anak-anak sungainya, yang berfungsi menampung, menyimpan, dan mengalirkan air yang berasal dari curah hujan ke danau atau ke laut secara alamiah, yang batas di darat merupakan pemisah topografis dan batas di laut sampai dengan daerah perairan yang masih terpengaruh aktivitas daratan. DAS ini terbagi menjadi tiga bagian. Segementasi Sungai Citarum ini berada pada beberapa wilayah administrasi kabupaten dan kota. Bagian sungai dan anak Sungai Citarum mengalir melalui beberapa wilayah. Berdasarkan BPLHD (2003) secara fisik ekologis DAS Citarum dibagi menjadi 3 bagian, yaitu:

1. DAS Citarum bagian hulu memiliki luas 1.771 km² dengan batas antara Majalaya sampai *inlet* Waduk Saguling. Segmen ini melewati daerah Kabupaten Sumedang, Kabupaten Bandung, Kota Bandung dan Kota Cimahi. Segmen ini paling banyak menampung beban pencemaran air akibat dari limbah industri, rumah tangga dan pertanian.
2. DAS Citarum bagian tengah memiliki luas 4.242 km², yaitu dari *inlet* Waduk Saguling sampai *outlet* Waduk Jatiluhur. Segmen bagian tengah

melewati Kabupaten Bandung, Kabupaten Cianjur, dan Kabupaten Purwakarta. Waduk-waduk tersebut banyak menerima beban pencemaran air akibat limbah perikanan dari keramba dan jaring apung.

3. DAS Citarum bagian hilir memiliki luas 1.387 km², yaitu dari *outlet* Waduk Jatiluhur sampai ke muara Laut Jawa. Segmen ini melewati daerah Kabupaten Karawang dan Kabupaten Bekasi.



Gambar 2. 1 Daerah Aliran Sungai Citarum
Sumber: BBWS Citarum 2013.

Peruntukan sungai dan kelasnya diatur dalam Peraturan Pemerintah Nomor 82 Tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air, namun untuk saat ini PP 82 Tahun 2001 telah digantikan dengan Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, khususnya dalam Lampiran VI yang mengatur tentang baku mutu air nasional. Lampiran ini juga mengatur tentang klasifikasi sungai berdasarkan peruntukannya.

2.2 Uji Toksisitas

Toksisitas merupakan potensi kerusakan akibat suatu zat/senyawa asing yang dipejani ke dalam organisme. Uji toksisitas terbagi menjadi 2 jenis yaitu uji toksisitas umum dan uji toksisitas khusus. Uji toksisitas umum terdiri dari uji toksisitas akut (terjadi dalam waktu cepat), subakut (terjadi dalam waktu sedang), kronik (terjadi dalam waktu lama) ataupun letal (terjadi pada konsentrasi yang dapat menimbulkan kematian secara langsung) dan subletal (terjadi di bawah konsentrasi yang menyebabkan kematian secara langsung) sedangkan uji toksisitas khusus terdiri dari uji teratogenik, mitagenik dan karsinogenik (Sjabana, 2006)

. Pengukuran dari toksisitas sangat kompleks, karena tingkat keparahannya dapat bervariasi dari satu organ ke organ lain, juga dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti usia, genetika, jenis kelamin, diet, kondisi fisiologis, dan status kesehatan makhluk hidup.

Uji toksisitas merupakan pengujian yang dilakukan untuk melihat efek toksik secara langsung dari suatu zat, dosis toksik pada manusia, efek teratogenik, mutagenik, karsinogenik, dan lainnya. Hasil uji toksisitas ini diperoleh dari pengujian dengan subjek uji melalui beberapa tahapan. Subjek uji digunakan untuk mengetahui adanya fisiologi, biokimia, dan fisiologi pada manusia.

Menurut BPOM Tahun 2022 uji toksisitas praklinik secara *in vivo* yang selanjutnya disebut Uji Toksisitas adalah uji yang dilakukan pada hewan uji untuk mendeteksi efek toksik pada sistem biologi dan untuk memperoleh data dosis respon yang khas dari sediaan uji. Uji toksisitas akut merupakan serangkaian pengujian praklinik untuk mendeteksi efek toksik suatu senyawa yang memberikan efek setelah pemberian sediaan uji dalam dosis tunggal atau dosis berulang selama 24 jam (Riaz *et al.*, 2018).

2.3 Ikan Zebra (*Danio rerio*)

Hewan uji yang digunakan adalah Ikan Zebra (*Danio rerio*). Ikan Zebra adalah hewan yang berasal dari Gangga, India. Ikan ini merupakan ikan vertebrata (memiliki tulang sejati tertutup insang). Ikan Zebra termasuk ke dalam ordo *Cypriniformes* (Utami, 2018). Ikan zebra dewasa dengan ciri antara lain terdapat lima garis berpigmen horizontal yang membentang secara longitudinal diseluruh tubuh. Ikan zebra berukuran kecil dengan panjang 3-4 cm. Ikan zebra berkembang biak secara cepat dengan waktu generasi sekitar 3-4 bulan dan dalam jumlah banyak (Rabatti, 2018)

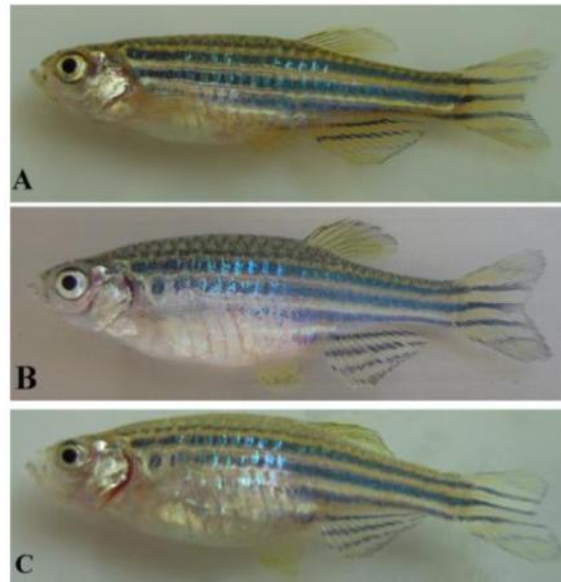
Ikan Zebra jantan dan betina dapat dibedakan berdasarkan karakteristik yang dimiliki. Terdapat 3 ciri khas untuk menentukan jenis kelamin ikan zebra. Pertama, ikan zebra betina

memiliki perut yang lebih besar. Kedua ikan zebra jantan menghasilkan pigmen kuning yang jauh lebih banyak dibandingkan betina. Ketiga *papilla genital* menonjol dari permukaan tubuh ventral pada betina, tetapi tidak pada jantan (Ossack & Draper, 2019)

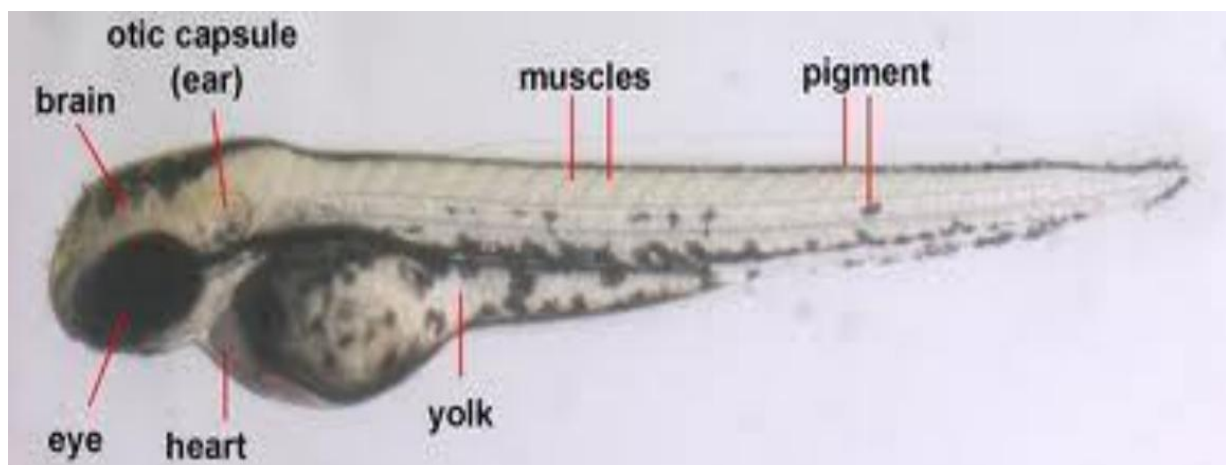
Ikan Zebra mengalami empat tahapan perkembangan, yaitu embrio, larva, anak dan dewasa. Proses perkembangan terjadi sangat cepat karena embrio menjadi larva hanya membutuhkan waktu empat hari. Ikan zebra memiliki ordo yang lebih rendah dari mamalia dengan ukuran tubuh yang lebih kecil. Namun, ikan ini memiliki sistem organ yang dapat dikenali berupa hati, jantung, ginjal, pankreas dan sebagainya memiliki kesamaan fungsi organ pada manusia (Ridwan, 2013).

Ikan Zebra sering digunakan karena memiliki gen yang mirip dengan manusia (sekitar 60–70%), yang memungkinkan pemetaan efek toksik secara lebih akurat (Harper, 2011). Hal ini menjadi kelebihan ikan zebra sebagai hewan model dibandingkan dengan menggunakan hewan dengan ordo yang lebih rendah seperti cacing dan lalat yang sistem organnya sulit dikenali. Hasi riset pada jumlah terbatas telah menunjukkan bahwa 8 dari 10 pengujian pada ikan zebra menunjukkan persamaan efek pengujian pada hewan pengerat dan manusia (MacRae & Peterson, 2015).

Selain itu, Ikan Zebra memiliki struktur dan fungsi organ utama yang mirip dengan manusia, seperti sistem kardiovaskular, ginjal, dan hati. Siklus hidupnya yang pendek dan embrio yang transparan memudahkan pengamatan selama uji toksisitas. Berdasarkan protokol OECD NO. 236 tahun 2013, pengujian embrio Ikan Zebra bertujuan menentukan batas keamanan suatu bahan yang dipaparkan pada embrio tersebut. Perkembangbiakan Ikan Zebra yang cepat dan kemampuannya menghasilkan ratusan telur transparan menjadikannya model yang ideal untuk penelitian (Hardianti et al., 2021).



Gambar 2. 2 Ilustrasi Ikan Zebrafish Jantan (A), Ikan betina (B,C), (Avdesh, 2012)



Gambar 2. 3 Anatomi Tubuh Embrio Ikan Zebrafish (Fleming, 2017)

Berdasarkan **Gambar 2.3** menunjukkan bagian-bagian tubuh embrio ikan zebra yang sedang tumbuh. Terlihat mata, otak, jantung, telinga, kuning telur, otot, dan bintik pigmen mulai terbentuk. Bagian-bagian ini penting untuk melihat apakah pertumbuhan embrio berjalan normal.

Berikut adalah ciri yang dapat membedakan ikan zebra jantan dan betina dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 2. 1 Karakteristik Ikan Zebra Jantan dan Betina (Schilling, 2002)

<i>Zebrafish</i> Jantan	<i>Zebrafish</i> Betina
Tubuhnya lebih gelap	Tubuh lebih terang
Garis tubuhnya lebih kuning atau cokelat	Tulang Spesifik
Permukaan bagian ventral lebih datar dan langsing	Permukaan bagian ventral lebih besar dan bulat
Terdapat warna kuning gelap dibawah sirip	Tidak terdapat warna kuning gelap dibawah sirip

2.4 Metode *Fish Embryo Toxicity* (FET)

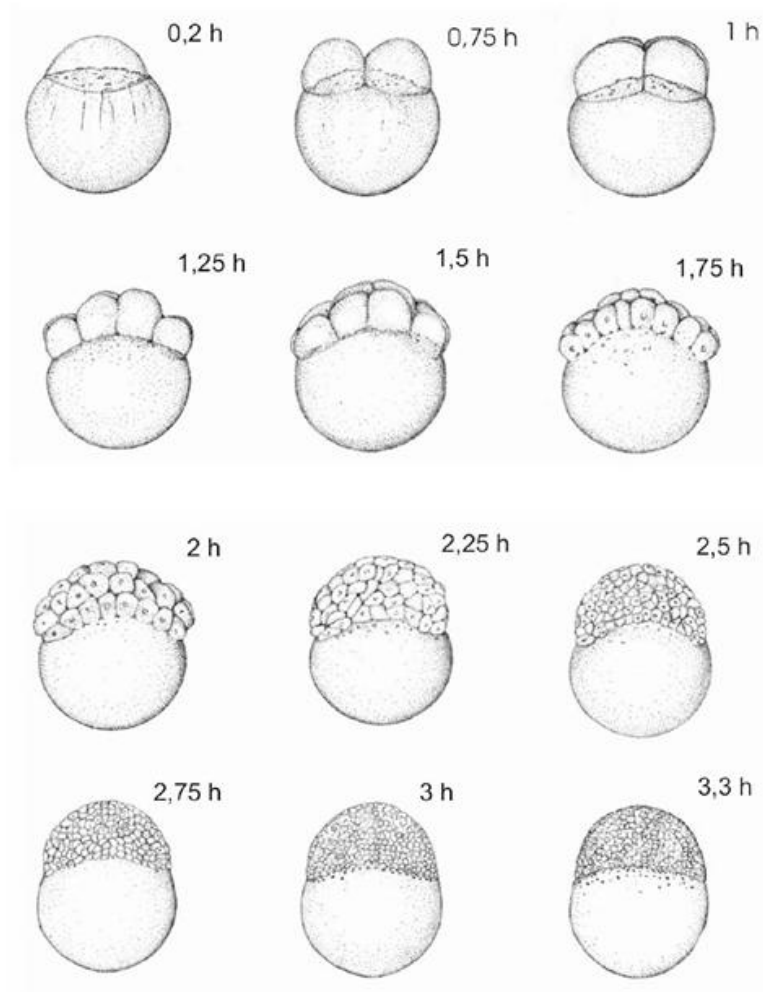
Fish embryo toxicity adalah metode yang dirancang untuk menilai toksisitas akut dari bahan kimia terhadap embrio ikan, terutama menggunakan Ikan Zebra (*Danio rerio*). Metode ini diadopsi sebagai alternatif untuk pengujian toksisitas ikan dewasa, dengan tujuan utama untuk mengurangi penggunaan hewan dalam penelitian dan meningkatkan efisiensi pengujian toksikologi. Metode FET ini menggunakan pedoman OECD No. 236 Tahun 2013 untuk panduan pengujiannya. Pada pedoman OECD tentang Uji Toksisitas Akut Embrio Ikan (*Fish Embryo Acute Toxicity/FET*) (OECD, 2013).

Pengujian ini menggunakan Ikan Zebra (*Danio rerio*) sebagai spesies uji dan dilakukan sesuai dengan pedoman OECD tentang Uji Toksisitas Akut embrio ikan (*Fish Embryo Acute Toxicity/FET*) (Altertox *et al.*, 2013), dengan sedikit adaptasi. Secara singkat, pengujian dimulai dengan interval waktu minimum setelah pembuahan telur dan diakhiri setelah 96 jam pemaparan. Sebelum dilakukannya pengujian toksisitas pada embrio ikan zebra perlu dilakukan validitas uji seperti yang tertera dibawah ini:

Validitas uji toksisitas pada embrio ikan zebra dapat diketahui berdasarkan beberapa kriteria. Berikut beberapa di antaranya meliputi:

- 1) Jumlah embrio yang fertil harus $\geq 70\%$ dari embrio yang diujikan.
- 2) Suhu air harus selalu dipertahankan pada suhu $26 \pm 1^\circ\text{C}$ dalam ruang uji.
- 3) Embrio yang terdapat pada kelompok kontrol negatif dan atau kelompok kontrol pelarut $> 90\%$ bertahan hidup sampai dengan akhir pengamatan di jam ke-96.
- 4) Embrio yang terdapat pada kelompok kontrol positif (4,0 mg/L 3,4-*dichloroanilin*) harus menghasilkan tingkat mortalitas minimal 30% sampai dengan akhir pengamatan di jam ke-96.
- 5) Jumlah penetasan pada kelompok kontrol negatif dan atau kelompok kontrol pelarut harus $\geq 80\%$ sampai dengan akhir pengamatan di jam
- 6) Selama pemaparan 96 jam, tingkat konsentrasi, yang terlarut pada kontrol negatif dan konsentrasi uji paling tinggi harus 80% lebih besar dari saturasi (OECD, 2013).

Setelah pembuahan, telur yang layak yang mengalami pembelahan dan tidak menunjukkan ketidakteraturan yang jelas dipilih dengan menggunakan mikroskop. Telur yang dipilih ditempatkan dalam cawan petri yang berisi larutan uji yang baru disiapkan, dan kemudian dipindahkan kedalam *well plate* 24 sumur, diisi dengan 2 ml sumur larutan uji yang sama, untuk meminimalkan kesalahan pengenceran. Semua telur yang digunakan dalam penelitian ini disediakan oleh fasilitas ikan zebra di Laboratorium Praktlinik.



Gambar 2. 4 Perkembangan Embrio Normal Pada Suhu 26°C (OECD, 2013).
 (Selengkapnya Lihat Lampiran 7)
 Sumber : OECD,2013

2.5 Parameter Uji Kimia

Parameter uji kimia merupakan parameter pengukuran kualitas air yang ditinjau berdasarkan kandungan unsur atau senyawa kimia di dalam air, baik yang berasal dari senyawa organik maupun senyawa anorganik.

2.5.1 Sulfat (SO_4^{2-})

Sulfat (SO_4^{2-}) hadir sebagai ion anorganik dengan ukuran ionik sekitar 0,46 nanometer dan ukuran hidrasi berkisar antara 0,76 hingga 0,80 nanometer. Sulfat tergolong stabil dan termasuk dalam kelompok anion. Secara alami, sulfat berasal dari pelarutan mineral yang mengandung belerang seperti gipsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) dan kalsium sulfat anhidrat (CaSO_4). Selain itu, keberadaannya di air juga dapat berasal

dari aktivitas manusia, termasuk limbah industri kertas, tekstil, dan logam, serta laboratorium. Sulfat sangat larut dalam air, kecuali dalam bentuk Kalsium Sulfat dan Stronsium Sulfat, karena itu, keberadaannya dalam air perlu dikontrol. Dalam air minum, batas maksimal kandungan sulfat yang direkomendasikan adalah 250 mg/L (Sawyer & McCarthy, 1978).

Sulfat merupakan salah satu parameter yang sering dianalisis dalam evaluasi kualitas air karena konsentrasi yang tinggi dapat memengaruhi rasa air, menimbulkan gangguan kesehatan seperti dehidrasi, serta merusak sistem perpipaan. Selain itu, pemantauan kadar sulfat juga berperan dalam mengidentifikasi kemungkinan sumber pencemaran dan dampaknya terhadap keseimbangan ekosistem perairan. Sulfat menjadi salah satu parameter penting dalam penilaian kualitas air di dalam suatu DAS. Hal ini karena kadar sulfat dalam perairan dapat meningkat akibat berbagai aktivitas di wilayah DAS, seperti pembuangan limbah industri, penggunaan pupuk pertanian, serta pelapukan batuan yang mengandung sulfur. Jika tidak dikendalikan, tingginya konsentrasi sulfat dapat menurunkan kualitas air, memengaruhi rasa, menimbulkan gangguan kesehatan, bahkan merusak infrastruktur perpipaan. Pemantauan sulfat dalam air di DAS sangat penting untuk mengetahui potensi pencemaran dan dampaknya terhadap ekosistem perairan.

Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 lampiran VI tentang air permukaan, batas maksimal sulfat dalam air adalah 400 mg/L. Sulfat dalam kadar tinggi dapat berdampak negatif bagi kesehatan manusia, terutama dalam bentuk senyawa magnesium atau natrium sulfat yang bersifat laksatif (pencahar) dan dapat mengiritasi saluran pencernaan jika dikonsumsi berlebihan. Deteksi ion sulfat dalam air kadar sulfat dalam air dapat dideteksi menggunakan metode spektrofotometri (uji kuantitatif), dengan mengukur intensitas warna larutan. Oleh karena itu, sampel air yang akan diuji harus jernih agar tidak mengganggu akurasi pembacaan nilai absorban.

2.5.2 Oxygen Demand Chemical (COD)

Chemical Oxygen Demand (COD) atau Kebutuhan Oksigen Kimia (KOK) adalah jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi zat-zat organik dalam air menjadi air (H_2O) dan karbon dioksida (CO_2). COD tidak merujuk pada satu jenis senyawa spesifik, melainkan merupakan gabungan berbagai senyawa organik, baik yang berukuran besar maupun kecil. Oleh karena itu, ukuran partikelnya sangat

bervariasi dan tidak dapat ditentukan secara spesifik. Reaksi ini berlangsung dalam kondisi asam dan dapat mengoksidasi sekitar 85% senyawa organik. Parameter ini adalah salah satu parameter utama yang digunakan untuk mengukur jumlah kandungan zat organik dalam air, baik yang mudah maupun yang sulit diuraikan secara biologis.

Nilai COD yang tinggi menunjukkan bahwa air tersebut mengandung banyak zat pencemar yang memerlukan oksigen dalam jumlah besar untuk proses penguraian secara kimia. Secara umum Daerah Aliran Sungai (DAS) tingginya nilai COD dapat menjadi tanda adanya pencemaran yang berasal dari berbagai aktivitas di dalam wilayah DAS, contohnya meliputi limbah rumah tangga dari permukiman, limbah cair dari kegiatan industri, aliran air dari lahan pertanian, serta buangan dari aktivitas peternakan yang seluruhnya dapat terbawa ke badan air melalui aliran permukaan dan berkontribusi terhadap peningkatan nilai COD.

Keberadaan COD dalam air berdampak serius terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Konsentrasi COD yang tinggi menandakan tingginya polutan organik, yang dapat menurunkan kadar oksigen terlarut, membunuh biota air, serta menyulitkan pemenuhan standar kualitas air bersih. Selain itu, tingginya COD juga mengindikasikan potensi keberadaan mikroorganisme patogen yang dapat menyebabkan berbagai penyakit. Lingkungan perairan dengan COD tinggi akan mengalami penurunan kualitas ekosistem akibat kekurangan oksigen, yang mengancam kelangsungan hidup makhluk hidup di dalamnya (Fardiaz, 1992). Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 lampiran VI tentang air permukaan, batas maksimal konsentrasi COD yang diperbolehkan dalam air adalah 80 mg/L.

2.5.3 Kromium Heksavalen (Cr VI)

Kromium heksavalen (Cr VI) adalah senyawa yang dihasilkan oleh proses industri dan dikenal sebagai logam berat yang berbahaya serta karsinogenik bagi manusia. Paparan terhadap Cr⁺⁶ dapat terjadi melalui penghirupan, konsumsi, atau kontak dengan kulit. Logam ini bersifat persisten, bioakumulatif, dan toksik, tidak mudah terurai di lingkungan, serta terakumulasi dalam tubuh manusia melalui rantai makanan. Polusi industri adalah sumber utama pelepasan kromium ke lingkungan, biasanya akibat kebocoran, penyimpanan yang buruk, atau pembuangan yang tidak tepat. Kromium mudah larut dalam air dan dapat mencemari sumber air. Untuk mendeteksi kromium heksavalen (Cr⁺⁶), biasanya digunakan metode spektrofotometri,

di mana (Cr^{+6}) bereaksi dengan 1,5-difenilkarbazida dalam kondisi asam, menghasilkan senyawa berwarna merah-ungu yang intensitas warnanya diukur pada panjang gelombang sekitar 540 nm.

Kromium heksavalen (Cr^{6+}) adalah salah satu bentuk logam berat yang sangat beracun dan berbahaya bagi makhluk hidup. Dalam wilayah Daerah Aliran Sungai (DAS), Cr^{6+} dapat masuk ke badan air melalui limbah industri seperti pelapisan logam, penyamakan kulit, atau limbah dari aktivitas manufaktur lainnya. Dampak kesehatan akibat paparan kromium heksavalen cukup serius, termasuk kerusakan pada organ hati, ginjal, dan racun terhadap protoplasma makhluk hidup. Paparan dapat menyebabkan reaksi alergi, ruam kulit, iritasi hidung, dan mimisan, terutama pada pekerja di industri baja dan tekstil. Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 lampiran VI tentang air permukaan, batas maksimum konsentrasi kromium heksavalen dalam air adalah 1 mg/L.

2.5.4 Logam Berat Kadmium (Cd)

Kadmium (Cd) adalah logam berat non-esensial yang cenderung larut dalam air dan memiliki nomor atom 48. Biasanya, kadmium berbentuk logam lunak berwarna putih perak, tidak berasa, dan tidak berbau. Kadmium berikatan dengan unsur-unsur lain seperti oksigen, sulfur, dan klorin (Jaishankar et al., 2014). Pelepasan kadmium ke perairan dapat terjadi secara alami akibat pelapukan batuan yang mengandung kadmium, yang kemudian masuk ke dalam tanah dan perairan. Pada tahun 1983, diperkirakan sekitar 1.200-13.400 ton kadmium dilepaskan ke perairan (UNEP, 2010). Sumber utama polusi kadmium di perairan berasal dari industri besi dan kimia, serta sektor pertambangan, metalurgi, stabilitas plastik, dan pembuatan baterai (Khan et al., 2022).

Pada konsentrasi tertentu, keberadaan larutan Cd (kadmium) di dalam badan air dapat membunuh biota perairan. Kadmium dapat menimbulkan efek toksik pada ikan jika mencapai kadar 200 mg/L, terutama ketika masuk ke dalam rantai makanan melalui proses biomagnifikasi dan bioakumulasi dalam berbagai organisme seperti hewan, tumbuhan, hingga manusia. Paparan kadmium pada manusia dapat menimbulkan gangguan pada ginjal, paru-paru, menurunnya kadar darah, kerapuhan tulang, gangguan sistem reproduksi, hingga risiko kanker (Palar, 2008). Sifat bioavailabilitas Cd membuat proses bioakumulasi senyawa ini, yang sangat larut dalam air, lebih mudah terjadi.

Kadmium adalah logam beracun yang bisa mencemari sungai dan membahayakan makhluk hidup. Daerah Aliran Sungai (DAS), kadmium bisa masuk ke air dari limbah pabrik, tambang, atau pupuk pertanian. Jika tidak dipantau, kadmium bisa merusak lingkungan, masuk ke tubuh hewan dan manusia, serta menyebabkan masalah kesehatan.

Di negara berkembang, kadmium sering dibuang tanpa pemisahan yang tepat, sehingga mencemari tempat pembuangan sampah atau langsung dibuang ke perairan. Untuk mendeteksi kadmium, metode yang umum digunakan adalah spektrometri, seperti Spektrometri Serapan Atom (AAS), Spektrometri Massa Plasma Terinduksi (ICP-MS), atau Voltametri Anodik Stripping (ASV), yang sangat sensitif untuk mengukur konsentrasi kadmium pada tingkat rendah. Kadmium memiliki dampak toksik yang serius bagi kesehatan dan lingkungan. Logam ini bersifat karsinogenik dan dapat merusak organ tubuh manusia, termasuk paru-paru, hati, ginjal, serta mengganggu sistem reproduksi dan aktivitas jantung (Mamoribo et al., 2019). Di lingkungan, kadmium dapat menghambat pertumbuhan organisme dan merusak ekosistem (Patang, 2018). Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 lampiran VI tentang air permukaan, batas maksimum kadmium yang diperbolehkan dalam air adalah 0,01 mg/L.

2.6 Baku Mutu Air

Baku mutu air adalah standar yang menentukan batasan dan konsentrasi biologis, material, energi atau kontaminan yang diperizinkan dalam air (Chairul, 2024). Dalam Peraturan Pemerintah (PP) No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, terdapat standar baku mutu yang harus dipenuhi dalam suatu perairan. Klasifikasi mutu air digolongkan menjadi 4 (empat) kelas dimana pembagian kelas ini didasarkan pada tingkatan baiknya mutu air dan kemungkinan penggunaannya untuk diperuntukkannya. Klasifikasi baku mutu air tersebut yaitu:

Tabel 2. 2 Klasifikasi Kelas Air Menurut Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021

Klasifikasi Tingkat	Pengertian dan Peruntukan
Kelas Satu (I)	merupakan air yang peruntukannya dapat digunakan untuk air baku air minum, dan atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut. merupakan air yang peruntukannya dapat digunakan untuk prasarana/sarana. rekreasi air, pembudidayaan ikan air tawar,"peternakan, air untuk mengairi pertanian, dan

Kelas Dua (II)	atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut
Kelas Tiga (III)	merupakan air yang peruntukannya dapat digunakan untuk pembudidayaan ikan air tawar, peternakan, air untuk mengairi tanaman, dan/atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut.
Kelas Empat (IV)	merupakan air yang peruntukannya dapat digunakan untuk mengairi pertanian dan/atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut.

Berdasarkan penjelasan diatas dapat diketahui bahwa baku mutu air dari kelas satu (I) sampai dengan empat (IV) peruntukannya berbeda dalam kehidupan manusia. Untuk golongan I dapat dimanfaatkan sebagai air minum dalam kehidupan sehari-hari. Golongan II yang dimanfaatkan oleh manusia sebagai sarana rekreasi. Golongan III dapat digunakan sebagai pembudidayaan ikan air tawar, peternakan, dan yang terakhir untuk golongan IV digunakan untuk mengairi pertanian. Dari golongan-golongan tersebut menunjukkan bahwa tingkatan kejernihan air yang berbeda-beda.

2.7 Konsentrasi Kematian LC₅₀

Lethal Concentration 50 (LC₅₀) adalah konsentrasi yang diturunkan secara statistik yang menyebabkan kematian 50% dari populasi organisme dalam serangkaian kondisi paparan yang telah ditentukan. Suatu bahan kimia dikatakan sangat beracun apabila memiliki nilai LC₅₀ kecil . Jangka waktu paparan yang mudah dan sering digunakan yaitu 96 jam, sehingga uji toksisitas akut sering diekspresikan sebagai LC₅₀-96 jam atau LD₅₀-96 jam. Tingkat toksisitas dari suatu polutan dapat ditentukan dengan melihat nilai LC₅₀ nya . Apabila nilai LC₅₀ lebih kecil dari 1000 mg/L dikatakan toksik, sebaliknya apabila nilai LC₅₀ lebih besar dari 1000 mg/L dikatakan tidak toksik. Perhitungan nilai toksitas dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$Y = a + b \cdot x$$

dimana: Y: jumlah biota uji

x: nilai LC₅₀

a: nilai regresi linear “a”

b: nilai regresi linear “b”

2.8 Penelitian Terdahulu

Dalam melakukan penelitian ini diperlukan kajian-kajian dari penelitian sebelumnya terkait topik yang akan diujikan tersebut. Berikut referensi yang dapat digunakan sebagai acuan.

Tabel 2. 3 Referensi Penelitian Terdahulu

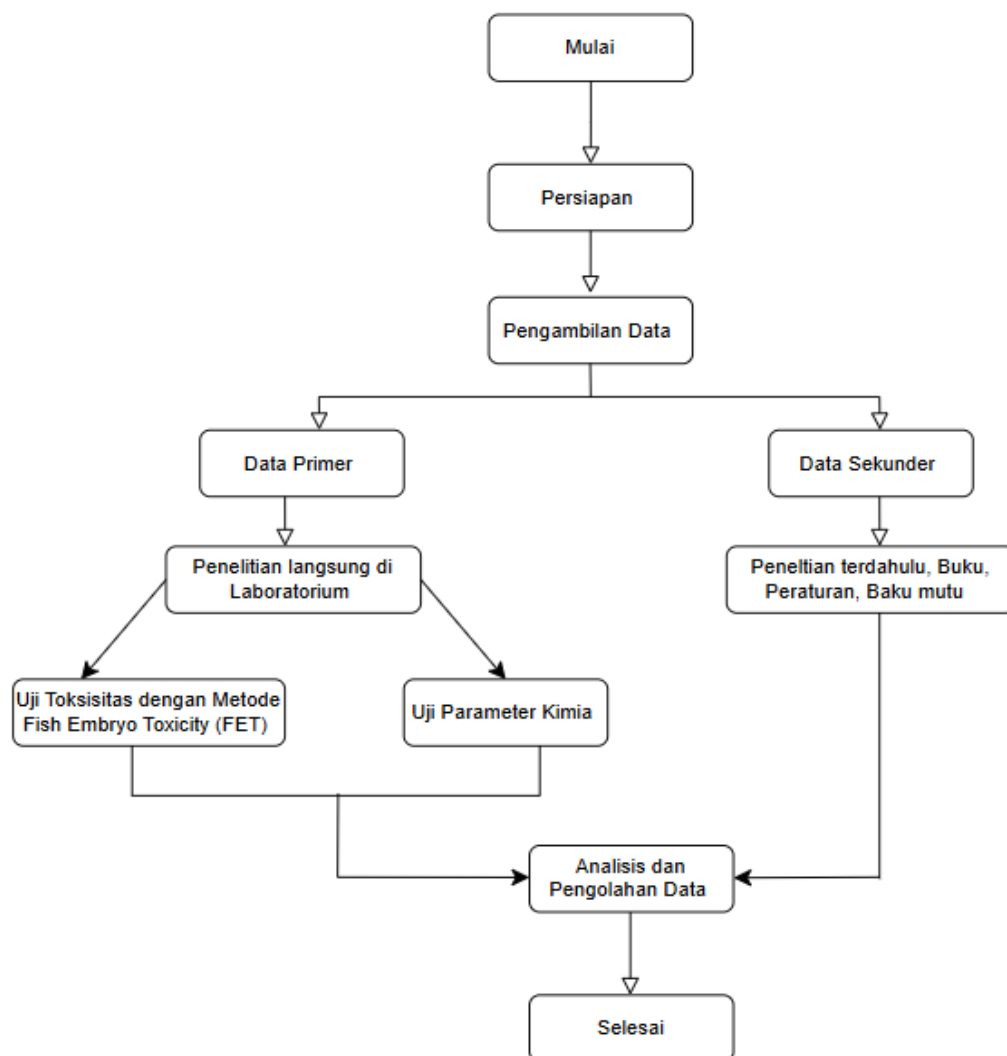
Judul	Penulis	Hasil
Zebrafish (<i>Danio rerio</i>) as a Model Organism	(Khan & Alhewairini, 2018)	Ikan zebra (<i>Danio rerio</i>) adalah hewan model yang sangat direkomendasikan karena dapat digunakan untuk memodelkan fungsi gen, pengembangan berbagai sistem organ, studi kanker, toksikologi, penemuan obat karena biaya rendah dan pemeliharaan yang mudah, embrio transparan, mudah dimanipulasi, dan kesuburan tinggi.
Induksi stres oksidatif dan toksisitas perkembangan jantung pada embrio ikan zebra oleh arsenat pada konsentrasi yang relevan dengan lingkungan	(Wang <i>et al.</i> , 2024)	Konsentrasi arsenik (As) hingga 150 µg/L, meskipun direkomendasikan oleh US EPA sebagai batas paparan kronis untuk kehidupan akuatik, dapat menimbulkan ancaman signifikan bagi ikan, terutama pada tahap awal kehidupan. Penelitian ini menunjukkan bahwa AsV menekan detak jantung, menunda perkembangan jantung, meningkatkan aktivitas SOD, namun juga memicu stres oksidatif, serta memengaruhi regulasi gen terkait perkembangan jantung dan pertahanan antioksidan. Temuan ini menegaskan dampak buruk AsV pada perkembangan awal ikan dan pentingnya pengendalian kontaminasi As di perairan.
Limbah pertambangan uranium: Penggunaan uji Uji Toksisitas Akut Embrio Ikan (<i>Fish Embryo Acute Toxicity Test/FET</i>) untuk mengevaluasi toksisitas dan risiko pembuangan ke lingkungan	(Lourenço <i>et al.</i> , 2017)	Studi ini menunjukkan bahwa limbah pertambangan uranium, termasuk air tambang terkontaminasi dan lindi pengolahan air, dapat mengganggu perkembangan awal ikan dengan memengaruhi pertumbuhan, penetasan, dan morfogenesis. Selain paparan logam, pH air yang ekstrem juga berdampak pada keberhasilan penetasan, menekankan perlunya penyesuaian pH sebelum pembuangan limbah. Meskipun pengolahan kimiawi mengurangi toksisitas limbah, genotoksitas tetap menjadi ancaman

Judul	Penulis	Hasil
Uji toksisitas akut (LC50-96 jam) limbah air rumah sakit X terhadap ikan zebra (<i>Danio rerio</i>).	(Shinta, 2023)	<p>bagi ekosistem air tawar. Evaluasi genotoksisitas meningkatkan akurasi uji risiko, namun tolok ukur tunggal seperti radiasi ionisasi tidak cukup menangkap risiko kompleks dari limbah multi-kontaminan. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengatasi risiko ekotoksikologi dan mendukung regulasi pembuangan limbah tambang yang lebih baik</p> <p>Pertumbuhan penduduk meningkatkan aktivitas masyarakat, termasuk layanan kesehatan yang menghasilkan limbah B3, terutama di rumah sakit. Semakin tinggi tipe rumah sakit, semakin kompleks jenis limbahnya, yang jika tidak diolah dengan baik dapat mencemari lingkungan. Penelitian ini bertujuan menentukan toksisitas akut air limbah rumah sakit terhadap ikan zebra (<i>Danio rerio</i>) menggunakan uji LC50. Pengujian dilakukan dengan berbagai konsentrasi selama 96 jam, lalu dianalisis menggunakan metode probit dengan IBM SPSS. Hasilnya, nilai LC₅₀-96 jam adalah 44,687 mg/L, yang mengklasifikasikan air limbah rumah sakit ke dalam kelas IV, sehingga dianggap tidak berbahaya bagi organisme hidup.</p>

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan beberapa tahapan. Berikut merupakan diagram alir metode penelitian yang dilakukan selama penelitian berlangsung.



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Waktu dan Lokasi Penelitian

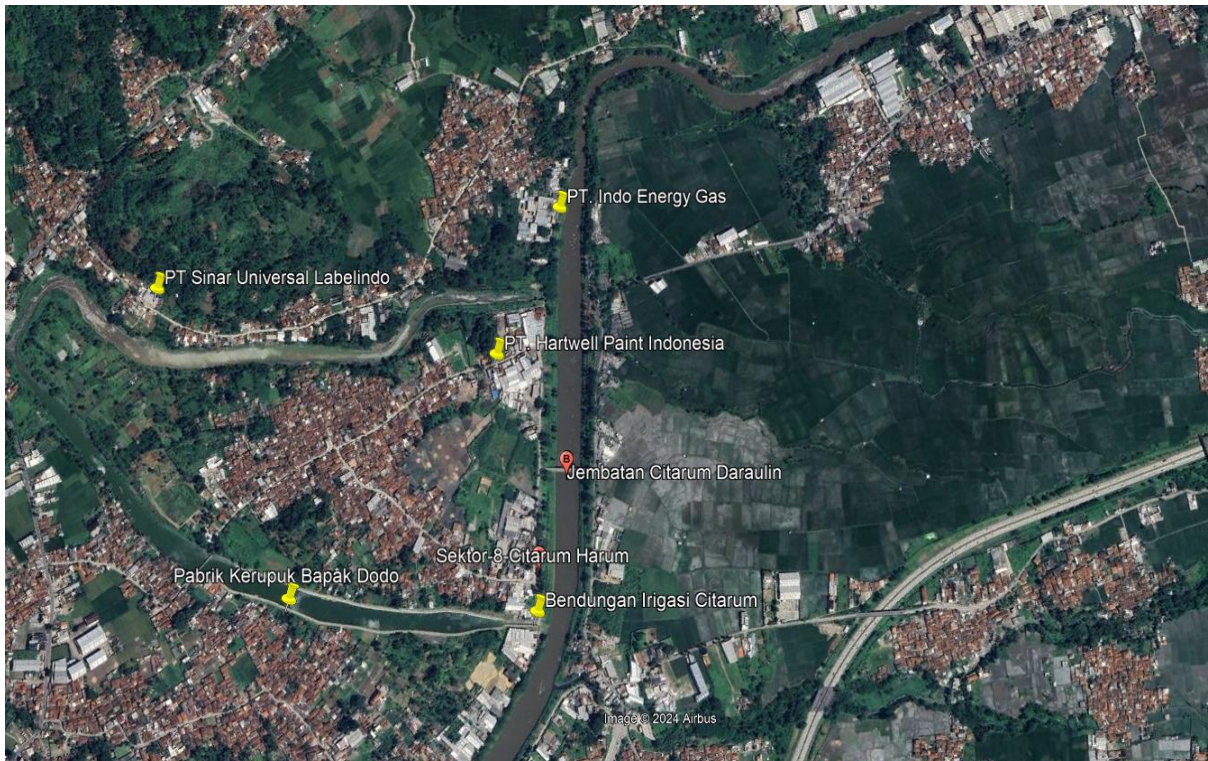
Penelitian ini berlangsung selama \pm 3 bulan, dari Agustus hingga Oktober 2024, dengan pengambilan sampel yang berlokasi di Sungai Citarum, Kabupaten Bandung, Jawa Barat. Penelitian ini terbagi menjadi tiga lokasi, yaitu lokasi sampling untuk pengambilan sampel air sungai, lokasi uji toksisitas dan lokasi uji parameter kimia. Pengambilan sampel air dilakukan dengan metode *grab sampling*, yaitu mengambil sampel secara langsung di satu titik pada waktu tertentu, sampel ini menunjukkan kondisi pada saat itu saja.

3.2.1 Lokasi Sampling

Lokasi penelitian difokuskan pada segmen tengah Sungai Citarum yang meliputi daerah Daraulin, Leuwi Sapi, dan Nanjung.



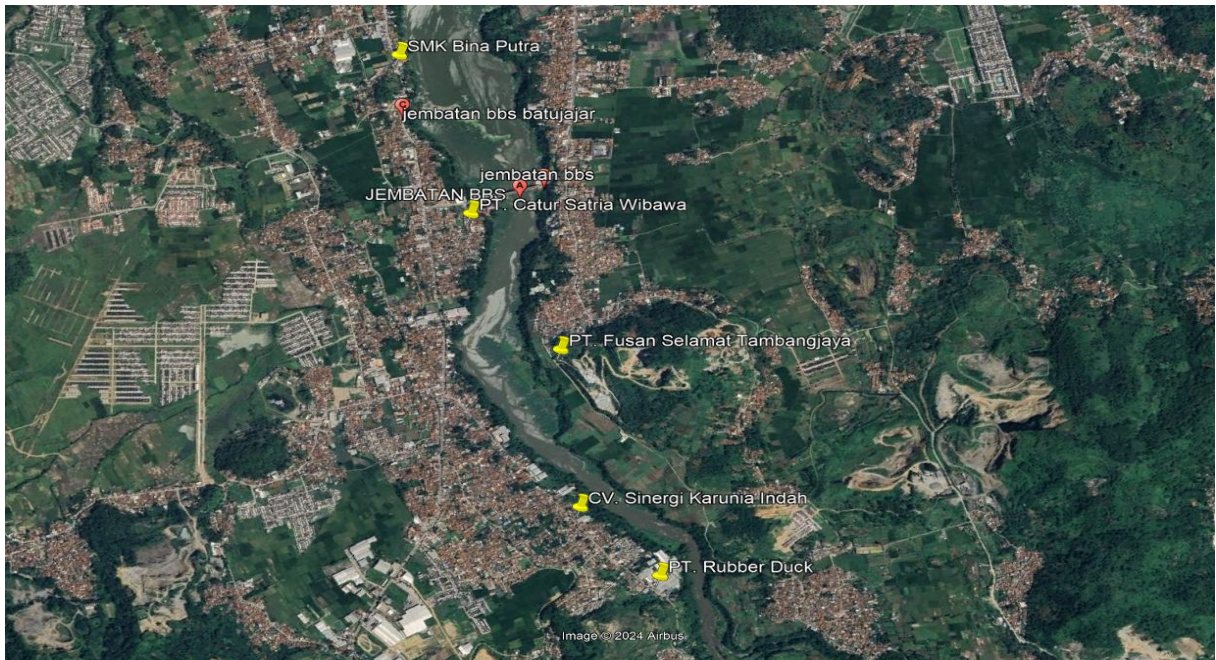
Gambar 3. 2 Titik Pengambilan Sampel Air Sungai Citarum
Sumber: Google Earth, 2024



Gambar 3. 3 Jembatan Daraulin Sektor – 8
Sumber: Google Earth, 2024



Gambar 3. 4 Jembatan Leuwi Sapi Nanjung Sektor – 9
Sumber: Google Earth, 2024



Gambar 3. 5 Jembatan BBS Nanjung
Sumber: Google Earth, 2024

3.2.2 Lokasi Uji

Lokasi pengujian dibagi menjadi dua tempat dengan fokus yang berbeda. Tempat pertama digunakan untuk melakukan uji toksisitas secara fisik, sedangkan tempat kedua digunakan untuk uji parameter kimia. Pembagian ini bertujuan untuk memastikan setiap jenis pengujian dilakukan secara optimal sesuai dengan kebutuhan dan tujuan penelitian. Pemisahan lokasi dilakukan karena uji toksisitas dan uji parameter kimia memiliki konsep dan metode yang berbeda, sehingga membutuhkan penanganan yang sesuai dengan karakteristik masing-masing.

3.2.2.1 Uji Toksisitas

Penelitian ini menggunakan metode Fish Embryo Toxicity (FET), yaitu pengujian toksisitas dengan menggunakan embrio Ikan Zebra (*Danio rerio*) sebagai organisme uji. Pengamatan dilakukan selama 96 jam untuk melihat apakah ada kematian atau kelainan pada embrio akibat paparan air sampel. Dalam pelaksanaannya, digunakan metode eksposur statis, artinya air uji tidak diganti selama masa pengujian. Metode ini sesuai dengan panduan OECD No. 236 (2013),

yang menyebutkan bahwa metode statis dapat digunakan jika zat yang diuji stabil dan tidak cepat menguap atau rusak selama pengujian.

3.2.2.2 Uji Parameter Kimia

Penelitian parameter kimia mengacu pada Lampiran VI Salinan Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 Baku Mutu Air Nasional tentang air permukaan parameter yang diuji adalah Sulfat (SO_4), *Chemical Oxygen Demand* (COD), Kromium Heksavalen (Cr^{+6}) dan Logam Berat Kadmium (Cd). Penelitian Uji parameter kimia dilakukan di Laboratorium Kualitas Air yang berlokasi di Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan. Hal ini dilakukan untuk mengukur kualitas air pada sampel air Sungai Citarum.

3.3 Alat dan Bahan

Alat dan bahan merupakan komponen penting dalam pelaksanaan suatu penelitian, yang berperan untuk menunjang proses pengumpulan data serta pelaksanaan percobaan secara sistematis dan terukur.

3.3.1 Uji Toksisitas

Dalam pengujian toksisitas yang dilakukan pada penelitian ini, berbagai alat laboratorium digunakan untuk menunjang proses pengujian secara optimal dan akurat. Alat-alat tersebut meliputi tangki ikan (*aquarium*), Mikroskop *Stereo (ZEISS) Axiocam 208 Color* yang digunakan untuk mengamati perkembangan embrio ikan secara detail, *well plate* berfungsi sebagai media penetasan dan inkubasi embrio, inkubator digunakan untuk menjaga suhu lingkungan sekitar embrio tetap stabil, TDS meter, mikropipet, labu volumetrik, gelas ukur, gelas beker, cawan petri, kain strimin, kelereng, *bluetip* dan timbangan analitik.

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini juga beragam dan memiliki peranan penting dalam proses pengujian toksisitas. Ikan zebra jantan dan betina (*Danio rerio*), 1,0 L sampel air per lokasi, 4,0 mg/L 3,4-dikloroanilin, *methylene blue* digunakan untuk menghindari jamur pada embrio, garam ditambahkan untuk menjaga kestabilan osmotik dalam air dan *aquadest* steril/*aquabidest* digunakan sebagai pelarut dan media pengenceran untuk memastikan tidak adanya kontaminan yang mempengaruhi hasil pengujian.

Berikut alat dan bahan yang digunakan dalam pemijahan (*breeding*) uji toksisitas menggunakan metode *Fish Embryo Toxicity* (FET) pada tabel dibawah ini:

Tabel 3. 1 Alat dan bahan yang digunakan untuk Peminjahan (*breeding*)

Gambar

Gambar



Tangki ikan (Akuarium)



Kelereng



Garam Ikan



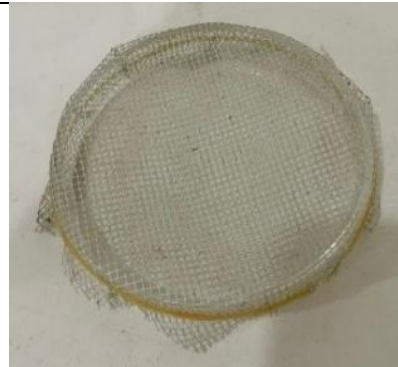
TDS Meter

Gambar



Methylene blue

Gambar



Swamping



Aerator



Cacing sutra & Daphnia

Berikut alat dan bahan yang digunakan dalam pengamatan uji toksisitas menggunakan metode *Fish Embryo Toxicity* (FET):

Tabel 3. 2 Alat dan bahan yang digunakan untuk Pengamatan

Gambar

Gambar



Mikroskop Stereo (ZEISS) AxioCam
208 Color



Well plate

Gambar



Mikropipet

Gambar



Bluetip



DCA 3,4-dikloroanilin



Aquabidest

3.3.2 Parameter Uji Kimia

Berikut alat yang digunakan dalam penelitian menurut SNI yang berlaku sebagai berikut:

Tabel 3. 3 Alat yang digunakan untuk uji parameter kimia

Parameter	Alat
Sulfat	a) Spektrofotometer dengan panjang gelombang 420 nm b) Neraca analitik c) Gelas ukur dan labu ukur d) Erlenmeyer dan gelas beker e) Pipet volumetrik dan pipet ukur f) Pengaduk magnetik
COD	Botol kaca a) Spektrofotometer dengan panjang gelombang 400 nm b) Kuvet c) Termoreaktor d) Pipet volumetrik e) Labu ukur f) Botol kaca

Krom Heksavalen	<ul style="list-style-type: none"> a) Spektrofotometer dengan panjang gelombang 540 nm b) Kuvet c) Pipet volumetrik d) Labu ukur dan gelas ukur e) Gelas beker dan erlenmeyer f) Neraca analitik g) Alat pengaduk h) Botol kaca
Kadmium	<ul style="list-style-type: none"> a) Spektrofotometer serapan Atom (SSA) b) Nebulizer c) Labu ukur dan erlenmeyer d) Pipet volumetrik mikropipet e) Botol kaca

Bahan yang digunakan dalam penelitian menurut SNI yang berlaku sebagai berikut:

Tabel 3. 4 Bahan yang digunakan untuk uji parameter kimia

Parameter	Bahan
Sulfat	<ul style="list-style-type: none"> a) Aquades b) Larutan standar sulfat (Na₂SO₄) c) Larutan BaCl₂ (barium klorida) Larutan buffer asetat
COD	<ul style="list-style-type: none"> a) Aquades b) Larutan standar COD c) Asam sulfat (H₂SO₄) pekat
Krom Heksavalen	<ul style="list-style-type: none"> a) Aquades b) Larutan standar kalium dikromat c) Reagen diphenilkarbohidrazida (DPCH) d) Asam sulfat (H₂SO₄) pekat e) Asam fosfat (H₃PO₄)
Cadmium	<ul style="list-style-type: none"> a) Larutan standar logam Cd b) Asam nitrat Pekat (HNO₃) c) Asam Klorida (HCl) d) Aquades e) Larutan buffer

3.4 Prosedur Pengambilan Data

Pada pengambilan data terbagi menjadi dua yaitu pengujian toksisitas dan pengujian parameter kimia. Adapun poin-poin pengujian toksistas yang perlu dilakukan adalah aklimatisasi, pemijahan, *pre-conditioning*, seleksi embrio, pemaparan embrio dan pengamatan embrio dengan pedoman (OECD 236, 2013),

sedangkan pada pengujian parameter kimia mengacu pada Standar Nasional Indonesia sesuai dengan parameter-parameter yang diuji dan di bandingkan dengan Lampiran VI Salinan Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Hal ini dilakukan untuk melihat perbandingan antara hasil penelitian dengan baku mutu dalam Peraturan Pemerintah yang bertujuan untuk menilai apakah kualitas air yang diuji masih sesuai dengan standar yang ditetapkan. Dengan cara ini, dapat diketahui apakah suatu perairan telah tercemar atau masih dalam batas aman.

3.4.1 Uji Toksisitas

Pada penelitian ini uji toksisitas menggunakan metode *Fish Embryo Toxicity* (FET) dimana subjek utama adalah embrio ikan zebra yang sudah melewati fase pemijahan (*breeding*). Tujuan dilakukan pengujian ini untuk memastikan suatu zat atau bahan aman bagi makhluk hidup dan lingkungan, serta mencegah dampak buruk terhadap kesehatan manusia dan ekosistem. Adapun proses dari uji toksisitas ini seperti: aklimatisasi, *pre-conditioning*, pemijahan, seleksi embrio, pemaparan embrio, dan pengamatan embrio dibawah mikroskop yang sudah dikhususkan dalam penelitian ini.

3.4.1.1 Seleksi Ikan Zebra

Pada saat penelitian seleksi pada ikan zebra jantan dan betina sangat dibutuhkan agar dapat mengetahui ikan yang sehat dan tidak sehat serta, dengan melakukan seleksi peneliti dapat memastikan bahwa hanya ikan yang berada dalam kondisi fisiologis normal yang digunakan, sehingga respons terhadap perlakuan uji menjadi lebih akurat dan dapat diandalkan.



Gambar 3. 6 Seleksi Ikan Zebra

3.4.1.2 Aklimatisasi

Aklimatisasi bertujuan untuk mengetahui apakah biota uji dapat beradaptasi dengan kondisi lingkungan barunya yaitu lingkungan pengujian (Ihsan dkk., 2018). Air aklimatisasi dan air pengencer harus berasal dari sumber yang sama (US EPA, 2002). Pada penelitian ini air yang digunakan adalah air Reverse Osmosis (RO).

Kriteria kelayakan aklimatisasi (OECD, 2019) yaitu:

- a. Jika jumlah kematian biota uji $< 5\%$ dari total keseluruhan biota uji, maka layak.
- b. Jika jumlah kematian biota uji $5 - 10\%$ dari total keseluruhan biota uji, maka dilanjut selama 14 hari.
- c. Jika jumlah kematian biota uji $> 10\%$ total keseluruhan biota uji, maka tidak layak

3.4.1.3 Pemeliharaan Ikan Zebra

Dalam tahap pemeliharaan, ikan zebra disimpan dalam air akuarium di laboratorium selama 9 hari dengan masa aklimatisasi minimal 7 hari. Suhu akuarium dipertahankan antara $26-28^{\circ}\text{C}$, dan airnya harus tetap terjaga dengan kadar oksigen $\geq 80\%$ dan pH dalam rentang $6,5-8,5$. Ruangan diatur dengan tahapan pencahayaan 14 jam terang dan 10 jam gelap. Pemberian makan ikan dilakukan 2 kali sehari menggunakan tetramin dan artemia setiap pagi dan sore hari.

3.4.1.4 Kriteria Ikan Zebra Dewasa dan Embrio Ikan Zebra

Pada uji toksisitas embrio ikan zebra, subjek uji yang dibutuhkan adalah ikan zebra dewasa jantan dan betina sebagai indukan dan embrio ikan zebra yang fertil. Kriteria inklusi ikan zebra dewasa sebagai indukan yang digunakan adalah ikan zebra berumur 4-6 bulan. Ikan-ikan tersebut harus dalam keadaan sehat, terbebas dari gejala infeksi dan penyakit yang dapat dilihat secara mikroskopik, dan tidak sedang menjalani proses pengobatan. Kriteria eksklusi ikan zebra dewasa adalah ikan yang sakit atau mati selama percobaan. Sementara itu, kriteria inklusi embrio yang akan digunakan, yaitu embrio yang baru mengalami pembuahan dan berumur ≤ 6 jam setelah fertilisasi. Kriteria eksklusi embrio ikan zebra, yaitu embrio mengalami koagulasi yang secara visual dapat diamati langsung jika di dalam kantung telur terdapat gumpalan berwarna putih dan terlihat elap jika diamati menggunakan stereo (OECD, 2013).

3.4.1.5 Proses Peminjahan (*Breeding*) Ikan Zebra

Proses pemijahan adalah tahapan awal yang harus dilakukan saat melakukan pengujian toksisitas pada embrio Ikan Zebra. Kualitas indukan dan proses pemijahan akan berdampak pada kualitas embrio. Perbandingan indukan jantan dan betina adalah 2:1. Embrio yang dihasilkan dikumpulkan untuk kemudian dilakukan tahapan seleksi embrio.

Embrio yang dihasilkan dari pemijahan harus melalui proses seleksi terlebih dahulu. Hal ini penting agar untuk mendapatkan embrio yang fertil sebagai subjek uji. Embrio yang digunakan adalah embrio yang baru dibuahi. Kualitas embrio dikatakan baik apabila lebih dari 70% embrio merupakan embrio yang fertil dan tidak mengalami koagulasi (OECD, 2013). Embrio fertil yang digunakan dalam pengujian ini diberikan paparan bahan uji untuk diamati selama 96 jam.

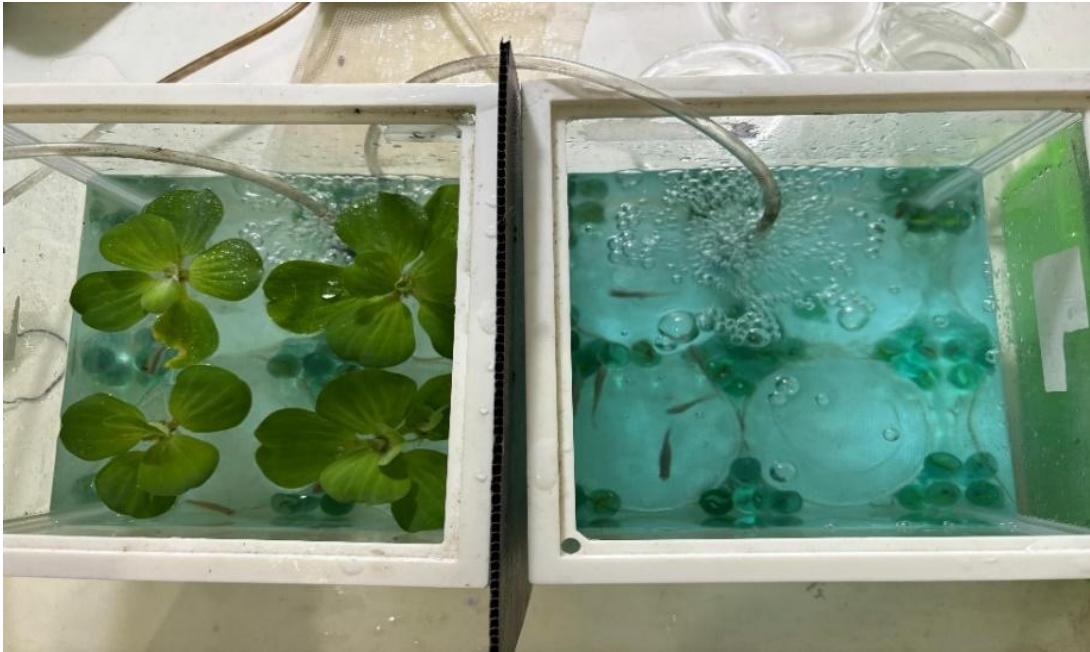
Pengamatan dilakukan setiap 24 jam di bawah mikroskop. Pengamatan dilakukan pada jam ke-24, 48, 72, dan 96. Indikator yang diamati antara lain terjadinya koagulasi embrio, pembentukan somit (tulang belakang ikan), lepasnya tailbud (bagian seperti ekor) dari yolk, serta denyut jantung. Parameter LC_{50} juga dapat dihitung dari pengamatan jumlah embrio yang mengalami kematian (OECD, 2013).

Persiapan sebelum *breeding* peneliti harus memisahkan indukan jantan dan betina sehari sebelum dilakukan pemijahan. Hal ini dilakukan agar ikan tidak stress dan meningkatkan kesiapan reproduksi serta untuk memudahkan indukan-indukan yang siap untuk dilakukan pemijahan.

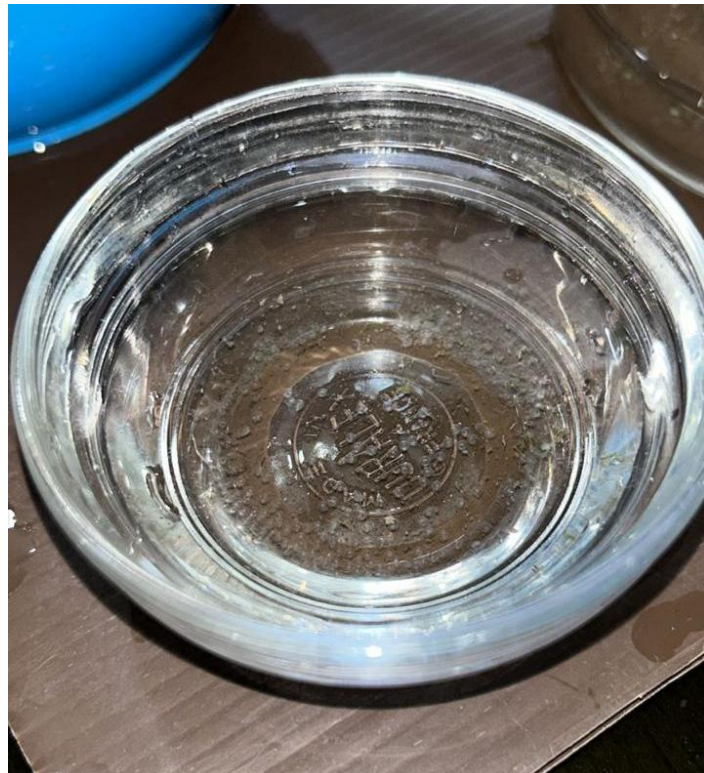
Pada proses *breeding* ini peneliti menggunakan banyak variasi untuk dapat menghasilkan embrio ikan yang banyak. Proses *breeding* ini melakukan banyak improvisasi seperti mengkombinasi cawan petri dengan kelereng, adapun opsi lain yaitu menggabungkan cawan petri, kelereng dan menambahkan kiambang ke dalam aquarium.



Gambar 3. 7 Proses Pemijahan (*breeding*) Ikan Zebra Tampak Samping



Gambar 3. 8 Proses Pemijahan (*breeding*) Ikan Zebra Tampak Atas



Gambar 3. 9 Hasil Embrio yang sudah selesai *breeding*

3.4.1.6 Seleksi Embrio

Embrio ikan zebra yang digunakan adalah embrio sebelum 6 jam setelah proses fertilisasi. Biasanya, embrio yang digunakan adalah yang berumur 3 jam. Hal ini bertujuan agar senyawa yang dipaparkan dapat menembus membran embrio (OECD, 2013). Peneliti perlu memastikan usia embrio dengan melihat melalui mikroskop antara bentuk embrio yang tampak dengan bentuk embrio sesuai dengan umurnya sebagaimana tercantum dalam literatur di menunjukkan perkembangan embrio ikan zebra yang ditandai dengan pembelahan sel dari 2, 4, 8, 16, dan seterusnya.



Gambar 3. 10 Seleksi Embrio menggunakan Mikroskop

3.4.1.7 Pemaparan Embrio

Preparasi *wellplate* dilakukan untuk memastikan penelitian berjalan dengan lancar dan hasilnya akurat dengan melakukan preparasi, kita dapat mencegah kontaminasi yang bisa mempengaruhi sampel dan menjaga kondisi penelitian tetap konsisten. Hal ini juga memudahkan analisis data dan meningkatkan kualitas hasil yang diperoleh, terutama ketika menguji banyak sampel sekaligus. Preparasi

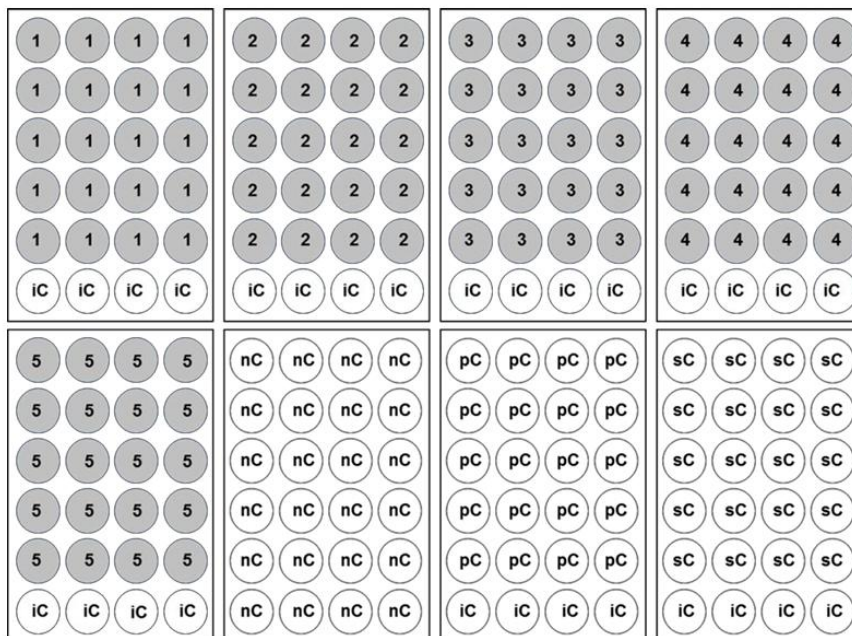
wellplate membantu memastikan proses penelitian lebih efisien dan memperoleh hasil yang akurat. Sebelum melakukan pengamatan pada sampel secara langsung perlu dilakukan *pre-conditioning* dimana sampel air yang sudah dilakukan pengenceran dimasukkan kedalam *wellplate*, selanjutnya larutan uji pada *well plate* diinkubasi terlebih dahulu selama 24 jam sebelum penambahan embrio.

Embrio diletakkan dalam *wellplate* 24 (6x4) sebanyak 8 buah. Sebanyak 5 *plate* untuk 5 konsentrasi sampel, 1 *plate* untuk kontrol positif 3,4-DCA 4mg/L (senyawa yang digunakan sebagai kontrol positif untuk setiap pengujian toksisitas pada embrio menurut OECD 2013), 1 *plate* untuk kontrol negatif dan *plate* yang terakhir digunakan kontrol pelarut. Masing-masing *plate* diisi 24 embrio dengan 1 embrio diisikan dalam 1 sumuran. Masing-masing *plate* disisakan empat sumuran untuk kontrol internal. Dua puluh sumuran diberikan larutan uji sesuai dengan perhitungan konsentrasi dan 4 sisa sumuran hanya diberi *dilution water* sebagai kontrol internal di masing-masing *plate*.

Larutan uji dalam *wellplate* diinkubasi terlebih dahulu 24 jam sebelum penambahan embrio. Pada saat pemaparan embrio ikan zebra, suhu larutan uji dijaga dalam suhu $26 \pm 1^{\circ}\text{C}$ dan pH dengan rentang 6,5 - 8,5. Pengamatan masing-masing kelompok dilakukan menggunakan mikroskop dengan perbesaran 40 kali (OECD, 2013).



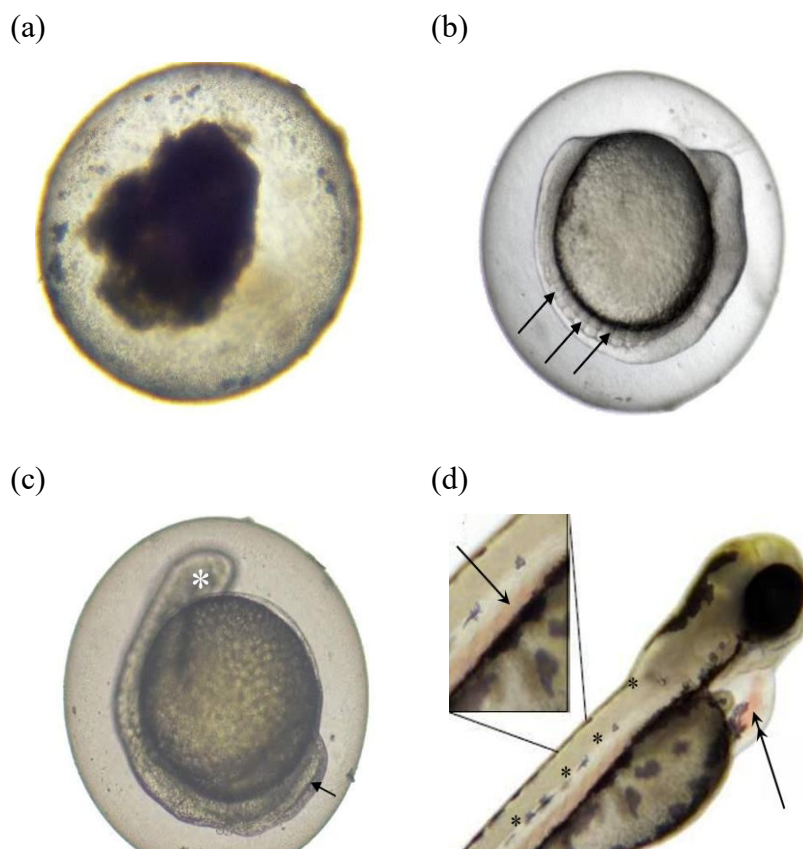
Gambar 3. 11 Pemaparan Embrio menggunakan sampel air Sungai Citarum



Gambar 3. 12 1-5= lima konsentrasi (100%; 50%; 25%; 12,5; 6,25%) / bahan kimia; nC = kontrol negatif (air pengenceran); iC = kontrol pelat internal (air pengenceran); pC = kontrol positif (3,4-DCA 4mg / L); sC = solvent control

3.4.1.8 Proses pengamatan Embrio

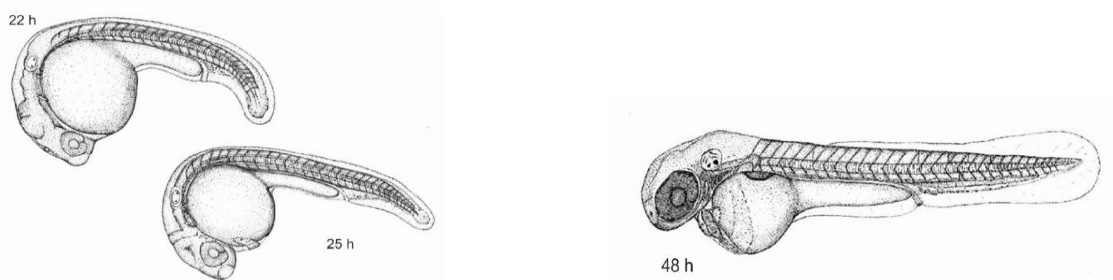
Pengamatan embrio dilakukan diatas *wellplate* dengan 24 sumuran (6x4) dan kedalaman sekitar 20 mm. Terdapat 8 *wellplate* dengan pembagian 1 *wellplate* untuk kontrol negatif, 1 *wellplate* untuk kontrol positif (3,4-DCA 4mg/L), dan 1 baris *wellplate* untuk kontrol pelarut. Lima *wellplate* yang lain digunakan dengan konsentrasi masing – masing 100%, 50%, 25%, 12,5% dan 6,25%. Masing-masing *wellplate* menggunakan 20 embrio, tiap embrio dimasukkan dalam satu sumuran. Tiap *wellplate* disisakan sumuran untuk kontrol pelarut. Larutan uji pada *wellplate* diinkubasi terlebih dahulu selama 24 jam sebelum penambahan embrio (*pre-condition*). Pengamatan masing-masing kelompok dilakukan menggunakan mikroskop dengan perbesaran 40 kali (OECD, 2013). Pengamatan dilakukan selama 96 jam. Pengukuran dilakukan setiap 24 jam yaitu, pada jam ke-24, 48, 72, dan 96. Terdapat empat parameter yang harus diamati, yaitu (i) koagulasi embrio, (ii) pembentukan *somite*, (iii) lepasnya bagian *tail-bud* dari kantung kuning telur (*yolk*), dan (iv) detak jantung, dapat dilihat dalam gambar dibawah ini.



Gambar 3. 13 Parameter pengamatan embrio ikan zebra diberikan larutan uji: (a) koagulasi embrio (b) pembentukan somit (c) kegagalan lepasnya bagian tail-bud dari yolk (d) detak jantung (OECD, 2013).

Kondisi normal embrio ikan zebra akan terbentuk somit pada jam ke-24 dan akan menunjukkan gerakan spontan. Tidak terbentuknya somit memungkinkan adanya keterlambatan pertumbuhan selambat-lambatnya hingga pengamatan pada jam ke-48. Jika somit tidak terbentuk pada pengamatan di jam tersebut, embrio dianggap mati. Pelepasan ekor dari yolk dapat diamati setelah adanya pemanjangan tubuh embrio dan dapat diamati mulai dari 24 jam pertama. Embrio yang berkembang dapat teramati detak jantungnya pada jam ke-48 dan embrio dikatakan mati setelah 48 jam tidak ada tanda-tanda detak jantung. Perkembangan ikan zebra.

mulai jam ke-22 sampai ke-48 dapat dilihat dalam gambar dibawah ini.

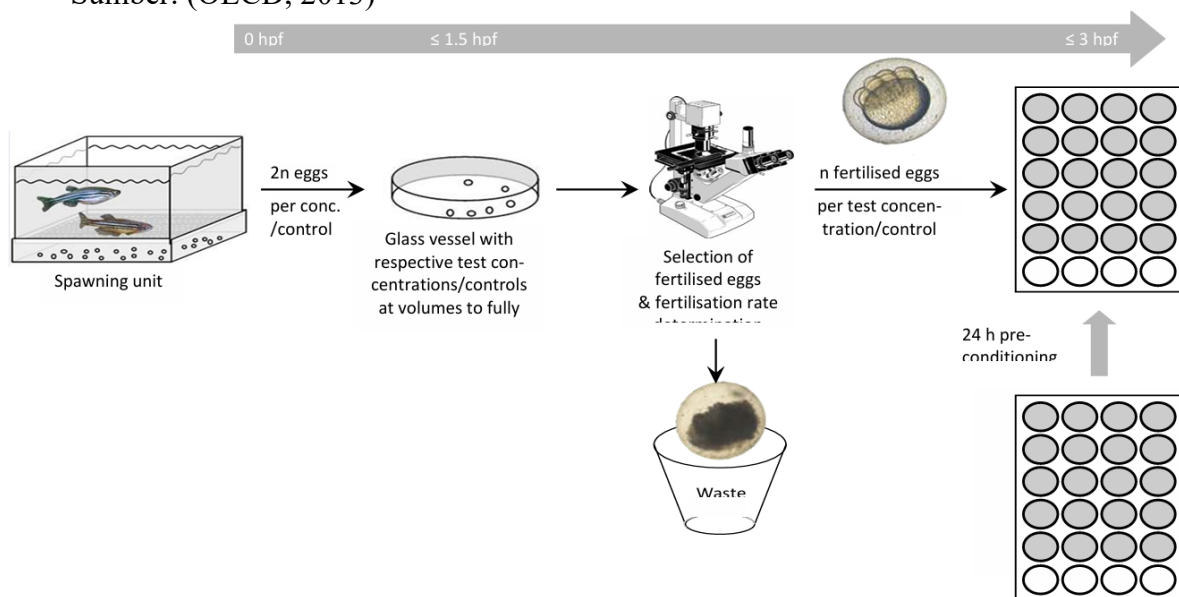


Gambar 3. 14 Perkembangan ikan zebra mulai jam ke-22 sampai ke-48 (OECD, 2013).

Tabel 3. 5 Contoh Tabel Hasil Pengamatan

	Waktu Pengamatan			
	24 Jam	48 Jam	72 Jam	96 Jam
Koagulasi Embrio	+	+	+	+
Terbentuknya Somiit	+	+	+	+
Lepasnya Bagian <i>Tail Bud</i> dari <i>Yolk</i>	+	+	+	+
Detak Jantung		+	+	+

Sumber: (OECD, 2013)



Gambar 3. 15 Skema uji toksisitas pada embrio ikan zebra (OECD, 2013)

3.4.2 Parameter Uji Kimia

Metode Acuan Parameter Uji Kimia Pengujian parameter kimia mengacu pada Lampiran VI Salinan Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 Baku Mutu Air Nasional, yaitu parameter Sulfat (SO_4), *Chemical Oxygen Demand* (COD), Kromium Heksavalen (Cr VI) dan Kadmium (Cd).

Tabel 3.3 Parameter dan Metode uji sesuai Standar yang berlaku

Parameter	Metode Uji
Sulfat (SO_4)	SNI 06-6989.20-2004 tentang Cara Uji Sulfat (SO_4^{2-}) dengan metode turbidimetri pada Air dan Air Limbah.
<i>Chemical Oxygen Demand</i> (COD),	SNI 6989.2:2009 : Cara Uji Kebutuhan Oksigen Kimiawi (<i>Chemical Oxygen Demand</i> (COD),

	((COD), dengan refluks tertutup secara spektrofotometri.
Kromium Heksavalen (Cr VI)	SNI 6989.71:2009 : Cara Uji krom heksavalen (Cr-VI) dalam contoh uji secara Spektrofotometri.
Logam Berat Kadmium (Cd)	SNI 6989-84:2019 : Cara Uji Kadar Logam terlarut dan logam total secara Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) nyala.

3.5 Analisis Data

Analisis data adalah proses mengolah dan memahami data untuk mendapatkan informasi yang berguna. Proses ini mencakup pengumpulan, pengolahan, pemahaman, dan penyajian data dimana analisis data ini terbagi menjadi dua, yaitu analisis data toksisitas mencakup analisis perhitungan parameter perkembangan embrio dan *Lethal Concentration 50* (LC₅₀) dengan metode probit dan analisis data parameter uji kimia.

3.5.1 Uji Toksisitas

Analisis data disajikan secara kualitatif menurut OECD tahun 2013. Adapun data kuantitatif berupa persentase. Data yang diperoleh dari pengamatan adalah jumlah embrio yang mengalami perkembangan normal, kelainan, koagulasi, pembentukan somit, pelepasan *tail-bud*, adanya detak jantung, dan kematian. Berdasarkan data, persentase setiap embrio dengan setiap parameter dihitung dengan membandingkan jumlah embrio yang digunakan menggunakan persamaan berikut.

3.5.1.1 Analisis Indikator Perkembangan Embrio

Dalam analisis perkembangan embrio, beberapa hal yang perlu dihitung adalah persentase kematian embrio, persentase koagulasi, persentase pembentukan somit, persentase pelepasan ekor, persentase detak jantung, dan persentase kelainan pada embrio.

- [1] % Kematian Embrio

$$= \frac{\text{jumlah kematian embrio}}{\text{jumlah total embrio yang digunakan}} \times 100\%$$
- [2] % Koagulasi

$$= \frac{\text{jumlah embrio yang koagulasi}}{\text{jumlah total embrio yang digunakan}} \times 100\%$$
- [3] % Pembentukan Somit

$$= \frac{\text{jumlah embrio yang terbentuk somit}}{\text{jumlah total embrio yang hidup}} \times 100\%$$
- [4] % Pelepasan *tail-bud*

$$= \frac{\text{jumlah embrio dengan pelepasan tail – bud}}{\text{jumlah total embrio yang hidup}} \times 100\%$$
- [5] % Detak Jantung

$$= \frac{\text{jumlah embrio dengan detak jantung terlihat}}{\text{jumlah total embrio yang hidup}} \times 100\%$$
- [6] % Kelainan

$$= \frac{\text{jumlah embrio dengan kelainan}}{\text{jumlah total embrio yang hidup}} \times 100\%$$

3.5.1.2 Lethal Concentration 50 (LC₅₀)

Lethal Concentration 50 (LC₅₀) merupakan konsentrasi yang dapat menyebabkan kematian 50% pada suatu organisme di dalam uji toksisitas pada suatu waktu observasi. LC₅₀ bermanfaat untuk memprediksi dampak potensial dari toksisitas polutan dalam suatu sistem perairan dan membantu untuk menentukan konsentrasi polutan maksimum yang diperbolehkan di lingkungan (*American Public Health Association, 1999; Boyd, 2005*).

Tabel 3. 6 Kriteria Toksisitas LC₅₀ Bahan Kimia terhadap Lingkungan

No.	Kategori	Nilai LC ₅₀ (mg/L)	Keterangan
1.	I	≤ 0,05 mg/L	Berbahaya
2.	II	> 0,05 mg/L ≤ 0,5 mg/	Peringatan
3.	III	> 0,5 mg/L ≤ 2 mg/L	Awas
4.	IV	> 2 mg/L	Dapat dikatakan tidak membahayakan

Sumber: (USEPA, 2004)

3.5.2 Uji Parameter Kimia

Analisis data disajikan secara kuantitatif berupa grafik. Data yang diperoleh dari hasil pengamatan penelitian.

3.5.2.1 Deskriptif

Data deskriptif digunakan untuk mengumpulkan, menyajikan, dan menganalisis data agar dapat menggambarkan kondisi secara langsung tanpa membandingkannya dengan data lain. Dalam konteks lingkungan, parameter seperti sulfat, COD, krom heksavalen, dan kadmium sering digunakan untuk menggambarkan kualitas air atau limbah. Analisis ini dilakukan untuk melihat hasil grafik parameter-parameter kimia yang diuji.

3.5.2.2 Standar Baku Mutu

Pengujian parameter kimia mengacu pada Lampiran VI Salinan Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 Baku Mutu Air Nasional.

Tabel 3. 7 Tabel Baku mutu Air Sungai dan Sejenisnya

No	Parameter	Satuan	Kelas 2	Kelas 3	Kelas 4
1.	Sulfat (SO ₄)	mg/L	300	300	400
2.	Chemical Oxygen Demand (COD)	mg/L	25	40	80
3.	Kromium Heksavalen (Cr-(VI))	mg/L	0,05	0,05	1
4.	Cadmium (Cd) Terlarut	mg/L	0,01	0,01	0,01

3.5.3 Keterkaitan Antara Kedua Hasil Uji

Data toksisitas dan data kimia saling berkaitan dalam analisis kualitas lingkungan. Data kimia memberikan informasi tentang jumlah dan jenis zat kimia dalam suatu sampel, seperti logam berat, senyawa organik, atau polutan lainnya. Sementara itu, data toksisitas menunjukkan efek biologis dari zat-zat tersebut terhadap organisme, misalnya tingkat kematian, perubahan perilaku, maupun kelainan pada hewan uji. Hubungan antara keduanya penting karena data kimia saja tidak selalu cukup untuk menilai risiko lingkungan. Sebuah zat kimia mungkin tampak aman berdasarkan konsentrasinya, tetapi dapat menjadi berbahaya jika ada interaksi dengan zat lain atau terjadi akumulasi dalam lingkungan. Keterkaitan data toksisitas dan data kimia, dapat memberikan gambaran yang lebih lengkap tentang dampak suatu zat terhadap ekosistem dan kesehatan manusia.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Uji Toksisitas

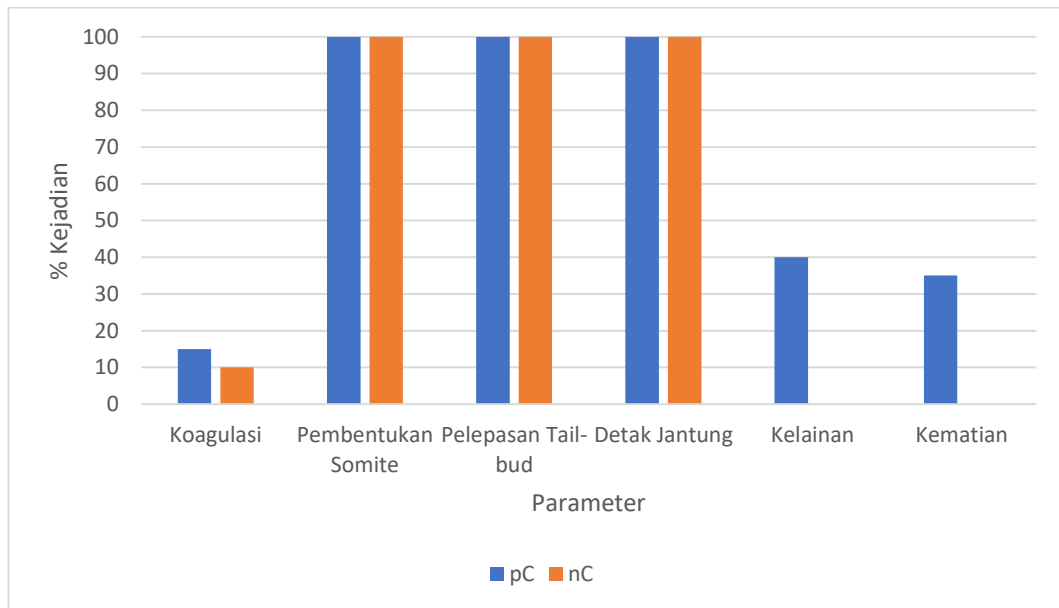
Pada pengujian toksisitas peneliti menggunakan embrio dari Ikan Zebra sebagai hewan uji untuk melihat potensi toksisitas secara langsung yang ada pada bagian tengah Sungai Citarum.

4.1.1 Data Uji Validitas

Setelah proses pemijahan atau *breeding* dilakukan, selanjutnya dilakukan uji validasi yang mana pengujian ini dilakukan untuk melihat apakah embrio Ikan Zebra sudah siap untuk digunakan. Pada pengujian ini dilihat 70% batch *breeding* yang fertil yang mana ini menjadi syarat utama untuk bisa melanjutkan penelitian.

Pada uji validitas ini dilengkapi dua kontrol yaitu negatif kontrol (nC) dan positif kontrol (pC) yang mana nC hanya menggunakan air pelarut (aquadest steril) atau *aquabidest*, nC ini diperuntukan untuk melihat perkembangan embrio dari jam ke 24 – 96 jam, sedangkan pada positif kontrol (pC) menggunakan DCA 3,4-dikloroanilin sebanyak 4 mg/l dengan 20 telur per kontrol. uji ini dikatakan valid, jika mortalitas pada kontrol negatif kurang dari 10% dan mortalitas pada kontrol positif $\geq 30\%$ (OECD, 2013).

Berdasarkan hasil data pengamatan pC 15% mengalami koagulasi sedangkan nC 10%, pembentukan somit (pertumbuhan tulang belakang), pelepasan *tail-bud* dari *yolk* serta detak jantung terjadi pada semua embrio mencapai 100%, kelainan hanya terjadi pada pC sebesar 40% dan kematian 35%

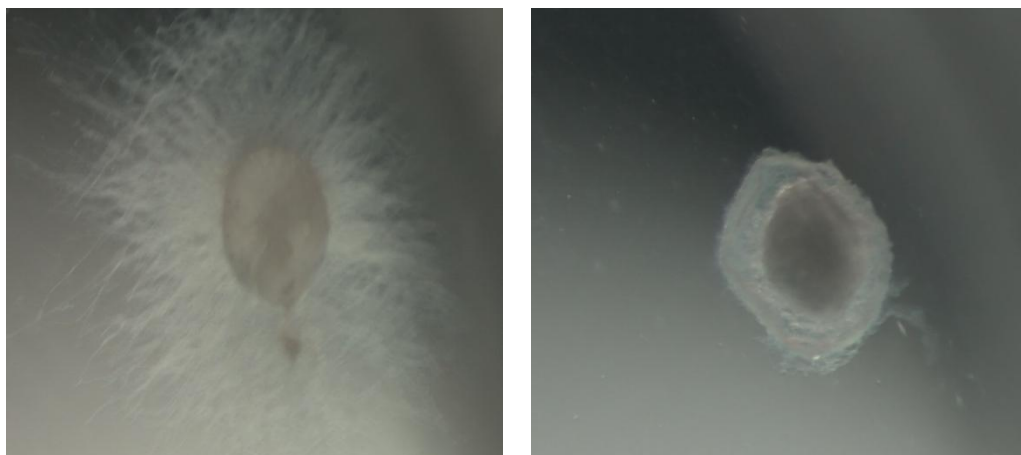


Gambar 4. 1 Grafik Hasil Pengamatan Kontrol

4.1.2 Karakteristik Parameter Uji Toksisitas

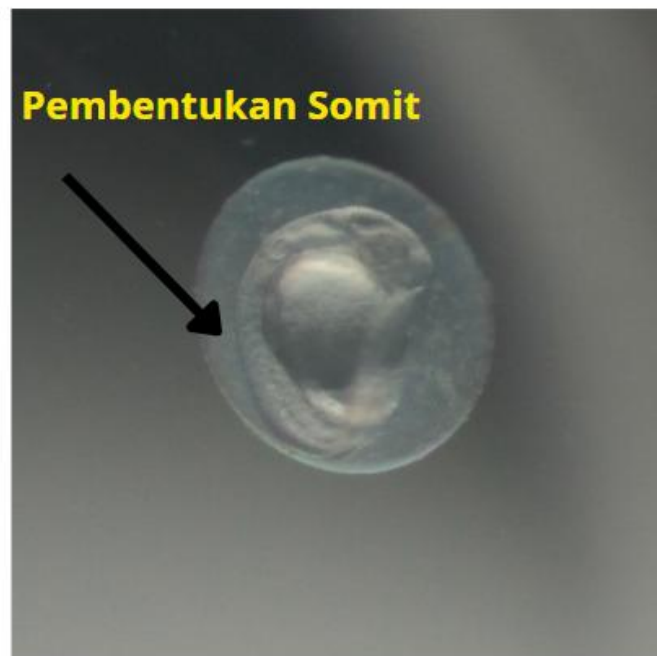
Pada uji toksisitas terdapat beberapa parameter yang harus diamati dan dilihat perkembangannya dengan rentang waktu 24 hingga 96 jam. Adapun parameter yang dilihat perkembangannya yaitu, koagulasi, pembentukan somit, pelepasan tail-bud, detak jantung dan hatching.

Koagulasi adalah embrio yang terkoagulasi berwarna putih susu dan tampak gelap dibawah mikroskop (lihat Lampiran 5 Gbr.1, pada OECD, 2013). Jumlah embrio yang menggumpal ditentukan setelah 24, 48, 72, dan 96 jam.



Gambar 4. 2 Koagulasi pada Embrio

Kurangnya pembentukan somite: pada suhu $26 \pm 1^\circ\text{C}$, sekitar 20 somite terbentuk setelah 24 jam (lihat Lampiran 5 Gbr. 2 pada OECD, 2013). Pada embrio ikan zebra yang berkembang secara normal. Embrio yang berkembang secara normal menunjukkan gerakan spontan (kontraksi dari sisi ke sisi). Gerakan spontan menunjukkan pembentukan somit. Tidak adanya somit dicatat setelah 24, 48, 72, 96 jam. Tidak terbentuknya somit setelah 24 jam mungkin disebabkan oleh retardasi perkembangan secara umum. Selambat-lambatnya setelah 48 jam, pembentukan somit harus dikembangkan. Jika tidak, embrio dianggap mati.



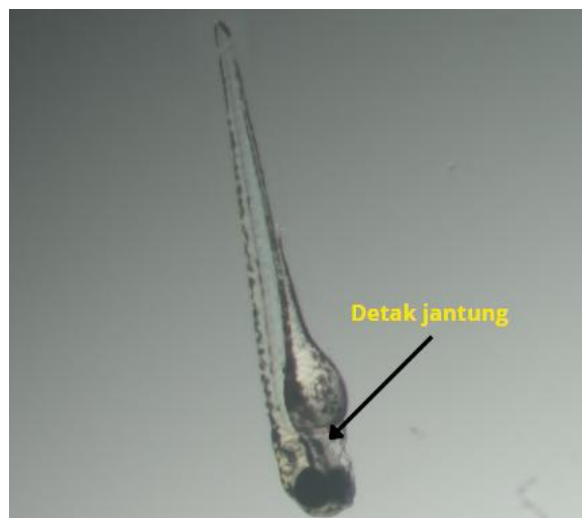
Gambar 4. 3 Pembentukan Somit pada Embrio

Ekor tidak terlepas, pada embrio ikan zebra yang berkembang secara normal, pelepasan ekor (lihat Lampiran 5 Gbr. 3 pada OECD, 2013) dari kuning telur diamati setelah pemanjangan posterior tubuh embrio. Tidak adanya pelepasan ekor dicatat setelah 24, 48, 72 dan 96 jam.



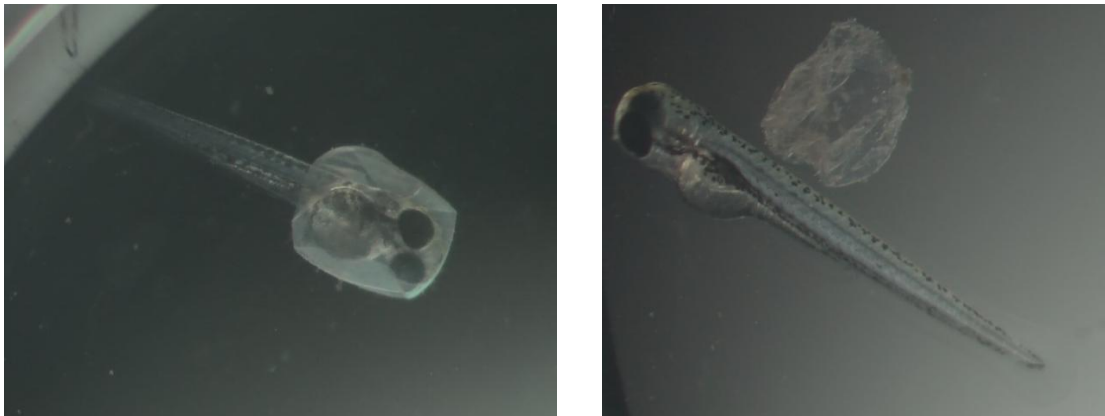
Gambar 4. 4 Pelepasan Tail-Bud pada Embrio

Tidak adanya detak jantung pada embrio ikan zebra yang berkembang secara normal pada suhu $26 \pm 1^{\circ}\text{C}$, detak jantung akan terlihat setelah 48 jam (lihat Lampiran 5 Gbr. 4 pada OECD, 2013) perhatian khusus harus diberikan keetika merekam titik terakhir ini, karena detak jantung yang tidak teratur (tidak menentu) tidak boleh dicatat sebagai hal yang mematikan. Selain itu, detak jantung yang terluhat tanpa sirkulasi di aorta abdominalis dianggap tidak mematikan. Untuk mencatat titik akhir ini, embrio yang tidak menunjukkan datak jantung harus diamati di bawah perbesaran minimum 80x selama setidaknya satu menit. Tidak adanya detak jantung dicatta setelah 48, 72 dan 96 jam.



Gambar 4. 5 Detak Jantung pada Embrio

Tingkat penetasan dari semua kelompok perlakuan dan kontrol harus dicatat dari 48 jam dan seterusnya. Meskipun penetasan bukan merupakan titik akhir yang digunakan untuk perhitungan LC50 , penetasan memastikan pemaparan embrio tanpa fungsi penghalang potensial dari korion, dan dengan demikian membantu interpretasi data.



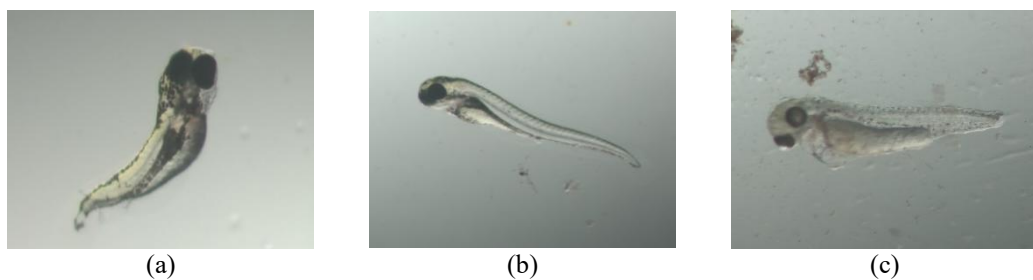
Gambar 4. 6 Penetasan (*hatching*) pada Embrio Ikan

Kelainan pada embrio bisa berupa kelainan secara fisiologis dan morfologis dimana kelainan fisiologis berkaitan dengan gangguan fungsi organ atau sistem tubuh, sedangkan kelainan morfologis mencakup perubahan bentuk atau struktur tubuh embrio. Kedua jenis kelainan ini dapat menghambat perkembangan normal embrio ikan dan bahkan menyebabkan kematian.

Tabel 4. 1 Persentase (%) Kelainan pada Embrio *Zebrafish* setelah 96 Jam

Sampel	Konsentrasi	Embrio		Koagulasi (%)	Embrio Normal (%)
		Abnormal (%)			
		Kematian	Hidup		
Kontrol	Kontrol Positif (pC)	15	25	15	10
	<i>Pericardial edema</i>	37.5	62.5	-	-
	Kontrol Negatif (nC)	0	0	10	90
Sampel 1	6,25%		0	25	75

	12,5%	0	0	15	85
	25%	0	5	15	80
	<i>Abnormal tail</i> <i>(Lordosis)</i>	-	100	-	-
	50%	0	0	10	90
	100%	0	0	5	95
Sampel 2	6,25%	0	5	5	90
	<i>Abnormal tail</i> <i>(Scoliosis)</i>	0	100	-	-
	12,5%	0	0	10	90
	25%	0	0	5	95
	50%	0	0	15	85
	100%	0	0	0	100
Sampel 3	6,25%	0	0	10	90
	12,5%	0	0	10	90
	25%	0	0	5	95
	50%	0	0	15	85
	100%	0	0	0	100



Gambar 4. 7 Beberapa Kelainan pada *Embryo Zebrafish (Danio rerio)* setelah 96 jam
 (a) *Scoliosis* pada Sampel 2 (6.25%), (b) *Lordosis* pada Sampel 1 (25%), (c) *Pericardial edema* pada pC.

Berdasarkan **Gambar 4.17** dapat dilihat bahwa sampel 1 dan sampel 2 serta kontrol positif (pC) menunjukkan adanya kelainan atau perubahan bentuk yang

abnormal pada anggota tubuh (deformitas). Kondisi ini disebabkan oleh paparan senyawa toksik yang mempengaruhi perkembangan morfologi ikan selama fase embrio atau larva. Deformitas yang diamati mencakup kelengkungan tulang belakang seperti skoliosis (kelengkungan ke samping) dan lordosis (kelengkungan ke arah ventral), yang merupakan jenis kelainan yang umum ditemukan dalam pengujian toksisitas menggunakan hewan uji seperti *zebrafish* ini. Secara umum, deformitas tulang belakang seperti skoliosis dan lordosis pada ikan umumnya bersifat permanen dan tidak dapat kembali ke bentuk normal setelah terbentuk. Beberapa faktor penyebab munculnya deformitas ini antara lain adalah cedera fisik, ketidakseimbangan nutrisi, dan kelainan genetik.

Pertumbuhan secara umum diartikan sebagai perubahan yang dapat diukur berdasarkan besar dan jumlahnya. Proses yang *irreversible* (tidak dapat kembali ke bentuk semula), tetapi pada beberapa kasus ada yang bersifat *reversible* (dapat kembali semula) akibat penurunan ukuran atau jumlah sel karena kerusakan atau proses dediferensiasi (Sugianto dkk, 2025).

Pericardium edema, yaitu penumpukan cairan di area jantung yang sedang berkembang, ini merupakan kondisi tidak normal yang sering muncul pada embrio berbagai spesies ikan setelah terpapar senyawa kimia dengan struktur yang beragam (Wiegand dkk, 2023). *Pericardium* didefinisikan sebagai suatu struktur kantung yang melapisi seluruh jantung. *Pericardium* merupakan bagian dari *coelemic cavity* yang tampak sebagai ruangan mengelilingi jantung dan memisahkannya dengan dinding tubuh. *Coelemic cavity* merupakan ruangan berisi cairan yang memisahkan organ dalam (Kimmel et al., 1995). Ikan zebra dapat dikatakan mengalami edema perikardium jika terdapat perbesaran pada *pericardium* (Cahyani, 2019).

Secara umum, edema merupakan kondisi penumpukan cairan yang berlebihan di antara jaringan atau dalam rongga tubuh. Kondisi ini dapat disebabkan oleh berbagai faktor seperti peradangan atau infeksi, penurunan tekanan osmotik koloid, peningkatan permeabilitas kapiler, kenaikan tekanan hidrostatik, serta adanya penyumbatan pada pembuluh (Dinata, 2016).

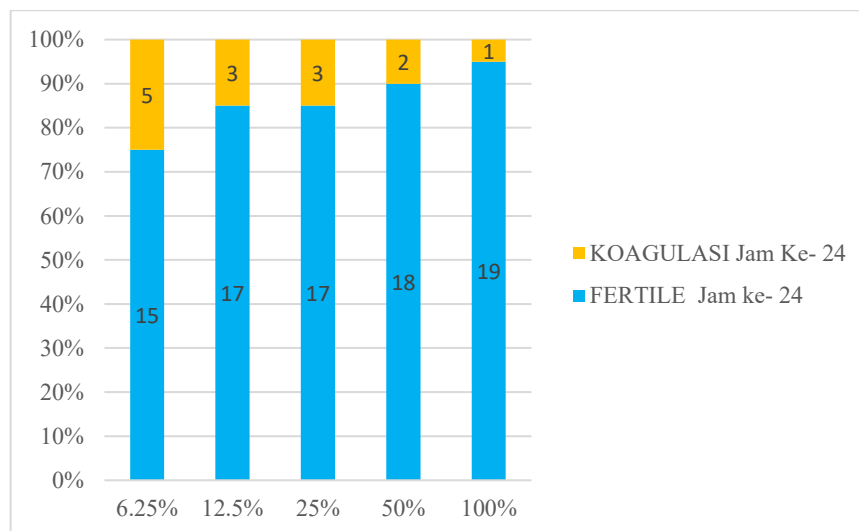
4.1.3 Hasil Uji Parameter Toksisitas

Pada hasil uji toksisitas ini terdapat beberapa parameter yang akan dilakukan pengamatan yaitu, koagulasi, pembentukan somit, pelepasan *tail-bud* dari *yolk*, detak jantung dan *hatching*.

Berikut hasil data koagulasi sampel 1 uji toksisitas pada air Sungai Citarum bagian Tengah dalam tabel di bawah ini:

Tabel 4. 2 Hasil Data Koagulasi dan Fertil Embrio Sampel 1

Konsentrasi	Sampel 1	
	24 Jam	
	(%) Koagulasi	(%) Fertil
6,25%	25	75
12,5%	15	85
25%	15	85
50%	10	90
100%	5	95



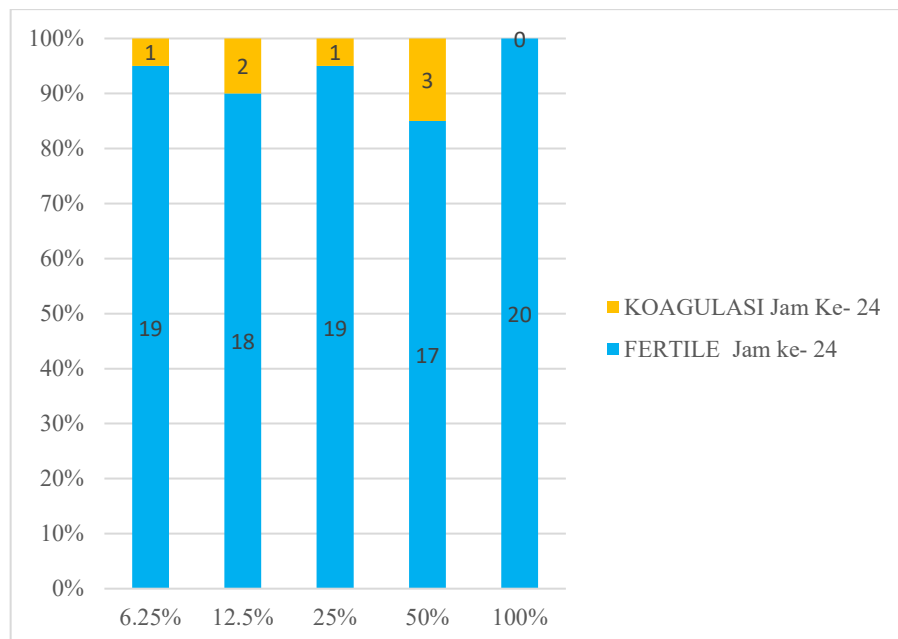
Gambar 4. 8 Grafik Koagulasi dan Embrio Fertil pada Sampel 1

Pada sampel 1 yang diambil dari lokasi Jembatan Daraulin sektor-8, hasil pengamatan menunjukkan bahwa pada konsentrasi 6,25% diperoleh 5 embrio yang mengalami koagulasi. Namun, pada konsentrasi yang lebih tinggi, yaitu 12,5% dan 25%, tingkat koagulasi menurun masing-masing menjadi 3. Selanjutnya, pada konsentrasi 50%, tingkat koagulasi semakin menurun menjadi 2, dan pada

konsentrasi tertinggi 100%, koagulasi menjadi 1. Pengamatan dilakukan secara kontinu dalam rentang waktu 24 hingga 96 jam.

Tabel 4. 3 Hasil Data Koagulasi dan Fertil Embrio Sampel 2

Sampel 2		
Konsentrasi	24 Jam	
	(%) Koagulasi	(%) Fertil
6,25%	5	95
12,5%	10	90
25%	5	95
50%	15	85
100%	0	100



Gambar 4. 9 Grafik Koagulasi dan Embrio Fertil pada Sampel 2

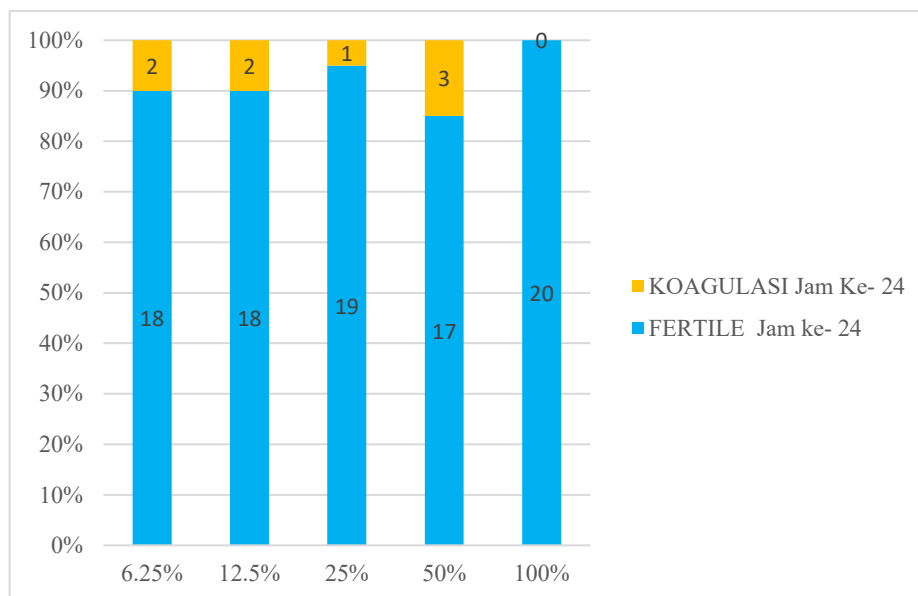
Pada sampel 2 yang diambil dari lokasi Jembatan Leuwi Sapi Nanjung sektor-9 , hasil pengamatan menunjukkan bahwa pada konsentrasi 6,25% diperoleh 1 embrio yang mengalami koagulasi. Namun, pada konsentrasi yang lebih tinggi, yaitu 12,5% dan 25%, tingkat koagulasi menurun masing-masing menjadi 2 dan 1. Selanjutnya, pada konsentrasi 50%, tingkat koagulasi naik menjadi 3, dan pada

konsentrasi tertinggi 100%, tidak adanya koagulasi. Pengamatan dilakukan secara kontinu dalam rentang waktu 24 hingga 96 jam.

Berikut hasil data koagulasi sampel 3 uji toksisitas pada air Sungai Citarum bagian Tengah dalam tabel di bawah ini:

Tabel 4. 4 Hasil Data Koagulasi dan Fertil Embrio Sampel 3

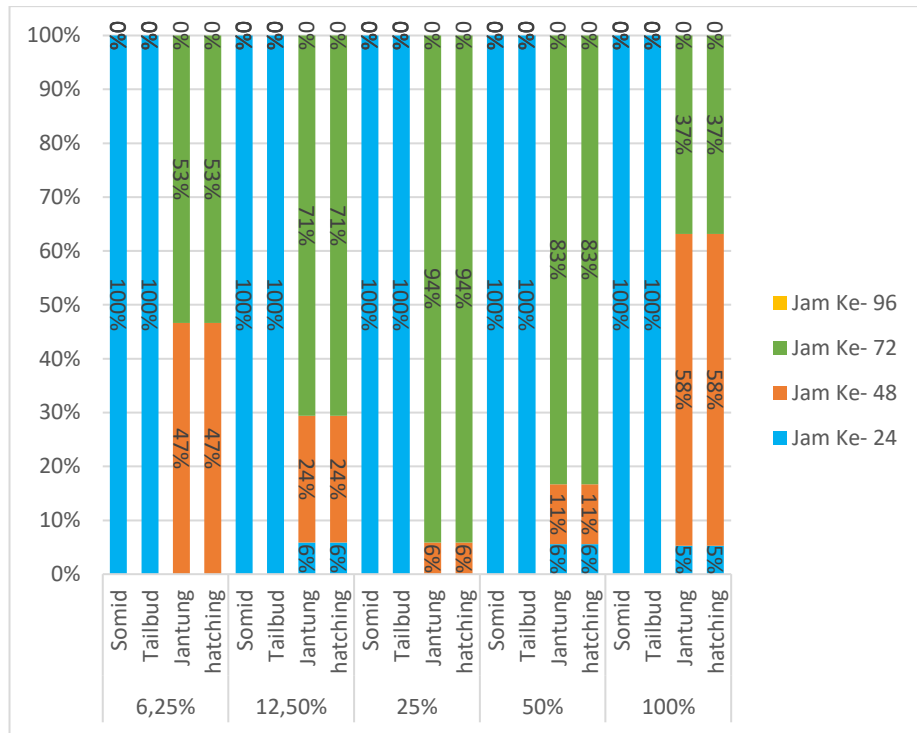
Konsentrasi	Sampel 3	
	24 Jam	
	(%) Koagulasi	(%) Fertil
6,25%	10	90
12,5%	10	90
25%	5	95
50%	15	85
100%	0	100



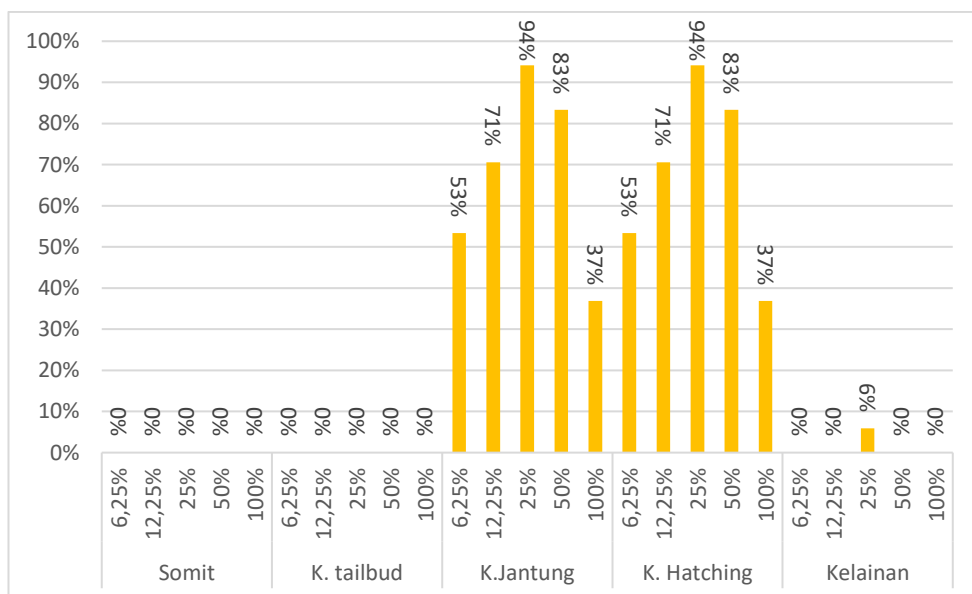
Gambar 4. 10 Grafik Koagulasi dan Embrio Fertil pada Sampel 3

Pada sampel 3 yang diambil dari lokasi Jembatan BBS Nanjung, hasil pengamatan menunjukkan bahwa pada konsentrasi 6,25% dan 12,5% diperoleh 2 embrio yang mengalami koagulasi. Namun, pada konsentrasi yang lebih tinggi, yaitu 25%, tingkat koagulasi menurun menjadi 1. Selanjutnya, pada konsentrasi 50%, tingkat koagulasi naik menjadi 3, dan pada konsentrasi tertinggi 100%, tidak

adanya koagulasi. Pengamatan dilakukan secara kontinu dalam rentang waktu 24 hingga 96 jam.



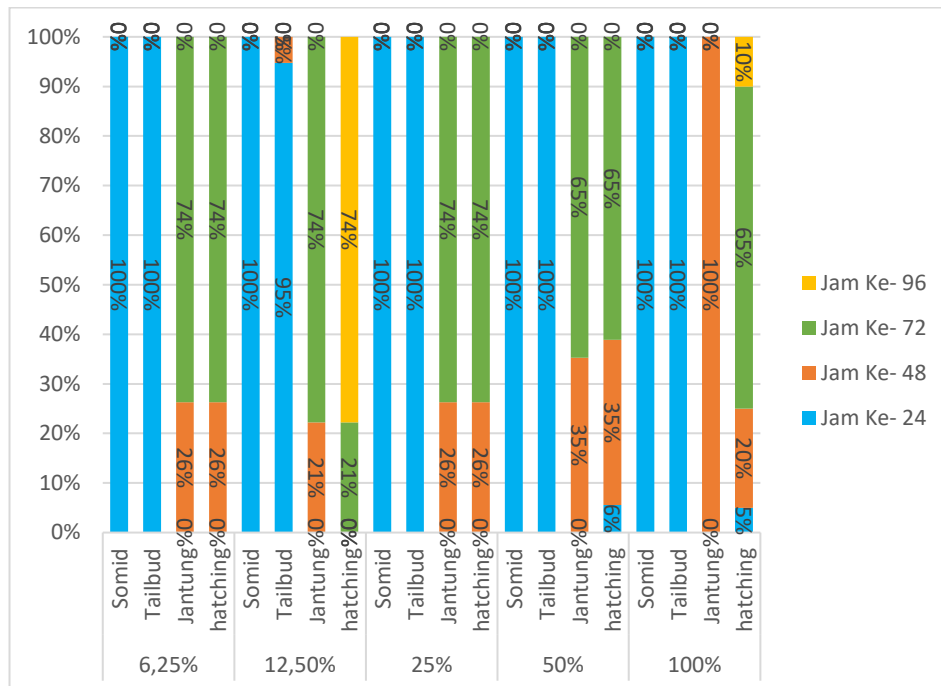
Gambar 4. 11 Grafik Perkembangan Terbentuknya Embrio pada Sampel 1



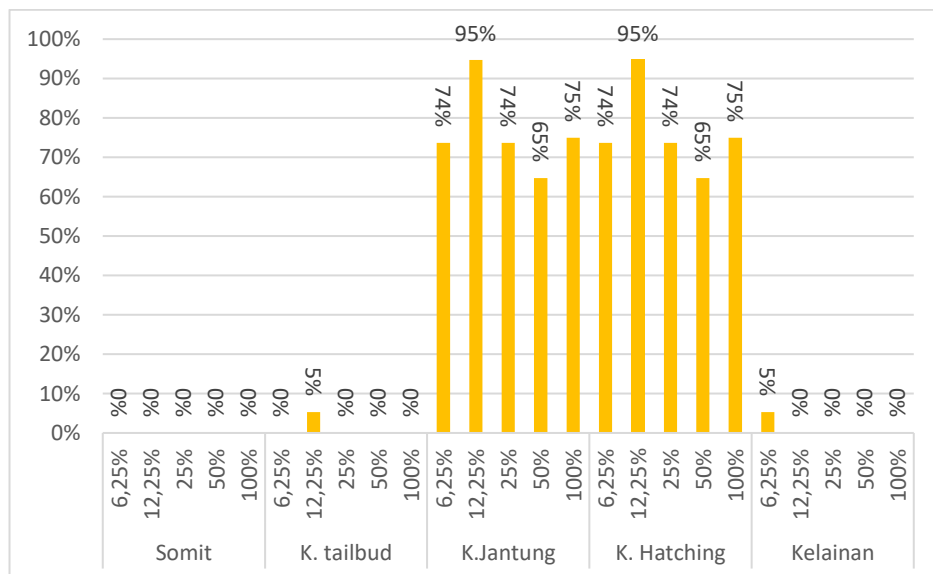
Gambar 4. 12 Grafik Kelainan pada Parameter Uji Toksisitas pada Sampel 1

Berdasarkan **Gambar 4. 11**, dapat dilihat proses perkembangan terbentuknya embrio pada rentang waktu 24 hingga 96 jam. Pada sampel 1 yang diuji dengan berbagai tingkat konsentrasi, mulai dari 6,25% hingga 100%, berdasarkan waktu pengamatan pada jam ke-24 (biru), 48 (orange), 72 (hijau), dan 96 (kuning). Tahapan yang diamati meliputi somit, *tailbud*, jantung, dan *hatching*. Pada konsentrasi 6,25% hingga 100%, perkembangan embrio pada tahap somit dan *tailbud* berjalan normal, ditunjukkan dengan terbentuknya 100% somit dan pelepasan *tailbud* pada jam ke-24. Hal ini menandakan bahwa proses awal perkembangan embrio normal dan tidak terganggu. Namun, untuk tahap detak jantung normalnya muncul pada jam ke-48, ditemukan variasi waktu kemunculannya di semua konsentrasi bahkan, pada beberapa detak jantung yang sudah terdeteksi sejak jam ke-24, yang menunjukkan adanya percepatan perkembangan. Sementara itu, proses menetas (*hatching*) umumnya terjadi pada jam ke-48. Jika *hatching* belum terjadi pada waktu tersebut, maka bisa dianggap terjadinya keterlambatan dalam perkembangan embrio.

Berdasarkan **Gambar 4. 12**, kelainan embrio Ikan Zebra pada sampel 1 diamati melalui empat parameter: kelainan somit, kelainan *tailbud*, kelainan jantung, kelainan *hatching* dan kelainan morfologi. Pada parameter somit dan parameter *tailbud* tidak adanya kelainan disemua konsentrasi. Kelainan jantung dan *hatching* meningkat tajam pada konsentrasi 12,5% hingga 50% dengan puncaknya di 25% sebanyak 94%, lalu menurun pada 100%. Secara keseluruhan, total kelainan hanya terdeteksi pada konsentrasi 25% sebanyak 6%.



Gambar 4. 13 Grafik Perkembangan Terbentuknya Embrio pada Sampel 2

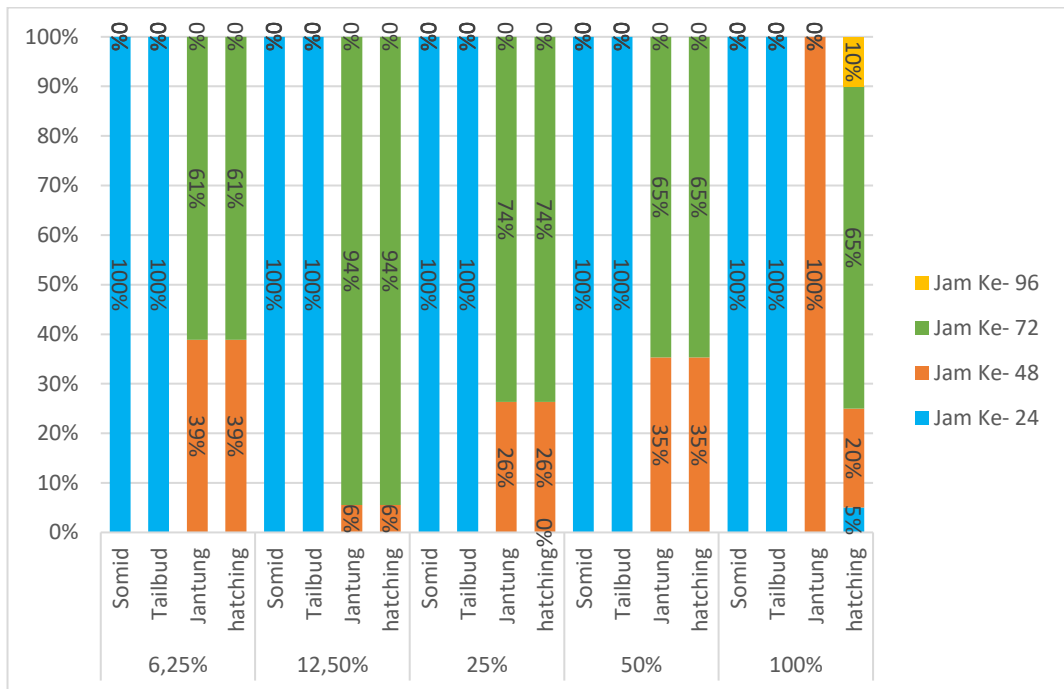


Gambar 4. 14 Grafik Kelainan pada Parameter Uji Toksisitas pada Sampel 2

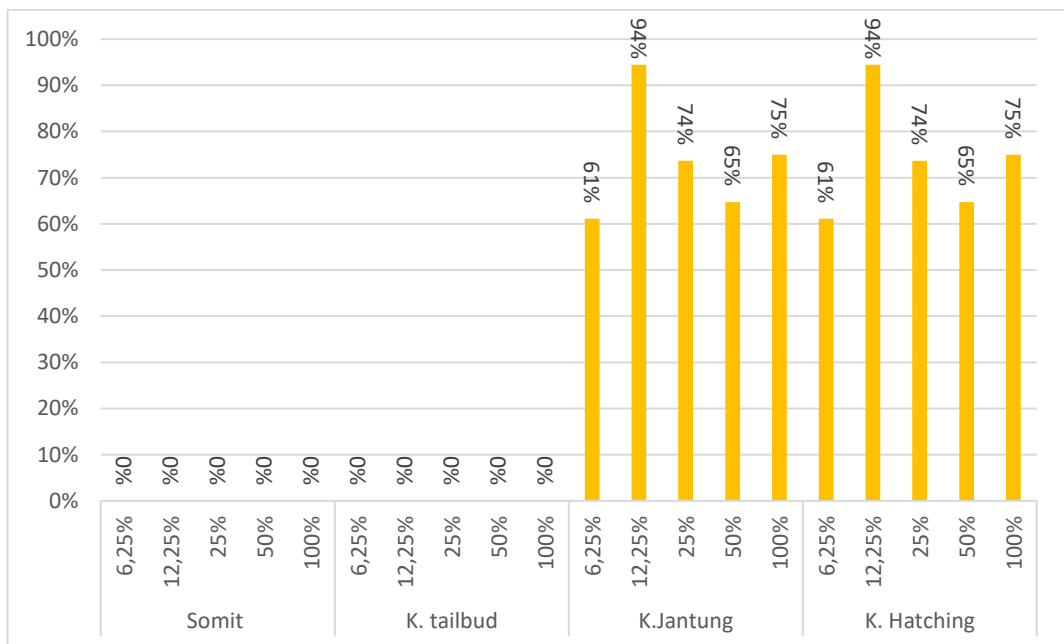
Berdasarkan **Gambar 4.13** dapat dilihat proses perkembangan terbentuknya embrio pada rentang waktu 24 hingga 96 jam. Pada sampel 2 yang diuji dengan berbagai tingkat konsentrasi, mulai dari 6,25% hingga 100%, berdasarkan waktu pengamatan pada jam ke-24 (orange), 48 (biru), 72 (kuning), dan 96 (hijau). Tahapan yang diamati meliputi somit, *tailbud*, jantung, dan *hatching*. Pada

konsentrasi 6,25% hingga 100%, perkembangan embrio pada tahap somit dan *tailbud* berjalan normal, namun terjadi keterlambatan pada konsentrasi 12,5% pelepasan *tailbud* sebanyak 6% pada jam ke-48 yang mana somit dan pelepasan *tailbud* normalnya pada jam ke-24. Namun, untuk tahap detak jantung yang biasanya muncul pada jam ke-48, ditemukan variasi waktu kemunculannya di semua konsentrasi, pada tahap proses menetas (*hatching*) umumnya terjadi pada jam ke-48, tetapi beberapa embrio sudah terdeteksi sejak jam ke-24, yang menunjukkan adanya percepatan perkembangan. Jika *hatching* belum terjadi pada waktu tersebut, maka bisa dianggap terjadinya keterlambatan dalam perkembangan embrio.

Berdasarkan **Gambar 4. 14**, kelainan embrio Ikan Zebra pada sampel 2 diamati melalui empat parameter: kelainan somit, kelainan *tailbud*, kelainan jantung, kelainan *hatching* dan kelainan morfologi. Pada parameter somit tidak adanya kelainan di semua konsentrasi. Pada konsentrasi 12,5% terjadi kelainan 6% di parameter *tailbud*. Kelainan jantung dan *hatching* terjadi variasi waktu kemunculan di semua konsentrasi. Pada konsentrasi 6,25% terjadi 74% pada konsentrasi 12,5% meningkat tajam 100% lalu menurun pada konsentrasi 25% menjadi 74% dan menurun kembali pada konsentrasi 50% menjadi 65% dan naik kembali menjadi 75% pada konsentrasi 100% pola tersebut serupa dengan *hatching*, total kelainan hanya terdeteksi pada konsentrasi 6,25% sebanyak 5%.



Gambar 4. 15 Grafik Perkembangan Terbentuknya Embrio pada Sampel 3



Gambar 4. 16 Grafik Kelainan pada Parameter Uji Toksisitas pada Sampel 3

Berdasarkan **Gambar 4. 15**, dapat dilihat proses perkembangan terbentuknya embrio pada rentang waktu 24 hingga 96 jam. Pada sampel 3 yang diuji dengan berbagai tingkat konsentrasi, mulai dari 6,25% hingga 100%, berdasarkan waktu pengamatan pada jam ke-24 (orange), 48 (biru), 72 (kuning), dan 96 (hijau). Tahapan

yang diamati meliputi somit, *tailbud*, jantung, dan *hatching*. Pada konsentrasi 6,25% hingga 100%, perkembangan embrio pada tahap somit dan *tailbud* berjalan normal, ditunjukkan dengan terbentuknya 100% somit dan pelepasan *tailbud* pada jam ke-24. Hal ini menandakan bahwa proses awal perkembangan embrio normal dan tidak terganggu. Namun, untuk tahap detak jantung yang biasanya muncul pada jam ke-48, ditemukan variasi waktu kemunculannya di semua konsentrasi. Pada tahap proses menetas (*hatching*) umumnya terjadi pada jam ke-48, tetapi beberapa embrio sudah terdeteksi sejak jam ke-24, yang menunjukkan adanya percepatan perkembangan. Jika *hatching* belum terjadi pada waktu tersebut, maka bisa dianggap terjadinya keterlambatan dalam perkembangan embrio.

Berdasarkan **Gambar 4. 16**, kelainan embrio Ikan Zebra pada sampel 3 diamati melalui empat parameter: kelainan somit, kelainan *tailbud*, kelainan jantung, kelainan *hatching* dan kelainan morfologi. Pada parameter somit dan parameter *tailbud* tidak adanya kelainan disemua konsentrasi Kelainan jantung dan *hatching* terjadi variasi waktu kemunculan di semua konsentrasi. Pada konsentrasi 6,25% terjadi 61% pada konsentrasi 12,5% meningkat tajam 94% lalu menurun pada konsentrasi 25% menjadi 74% dan menurun kembali pada konsentrasi 50% menjadi 65% dan naik kembali menjadi 75% pada konsentrasi 100% pola tersebut serupa dengan *hatching*.

4.1.4 Konsentrasi Kematian (LC₅₀)

Berdasarkan hasil penelitian, parameter LC₅₀ tidak dapat dihitung karena tidak terdapat hubungan yang linier antara konsentrasi dan tingkat kematian. Ketidakteraturan ini menunjukkan tidak adanya tren yang konsisten, sehingga penentuan nilai LC₅₀ menjadi tidak memungkinkan. Selain itu, hasil yang diperoleh menunjukkan tingkat toksisitas yang sangat tinggi, padahal pada kondisi tersebut seharusnya tidak menunjukkan toksisitas sama sekali.

4.1.5 Evaluasi Hasil Uji Toksisitas pada Tiga Sampel

Hasil pengujian menunjukkan bahwa efek toksisitas pada sampel 1 mulai terlihat sejak konsentrasi rendah (6,25%), sedangkan pada sampel 2 dan 3, efek toksik baru muncul pada konsentrasi tinggi (50%) dan setelah waktu paparan

tertentu. Hal ini diduga berkaitan dengan karakteristik partikel dan mekanisme pelepasan zat toksik dalam air uji. Pada konsentrasi rendah, partikel yang berukuran sangat kecil atau berada dalam bentuk terlarut cenderung lebih mudah menembus membran korion (selubung telur) embrio, sehingga efek toksik dapat muncul lebih cepat. Sebaliknya, pada konsentrasi tinggi, partikel dalam sampel air umumnya berukuran lebih besar dan tidak langsung masuk ke dalam embrio. Namun, seiring waktu, partikel ini dapat mengalami perubahan fisik, seperti pecah menjadi partikel yang lebih kecil atau melepaskan zat beracun yang sebelumnya terikat di permukaannya, sehingga tetap berpotensi menimbulkan efek toksik. Proses ini dikenal sebagai desorpsi, yaitu pelepasan zat toksik dari partikel pembawanya ke dalam media uji. Selain itu, karena dalam sistem pengujian statis yang tidak mengalami pergantian media, partikel juga cenderung tetap tersuspensi dan dapat meningkatkan paparan seiring waktu. Oleh karena itu, toksisitas yang muncul setelah waktu tertentu pada konsentrasi tinggi diduga merupakan hasil dari akumulasi paparan atau perubahan karakteristik partikel yang menyebabkan zat toksik lebih mudah masuk dan diserap oleh embrio ikan zebra.

Pada sampel 1 dan 2 terdapat kelainan morfologi pada embrio ikan zebra kemungkinan ini bisa terjadi umumnya disebabkan oleh paparan zat toksik yang mengganggu proses genetik, fisiologis, atau lingkungan mikroembrio, seperti tekanan osmotik, kerusakan DNA, atau gangguan ekspresi gen perkembangan. Kemungkinan disebabkan oleh keterbatasan penetrasi zat uji akibat ukuran molekul yang terlalu besar untuk melewati korion embrio. Berdasarkan hasil penelitian oleh Pelka et al. (2016), kemampuan molekul untuk menembus korion embrio ikan zebra sangat bergantung pada ukuran berat molekulnya. Molekul dengan berat molekul ≤ 3.000 Dalton dapat melintasi korion secara bebas dan relatif cepat. Sementara itu, molekul berukuran sekitar 4.000 Dalton masih dapat melewati korion, namun proses penetrasinya terjadi secara parsial dan memerlukan waktu yang lebih lama. Sebaliknya, molekul dengan berat ≥ 6.000 Dalton tidak dapat menembus korion, bahkan setelah 48 jam waktu pemaparan. Hasil ini menunjukkan bahwa korion berfungsi sebagai penghalang selektif yang membatasi masuknya molekul besar ke

dalam embrio, sehingga ukuran molekul menjadi faktor penting dalam evaluasi efektivitas dan dampak toksik suatu senyawa terhadap embrio ikan zebra.

4.2 Uji Parameter Kimia

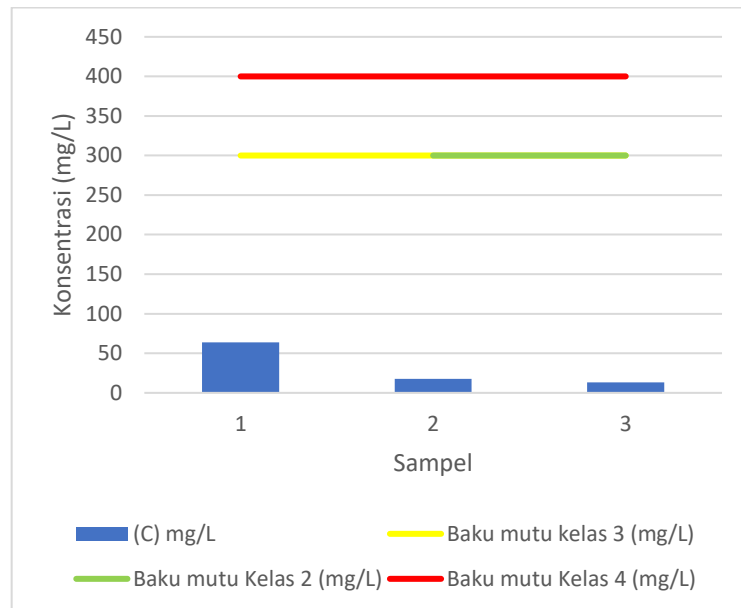
Pada pengujian kualitas air terdapat parameter kimia yang diuji yaitu, Sulfat (SO_4), *Chemical Oxygen Demand* (COD), Kromium heksavalen (Cr(VI)), dan Kadmium (Cd) dengan acuan menggunakan Standar Nasional Indonesia sesuai dengan parameter-parameter yang di uji.

4.2.1 Sulfat

Berikut hasil dari pengukuran Sulfat (SO_4) di Sungai Citarum bagian Tengah dalam tabel di bawah ini:

Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Sulfat Pada Sungai Citarum bagian Tengah

<i>Sulfat</i>				
Sampel	(C) mg/L	<i>Baku mutu</i>		
		Kelas 2 (mg/L)	Kelas 3 (mg/L)	Kelas 4 (mg/L)
1	63,82	300	300	400
2	17,59	300	300	400
3	13,16	300	300	400



Gambar 4. 17 Grafik Hasil Perhitungan Sulfat pada air Sungai Citarum bagian Tengah

Berdasarkan **Tabel 4.17**, hasil analisis laboratorium menunjukkan bahwa kadar sulfat di air Sungai Citarum mengalami penurunan secara bertahap dari sampel pertama hingga sampel ketiga. Pada sampel 1, kadar sulfat terukur sebesar 63,82 mg/L, kemudian menurun menjadi 17,59 mg/L pada sampel 2, dan semakin rendah pada sampel 3 dengan kadar sebesar 13,16 mg/L. Penurunan ini menunjukkan adanya perbedaan kondisi lingkungan atau potensi pengenceran di sepanjang aliran sungai. Meskipun demikian, seluruh hasil pengukuran menunjukkan bahwa kadar sulfat di ketiga titik lokasi masih berada jauh di bawah ambang batas baku mutu yang ditetapkan oleh Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, yaitu sebesar 300 mg/L untuk air kelas 2.

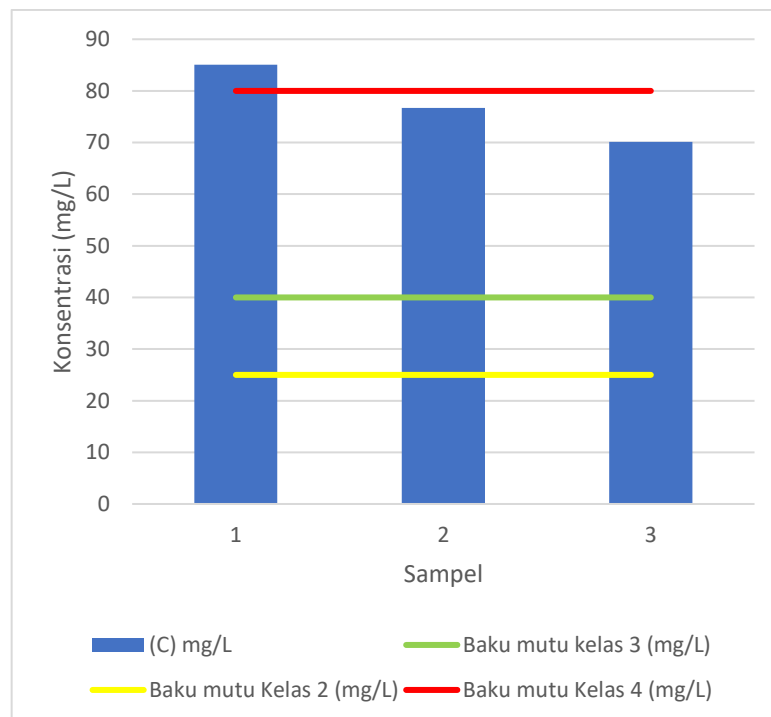
Air kelas 2 diperuntukkan bagi kegiatan seperti prasarana dan sarana rekreasi air, pembudidayaan ikan air tawar, peternakan, pengairan untuk pertanian, serta peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air serupa. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa kandungan sulfat pada ketiga sampel air Sungai Citarum masih berada dalam batas aman dan belum menimbulkan potensi risiko terhadap ekosistem maupun aktivitas pemanfaatan air sesuai peruntukannya.

4.2.2 Chemical Oxygen Demand (COD)

Berikut hasil dari pengukuran *Chemical Oxygen Demand* (COD) di Sungai Citarum bagian Tengah dalam tabel di bawah ini:

Tabel 4. 6 Hasil Pengujian Chemical Oxygen Demand (COD) Pada Sungai Citarum bagian Tengah

Sampel	(C) mg/L	Baku mutu		
		Kelas 2 (mg/L)	Kelas 3 (mg/L)	Kelas 4 (mg/L)
1	85,1	25	40	80
2	76,7	25	40	80
3	70,1	25	40	80



Gambar 4. 18 Grafik Hasil Perhitungan Chemical Oxygen Demand (COD) pada air Sungai Citarum bagian Tengah

Berdasarkan **Tabel 4.18** hasil analisis laboratorium menunjukkan bahwa kadar COD pada sampel 1 melebihi baku mutu yang telah ditetapkan. Baku mutu

ini mengacu pada Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup dimana air sungai kelas 2, baku mutu COD adalah 25 mg/L, . Hal ini terjadi karena adanya zat organik dan anorganik di dalam air yang dapat mengalami reaksi kimia dan teroksidasi. Zat-zat tersebut, seperti limbah dari industri, bahan kimia, serta sisa-sisa makhluk hidup, membutuhkan oksigen untuk bisa diuraikan dan dihancurkan.

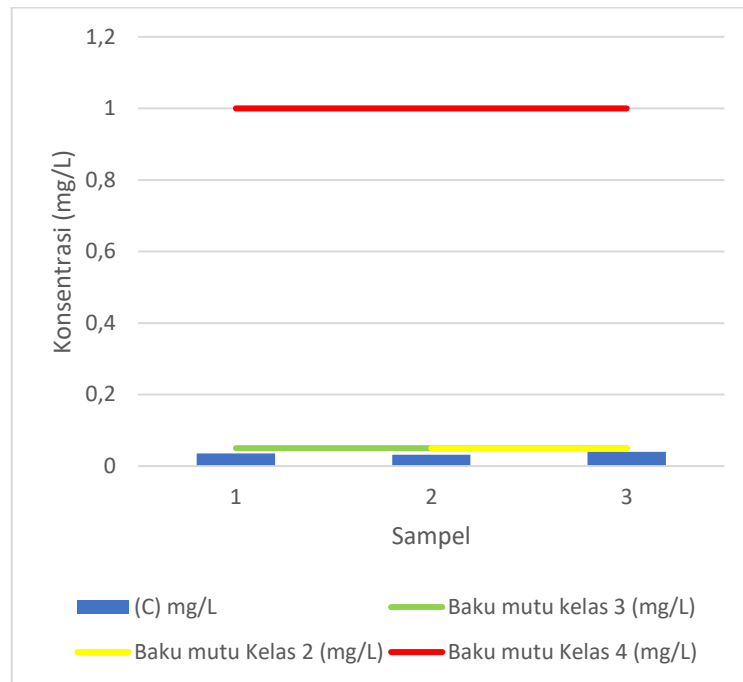
Hasil sampel yang diambil dari berbagai titik sungai pada bagian tengah menunjukkan nilai COD melebihi batas baku mutu 25 mg/L. Nilai COD di beberapa lokasi sampel, seperti sampel 1 sebesar 85,1 mg/L yang melebihi baku mutu sampel 2 sebesar 76,7 mg/L, dan sampel 3 sebesar 70,1 mg/L, masih dibawah ambang batas tersebut. COD tinggi pada sampel 1 bisa jadi ada sumber pencemaran spesifik dekat dengan lokasi titik sampel 1 seperti pembuangan limbah industri atau rumah tangga yang langsung membuang limbah ke badan air ataupun saluran drainase atau pun got yang bermuara langsung pada lokasi sampel 1. Hal ini terjadi karena jarak terhadap sumber pencemar pada lokasi 2 dan 3 tidak dekat langsung dengan sumber pencemar.

4.2.3 Krom Heksavalen

Berikut hasil dari pengukuran kromium heksavalen di Sungai Citarum bagian Tengah dalam tabel di bawah ini:

Tabel 4. 7 Hasil Pengujian Kromium Heksavalen Pada Sungai Citarum bagian Tengah

<i>Krom Heksavalen</i>				
Sampel	(C) mg/L	<i>Baku mutu</i>		
		Kelas 2 (mg/L)	Kelas 3 (mg/L)	Kelas 4 (mg/L)
1	0,035	0,05	0,05	1
2	0,032	0,05	0,05	1
3	0,040	0,05	0,05	1



Gambar 4. 19 Grafik Hasil Perhitungan Kromium Heksavalen pada air Sungai Citarum bagian Tengah

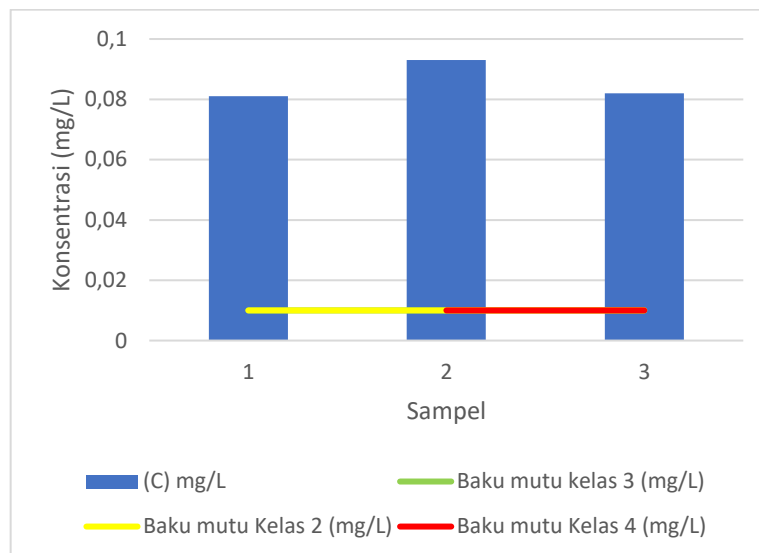
Berdasarkan **Tabel 4.19**, hasil analisis pengujian kromium heksavalen menunjukkan bahwa kadar di beberapa lokasi sampel adalah sebagai berikut: sampel 1 sebesar 0,035 mg/L, sebesar sampel 2 0,032 mg/L, dan sampel 3 sebesar 0,040 mg/L. Semua hasil tersebut masih memenuhi baku mutu yang ditetapkan oleh Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, yaitu sebesar 0,05 mg/L untuk kromium heksavalen dalam air permukaan. Hasil ini menunjukkan bahwa konsentrasi kromium heksavalen pada ketiga sampel air tergolong rendah dan masih dalam kondisi yang stabil. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa keberadaan unsur logam berat kromium heksavalen di lokasi pengambilan sampel belum menunjukkan potensi pencemaran yang signifikan, serta masih aman bagi ekosistem perairan maupun untuk kepentingan pemanfaatan air sesuai peruntukannya.

4.2.4 Kadmium (Cd)

Berikut hasil dari pengukuran kadmium (Cd) di Sungai Citarum bagian Tengah dalam tabel di bawah ini:

Tabel 4. 8 Hasil Pengujian Kadmium (Cd) Pada Sungai Citarum bagian Tengah

<i>Kadmium (Cd)</i>				
Sampel	(C) mg/L	<i>Baku Mutu</i>		
		Kelas 2 (mg/L)	Kelas 3 (mg/L)	Kelas 4 (mg/L)
1	0,081	0,01	0,01	0,01
2	0,093	0,01	0,01	0,01
3	0,082	0,01	0,01	0,01



Gambar 4. 20 Grafik Hasil Perhitungan Kadmium pada air Sungai Citarum

Berdasarkan **Tabel 4.5**, hasil analisis laboratorium menunjukkan kadar kadmium (Cd) di Sungai Citarum pada sampel satu lokasi daraulin sebesar 0,081 mg/L, sampel dua sebesar 0,093 mg/L, sampel tiga sebesar 0,082 mg/L. Data ini menunjukkan fluktuasi kadar kadmium di antara ketiga sampel tersebut. Menurut Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, baku mutu kadmium untuk air kelas 2 adalah 0,01 mg/L. Karena kadar kadmium dalam sampel melebihi batas tersebut, dapat disimpulkan bahwa kualitas air Sungai Citarum pada titik-titik tersebut tidak memenuhi baku mutu yang ditetapkan.

Salah satu efek negatif dari logam berat (Cd) yaitu dapat menimbulkan pencemaran dan dapat membahayakan makhluk hidup di sekitarnya. Salah satunya logam berat dari pembuangan industri yaitu kadmium (Cd). Di wilayah semua titik pengambilan sampel dapat dilihat bahwa semua sampel dekat dengan beberapa industri maupun pabrik. Logam berat kadmium yang mengontaminasi lingkungan memiliki ambang batas yang berbeda-beda bagi setiap organisme. Dampak negatif yang ditimbulkan dari kadmium bagi lingkungan yaitu memperlambat pertumbuhan suatu organisme dan mengganggu ekosistem di dalamnya (Najihah, 2023).

Salah satu alternatif pencegahan pencemaran logam berat di sungai yaitu menggunakan tumbuhan air. Tumbuhan air tersebut berfungsi untuk menyerap polutan yang ada di dalam perairan. Tumbuhan air yang berpotensi dapat menyerap logam berat kadmium (Cd) diantaranya adalah kangkung (*Ipomea aquatica*), eceng gondok (*Eichhornia crassipes*), dan genjer (*Limnocharis flava*). Dalam penelitian (Suheriyanto dan Risma, 2013). Penyerapan zat kadmium (Cd) dilakukan oleh batang dan akar tumbuhan tetapi penyerapan polutan ini tidak berbahaya bagi tubuh tumbuhan (Najihah, 2023). kemampuan tumbuhan dalam menyerap akumulasi logam berat disebut fitoremediasi. Absorpsi kadmium dapat melalui tumbuhan air, penyebabnya yaitu tumbuhan air memiliki kemampuan yang sangat baik dalam proses penyerapan hara esensial, air, serta elemen-elemen lain termasuk zat toksik dan polutan.

4.2.5 Evaluasi Hasil Uji Parameter Kimia pada Tiga Sampel

Hasil uji parameter kimia dari ketiga sampel air Sungai Citarum menunjukkan adanya pencemaran organik dan logam berat yang cukup signifikan. Pada Sampel 1, terdeteksi kadar *Chemical Oxygen Demand* (COD) yang melebihi baku mutu, yang menunjukkan adanya kandungan bahan organik terlarut dalam jumlah tinggi. Kandungan COD yang tinggi mengindikasikan bahwa air tersebut mengandung banyak zat pencemar organik yang memerlukan oksigen dalam jumlah besar untuk proses dekomposisi biologis maupun kimiawi. Hal ini dapat mengganggu kualitas oksigen terlarut di perairan dan membahayakan organisme akuatik, termasuk embrio ikan zebra dalam uji FET.

Selain itu, kadar logam berat kadmium (Cd) pada ketiga sampel juga ditemukan melampaui ambang batas yang ditetapkan dalam PP No. 22 Tahun 2021 Lampiran VI. Kadmium merupakan logam berat yang bersifat toksik, bioakumulatif, dan dapat mengganggu fungsi organ serta perkembangan embrio organisme akuatik meskipun dalam konsentrasi rendah. Paparan Cd dalam waktu tertentu dapat menyebabkan stres fisiologis, kelainan fungsi organ dalam, termasuk jantung, serta menghambat pertumbuhan normal embrio.

Kondisi ini menunjukkan bahwa pencemaran di Sungai Citarum tidak hanya berasal dari limbah organik, tetapi juga logam berat yang berbahaya. Kombinasi tingginya COD dan kandungan kadmium dapat memperparah tingkat toksisitas pada air, sebagaimana terlihat dari hasil uji FET yang menunjukkan kematian dan kelainan fisiologis pada embrio ikan zebra. Oleh karena itu, keberadaan parameter-parameter ini menjadi indikator penting dalam menilai tingkat pencemaran dan potensi bahaya biologis dari sampel air Sungai Citarum.

4.3 Perbandingan per Titik pada Lokasi Sampel Uji Parameter Kimia

Berdasarkan hasil pengujian di lokasi pengambilan sampel, ditemukan variasi pola konsentrasi pada empat parameter utama, yaitu COD (*Chemical Oxygen Demand*), sulfat, krom heksavalen, dan kadmium. Pada parameter COD, konsentrasi tertinggi tercatat di sampel 1 yang berlokasi di Daraulin sebesar 85,1 mg/L, yang kemudian menurun menjadi 76,7 mg/L pada sampel 2 yang berlokasi di Leuwi Sapi, dan mencapai nilai terendah di sampel 3 yang berlokasi di Nanjung sebesar 70,1 mg/L. Hal ini menunjukkan bahwa titik pengambilan sampel 1 memiliki tingkat pencemaran organik yang lebih tinggi dibandingkan dengan titik lainnya.

Sebaliknya, pada parameter sulfat terjadi penurunan konsentrasi yang signifikan, dari 63,52 mg/L pada sampel 1 menjadi 17,59 mg/L pada sampel 2, kemudian menurun lebih tajam hingga mencapai 13,16 mg/L pada sampel 3. Penurunan drastis dari sampel 1 ke sampel 2 mengindikasikan adanya pengurangan sumber pencemaran sulfat di sekitar lokasi pengambilan sampel 2.

Pada parameter krom heksavalen, konsentrasi mengalami fluktuasi. Sampel 1 diperoleh nilai 0,035 mg/L, sedikit lebih tinggi dibandingkan sampel 2 nilai yang

diperoleh 0,032 mg/L. Namun, sampel 3 menunjukkan lonjakan konsentrasi menjadi 0,040 mg/L, menjadikannya titik dengan kadar krom heksavalen tertinggi di antara ketiga lokasi tersebut.

Sementara itu, pada parameter kadmium, konsentrasi tertinggi ditemukan di sampel 2 dengan nilai 0,093 mg/L, menurun menjadi 0,082 mg/L pada sampel 2. Namun, konsentrasi kadmium menurun di sampel 1 menjadi 0,081 mg/L, yang merupakan nilai terendah di antara ketiga titik.

Analisis perbandingan antar titik pengambilan sampel ini memberikan gambaran yang lebih rinci mengenai variasi konsentrasi parameter kualitas air di Sungai Citarum. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa sampel 1 memiliki indikasi pencemaran paling tinggi dibandingkan titik lainnya.

4.4 Perbandingan Kualitas Air dengan Sungai Lain

Berdasarkan data yang diperoleh, kualitas air Sungai Citarum dapat dibandingkan dengan beberapa sungai lain di Indonesia. Pada parameter Chemical Oxygen Demand (COD), Sungai Citarum memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan Sungai Brantas, di mana COD di Sungai Brantas tercatat sebesar 88 mg/L. Hal ini menunjukkan bahwa tingkat pencemaran organik di Sungai Brantas lebih tinggi dibandingkan dengan Sungai Citarum.

Pada parameter sulfat, kadar sulfat di Sungai Batanghari, baik di hulu maupun hilir, masing-masing sebesar 28,50 mg/L dan 32,745 mg/L (Sari, 2021). Nilai ini lebih rendah dibandingkan kadar sulfat di Sungai Citarum, yang menunjukkan bahwa kualitas air Sungai Batanghari lebih baik dalam hal parameter sulfat.

Pada parameter kromium heksavalen, konsentrasi di Sungai Bengawan Solo tercatat sebesar 0,0062 mg/L, lebih rendah dibandingkan dengan Sungai Citarum. Ini menunjukkan bahwa Sungai Citarum memiliki tingkat pencemaran kromium heksavalen yang lebih tinggi dibandingkan Sungai Bengawan Solo.

Sementara itu, untuk parameter kadmium, kadar kadmium di Sungai Lesti, Malang, tercatat sebesar 0,133 mg/L, jauh lebih tinggi dibandingkan dengan Sungai Citarum. Hal ini menunjukkan bahwa Sungai Lesti memiliki tingkat pencemaran kadmium yang lebih tinggi.

Perbandingan ini memberikan gambaran yang lebih luas mengenai kondisi kualitas air di berbagai sungai di Indonesia, sekaligus menyoroti parameter yang perlu menjadi prioritas pengelolaan di Sungai Citarum.

4.5 Hubungan antara Uji Toksisitas dengan Uji Parameter Kimia

Penelitian ini dilakukan dengan dua pendekatan pengujian, yaitu uji toksisitas menggunakan embrio ikan zebra (*zebrafish*) dan uji parameter kimia terhadap sampel air Sungai Citarum. Uji toksisitas bertujuan untuk melihat dampak biologis paparan air sungai terhadap embrio ikan, seperti kematian, koagulasi, tidak terjadinya pembentukan somit, pelepasan *tail-bud*, tidak adanya detak jantung dan deformitas. Sementara itu, uji parameter kimia difokuskan pada analisis beberapa zat pencemar yang umum ditemukan di perairan tercemar, yaitu sulfat, COD, kromium heksavalen, dan kadmium (Cd). Keempat parameter tersebut dipilih karena berpotensi memberikan dampak negatif terhadap organisme akuatik jika melebihi ambang batas baku mutu yang ditetapkan. Melalui perbandingan antara hasil uji toksisitas dan parameter kimia, penelitian ini bertujuan untuk melihat keterkaitan antara kedua uji, kualitas kimia air Sungai Citarum dan tingkat toksisitas yang ditimbulkan terhadap embrio ikan zebra.

Berdasarkan **Gambar 4.21** memperlihatkan grafik (%) koagulasi dan parameter kadar sulfat dengan persentase koagulasi embrio ikan zebra pada berbagai konsentrasi (6,25%, 12,5%, 25%, 50%, dan 100%) kadar sulfat pada tiga sampel air. Analisis dilakukan untuk melihat apakah terdapat hubungan antara hasil uji toksisitas berupa persentase koagulasi embrio ikan zebra (*zebrafish*) dan kadar sulfat sebagai salah satu parameter kimia dalam sampel air Sungai Citarum. Koagulasi pada embrio menunjukkan adanya efek toksik dari sampel air terhadap organisme uji. Semakin tinggi persentase koagulasi, maka semakin tinggi pula dugaan toksisitas air terhadap perkembangan embrio ikan zebra.

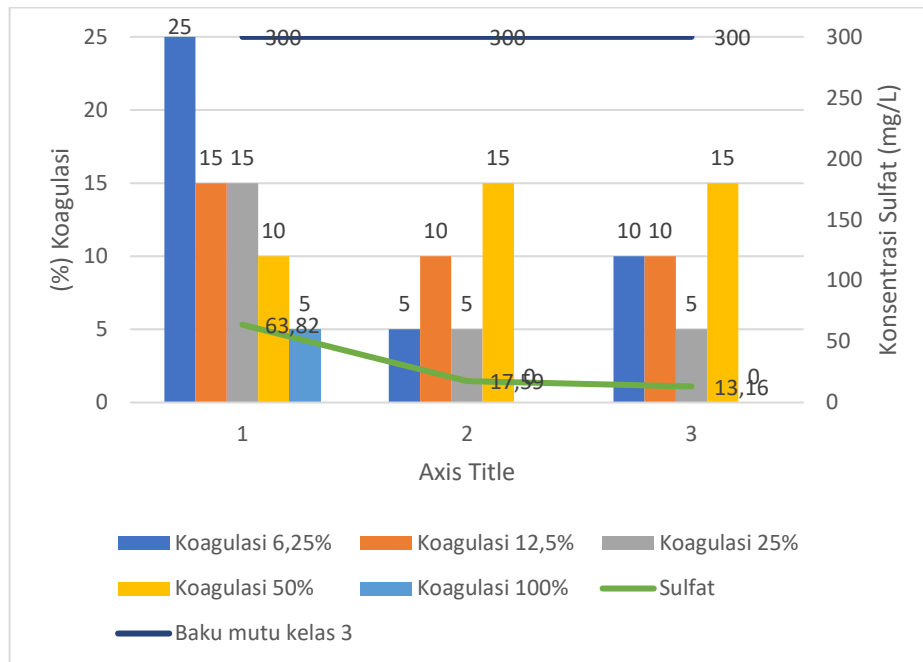
Sampel 1 menunjukkan konsentrasi sulfat paling tinggi, yaitu sebesar 63,82 mg/L, dan pada saat yang sama, memiliki persentase koagulasi tertinggi, terutama pada konsentrasi terendah (6,25%) yang mencapai 25%. Sekilas, hal ini seolah menunjukkan bahwa tingginya kadar sulfat mungkin berkontribusi terhadap

toksisitas pada organisme uji. Namun, ketika dibandingkan dengan sampel lain, pola ini tidak konsisten.

Pada sampel 2, kadar sulfat menurun cukup drastis menjadi 17,09 mg/L, tetapi koagulasi masih terjadi, terutama pada konsentrasi 50%, yang mencapai 15%. Hal yang sama juga terlihat pada sampel 3, di mana kadar sulfat paling rendah yaitu 13,16 mg/L, namun koagulasi tetap muncul pada konsentrasi 50% dengan persentase yang juga 15%. Bahkan, pada konsentrasi rendah seperti 6,25%, tidak terjadi koagulasi signifikan pada sampel 2 dan 3, padahal kadar sulfat mereka jauh lebih rendah dibandingkan sampel 1.

Dari pola tersebut, dapat disimpulkan bahwa tidak ada hubungan yang jelas atau langsung antara kadar sulfat dengan tingkat koagulasi embrio ikan zebra. Jika sulfat memang menjadi penyebab utama toksisitas, maka seharusnya semakin tinggi kadar sulfat, semakin tinggi juga tingkat koagulasi — dan sebaliknya. Namun kenyataannya, ketika kadar sulfat menurun di sampel 2 dan 3, koagulasi justru tetap terjadi dengan persentase yang hampir sama atau bahkan lebih tinggi pada konsentrasi uji tertentu.

Hal ini menunjukkan bahwa sulfat bukan satu-satunya penyebab efek toksik terhadap embrio ikan zebra, dan kemungkinan besar terdapat parameter lain yang lebih berpengaruh. Sulfat memang bisa berdampak negatif pada organisme air dalam konsentrasi tinggi, tetapi dalam kasus ini, tidak ada pola yang konsisten antara kadar sulfat dan tingkat koagulasi embrio.



Gambar 4. 21 Grafik (%) Koagulasi dan Parameter Sulfat

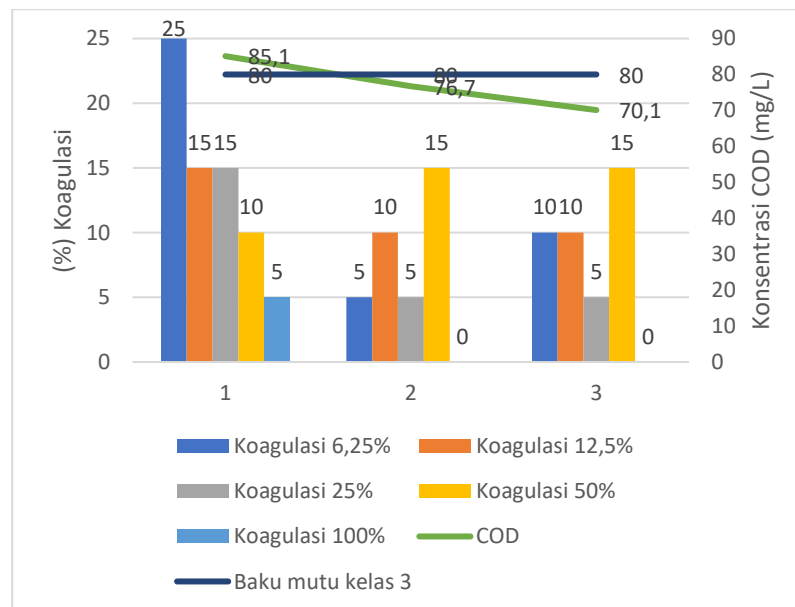
Berdasarkan **Gambar 4.22** memperlihatkan grafik (%) koagulasi dan parameter kadar COD dengan persentase koagulasi embrio ikan zebra pada berbagai konsentrasi (6,25%, 12,5%, 25%, 50%, dan 100%) kadar COD pada tiga sampel air. Kadar COD yang tinggi dapat dijadikan indikasi pencemaran bahan organik yang berasal dari limbah domestik, industri, limpasan (*runoff*), pupuk pertanian. Dalam analisis hubungan antara kadar *Chemical Oxygen Demand* (COD) dan tingkat toksisitas yang ditunjukkan melalui persentase koagulasi embrio ikan zebra, data menunjukkan bahwa hanya sampel 1 yang memperlihatkan hubungan yang kuat dan signifikan. Sampel ini memiliki kadar COD tertinggi, yaitu 85,1 mg/L, dan menghasilkan tingkat koagulasi sebesar 25% pada konsentrasi terendah (6,25%). Hal ini menunjukkan bahwa air dari lokasi sampel 1 memiliki potensi toksisitas yang tinggi meskipun hanya digunakan dalam konsentrasi rendah. Temuan ini mengindikasikan bahwa keberadaan senyawa organik dalam jumlah tinggi pada sampel 1 sangat mungkin menjadi salah satu penyebab utama efek toksik terhadap embrio ikan zebra.

Namun, ketika dilihat pada sampel 2 dan 3, hubungan tersebut tidak terlihat. Meskipun kedua sampel ini juga memiliki kadar COD yang tergolong tinggi

(masing-masing 76,7 mg/L dan 70,1 mg/L), tingkat koagulasi yang terjadi hanya sebesar 15% dan hanya muncul pada konsentrasi tertinggi (50%). Tidak ada reaksi toksik signifikan pada konsentrasi rendah. Kondisi ini menunjukkan bahwa tingginya COD pada sampel 2 dan 3 tidak berbanding lurus dengan peningkatan toksisitas, sehingga hubungan antara COD dan koagulasi tidak dapat disimpulkan untuk seluruh sampel.

Perbedaan ini menunjukkan bahwa senyawa organik yang berkontribusi terhadap nilai COD tidak selalu memiliki tingkat toksisitas yang sama. COD hanya mengukur total kebutuhan oksigen untuk menguraikan semua bahan organik dalam air, tetapi tidak membedakan jenis senyawanya. Oleh karena itu, meskipun COD tinggi, efek toksiknya bisa berbeda tergantung pada karakter senyawa pencemar organik yang terkandung dalam masing-masing sampel.

Lebih jauh, kondisi ini memperkuat dugaan bahwa ada faktor lain di luar COD yang memengaruhi tingkat toksisitas air, seperti kandungan logam berat, pH, atau interaksi antarparameter kimia. Dengan kata lain, COD mungkin menjadi indikator toksisitas pada kasus tertentu seperti pada sampel 1, tetapi tidak cukup menjelaskan secara keseluruhan penyebab toksisitas pada semua sampel.



Gambar 4. 22 Grafik (%) Koagulasi dan Parameter COD

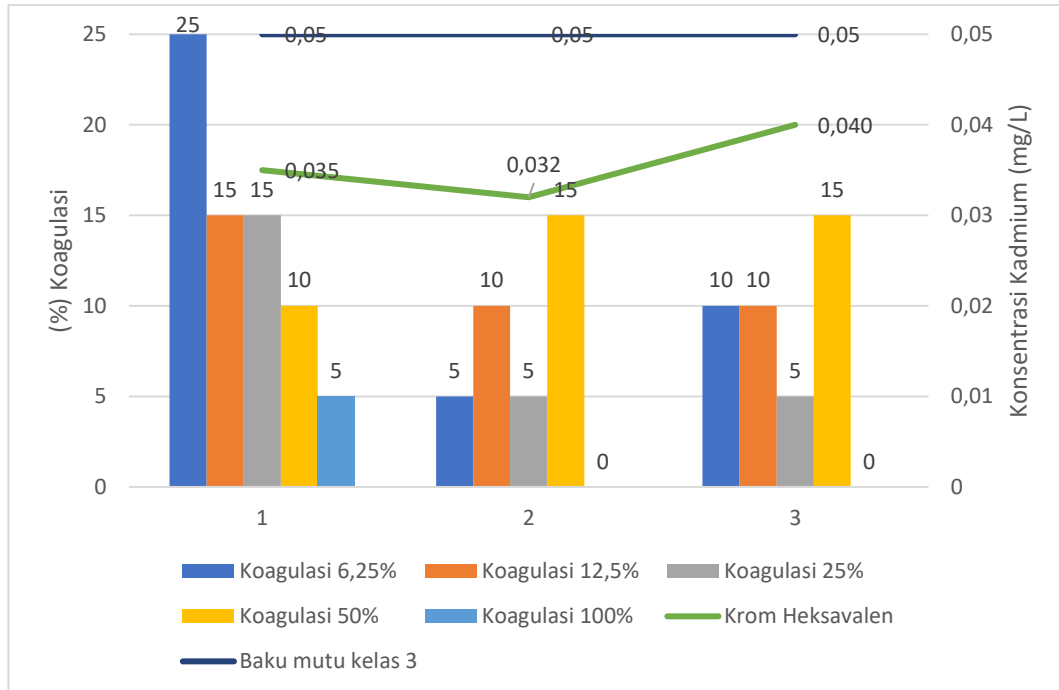
Berdasarkan **Gambar 4.23** memperlihatkan grafik (%) koagulasi dan parameter kadar krom heksavalen (Cr^{6+}) dengan persentase koagulasi embrio ikan zebra pada berbagai konsentrasi (6,25%, 12,5%, 25%, 50%, dan 100%) kadar krom heksavalen pada tiga sampel air.

Jika dilihat secara visual dari grafik, kadar krom heksavalen pada ketiga sampel masih berada di bawah ambang batas baku mutu tersebut. Sampel 1 mengandung Cr^{6+} sebesar 0,035 mg/L, sampel 2 sebesar 0,032 mg/L, dan sampel 3 sebesar 0,040 mg/L. Meskipun semuanya memenuhi baku mutu secara umum, namun terdapat gejala toksisitas biologis pada embrio ikan zebra. Hal ini tercermin dari hasil uji FET yang menunjukkan adanya persentase koagulasi yang cukup signifikan di semua sampel. Contohnya, pada sampel 1, tingkat koagulasi mencapai 25% pada konsentrasi paparan 6,25%, dan masih ada koagulasi 5% bahkan pada konsentrasi 100%. Sementara itu, pada sampel 2 dan 3, pola koagulasi juga tetap terjadi di berbagai konsentrasi, meskipun tidak setinggi sampel 1.

Apabila kita mencoba mengkorelasikan nilai krom heksavalen dengan tingkat koagulasi, maka tidak ditemukan hubungan yang konsisten atau linier. Misalnya, kadar Cr^{6+} tertinggi justru terdapat pada sampel 3, namun tingkat koagulasi tidak lebih tinggi dibandingkan sampel 1 yang kadar Cr^{6+} -nya lebih rendah. Begitu pula pada sampel 2, meskipun kadar Cr^{6+} paling rendah, tingkat koagulasi pada beberapa konsentrasi tetap menunjukkan nilai yang relatif signifikan. Ketidaksesuaian ini menunjukkan bahwa krom heksavalen kemungkinan bukan faktor dominan yang menyebabkan toksisitas terhadap embrio ikan zebra dalam sampel air sungai yang diuji.

Dari hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa tidak terdapat hubungan langsung antara parameter krom heksavalen dengan hasil uji toksisitas embrio, setidaknya dalam konteks data yang diperoleh dari tiga sampel ini. Dengan kata lain, kadar Cr^{6+} yang rendah tidak serta-merta menjamin bahwa air bebas dari dampak toksik terhadap makhluk hidup. Hal ini mengindikasikan bahwa efek toksisitas yang terdeteksi dalam uji FET kemungkinan besar disebabkan oleh kontaminan lain yang tidak ditampilkan dalam grafik ini, seperti senyawa organik,

atau zat-zat kimia kompleks lainnya yang mungkin bekerja secara sinergis dan tidak dapat diidentifikasi hanya dengan melihat satu parameter saja.



Gambar 4. 23 Grafik (%) Koagulasi dan Parameter Krom Heksavalen

Berdasarkan **Gambar 4.24** Grafik di atas menunjukkan persentase koagulasi embrio ikan zebra pada berbagai konsentrasi sampel (6,25%, 12,5%, 25%, 50%, dan 100%) dari tiga lokasi pengambilan sampel (1, 2, dan 3), serta kadar logam berat kadmium (Cd) di setiap lokasi tersebut.

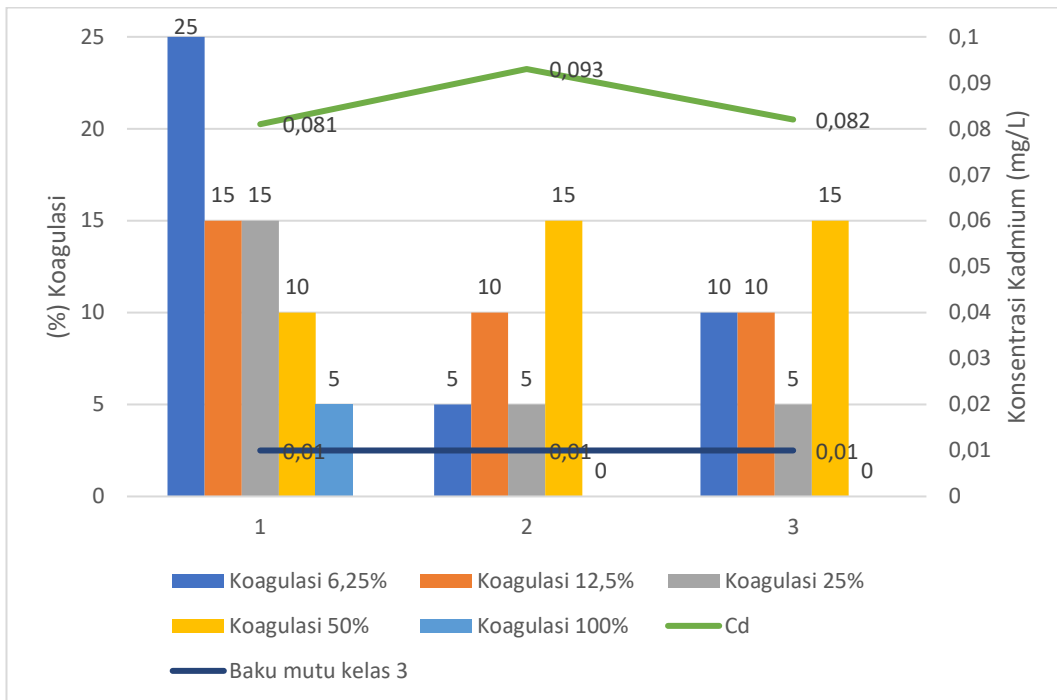
Jika dilihat dari data sampel 1, kadar kadmiumnya adalah 0,081 mg/L, jauh di atas baku mutu kelas 3 menurut PP No. 22 Tahun 2021 yang hanya sebesar 0,01 mg/L. Pada sampel ini, terjadi koagulasi sebesar 25% pada konsentrasi pengenceran 6,25%, kemudian menurun secara bertahap hingga hanya 5% pada konsentrasi 50% dan 100%. Pola ini cukup menarik karena efek toksik (koagulasi) justru paling tinggi pada konsentrasi paling rendah. Hal ini bisa menunjukkan adanya efek stres awal atau sensitivitas tinggi embrio terhadap kandungan Cd yang terakumulasi walau pada pengenceran rendah. Dengan kata lain, meskipun kadar Cd tidak meningkat, respons biologisnya bisa lebih kuat di awal paparan.

Pada sampel 2 kadarnya bahkan lebih tinggi lagi, yaitu 0,093 mg/L ini adalah yang tertinggi di antara ketiga sampel. Namun, jika dilihat dari hasil

koagulasinya, tidak ada perubahan signifikan. Koagulasi hanya berkisar antara 10–15% pada semua konsentrasi. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun kadar kadmium tinggi, efek toksiknya terhadap embrio tidak meningkat secara langsung atau signifikan. Ini bisa saja dipengaruhi oleh keberadaan senyawa lain dalam air yang justru bersifat menetralkan atau mengurangi efek Cd, atau mungkin embrio mengalami semacam adaptasi biologis. Jadi, kadmium di sini memang tercemar, tapi belum tentu berbanding lurus dengan tingkat toksisitas yang diamati.

Pada sampel 3 menunjukkan kadar Cd sebesar 0,082 mg/L, hampir sama seperti sampel 1. Namun, respons koagulasi pada sampel ini tidak mengikuti pola yang sama. Justru, nilai koagulasi tertinggi terjadi pada konsentrasi 50% dan 100% (15%), sementara konsentrasi lainnya menunjukkan angka 5–10%, ini menunjukkan bahwa tidak ada hubungan yang konsisten atau linier antara kadar kadmium dengan tingkat koagulasi embrio. Jika memang kadmium adalah penyebab utama koagulasi, maka kita seharusnya melihat peningkatan atau pola yang serupa pada semua sampel dengan kadar Cd tinggi.

Berdasarkan keseluruhan hasil ini, bisa disimpulkan bahwa walaupun kadmium merupakan logam berat yang berbahaya dan melebihi ambang batas pada semua sampel, tidak ada pola hubungan yang kuat dan konsisten antara konsentrasi kadmium dan tingkat toksisitas yang terukur melalui persentase koagulasi embrio ikan zebra. Koagulasi yang muncul kemungkinan besar tidak hanya disebabkan oleh Cd, tetapi juga oleh kombinasi berbagai zat pencemar lain dalam air sungai yang mungkin tidak terukur dalam parameter ini. Hal ini wajar karena air limbah sungai biasanya mengandung banyak senyawa kompleks, baik organik maupun anorganik, yang bisa saling berinteraksi dan mempengaruhi respons biologis organisme uji. Dengan demikian, parameter Cd bisa menjadi salah satu indikasi awal tentang potensi pencemaran, tetapi untuk menyimpulkan hubungan langsung dengan toksisitas, diperlukan pengujian tambahan terhadap parameter lain serta pengamatan lebih mendalam terhadap mekanisme kerja masing-masing senyawa dalam lingkungan perairan.



Gambar 4. 24 Grafik (%) Koagulasi dan Parameter Kadmium

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisa yang telah dilakukan dalam penelitian air Sungai Citarum diperoleh kesimpulan:

1. Hasil uji toksisitas menggunakan metode Fish Embryo Toxicity (FET), air Sungai Citarum menunjukkan adanya efek toksik terhadap embrio ikan zebra (*Danio rerio*). Tingkat toksisitas tertinggi terdeteksi pada sampel 1, bahkan pada konsentrasi terendah (6,25%), dengan indikasi koagulasi sebagai parameter utama. Hal ini menunjukkan bahwa air di titik tersebut mengandung zat beracun yang dapat mengganggu perkembangan embrio ikan, sehingga mencerminkan tingkat pencemaran yang berdampak secara biologis.
2. Hasil uji parameter kimia menunjukkan bahwa kadar COD dan kadmium pada beberapa sampel telah melebihi ambang batas baku mutu sesuai PP No. 22 Tahun 2021 Lampiran VI. Sementara itu, kadar sulfat dan kromium heksavalen masih berada dalam batas aman. Hal ini mengindikasikan adanya pencemaran organik dan logam berat di beberapa titik Sungai Citarum, yang berpotensi membahayakan kualitas ekosistem perairan..

5.2 Saran

1. Melakukan penelitian lanjutan dengan toksikan dan hewan uji yang sama, tetapi dengan rentang konsentrasi berbeda yang bertujuan untuk mengetahui potensi bahaya toksikan di lingkungan.
2. Melakukan pengamatan lebih awal pada jam 0 sampai 12 jam pertama untuk melihat awal terjadinya koagulasi pada embrio ikan.
3. Melakukan perhitungan detak jantung pada embrio ikan, untuk mengetahui larva ikan normal atau terjadinya kelainan.

DAFTAR PUSTAKA

- Altertox, F. B., Braunbeck, T., & Lillicrap, A. (2013). *Oecd guidelines for the testing of chemicals 236-Fish Embryo Acute Toxicity (FET) Test*. <https://www.researchgate.net/publication/255968359>
- Asdak C. 2014. Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai. Yogyakarta (ID): Gadjah Mada University Press.
- Balai Besar Wilayah Sungai Citarum. *Profil BBWS Citarum*. Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, Kementerian PUPR.
- Bourhia, M., Lahmadi, A., Ahtak, H., Touis, A., Elbrahmi, J., Ullah, R., Shahat, A. a., Mahmood, H. M., Aboudkhal, S., Benbacer, L., & Khilil, N. (2019). Phytochemical analysis and toxicity study of aristolochia paucinervis rhizomes decoction used in moroccan alternative medicine: Histopathological and biochemical profiles. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2019.
- Eanhard, D. 2013. Water Pollution from Industrial Source. *Encyclopedia of Energy, Natural Resource and Environmental Economics*
- Fardiaz. (1992). *Polusi Air dan Udara*. Yogyakarta : Kanisius .
- Harper, C., & Christian, L. (2011). *The Laboratory Zebrafish*.
- Khan, Z., Elahi, A., Bukhari, D.A., Rehman, A. (2022). Cadmium sources, toxicity, resistance and removal by microorganisms- Apotential strategy for cadmium eradication. *Journal of Saudi Chemical Society*, 26(6), 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2022.101569>
- Lourenço, J., Marques, S., Carvalho, F. P., Oliveira, J., Malta, M., Santos, M., Gonçalves, F., Pereira, R., & Mendo, S. (2017). Uranium mining wastes: The use of the Fish Embryo Acute Toxicity Test (FET) test to evaluate toxicity and risk of environmental discharge. *Science of the Total Environment*, 605–606, 391–404. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.125>
- MacRae, C.A & Peterson, R. T., 2015. Zebrafish as Tools for Drug Diccovery. *Nature Reviews*, Volume 14, pp. 721-731.
- Mamoribo H, Rompas RJ, dan Kalesaran OJ, 2019. Determinasi Kandungan Kadmium (Cd) di Perairan Pantai Malalayang Sekitar Rumah Sakit Prof. Kandou Manado. *E-journal Budidaya Perairan*; 3(1).
- Masere, T.P., Munodawafa, A. and Chitata, T. 2012. “Assessment of human impact on water quality along Manyame River”, *International Journal of Development and Sustainability*.1(3):754-765.
- Najihah, N., & Rachmadiarti, F. (2023). Analisis Kadar Logam Berat Kadmium (Cd) pada Tumbuhan Air di Sungai Brantas Kota Mojokerto. *LenteraBio: Berkala Ilmiah Biologi*, 12(2), 239-247.
- Palar, H., 2008. *Pollution and toxicology of heavy metals*. Rineka Cipta, Jakarta.
- Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup
- Patang, 2018. *Dampak Logam Berat Kadmium pada Perairan*. Badan Penerbit UNM
- Putuhena, W. M., et al. (2018). *Restorasi Citarum Hulu: Mewujudkan Sungai Citarum yang Sehat untuk Kesejahteraan Masyarakat* (R. W. Triweko, Ed.). ITB Press.

- Riaz, B., Zahoor, M. K., Zahoor, M. A., Majeed, H. N., Javed, I., Ahmad, A., Jabeen, F., Zulhussnain, M., & Sultana, K. (2018). Toxicity, Phytochemical Composition, and Enzyme Inhibitory Activities of Some Indigenous Weed Plant Extracts in Fruit Fly, *Drosophila melanogaster*. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/2325659>
- Ribatti, D., 2018, The Zebrafish : In Vivo Models to Study Angiogenesis. In *In Vivo Models to Study Angiogenesis*. s.l.:Elsevier, pp 75-88
- Ridwan, E., 2013. Etika Pemanfaatan Hewan Percobaan dalam Penelitian Kesehatan. *J Idon Med Assoc* , 63(3), pp. 112-116
- Satuan Tugas Pengendalian Pencemaran dan Kerusakan DAS Citarum. (2019). *Action plan for controlling pollution and damage in the Citarum watershed 2019–2025*. Bandung: Government of West Java Province.
- Sugianto, G., Agustini, M., & Wirawan, I. (2025). Pengaruh Penggunaan Probiotik Mina Pro Dosis yang Berbeda terhadap Pertumbuhan Berat Mutlak Benih Lele Mutiara (*Clarias gariepinus*) Ukuran 5-7 cm di Bak Pemeliharaan. *Zebra: Jurnal Ilmu Peternakan dan Ilmu Hewani*, 3(1), 33-44.
- Utami, N., 2018 Zebrafish (*Danio rerio*) sebagai Hewan Model Diabetes Mellitus. *BioTreds*, 9(1), pp. 15-1
- Wang, W., Ye, Y., Liu, Y., Sun, H., Gao, C., Fu, X., & Li, T. (2024). Induction of oxidative stress and cardiac developmental toxicity in zebrafish embryos by arsenate at environmentally relevant concentrations. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 280. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116529>
- Wiegand, J., Avila-Barnard, S., Nemarugommula, C., Lyons, D., Zhang, S., Stapleton, H. M., & Volz, D. C. (2023). Triphenyl phosphate-induced pericardial edema in zebrafish embryos is dependent on the ionic strength of exposure media. *Environment international*, 172, 107757.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Perhitungan Konsentrasi Sampel

- Konsentrasi 100% dalam 50 mL

$$\begin{aligned}\text{Sampel} &= 100\% \times 50 \text{ mL} \\ &= 50 \text{ mL}\end{aligned}$$

- Konsentrasi 50% dalam 50 mL

$$\begin{aligned}\text{Sampel} &= 50\% \times 50 \text{ mL} \\ &= 25 \text{ mL}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Pengenceran (Aquades Steril)} &= 50 \text{ mL} - 25 \text{ mL} \\ &= 25 \text{ mL}\end{aligned}$$

Jadi, konsentrasi 50% adalah 25 mL Sampel + 25 mL Aquades Steril

- Konsentrasi 25% dalam 50 mL

$$\begin{aligned}\text{Sampel} &= 25\% \times 50 \text{ mL} \\ &= 12,5 \text{ mL}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Pengenceran (Aquades Steril)} &= 50 \text{ mL} - 12,5 \text{ mL} \\ &= 37,5 \text{ mL}\end{aligned}$$

Jadi, konsentrasi 50% adalah 12,5 mL Sampel + 37,5 mL Aquades Steril

- Konsentrasi 12,5% dalam 50 mL

$$\begin{aligned}\text{Sampel} &= 12,5\% \times 50 \text{ mL} \\ &= 6,25 \text{ mL}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Pengenceran (Aquades Steril)} &= 50 \text{ mL} - 6,25 \text{ mL} \\ &= 43,75 \text{ mL}\end{aligned}$$

Jadi, konsentrasi 50% adalah 6,25 mL Sampel + 43,75 mL Aquades Steril

- Konsentrasi 6,25% dalam 50 mL

$$\begin{aligned}\text{Sampel} &= 6,25\% \times 50 \text{ mL} \\ &= 3,125 \text{ mL}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Pengenceran (Aquades Steril)} &= 50 \text{ mL} - 3,125 \text{ mL} \\ &= 46,875 \text{ mL}\end{aligned}$$

Jadi, konsentrasi 50% adalah 3,125 mL Sampel + 46,875 mL Aquades Steril

Lampiran 2 Hasil Pengamatan Embrio *Zebrafish*

a) Sampel 1

Konsentrasi 100%

Sampel		Parameter Pengamatan															
100%	Nomor Embrio	Koagulasi				Pembentukan Somite				Pelepasan Tail-bud				Detak Jantung			
		24	48	72	96	24	48	72	96	24	48	72	96	24	48	72	96
	1					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	2					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	3					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	4					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	5					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	6					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	7					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	8					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	9					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	10	+	+	+	+												
	11					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	12					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	13					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	14					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	15					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	16					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	17					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	18					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	19					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	20					+	+	+	+	+	+	+	+				+

Konsentrasi 50%

Sampel		Parameter Pengamatan															
50%	Nomor Embrio	Koagulasi				Pembentukan Somite				Pelepasan Tail-bud				Detak Jantung			
		24	48	72	96	24	48	72	96	24	48	72	96	24	48	72	96
	1					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	2					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	3					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	4					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	5					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	6					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	7					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	8					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	9	+	+	+	+												
	10					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	11					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	12					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	13					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	14	+	+	+	+												
	15					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	16					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	17					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	18					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	19					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	20					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+

Konsentrasi 25%

Sampel		Parameter Pengamatan															
25%	Nomor Embrio	Koagulasi				Pembentukan Somite				Pelepasan Tail-bud				Detak Jantung			
		24	48	72	96	24	48	72	96	24	48	72	96	24	48	72	96
	1	+	+	+	+												
	2					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	3					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	4					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	5					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	6					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	7					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	8					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	9					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	10					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	11	+	+	+	+												
	12					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	13					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	14					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	15					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	16					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	17					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	18					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	19	+	+	+	+												
	20					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+

Konsentrasi 12,5%

Sampel		Parameter Pengamatan															
12,5%	Nomor Embrio	Koagulasi				Pembentukan Somite				Pelepasan Tail-bud				Detak Jantung			
		24	48	72	96	24	48	72	96	24	48	72	96	24	48	72	96
	1					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	2					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	3					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	4					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	5					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	6					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	7					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	8					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	9					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	10					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	11					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	12					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	13	+	+	+	+												
	14					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	15					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	16					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	17					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	18					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	19	+	+	+	+												
	20	+	+	+	+												

Konsentrasi 6,25%

Sampel		Parameter Pengamatan															
Nomor Embrio		Koagulasi				Pembentukan Somite				Pelepasan Tail-bud				Detak Jantung			
		24	48	72	96	24	48	72	96	24	48	72	96	24	48	72	96
6,25%	1					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	2					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	3					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	4					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	5					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	6					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	7	+	+	+	+												
	8	+	+	+	+												
	9	+	+	+	+												
	10					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	11					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	12					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	13					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	14					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	15					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	16					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	17	+	+	+	+												
	18					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	19					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	20	+	+	+	+												

b. Sampel 2

Konsentrasi 100%

Sampel		Parameter Pengamatan															
100%	Nomor Embrio	Koagulasi				Pembentukan Somite				Pelepasan Tail-bud				Detak Jantung			
		24	48	72	96	24	48	72	96	24	48	72	96	24	48	72	96
	1					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	2					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	3					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	4					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	5					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	6					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	7					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	8					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	9					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	10					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	11					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	12					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	13					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	14					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	15					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	16					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	17					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	18					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	19					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	20					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+

Konsentrasi 50%

Sampel		Parameter Pengamatan															
50%	Nomor Embrio	Koagulasi				Pembentukan Somite				Pelepasan Tail-bud				Detak Jantung			
		24	48	72	96	24	48	72	96	24	48	72	96	24	48	72	96
	1	+	+	+	+												
	2	+	+	+	+												
	3					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	4	+	+	+	+												
	5					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	6					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	7					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	8					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	9					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	10					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	11					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	12					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	13					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	14					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	15					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	16					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	17					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	18					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	19					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	20					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+

Konsentrasi 25%

Sampel		Parameter Pengamatan															
25%	Nomor Embrio	Koagulasi				Pembentukan Somite				Pelepasan Tail-bud				Detak Jantung			
		24	48	72	96	24	48	72	96	24	48	72	96	24	48	72	96
	1					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	2					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	3	+	+	+	+												
	4					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	5					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	6					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	7					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	8					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	9					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	10					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	11					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	12					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	13					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	14					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	15					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	16					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	17					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	18					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	19					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	20					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+

Konsentrasi 12,5%

Sampel		Parameter Pengamatan															
12,5%	Nomor Embrio	Koagulasi				Pembentukan Somite				Pelepasan Tail-bud				Detak Jantung			
		24	48	72	96	24	48	72	96	24	48	72	96	24	48	72	96
	1	+	+	+	+												
	2					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	3	+	+	+	+												
	4					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	5					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	6					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	7					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	8					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	9					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	10					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	11					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	12					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	13					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	14					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	15					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	16					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	17					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	18					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	19					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	20					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+

Konsentrasi 6,25%

Sampel		Parameter Pengamatan																
Nomor Embrio	Koagulasi	Pembentukan Somite				Pelepasan Tail-bud				Detak Jantung								
		24	48	72	96	24	48	72	96	24	48	72	96	24	48	72	96	
6,25%	1					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	
	2					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	
	3					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	
	4					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	
	5					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	
	6					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	
	7					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	
	8					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	
	9					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	
	10	+	+	+	+													
	11					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	
	12					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	
	13					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	
	14					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	
	15					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	
	16					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	
	17					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	
	18					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	
	19					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	
	20					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	

c. Sampel 3
Konsentrasi 100%

Sampel		Parameter Pengamatan															
100%	Nomor Embrio	Koagulasi				Pembentukan Somite				Pelepasan Tail-bud				Detak Jantung			
		24	48	72	96	24	48	72	96	24	48	72	96	24	48	72	96
	1					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	2					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	3					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	4					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	5					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	6					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	7					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	8					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	9					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	10					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	11					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	12					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	13					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	14					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	15					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	16					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	17					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	18					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	19					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	20					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+

Konsentrasi 50%

Sampel		Parameter Pengamatan															
50%	Nomor Embrio	Koagulasi				Pembentukan Somite				Pelepasan Tail-bud				Detak Jantung			
		24	48	72	96	24	48	72	96	24	48	72	96	24	48	72	96
	1	+	+	+	+												
	2					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	3					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	4					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	5					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	6	+	+	+	+												
	7	+	+	+	+												
	8					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	9					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	10					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	11					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	12					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	13					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	14					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	15					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	16					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	17					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	18					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	19					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	20					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+

Konsentrasi 25%

Sampel		Parameter Pengamatan															
25%	Nomor Embrio	Koagulasi				Pembentukan Somite				Pelepasan Tail-bud				Detak Jantung			
		24	48	72	96	24	48	72	96	24	48	72	96	24	48	72	96
	1					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	2					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	3					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	4	+	+	+	+												
	5					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	6					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	7					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	8					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	9					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	10					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	11					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	12					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	13					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	14					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	15					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	16					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	17					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	18					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	19					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	20					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+

Konsentrasi 12,5%

Sampel		Parameter Pengamatan															
12,5%	Nomor Embrio	Koagulasi				Pembentukan Somite				Pelepasan Tail-bud				Detak Jantung			
		24	48	72	96	24	48	72	96	24	48	72	96	24	48	72	96
	1					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	2					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	3					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
	4					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	5					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	6					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	7					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	8					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	9					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	10					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	11	+	+	+	+												
	12	+	+	+	+												
	13					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	14					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	15					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	16					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	17					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	18					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	19					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
	20					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+

Konsentrasi 6,25%

Sampel		Parameter Pengamatan																
Nomor Embrio		Koagulasi				Pembentukan Somite				Pelepasan Tail-bud				Detak Jantung				
		24	48	72	96	24	48	72	96	24	48	72	96	24	48	72	96	
6,25%	1					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	
	2					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	
	3					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	
	4					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	
	5					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	
	6	+	+	+	+													
	7					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	
	8					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	
	9					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	
	10					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	
	11					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	
	12	+	+	+	+													
	13					+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	
	14					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	
	15					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	
	16					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	
	17					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	
	18					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	
	19					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	
	20					+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	

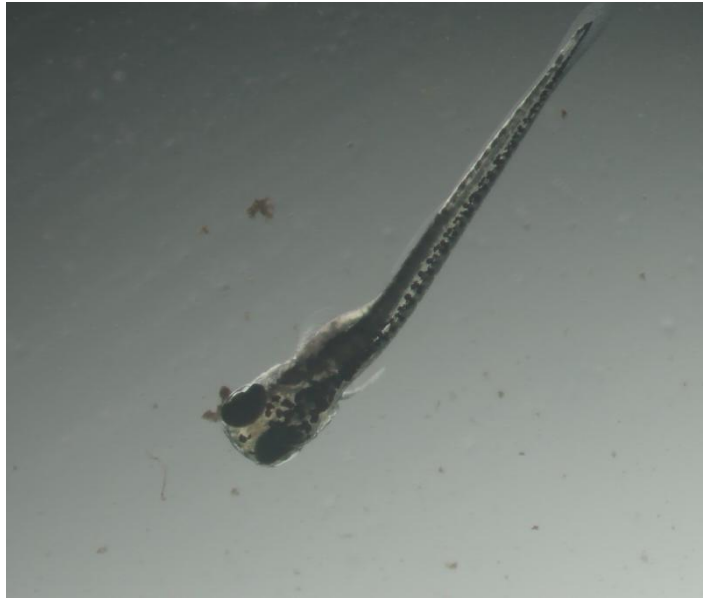
LAMPIRAN



Abnormal Tail (*Lordosis*) pada sampel 1 konsentrasi 25%



Abnormal Tail (*Scoliosis*) pada sampel 2 konsentrasi 6,25%



Abnormal Tail (*Scoliosis*) pada sampel 1 konsentrasi 100%

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Kanza Kania Chairunisa Hamdani, lahir pada tanggal 17 Juli 2002 di Duri, Provinsi Riau. Penulis merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara, putri dari pasangan Hamdan dan Roja Seli. Pendidikan formal dimulai dari Taman Kanak-Kanak (TK) Cendana Mandau pada tahun 2008 hingga 2010, dilanjutkan dengan Sekolah Dasar di SDS Cendana Mandau (2010–2014). Penulis kemudian menempuh pendidikan tingkat menengah pertama di SMP Cendana Mandau (2014–2017), dan menyelesaikan pendidikan menengah atas di SMAN 2 Mandau pada tahun 2020. Kemudian penulis melanjutkan studi pada jenjang S1 di Fakultas Teknik Sipil dan Perencana dengan Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia (2021-2025). Selama menjadi mahasiswa, penulis melibatkan diri pada beberapa kegiatan di jurusan. Kegiatan yang diikuti yaitu menjadi anggota divisi acara pada Kegiatan Olahraga Jurusan Tahun 2022, menjadi anggota divisi wali jamaah pada Kegiatan Malam Keakraban Jurusan Tahun 2022, dan menjadi Steering Comite divisi acara pada Kegiatan Olahraga Jurusan Tahun 2023.