

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

II.1. Kualitas Air

Air merupakan zat vital untuk kelangsungan hidup yang memainkan peranan kunci dalam setiap proses biologi, terlepas dari perkembangan sosial ekonomi suatu negara perkembangannya sebagian besar tergantung dari ketersediaan air dengan kualitas baik (Malik & Shukla, 2019). Menurut Peraturan Pemerintah no. 82 tahun 2001 pengertian air adalah semua air yang terdapat di atas dan di bawah permukaan tanah, kecuali air laut dan air fosil. Kualitas air menggambarkan tingkat kesesuaian atau kecocokan air untuk penggunaan tertentu, misalnya air minum, perikanan, pengairan / irigasi, rekreasi, dan sebagainya. Kualitas air menentukan kegunaan dari air tersebut, kegunaan air menurut kelasnya telah diatur dalam Peraturan Pemerintah no. 82 tahun 2001 yaitu :

Tabel 1. Kelas air menurut peruntukannya

Kelas 1	: Air yang dapat digunakan untuk bahan baku air minum atau peruntukan lainnya mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut
Kelas 2	: Air yang dapat digunakan untuk prasarana/ sarana rekreasi air, budidaya ikan air tawar, peternakan, air untuk mengairi pertanaman, dan/atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut
Kelas 3	: Air yang peruntukannya dapat digunakan untuk budidaya ikan air tawar, peternakan, air untuk mengairi pertanaman, dan/atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu yang sama dengan kegunaan tersebut
Kelas 4	: Air yang dapat digunakan untuk mengairi pertanaman pertanian dan/atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut

Sekolah Pascasarjana

Peraturan Pemerintah no. 82 tahun 2001 telah mengatur baku mutu air sesuai dengan kelas air seperti terlihat pada tabel 3:

Tabel 2. Baku Mutu Air Sesuai Kelas Air

Parameter	Satuan	Kelas				Keterangan
		I	II	III	IV	
FISIKA						
Temperatur	°C	Deviasi 3	Deviasi 3	Deviasi 3	Deviasi 5	Deviasi temperature dari keadaan alamiah
Residu Terlarut	mg/L	1000	1000	1000	5000	
Residu Tersuspensi	mg/L	50	50	400	400	Bagi pengolahan air minum secara konvensional residu ≤ 5000 mg/L
KIMIA ORGANIK						
pH		6-9	6-9	6-9	5-9	Apabila secara alamiah di luar rentang tersebut, maka ditentukan berdasarkan kondisi alamiah
BOD	mg/L	2	3	6	12	
COD	mg/L	10	25	50	100	
DO	mg/L	6	4	3	0	Angka batas minimum
Total Fosfat sebagai P	mg/L	0,2	0,2	1	5	
NO ₃ sebagai N	mg/L	10	10	20	20	
NH ₃ -N	mg/L	0,5	(-)	(-)	(-)	Bagi perikanan, kandungan ammonia bebas untuk ikan yang peka $\leq 0,02$ mg/L sebagai NH ₃
Arsen	mg/L	0,05	1	1	1	
Kobalt	mg/L	0,2	0,2	0,2	0,2	
Barium	mg/L	1	(-)	(-)	(-)	
Boron	mg/L	1	1	1	1	
Selenium	mg/L	0,01	0,05	0,05	0,05	
Kadmium	mg/L	0,01	0,01	0,01	0,01	
Khrom (IV)	mg/L	0,05	0,05	0,05	0,01	
Tembaga	mg/L	0,02	0,02	0,02	0,2	Bagi pengolahan air minum secara konvensional, Cu ≤ 1 mg/L
Besi	mg/L	0,3	(-)	(-)	(-)	Bagi pengolahan air minum secara konvensional, Fe ≤ 5 mg/L

Timbal	mg/L	0,03	0,03	0,03	1	Bagi pengolahan air minum secara konvensional, Pb≤0,1 mg/L
Mangan	mg/L	1	(-)	(-)	(-)	
Air Raksa	mg/L	0,001	0,002	0,002	0,005	
Seng	mg/L	0,05	0,05	0,05	2	Bagi pengolahan air minum secara konvensional, Zn≤5 mg/L
Khlorida	mg/L	1	(-)	(-)	(-)	
Sianida	mg/L	0,02	0,02	0,02	(-)	
Fluorida	mg/L	0,5	1,5	1,5	(-)	
Nitrit sebagai N	mg/L	0,06	0,06	0,06	(-)	Bagi pengolahan air minum secara konvensional, NO ₂ -N≤1 mg/L
Sulfat	mg/L	400	(-)	(-)	(-)	
Khlorin bebas	mg/L	0,03	0,03	0,03	(-)	Bagi ABAM tidak dipersyaratkan
Belerang sebagai H ₂ S	mg/L	0,002	0,002	0,002	(-)	
MIKROBIOLOGI						
Fecal coliform	Jml/100ml	100	1000	2000	2000	Bagi pengolahan air minum secara konvensional, fecal coliform ≤2000 jml/100ml dan total coliform ≤10000 jml/100ml
Total Coliform	Jml/100ml	1000	5000	10000	10000	
RADIOAKTIVITAS						
Gross-A	bg/L	0,1	0,1	0,1	0,1	
Gross-B	bg/L	1	1	1	1	
KIMIA ORGANIK						
Minyak dan Lemak	ug/L	1000	1000	1000	(-)	
Detergen sebagai MBAS	ug/L	200	200	200	(-)	
Senyawa Fenol	ug/L	1	1	1	(-)	
Sebagai Fenol	ug/L					
BHC	ug/L	210	210	210	(-)	
Aldrin/Dieldrin	ug/L	17	(-)	(-)	(-)	
Chlordane	ug/L	3	(-)	(-)	(-)	
DDT	ug/L	2	2	2	2	

Heptachlor	ug/L	18	(-)	(-)	(-)
Heptachlor epoxide	ug/L				
Lindane	ug/L	56	(-)	(-)	(-)
Methoxyctor	ug/L	35	(-)	(-)	(-)
Endrin	ug/L	1	4	4	(-)
Toxaphan	ug/L	5	(-)	(-)	(-)

Sumber : Peraturan Pemerintah no. 82 tahun 2001

II.2. Pencemaran Air

Menurut Undang-Undang no. 32 tahun 2009 pengertian pencemaran lingkungan hidup adalah masuk atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energi, dan/atau komponen lain ke dalam lingkungan hidup oleh kegiatan manusia sehingga melampaui baku mutu lingkungan hidup yang telah ditetapkan. Pencemaran air menurut Peraturan Pemerintah No. 82 tahun 2001 adalah masuknya atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energi dan/atau komponen lain ke dalam air oleh kegiatan manusia, sehingga kualitas air turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan air tidak dapat berfungsi sesuai dengan peruntukannya.

Pencemaran air tawar menjadi masalah penting di negara-negara dengan pendapatan rendah sampai menengah, dimana air sungai yang tidak diolah dikonsumsi untuk kebutuhan sehari-hari, hal ini terjadi karena kurangnya akses ke sumber air bersih dan kurangnya penegakan hukum terhadap industri-industri yang membuang air limbah ke sungai (Garg *et al*, 2018). Kegiatan manusia (antropogenik) dan proses alami menjadi penyebab penurunan kualitas air permukaan, sehingga sudah tidak dapat digunakan sesuai dengan peruntukannya lagi (Şener *et al*, 2017).

Garg *et al* (2018) telah melakukan penelitian tentang pencemaran sungai di Indonesia dan dampaknya terhadap kesehatan masyarakat : Indonesia telah membuat kemajuan dalam peraturan lingkungan dengan dibuatnya Undang-Undang no. 32 tahun 2009 dalam peraturan tersebut telah diakui bahwa di Indonesia telah terjadi penurunan kualitas lingkungan yang serius, dalam peraturan tersebut juga telah dirancang tindakan-tindakan yang dapat dilakukan untuk mengurangi emisi dan polusi lainnya. Terlepas dari aturan yang telah dibuat dan penegakan hukum yang dilakukan, kualitas sumber air di Indonesia tetap rendah, bahkan penelitian yang dilakukan oleh KLH di 35 sungai di Indonesia merupakan sumber air minum

yang tidak sehat. Sumber pencemaran air yang belum diatur di Indonesia adalah buangan air limbah rumah tangga dan kota, limbah rumah tangga setiap hari langsung dibuang ke sungai sedangkan limbah air dari perko masih banyak yang belum diolah dan langsung dibuang ke sungai. Secara umum pencemaran air di Indonesia berasal dari limbah cair industri dan limpasan pertanian, pencemaran dari industri menyebabkan masuknya logam berat dan merkuri ke sumber air. Peraturan pencemaran air di Indonesia sering kali tidak diberlakukan untuk industri kecil dan rumah tangga.

Pencemaran air dapat terjadi dari 2 sumber pencemar yaitu *non point source* (NPS) dan *point source* (PS). *Point Source* adalah pencemar yang sumbernya dapat diidentifikasi secara langsung contohnya pipa dari pembuangan limbah pabrik dan tumpahan minyak dari kapal. Limbah cair yang berasal dari perkotaan dan industri serta air limbah dari saluran drainase termasuk dalam *point source*. *Non point source* (NPS) adalah limbah yang masuk ke air tanah atau air permukaan dari sumber yang tidak dapat diidentifikasi. Contoh dari NPS adalah limpasan dari pertanian, limbah kota, dll. Terkadang polusi yang masuk ke lingkungan di suatu tempat berdampak ratusan atau bahkan ribuan mil jauhannya, ini dikenal sebagai polusi lintas batas (*trans boundary*). Polutan pada perairan dapat berupa organik dan anorganik (Singh, 2017).

Menurut Singh (2017) polutan organik di air terdiri dari insektisida dan herbisida, organohalida dan bentuk bahan kimia lainnya, bakteri dari kotoran ternak dan pertanian, limbah pengolahan makanan, pathogen, senyawa organik yang mudah menguap, dll. Sedangkan polutan anorganik di air timbul dari logam berat dari drainase tambang, limbah kimia dari industri, penebangan dan pembakaran lahan, pupuk dari limpasan pertanian yang meliputi nitrat dan fosfat. Karakteristik sumber pencemar baik *point sources* maupun *non point sources* seperti terlihat pada tabel 4.

Tabel 3. Karakteristik Sumber Pencemar *Point Source* dan *Non Point Source*

<i>Point Source</i>	<i>Non Point Source</i>
- Effluent limbah cair (perkotaan dan industri)	- Limpasan dari pertanian
- Limpasan dan lindi dari lokasi pembuangan limbah	- Limpasan dari padang rumput dan perkebunan
- Limpasan dan infiltrasi dari tempat pemberian pakan ternak	- Limpasan dari limbah perkotaan baik limbah cair maupun sampah dengan jumlah penduduk < 100.000
	- Lindi dari septic tank

-
- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none">- Limpasan dari tambang, tempat penyimpanan minyak, dan industri yang tidak menghasilkan limbah cair- Outfall dari saluran drainase kota dengan jumlah penduduk > 100.000- Luapan dari saluran drainase dan saluran sanitari- Limpasan dari lokasi konstruksi > 2Ha | <ul style="list-style-type: none">- Limpasan dari lokasi konstruksi- Limpasan dari lokasi bekas tambang- Deposisi dari atmosfer ke air permukaan- Aktivitas di darat yang menghasilkan kontaminan seperti penebangan kayu, alih fungsi lahan, pembangunan, dll. |
|--|--|
-

Sumber : (Singh, 2017)

Penelitian Bu *et al* (2011) menunjukkan bahwa aktivitas manusia di DAS yang berupa kegiatan pertanian, aktivitas industri berupa pencetakan dan pencelupan tekstil, industri kertas, pertambangan, dan limbah domestik menyebabkan terjadinya eutrofikasi ekosistem pesisir. Populasi penduduk juga berpengaruh langsung terhadap kualitas air sungai, tingginya jumlah penduduk memiliki korelasi terhadap penurunan kualitas air sungai (parameter : TDS, COD, Cl, K, Na, NH₃-N, PO₄-P, Total Fosfat dan Total Fosfat terlarut), tingginya pertumbuhan penduduk menyebabkan area vegetasi dan lahan basah dikonversi menjadi pemukiman, industri dan lahan pertanian, solusinya adalah dengan desentralisasi penduduk di perkotaan. Aktivitas pertanian juga memiliki korelasi terhadap pencemaran sungai, penggunaan pupuk dan pestisida memiliki korelasi dengan peningkatan jumlah N di dalam air sungai, penggunaan pupuk hanya sekitar 30-35% yang terserap oleh tanaman dan sisanya terbawa air limpasan, pupuk dan pestisida yang terbawa air limpasan ke sungai menyebabkan penurunan kualitas air sungai, eutrofikasi, penurunan keanekaragaman hayati sungai, dan dampak yang terburuk adalah zat kimia dari pupuk dan pestisida akan terakumulasi dalam rantai makanan yang sangat berbahaya bagi kesehatan manusia dan ekosistem sungai. Limbah cair domestik dan limbah cair industri menjadi penyebab utama pencemaran air sungai, solusi untuk hal ini adalah dengan membuat pengolahan limbah domestik di pemukiman sepanjang daerah aliran sungai dan meningkatkan efisiensi pengolahan air limbah industri.

Faktor emisi limbah dari pemukiman sesuai dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup no. 01 tahun 2010 seperti terlihat pada tabel 5 :

Tabel 4. Faktor Emisi Limbah dari Sumber Pencemar Pemukiman

Sumber Pencemar	Faktor Emisi (gr/kapita/hari)			
	BOD	COD	TN	TP
Pemukiman				
a. Limbah cair tanpa diolah	53	101,6	22,7	3,8
b. Pakai septic tank	12,6	24,2	5,4	0,9

Sumber : Permen LH no. 01 tahun 2010

Baherem (2014) menyebutkan bahwa kapasitas air limbah domestik diperlukan untuk mengetahui sumbangan air limbah domestik terhadap pencemaran sungai, jika tidak tersedia data tentang kapasitas air limbah domestik maka dapat dilakukan perkiraan bahwa kapasitas limbah domestik adalah sebesar 150-380 liter/orang/hari. Menurut Tchobanoglus, volume air limbah dapat diperkirakan dari jumlah total penggunaan air bersih, air limbah diperkirakan sekitar 60-75% dari penggunaan air bersih, dimana penggunaan air bersih untuk keperluan rumah tangga sekitar 100 L/orang/hari. Komposisi air limbah domestik terdiri dari air dan partikel padat terlarut yang berupa protein, karbohidrat, lemak dan zat anorganik, 70% zat terlarut merupakan bahan organik, keberadaan senyawa organik di dalam air dapat diketahui dengan parameter BOD, COD, TOC dan ThOD.

Sumber pencemar air sungai selain dari limbah domestik juga dari kegiatan pertanian. Sumber pencemar dari kegiatan pertanian berasal dari sisa pemakaian pupuk dan jerami, pupuk yang digunakan setiap Ha sawah terdiri dari 200 kg Nitrogen, 100 kg Phospor, dan 100 kg Kalium, sedangkan pestisida yang digunakan setiap Ha sawah adalah sebesar 2 L. Pupuk yang digunakan pada kegiatan pertanian hanya 80% yang terserap oleh tanaman, 20% akan ikut terbawa aliran terutama saat musim hujan. Setiap Ha sawah akan menghasilkan 3 ton jerami yang menghasilkan 30 kg emisi BOD dan sebanyak 20% dari emisi tersebut akan terbawa aliran air (Kartika, 2012).

Sekolah Pascasarjana

Besarnya emisi kegiatan pertanian untuk setiap hektar lahan adalah sebagai berikut :

Tabel 5. Emisi dari Kegiatan Pertanian

Jenis Pertanian	Emisi Limbah Pertanian				
	BOD	N	P	TSS	Pestisida
	Kg/Ha/Musim			Lt/Ha/Musim	
Sawah	225	20	10	0,4	0,16
Palawija	125	10	5	2,4	0,08
Perkebunan lain	32,5	3	1,5	1,6	0,024

Sumber : Iskandar, 2007

Parameter COD dihitung $1,5 \times \text{BOD}$, pertanian yang menggunakan pengairan lebih tinggi menghasilkan beban pencemaran yang lebih tinggi karena genangan air menyebabkan pembusukan bahan organik lebih tinggi (Ardhani, 2014).

Crabit *et al* (2016) melakukan penelitian di Guadeloupe terkait kontaminasi tanah dan sungai oleh Chlordecone (CLD) yaitu bahan yang digunakan untuk pestisida dan insektisida. CLD merupakan bahan yang telah dilarang digunakan sesuai dengan konvensi Stockholm, namun masih sering digunakan secara ilegal. Dalam penelitian tersebut disebutkan bahwa daerah yang menunjukkan kontaminasi CLD tinggi berada di daerah yang dulunya digunakan untuk pertanian besar. Konsentrasi CLD yang masuk ke tanah dan air tanah dipengaruhi oleh jenis tanah, jenis tanah andosol lebih besar konsentrasi CLD dibanding tanah nitisol. Sedangkan konsentrasi CLD yang masuk ke sungai dipengaruhi musim, konsentrasi CLD pada musim kemarau lebih tinggi dibanding saat musim hujan, karena polutan yang masuk ke sungai dari area hilir akan diencerkan oleh air yang mengalir dari bagian hulu. Pencemaran tanah dan air tanah juga berkontribusi terhadap pencemaran air sungai, pencemaran sungai oleh CLD terbesar terjadi pada daerah aliran sungai yang jenis tanahnya andosol.

Beban pencemaran peternakan merupakan hasil kali jumlah hewan dengan emisinya (Yusuf & Priade, 2014). Setiap jenis ternak akan menghasilkan beban pencemaran yang berbeda, semakin besar ukuran ternak maka akan menghasilkan beban pencemaran yang semakin besar Emisi dari peternakan ditunjukkan pada tabel 7.

Tabel 6. Emisi dari Peternakan

Jenis Ternak	Emisi hewan ternak (mg/ekor/hari)							
	BOD	COD	TN	TP	NO ₂	NO ₃	NH ₄	N-org
Ayam buras	1.028	2.337	0,841	1,32	tt	0,479	0,247	0,116
Ayam ras pedaging	1.718	4.062	1,09	1,71	tt	0,62	0,31	0,16
Ayam ras petelur	2.335	5.913	1,073	1,682	tt	0,609	0,305	0,16
Angsa	2.737	7.428	140	6,886	0,209	3,008	134,6	2,139
Bebek-entog	2.056	5.192	2,87	12,39	tt	1,365	0,753	0,753
Bebek	1.525	3.697	1,742	7,452	tt	0,824	0,459	0,459
Kambing	7.100	15.950	328	24	0,55	15,5	306	5,5
Domba	9.550	21.750	210	10,5	tt	5,5	199	4,5
Kuda	24.400	60.400	415	33	tt	9,5	380	25
Babi	71.050	202.600	630	98	2,05	21,5	530	74
Sapi pekerja	120.805	292.485	170	28	tt	33,3	111	25,9
Sapi potong	172.050	416.250	242	41	tt	48,1	159	37
Sapi perah	163.725	447.330	272	44	tt	64,75	172	48,1
Kerbau	40.700	104.155	511	76	2,035	35,15	435	40,7

Sumber : Yusuf & Priade, 2014

Limbah-limbah yang dihasilkan dari kegiatan-kegiatan manusia adalah sebagai berikut:

Tabel 7. Limbah dari Kegiatan Manusia

No	Jenis Kegiatan	Limbah
1.	Industri pangan	BOD, COD, TOC, TOD, pH, suspend solid, minyak dan lemak, logam berat, sianida, klorida, amoniak, nitrat, fosfor dan fenol.
2.	Industri minuman	BOD, pH, suspended solid, settleable solid, TDS, minyak dan lemak, wana, jumlah coli, bahan beracun, suhu, kekeruhan dan buih
3.	Industri makanan	BOD, COD, TOC, pH, minyak dan lemak, logam berat, nitrat, fosfor dan fenol

4.	Industri percetakan	BOD, COD, TOC, total solid, suspended solid, TDS, minyak dan lemak, logam berat, amoniak, sulfat, nitrat, fosfor, warna, jumlah coli, coli feces, bahan beracun, suhu, kekeruhan, klorinated benzenoid
5.	Perkayuan dan motor	COD, logam berat, dan bahan beracun
6.	Industri pakaian jadi	BOD, COD, TOD, suspended solid, TDS, minyak dan lemak, logam berat, kromium, warna, bahan beracun, suhu, klorinated, benzenoid dan sulfida
7.	Industri plastik	BOD, COD, total solid. Settleable solid, TDS, minyak dan lemak, seng, sianida, sulfat, amoniak, fosfor, urea anorganik, bahan beracun, fenol dan sulfida
8.	Industri kulit	Total padatan, pengkaraman, sulfida, kromium, pH, endapan kapur, dan BOD
9.	Industri besi dan logam	COD, suspended solids, minyak dan lemak, logam berat, bahan beracun, sianida, pH, suspended solid, kromium, besi, seng, klorida, sulfat, amoniak dan kekeruhan
10.	Aneka industri	BOD, pH, suspended solid, settleable solid, TDS, minyak dan lemak, warna, jumlah coli, bahan beracun, suhu, kekeruhan dan amoniak
11.	Pertanian/tanaman pangan	Pestisida, bahan beracun, dan logam berat
12.	Perhotelan	Deterjen, zat padat, BOD, COD, TOC, TOD, nitrogen, fosfor, warna, jumlah coli, bahan beracun, dan kekeruhan
13.	Rekreasi	BOD, COD, kekeruhan dan warna
14.	Kesehatan	Bahan beracun, logam berat, BOD, COD, TOM, dan jumlah coli
15.	Perdagangan	BOD, pH, suspended solid, settleable solid, TDS, minyak dan lemak, amoniak, urea, fosfor, warna, jumlah coli, bahan beracun dan kekeruhan
16.	Pemukiman	Deterjen, zat padat, BOD, COD, TOD, TOC, nitrogen, fosfor, kalsium, klorida dan sulfat
17.	Perhubungan darat	Logam berat, bahan beracun dan COD
18.	Perikanan darat	BOD, COD, TOM dan pH

19. Peternakan	BOD, COD, TOC, pH, suspended solid, klorida, nitrat, fosfor, warna, bahan beracun, suhu dan kekeruhan
20. Perkebunan	COD, pH, suspended solid, TDS, minyak dan lemak, kromium, kalsium, klorida, sulfat, amoniak, sodium, nitrat, fosfor, urea anorganik, coli fecces dan suhu

Sumber : (Trofisa, 2011)

II.3. Status Mutu Air

Kondisi kualitas air dapat diukur dan diuji dengan parameter-parameter dan metode yang telah diatur di dalam peraturan perundang-undangan, kondisi kualitas air tersebut di dalam Keputusan Menteri Lingkungan Hidup no. 115 tahun 2003 disebut dengan mutu air. Kondisi mutu air tercemar atau tidak dinyatakan dalam status mutu air. Penentuan status mutu air dapat menggunakan beberapa metode diantaranya : WQI (*Water Quality Index*)/ NSF WQI, Indeks Wilcox, Indeks Schoeller, IP (Indeks Pencemaran) dan Metode Storet.

WQI (*Water Quality Index*) merupakan suatu metode untuk menyederhanakan data dalam jumlah besar ke dalam bentuk yang sederhana. WQI membantu mengevaluasi profil kualitas air dari sebuah sungai, metode ini digunakan untuk mengidentifikasi perbedaan antara kualitas air yang diinginkan dengan kondisi eksisting, metode WQI banyak dikembangkan di India (Gupta *et al*, 2015). Metode WQI hanya menggunakan 9 parameter yaitu BOD, DO, nitrate, total phosphate, temperature, turbidity, total solids, pH, and Fecal Coliform. *Water Quality Index* lebih menggambarkan kondisi perairan yang relatif bagus (hanya tercemar bahan organik) dan tidak tercemar logam berat (Effendi, 2015).

Mir *et al* (2017) telah melakukan penelitian tentang kualitas air di sungai Sistan pada musim penghujan dan musim kemarau : Metode yang digunakan dalam penentuan kualitas air adalah Indeks Wilcox dan Indeks Schoeller. Parameter yang digunakan ada 9 yaitu TDS, rasio penyerapan Na, konduktivitas, Na, Ca, Mg, Cl, SO₄, bikarbonat. Indeks Wilcox dan Indeks Scholler dikembangkan di Amerika dan hanya cocok digunakan untuk penentuan kualitas air irigasi dan air minum.

Yan *et al* (2015) menyatakan beberapa metode yang digunakan untuk penilaian kualitas air diantaranya Single Faktor Pollution Index (SFPI), Complex Pollution Indices (CPI), Analytic Hierarchy Process (AHP), Fuzzy Comprehensive Evaluation (FCE), Gray Evaluation (GE), Artificial Neural Network (ANN), Principal Component Analysis (PCA), Fuzzy Comprehensive-quantifying Assesment (FCQA), Water Quality Identification (WQI), namun

metode-metode tersebut memiliki kelemahan yaitu tidak dapat menggambarkan data dari sampel secara spasial dan tidak dapat mengidentifikasi daerah yang berbahaya dan rentan terhadap pencemaran.

Metode penentuan status mutu air yang direkomendasikan di Keputusan Menteri Lingkungan Hidup no. 115 tahun 2003 tentang Pedoman Penentuan Status Mutu Air adalah metode Indeks Pencemaran (IP) dan metode Storet. Indeks Pencemaran ditentukan dengan membandingkan data simulasi terhadap baku mutu kualitas air yang tercantum di dalam Peraturan Pemerintah no. 82 tahun 2001 (Effendi, 2015). Metoda STORET ditentukan dengan membandingkan antara data kualitas air dengan baku mutu air yang disesuaikan dengan peruntukannya guna menentukan status mutu air, untuk menentukan status mutu air menggunakan nilai dari US-EPA (*Environmental Protection Agency*), pada metode STORET data yang digunakan harus *time series* dan minimal ada 4 data. Jadi untuk data tunggal (hanya 1 kali pengambilan data) lebih cocok menggunakan metode Indeks Pencemaran (IP).

Keputusan Menteri Lingkungan Hidup no. 115 tahun 2003 menyebutkan bahwa Indeks Pencemaran (IP) dihitung untuk menilai tingkat pencemaran air. Penentuan Indeks Pencemaran (IP) dilakukan dengan membandingkan data simulasi dengan baku mutu kualitas air yang tercantum di dalam Peraturan Pemerintah no. 82 tahun 2001 (Effendi, 2015).

Klasifikasi status mutu air berdasarkan perhitungan Indeks Pencemaran (IP) di dalam Keputusan Menteri Lingkungan Hidup no. 115 tahun 2003 adalah sebagai berikut :

Tabel 8. Klasifikasi Status Mutu Air Berdasar Perhitungan IP

Nilai IP	Status Mutu Air
$0 \leq IP \leq 1$	Memenuhi Baku Mutu
$1 \leq IP \leq 5$	Cemar Ringan
$5 \leq IP \leq 10$	Cemar Sedang
$IP > 10$	Cemar Berat

Indeks Pencemaran (IP) merupakan fungsi dari C_i/L_{ij} dimana C_i menyatakan konsentrasi parameter kualitas air (i) yang diperoleh dari hasil analisis sampel air pada suatu lokasi pengambilan sampel suatu alur sungai, sedangkan L_{ij} menyatakan baku mutu air untuk parameter (i) dan kelas air (j). Beberapa perhitungan C_i/L_{ij} yang dijelaskan di dalam Keputusan Menteri Lingkungan Hidup no. 115 tahun 2003 adalah :

- a. C_i/L_{ij} untuk parameter yang nilainya menurun menunjukkan pencemaran meningkat (parameter DO)

$$\frac{C_i}{L_{ij}} = \frac{C_{im} - C_i}{C_{im} - L_{ij}}$$

C_{im} : konsentrasi DO jenuh yaitu 7 pada suhu 25°C

- b. Jika nilai L_{ij} memiliki rentang

- $C_i \leq L_{ij \text{ rata-rata}}$

$$\frac{C_i}{L_{ij}} = \frac{C_i - L_{ij}(\text{rata-rata})}{L_{ij}(\text{minimum}) - L_{ij}(\text{rata-rata})}$$

- $C_i > L_{ij \text{ rata-rata}}$

$$\frac{C_i}{L_{ij}} = \frac{C_i - L_{ij}(\text{rata-rata})}{L_{ij}(\text{maksimum}) - L_{ij}(\text{rata-rata})}$$

Nilai $C_i/L_{ij} = 1,0$ adalah nilai yang kritis, karena nilai ini diharapkan untuk dipenuhi bagi suatu Baku Mutu Peruntukan Air. Jika $C_i/L_{ij} > 1,0$ untuk suatu parameter, maka konsentrasi parameter ini harus dikurangi atau disisihkan, kalau badan air digunakan untuk peruntukan (j) Jika hasil perhitungan $C_i/L_{ij} > 1$

$$(C_i/L_{ij})_{\text{baru}} = 1 + P \cdot \text{Log} (C_i/L_{ij})_{\text{perhitungan}}$$

P adalah konstanta dan nilainya ditentukan dengan bebas dan disesuaikan dengan hasil pengamatan lingkungan dan atau persyaratan yang dikehendaki untuk suatu peruntukan (biasanya digunakan nilai 5).

Pada model IP digunakan berbagai parameter kualitas air, maka pada penggunaannya dibutuhkan nilai rata-rata dari keseluruhan nilai C_i/L_{ij} sebagai tolok-ukur pencemaran. Setelah diketahui nilai perhitungan C_i/L_{ij} untuk setiap parameter selanjutnya ditentukan nilai rata-rata $(C_i/L_{ij})_R$ dan nilai maksimum $(C_i/L_{ij})_M$ dari keseluruhan C_i/L_{ij} , kemudian dapat dilakukan perhitungan Indeks Pencemaran (IP) dengan persamaan :

$$IP = \sqrt{\frac{(C_i/L_{ij})_M^2 - (C_i/L_{ij})_R^2}{2}}$$

II.4. Status Trofik

Peraturan Menteri Lingkungan Hidup no. 28 tahun 2009 menyebutkan bahwa status trofik adalah status kualitas air danau berdasarkan kadar unsur hara dan kandungan biomassa fitoplankton atau produktivitasnya.

Kondisi kualitas air danau dan/atau waduk diklasifikasikan berdasarkan eutrofikasi yang disebabkan adanya peningkatan kadar unsur hara dalam air. Eutrofikasi adalah pencemaran air yang disebabkan oleh munculnya nutrient yang berlebihan ke dalam ekosistem air yang berakibat tidak terkontrolnya pertumbuhan tumbuhan air (Simbolon, 2016). Faktor pembatas sebagai penentu eutrofikasi adalah unsur Fosfor (P) dan Nitrogen (N). Pada umumnya rata-rata tumbuhan air mengandung Nitrogen dan Fosfor masing-masing 0,7% dan 0,09% dari berat basah. Fosfor membatasi eutrofikasi jika kadar Nitrogen lebih dari delapan kali kadar Fosfor, Nitrogen membatasi proses eutrofikasi jika kadarnya kurang dari delapan kali kadari Fosfor. Klorofil-a adalah pigmen tumbuhan hijau yang diperlukan untuk fotosintesis. Parameter Klorofil-a mengindikasikan kadar biomassa algae, dengan perkiraan rata-rata beratnya adalah 1% dari biomassa (Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 28 Tahun 2009).

Eutrofikasi disebabkan oleh peningkatan kadar unsur hara terutama parameter Nitrogen dan Fosfor pada air danau dan/atau waduk. Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup no 28 tahun 2009 menjelaskan bahwa status trofik diklasifikasikan dalam 4 kategori yaitu :

1. Oligotrof adalah status trofik air danau dan/atau waduk yang mengandung unsur hara dengan kadar rendah, status ini menunjukkan kualitas air masih bersifat alamiah belum tercemar dari sumber unsur hara Nitrogen dan Fosfor.
2. Mesotrof adalah status trofik air danau dan/atau waduk yang mengandung unsur hara dengan kadar sedang, status ini menunjukkan adanya peningkatan kadar Nitrogen dan Fosfor namun masih dalam batas toleransi karena belum menunjukkan adanya indikasi pencemaran air.
3. Eutrof adalah status trofik air danau dan/atau waduk yang mengandung unsur hara dengan kadar tinggi, status ini menunjukkan air telah tercemar oleh peningkatan kadar Nitrogen dan Fosfor .
4. Hipereutrof/Hipertrof adalah status trofik air danau dan/atau waduk yang mengandung unsur hara dengan kadar sangat tinggi, status ini menunjukkan air telah tercemar berat oleh peningkatan kadar Nitrogen dan Fosfor.

Sekolah Pascasarjana

II.5. Penginderaan Jarak Jauh

Pengertian dari penginderaan jarak jauh (*remote sensing*) adalah ilmu yang mempelajari penerimaan informasi tentang permukaan bumi tanpa harus melakukan kontak langsung dengan objeknya (Setiawan, 2012). Penggunaan sistem penginderaan jarak jauh seperti citra satelit, pesawat kecil, pesawat tanpa awak bersama dengan data analitik dan *artificial intelegent* (AI) menjadi alat baru untuk mengamati fenotip tanaman (Costa *et al*, 2020). Penginderaan jarak jauh secara luas telah digunakan untuk menghitung parameter kualitas air diantaranya klorofil-a (Kimambo *et al*, 2019).

Penginderaan jarak jauh memiliki kemampuan untuk mengumpulkan data secara rutin untuk membantu pemerintah dalam menetapkan standar dan monitoring kualitas air, melakukan evaluasi terhadap program pengelolaan sumber air, penegakan peraturan terkait kualitas air, memahami karakteristik biologi dan hidrologi dari suatu perairan sehingga dapat diketahui pengaruh penggunaan lahan terhadap kualitas air di perairan tersebut (Keith, 2014).

Citra satelit merupakan salah satu hasil dari penginderaan jarak jauh yang bisa dimanfaatkan manusia untuk menganalisa permukaan bumi dengan berbagai cara tertentu. Permasalahan yang sering muncul dalam pengolahan citra satelit adalah adanya gangguan derau (*noise*). Salah satu noise dari citra satelit yaitu awan yang menutupi sebagian area tertentu, Awan akan dianggap sebagai pengganggu karena ia akan menutupi sebagian wilayah dari citra satelit. Sehingga area yang tertutup tersebut tidak bisa dimanfaatkan atau akan menjadi data pencilan (*outlier*) apabila dilakukan proses segmentasi atau *clustering* pada citra tersebut (Putro *et al*, 2015).

Koreksi atmosfer merupakan proses untuk menghilangkan kesalahan yang disebabkan adanya pengaruh atmosfer pada citra. Pengaruh atmosfer terjadi saat proses perekaman citra di mana gelombang elektromagnetik dari matahari ke permukaan bumi dan dari objek ke sensor mengalami gangguan saat melewati atmosfer, gangguan tersebut dapat berupa hamburan maupun serapan. Hal ini akan berdampak pada data citra yang diperoleh, di mana data yang terekam oleh sensor satelit dengan data pada objek akan berbeda. Ada 3 jenis koreksi atmosfer yaitu koreksi atmosfer DOS, koreksi atmosfer FLAASH, koreksi atmosfer 6SV. Prinsip dari koreksi atmosfer DOS adalah memperbaiki nilai radiometrik (pixelvalue pada citra akibat gangguan atmosfer), sedangkan koreksi atmosfer FLAASH mengoreksi citra dengan menekan atau menghilangkan efek uap air, oksigen, karbondioksida, metana, ozon dan hamburan molekular maupun aerosol berdasarkan kode transfer radiasi MODTRAN- 4, dan koreksi

atmosfer 6SV melibatkan data untuk perhitungan asbsorpsi atmosfer menggunakan nilai yang meningkat untuk gas-gas di atmosfer (Kristianingsih *et al*, 2016).

Sartika *et al* (2019) melakukan pemetaan sebaran Total Suspended Solid (TSS) dan klorofil-a (Chl-a) di perairan Sungai Wanggu menggunakan Citra Sentinel-2, pada penelitian tersebut dilakukan 2 analisis yaitu analisis citra dan analisis satelit. Analisis satelit Sentinel-2 diawali dengan koreksi atmosferik atas (TOA) dan koreksi atmosferik bawah (BOA), koreksi TOA menggunakan aplikasi QGIS dan untuk mendapatkan nilai reflektansi BOA sesuai dengan European Space Agency's (ESA) digunakan rumus :

$$R_{ts} : R_t/\pi$$

Keterangan :

R_{ts} : Reflektansi BOA

R_t : Reflektansi TOA

π : Nilai π pada software SNAP

Analisis klorofil-a dari citra Sentinel-2B menggunakan algoritma :

$$Chl_a = 25.985x^{3.117}$$

Keterangan : $x = \frac{Rrs(\lambda_5)}{Rrs(\lambda_4)}$, Rrs adalah Reflektansi citra Sentinel-2

Qanita *et al* (2019) melakukan analisis sebaran kandungan TSS dan klorofil-a di Banjir Kanal Barat menggunakan citra Landsat-8 dan Sentinel-2A, pembuatan model sebaran kandungan klorofil-a dengan menggunakan Citra Landsat 8 OLI dengan fitur band math pada perangkat lunak ENVI, dilakukan dengan melihat nilai reflektansi cahaya tampak di badan air sesuai dengan kanal pada citra. Pendugaan model pada penelitian kemudian dilakukan dengan persamaan-persamaan klorofil-a dari penelitian sebelumnya yaitu :

a. Penelitian Arief dan Laksmi tahun 2006

$$Chl-a = 17,912 \times \left(\frac{b_1 - b_2}{b_4}\right) \times 0,3343$$

Keterangan :

b_1 = Kanal biru (Kanal 1 Landsat 7 ETM+)

b_2 = Kanal Hijau (Kanal 2 Landsat 7 ETM+)

b. Penelitian Nuriya, dkk tahun 2010

$$C = 0,2818 \times \left(\frac{TM4+TM5}{TM3}\right)^{3,497}$$

Keterangan :

TM 3 = Nilai reflektansi kanal 3 dari Landsat

TM 4 = Nilai reflektansi kanal 4 dari Landsat

TM 5 = Nilai reflektansi kanal 5 dari Landsat

c. Penelitian Pentury tahun 1987

$$\text{Chl-a} = 2,3868 \left(\frac{B3}{B2} \right) - 0,4671$$

Keterangan :

B2 = Nilai reflektansi kanal 2 Landsat

B3 = Nilai reflektansi kanal 3 Landsat

Pada perhitungan klorofil-a citra Sentinel-2 MSI digunakan C2RCC Processor dengan perangkat lunak SNAP dari ESA.

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Saberioon *et al* (2020) indeks yang dapat menggambarkan kelimpahan klorofil-a di perairan darat dari citra Sentinel-2A adalah NDWI (*Normalized Difference Water Index*) 2, 4 dan 5 serta NDVI. Menurut (Watanabe *et al.*, 2019) indeks yang dapat menggambarkan kelimpahan klorofil-a dari citra Sentinel-2 adalah NDCI (*Normalized Difference Chlorophyll Index*).

II.6. Sentinel-2

Sentinel-2 merupakan satelit yang diluncurkan oleh *European Space Agency* (ESA), satelit pertama (Sentinel-2A) diluncurkan pada tahun 2013 dan satelit kedua (Sentinel-2B) diluncurkan tahun 2015, tujuan dari misi ini adalah untuk menyajikan citra multispektral dengan resolusi dan frekuensi kunjungan yang tinggi, sentinel-2 memiliki 13 pita spektral mulai dari sinar tampak sampai NIR (ESA, 2015). Sentinel-2 memiliki resolusi 10 meter dan memiliki interval kunjungan kembali selama 5 hari, citra sentinel-2 tersedia untuk umum di portal ESA (Bergsma & Almar, 2020).

Citra Sentinel-2 selain dapat diakses di portal ESA juga dapat diakses di situs USGS earth explorer dan google earth, dibandingkan dengan Landsat-8 sensor sentinel-2 memiliki resolusi spasial yang lebih tinggi yaitu 10, 20 dan 60 meter, periode kunjungan kembali yang lebih pendek dan tiga pita tambahan di wilayah inframerah dekat (703, 740 dan 783 nm) (Kuhn *et al*, 2019). Hasil penelitian (Saberioon *et al.*, 2020) menunjukkan bahwa produk sentinel-2A dapat menyediakan data yang cukup untuk memprediksi dan memvisualisasikan temporal dan

spasial tren klorofil-a dan TSS dalam badan air yang kecil. Pita spektral dari citra Sentinel-2 disajikan dalam tabel 10.

Tabel 9. Pita Spektral Citra Sentinel-2

Band	Spectral Range (nm)	Central Wavelength (nm)	Bandwidth (nm)	Spatial Resolution (m)	SNR
B2	458–523	492	65	10	154
B3	543–578	560	35	10	168
B4	650–680	665	30	10	142
B5	698–713	704	15	20	117
B6	733–748	740	15	20	89
B7	773–793	783	20	20	105
B8	785–900	833	115	10	174
B8a	855–875	865	20	20	72
B11	1565–1655	1641	90	20	100
B12	2100–2280	2202	180	20	100

Sumber : (Saberioon *et al*, 2020)

Rincian indeks yang diturunkan dari citra Sentinel-2 adalah sebagai berikut :

Tabel 10. Indeks yang Diturunkan dari Citra Sentinel-2

Index	Definition	Definition based on Sentinel-2
NDVI	$(\rho_{NIR} - \rho_{Red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{Red})$	$B8 - B4 / B8 + B4$
NDWI1	$(\rho_{Green} - \rho_{NIR1}) / (\rho_{Green} + \rho_{NIR1})$	$B3 - B8 / B3 + B8$
NDWI2	$(\rho_{NIR1} - \rho_{SWIR1}) / (\rho_{NIR1} + \rho_{SWIR1})$	$B8 - B11 / B8 + B11$
NDWI3	$(\rho_{NIR1} - \rho_{SWIR2}) / (\rho_{NIR1} + \rho_{SWIR2})$	$B8 - B12 / B8 + B12$
NDWI4	$(\rho_{NIR2} - \rho_{SWIR1}) / (\rho_{NIR2} + \rho_{SWIR2})$	$B8 - B11 / B8 + B12$
NDWI5	$(\rho_{NIR2} - \rho_{SWIR2}) / (\rho_{NIR2} + \rho_{SWIR1})$	$B8 - B12 / B8 + B11$
MNDWI1	$(\rho_{Green} - \rho_{SWIR1}) / (\rho_{Green} + \rho_{SWIR1})$	$B3 - B11 / B3 + B11$
MNDWI2	$(\rho_{Green} - \rho_{SWIR2}) / (\rho_{Green} + \rho_{SWIR2})$	$B3 - B12 / B3 + B12$
MNDWI3	$(\rho_{Green} - \rho_{SWIR1}) / (\rho_{Green} + \rho_{SWIR2})$	$B3 - B11 / B3 + B12$
MNDWI4	$(\rho_{Green} - \rho_{SWIR2}) / (\rho_{Green} + \rho_{SWIR1})$	$B3 - B12 / B3 + B11$
NDTI	$(\rho_{Red} - \rho_{Green}) / (\rho_{Red} + \rho_{Green})$	$B4 - B3 / B4 + B3$
WRI1	$(\rho_{Green} + \rho_{Red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{SWIR1})$	$B3 + B4 / B8 + B11$
WRI2	$(\rho_{Green} + \rho_{Red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{SWIR2})$	$B3 + B4 / B8 + B12$
AWEI1	$4 \times (\rho_{Green} - \rho_{SWIR1}) - (0.25 \times \rho_{NIR} + 2.75 \times \rho_{SWIR1})$	$4 \times (B3 - B11) - (0.25 \times B8 + 2.75 \times B11)$
AWEI2	$4 \times (\rho_{Green} - \rho_{SWIR2}) - (0.25 \times \rho_{NIR} + 2.75 \times \rho_{SWIR2})$	$4 \times (B3 - B12) - (0.25 \times B8 + 2.75 \times B12)$
AWEI3	$4 \times (\rho_{Green} - \rho_{SWIR1}) - (0.25 \times \rho_{NIR} + 2.75 \times \rho_{SWIR2})$	$4 \times (B3 - B11) - (0.25 \times B8 + 2.75 \times B12)$
AWEI4	$4 \times (\rho_{Green} - \rho_{SWIR2}) - (0.25 \times \rho_{NIR} + 2.75 \times \rho_{SWIR1})$	$4 \times (B3 - B12) - (0.25 \times B8 + 2.75 \times B11)$
SR	ρ_{Red} / ρ_{NIR}	$B4 / B8$
SRWC	ρ_{Red} / ρ_{Blue}	$B4 / B2$

Sumber : (Saberioon *et al*, 2020)

II.7. Daya Tampung Beban Pencemaran

Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 110 tahun 2003 menyebutkan bahwa daya tampung beban pencemaran air adalah kemampuan air pada suatu sumber air, untuk menerima masukan beban pencemaran tanpa mengakibatkan air tersebut menjadi cemar. Beban pencemaran adalah jumlah suatu unsur pencemar yang terkandung dalam air atau air limbah. Keputusan menteri tersebut juga menyebutkan beberapa metode yang dapat digunakan untuk menetapkan daya tampung beban pencemaran yaitu :

a. Metode neraca massa

Model matematika yang menggunakan perhitungan neraca massa dapat digunakan untuk menentukan konsentrasi rata-rata aliran hilir (*down stream*) yang berasal dari sumber pencemar tertentu (*point sources*) dan sumber pencemar tak tentu (*non point sources*), perhitungan ini dapat pula dipakai untuk menentukan persentase perubahan laju alir atau beban polutan. Jika beberapa aliran bertemu menghasilkan aliran akhir, atau jika kuantitas air dan massa konstituen dihitung secara terpisah, maka perlu dilakukan analisis neraca massa untuk menentukan kualitas aliran akhir dengan perhitungan :

$$C_R = \frac{\sum C_i Q_i}{\sum Q_i} = \frac{\sum M_i}{\sum Q_i}$$

Keterangan :

C_R : konsentrasi rata-rata konstituen untuk aliran gabungan

C_i : konsentrasi konstituen pada aliran-1

Q_i : laju alir aliran ke-i

M_i : massa konstituen pada aliran ke-i

Metode neraca massa dapat juga digunakan untuk menentukan pengaruh erosi terhadap kualitas air yang terjadi selama fasa konstruksi atau operasional suatu proyek, dan dapat juga digunakan untuk suatu segmen aliran, suatu sel pada danau, dan samudera. Tetapi metode neraca massa ini hanya tepat digunakan untuk komponen-komponen yang konservatif yaitu komponen yang tidak mengalami perubahan (tidak terdegradasi, tidak hilang karena pengendapan, tidak hilang karena penguapan, atau akibat aktivitas lainnya) selama proses pencampuran berlangsung seperti misalnya garam-garam. Penggunaan neraca massa untuk komponen lain, seperti DO, BOD dan $\text{NH}_3\text{-N}$ hanyalah merupakan pendekatan saja.

b. Metode Streeter-Phelps

Streeter dan Phelps pada tahun 1925 memperkenalkan pemodelan sungai menggunakan persamaan kurva penurunan oksigen (*oxygen sag curve*) dimana metode pengelolaan kualitas air ditentukan atas dasar defisit oksigen kritik D_c . Pemodelan Streeter-Phelps hanya terbatas pada dua fenomena yaitu proses pengurangan oksigen terlarut (deoksigenasi) akibat aktivitas bakteri dalam mendegradasikan bahan organik yang ada dalam air dan proses peningkatan oksigen terlarut (reaerasi) yang disebabkan turbulensi yang terjadi pada aliran sungai.

- Proses pengurangan oksigen (Deoksigenasi)

Streeter-Phelps menyatakan bahwa laju oksidasi biokimiawi senyawa organik ditentukan oleh konsentrasi senyawa organik sisa (residual). Laju deoksigenasi akibat senyawa organik dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$r_D = -K' \cdot L$$

Keterangan :

K' : konstanta laju reaksi orde pertama (hari^{-1})

L : BOD ultimat pada titik yang diminta (mg/L)

- Proses peningkatan oksigen terlarut (reaerasi)

Kandungan oksigen di dalam air akan menerima tambahan akibat turbulensi sehingga berlangsung perpindahan oksigen dari udara ke air dan proses ini adalah proses reaerasi. Peralihan oksigen ini dinyatakan oleh persamaan laju reaerasi :

$$r_R = K^2 (C_s - C)$$

Keterangan :

K^2 : konstanta reaerasi (hari^{-1})

C_s : konsentrasi oksigen terlarut jenuh (mg/L)

C : konsentrasi oksigen terlarut (mg/L)

Nilai konstanta reaerasi terlihat seperti pada tabel 12.

Sekolah Pascasarjana

Tabel 11. Nilai konstanta reaerasi

Badan air	K'² pada 20°C
Kolam kecil dan <i>backwaters</i>	0,10 – 0,23
Danau	0,23 – 0,35
Aliran besar dengan kecepatan kecil	0,35 – 0,46
Aliran besar dengan kecepatan normal	0,46 – 0,69
Aliran cepat	0,69 – 1,15
Air terjun	>1,15

c. Metode QUAL2E

QUAL2E merupakan program pemodelan kualitas air sungai yang sangat komprehensif dan yang paling banyak digunakan saat ini. QUAL2E dikembangkan oleh *US Environmental Protection Agency*. Tujuan penggunaan suatu pemodelan adalah menyederhanakan suatu kejadian agar dapat diketahui kelakuan kejadian tersebut. Pada QUAL2E ini dapat diketahui kondisi sepanjang sungai, dengan begitu dapat dilakukan tindakan selanjutnya seperti industri yang ada disepanjang sungai hanya diperbolehkan membuang limbahnya pada beban tertentu. Manfaat yang dapat diambil dari pemodelan QUAL2E adalah :

1. Mengetahui karakteristik sungai yang akan dimodelkan dengan membandingkan data yang telah diambil langsung dari sungai tersebut.
2. Mengetahui kelakuan aliran sepanjang sungai bila terdapat penambahan beban dari sumber-sumber pencemar baik yang tidak terdeteksi maupun yang terdeteksi.
3. Dapat memperkirakan pada beban berapa limbah suatu industri dapat dibuang ke sungai tersebut agar tidak membahayakan makhluk lainnya sesuai baku mutu minimum.

Perangkat lunak QUAL2E adalah program pemodelan kualitas air sungai yang sangat komprehensif. Program ini dapat diaplikasikan pada kondisi tunak atau dinamik. Selain itu dapat mensimulasikan hingga 15 parameter konstituen dengan mengikutsertakan perhitungan aliran-aliran anak sungai yang tercemar. Model ini dapat juga digunakan untuk arus dendritik dan tercampur sempurna dengan menitik beratkan pada mekanisme perpindahan secara adveksi dan disperse searah dengan arus.

Menurut Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 01 tahun 2010 tentang Tata Laksana Pengendalian Pencemaran Air disebutkan bahwa penetapan daya tampung beban pencemaran air mempertimbangkan :

- a) Kondisi hidrologi dan morfologi sumber air termasuk status mutu dan/atau status trofik sumber air yang ditetapkan daya tampung beban pencemarannya.
- b) Baku mutu air untuk sungai dan muara
- c) Baku mutu air serta kriteria status trofik air untuk situ, danau dan waduk
- d) Beban pencemaran pada masing-masing sumber pencemar air.

Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 82 tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air menyebutkan bahwa hasil perhitungan daya tampung beban pencemaran dapat dipergunakan sebagai bahan pertimbangan dan kebijakan terkait :

1. Pemberian izin lokasi
2. Pengelolaan air dan sumber air
3. Penetapan rencana tata ruang
4. Pemberian izin pembuangan air limbah
5. Penetapan mutu air sasaran dan program kerja pengendalian pencemaran air

II.8. QUAL2Kw

Model kualitas air dapat menjadi alat yang efektif untuk mensimulasikan dan memprediksi transportasi polutan di perairan yang dapat berkontribusi untuk menghemat biaya, tenaga dan bahan untuk percobaan. Model kualitas air merupakan alat yang penting untuk mengidentifikasi pencemaran perairan dan memprediksi kondisi pencemaran di masa depan. Hasil simulasi dengan model juga dapat membantu keputusan penting dalam manajemen lingkungan. Beberapa model yang dapat digunakan untuk mensimulasikan kualitas air yaitu HSPF, WASP, QUAL2E, QUAL2K, RWQM, MIKE11, InfoWorks RS, SIMCAT and QUASAR. Model-model tersebut biasanya digunakan untuk perencanaan sumber air atau pengendalian pencemaran limbah industri dan limbah cair domestik (Keupers & Willems, 2017). QUAL2Kw adalah model kualitas air sungai pengembangan dari model QUAL2E (Pangestu, 2017). Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup no. 110 tahun 2003 menyebutkan manfaat dari pemodelan QUAL2E adalah :

- a. Mengetahui karakteristik sungai yang akan dimodelkan dengan membandingkan data yang telah diambil langsung dari sungai tersebut.
- b. Mengetahui kelakuan aliran sepanjang sungai bila terdapat penambahan beban dari sumber-sumber pencemar baik yang tidak terdeteksi maupun yang terdeteksi.
- c. Dapat memperkirakan pada beban berapa limbah suatu industri dapat dibuang ke sungai tersebut agar tidak membahayakan makhluk lainnya sesuai baku mutu minimum.

Model QUAL cocok untuk sungai dendritik dan sumber pencemar NPS (*non point source*), termasuk dalam model satu dimensi *steady-state* (Wang et al., 2013). Model ini sesuai untuk simulasi Sungai Ciujung yang merupakan sungai dendritik. Model *steady-state* digunakan untuk merencanakan atau membuat kebijakan tentang kualitas air di *downstream* (Whitehead, 2012).

Kamal *et al* (2020) pernah melakukan penelitian di Skudai River Malaysia dengan menggabungkan metode QUAL2K dengan SIG. Metode QUAL2K dipilih karena kemampuannya untuk mensimulasikan berbagai skenario untuk sungai yang memiliki percabangan dan airnya bercampur di sungai utama secara lateral dan vertical, selain itu QUAL2K juga mempertimbangkan pengaruh *point source* (PS) dan *non point source* (NPS). QUAL2K juga dapat mensimulasikan migrasi dan transformasi berbagai konstituen termasuk DO, suhu, BOD, COD, Nitrogen organik, NH₃eN, NO₃eN, Nitrogen Total, *Sediment Oxygen Demand* (SOD), Fosfor Organik, Fosfor Anorganik, Fosfor Total (TP), Fitoplankton dan ganggang. Model dikalibrasi dan divalidasi berdasarkan lima parameter yaitu BOD, COD, NH₃eN, DO dan SS, menggunakan data selama musim hujan dan kemarau. Validasi dilakukan menggunakan parameter hidrolis yang sama yang digunakan selama proses kalibrasi, indeks kualitas air yang disimulasikan adalah dibandingkan dengan data yang diamati. Parameter hidrolis dapat diterima saat perkiraan indeks kualitas air dari model QUAL2K hasilnya memuaskan, kemudian dilakukan validasi dan evaluasi kinerja QUAL2K dengan langkah seperti kalibrasi, proses ini dihentikan ketika kinerja model QUAL2K dalam proses kalibrasi dan validasi sudah memuaskan. Relative Percentage Difference (RPD) digunakan untuk mengevaluasi kalibrasi model dan proses validasi untuk setiap titik pengambilan sampel di sepanjang sungai.

QUAL2Kw membagi sungai menjadi beberapa bagian, setiap bagian (*reach*) dibagi dalam sejumlah unsur perhitungan yang masing-masing mengandung kesetimbangan hidrologi, kesetimbangan panas dan suhu, dan kesetimbangan massa dalam konsentrasi. Kesetimbangan massa memperhitungkan massa hilang atau bertambah melalui proses pembuangan air limbah atau pengambilan air dari sungai serta proses internal seperti reaksi

penguraian senyawa organik dan fotosintesa. Model QUAL2Kw dapat mensimulasikan sejumlah konstituen termasuk suhu, pH, permintaan biokimia karbon, permintaan sedimen oksigen, DO (oksigen terlarut), nitrogen organik, nitrogen amonia, nitrit dan nitrat nitrogen, fosfor organik, fosfor anorganik, nitrogen total, total fosfor, fitoplankton, dan ganggang bawah (*algae bottom*) (Rachmawati, 2017).

Komarudin (2015) melakukan penelitian analisis beban pencemaran Sungai Pesanggrahan menggunakan metode QUAL2Kw. Model QUAL2Kw diawali dengan skematik model. Skematik model diperoleh berdasarkan Peta Segmentasi, data hidrologi, meteorologi, pengukuran kuantitas dan kualitas sumber pencemaran tertentu serta hasil sampling kualitas air di sungai. Empat kelompok data utama yang dipergunakan sebagai masukan adalah data kondisi hidrologi, data hidrometeorologi, data kualitas air sungai, serta data sumber pencemaran tertentu. Berdasarkan masukan dari empat kelompok data tersebut, simulasi dilakukan hingga diperoleh model sebaran kualitas air yang paling mendekati data lapangan. Pengujian kecocokan antara data lapangan dengan data model dilakukan menggunakan nilai koefisien determinasi (R^2), dan indikator kesalahan model dengan menggunakan *Root Mean Square Error* (RMSE). Model kualitas air yang paling mendekati data lapangan dipergunakan untuk menghitung beban pencemaran dan daya tampung beban pencemaran sungai. Tingkat keterpercayaan hasil pemodelan diuji dengan uji reliabilitas. Uji reliabilitas tidak mempengaruhi apakah model diterima ataupun ditolak, namun memberikan tingkat keyakinan dalam penggunaan model.

II.9. Sistem Informasi Geografis (SIG)

Sistem Informasi Geografis (SIG) merupakan suatu sistem informasi berbasis komputer untuk menyimpan, mengelola, menganalisa dan memanggil data bereferensi geografis (Wibowo *et al*, 2015). SIG memiliki kontribusi yang penting dalam pengelolaan dan pemantauan lingkungan (Kamara, 2019). SIG dapat menggabungkan banyak data dan menghasilkan skenario yang berbeda dengan cepat dan akurasi yang tinggi (Odera & Karanja, 2019).

Yaghi & Salim (2017) melakukan penelitian terkait pemanfaatan SIG untuk pemodelan resiko pencemaran air, fokus dari penelitian tersebut adalah merancang model SIG untuk memantau *non point source pollution* (NPSP) dari sumber pertanian seperti pupuk dan pestisida, membuat data set yang dapat dimasukkan ke dalam SIG dengan mudah, dan

menjalankan model dan mendapatkan peta resiko pencemaran dari sumber pertanian. SIG digunakan untuk membuat peta hidrologi menggunakan Arc Hydro, membuat peta curah hujan dan peta polusi menggunakan Geo-statistical analis, membuat slope menggunakan spasial analyst dan 3D. Gambar satelit digunakan untuk membuat peta tutupan lahan dan peta penggunaan lahan, sedangkan GPS digunakan untuk menandai lokasi-lokasi penting. Area dengan erosi tanah yang parah merupakan area yang kritis untuk terjadi pencemaran NPS dari pertanian. Erosi tidak hanya mencakup pengangkutan partikel sedimen tetapi juga pengangkutan nutrisi dan polutan, maka model erosi dapat digunakan untuk menentukan area kritis sumber pencemaran NPS. Penelitian Yaghi menghasilkan informasi bahwa pemodelan SIG sangat cocok digunakan untuk menghasilkan peta resiko pencemaran air permukaan dari sumber NPS pada skala DAS, peta resiko pencemaran air permukaan dapat diperbaharui setiap ada perubahan peta penggunaan lahan, SIG juga dapat digunakan untuk menentukan lokasi terbaik untuk melakukan pemantauan air.

Yan *et al* (2015) melakukan penelitian terkait penilaian kualitas air dan identifikasi daerah yang beresiko tercemar menggunakan SIG. Penilaian kualitas air sungai tidak hanya membutuhkan investigasi pencemaran air dan factor utama pencemar tetapi juga perlu dilakukan penentuan daerah yang beresiko terjadi pencemaran yang mempengaruhi DAS. SIG sebagai alat yang paling kuat untuk menangani data spasial, melakukan analisis spasial dan mengolah aoutput spasial, SIG juga dapat memperkirakan kandungan pencemar di lokasi yang tidak diketahui nilainya dengan interpolasi, pemodelan SIG telah secara khusus digunakan dalam penilaian resiko dan studi pencemaran sungai. Yan melakukan penelitian di sungai Hinghe di China, pengambilan sampel menggunakan metode Grid GIS untuk menganalisis 6 parameter yaitu DO, NH₃-N, NO₃-N, NO₂-N, Total N, Total fosfor. Geo-statistic analisis dan SIG digunakan untuk menggambarkan karakteristik pencemaran dan daerah yang beresiko tercemar.

Kamal *et al* (2020) melakukan penelitian dengan menggabungkan metode QUAL2K dan SIG di Sungai Skudai River, Malaysia. Perangkat lunak ArcGIS digunakan untuk menyajikan kode warna distribusi pencemar sesuai dengan tingkat konsentrasi dan klasifikasi sesuai dengan kelasnya. SIG digunakan untuk menghasilkan peta kualitas air dengan kode warna yang komprehensif.

Shaban *et al* (2010) melakukan penelitian di delta sungai Niel menggabungkan metode clustering multivariate dengan SIG. Sistem Informasi Geografis (SIG) adalah kompilasi dari perangkat keras komputer, perangkat lunak, data spasial, data non-spasial, dan pengguna yang dirancang untuk secara efisien menangkap, menyimpan, memperbaharui, memanipulasi,

menganalisis dan menampilkan semua bentuk informasi yang dirujuk secara geografis, kemampuan tersebut menjadikan SIG sebagai alat paling komprehensif yang mewakili kualitas air permukaan untuk memfasilitasi pengambilan keputusan.

II.10. Parameter Fisik Kimia Air

II.10.1. Oksigen Terlarut (DO)

Oksigen terlarut (DO) mengacu kepada gas oksigen yang terlarut di dalam air. Tingkat oksigen sering digunakan untuk mengindikasikan kualitas perairan. Hampir seluruh DO di perairan diproduksi selama proses fotosintesis tanaman air dan alga, sehingga nilai DO meningkat pada siang hari dan menurun pada malam hari (Kibria, 2017). Semakin tinggi nilai DO maka semakin bagus kualitas air di perairan tersebut (Prahutama, 2013). Nilai DO di suatu perairan tergantung dari suhu, salinitas dan ketinggian, peningkatan faktor-faktor tersebut mengurangi kelarutan oksigen di dalam air (Ahmed, 2017).

DO secara tidak langsung menunjukkan apakah di perairan tersebut terjadi polusi atau tidak. Oksigen terlarut sangat penting untuk kelangsungan hidup organisme aerob dan fauna air. Pengukuran DO penting untuk menentukan apakah suatu system air didominasi oleh organisme aerob atau anaerob, memprediksi kelangsungan hidup organisme akuatik, dan memprediksi apakah proses biologi aerob dapat terjadi untuk mengubah kontaminan organik yang dapat terurai secara biologis yang dibuang ke dalam air. Ketika ada pelepasan senyawa organik ke perairan, DO akan menurun dengan cepat karena mikroorganisme aerobik yang mengkonsumsi oksigen selama degradasi metabolik bahan organik, keberadaan oksigen terlarut sangat penting untuk *self-cleansing* di perairan. Jumlah DO di suatu perairan tergantung pada suhu air, garam terlarut, tekanan atmosfer, adanya senyawa pereduksi, bahan yang tersuspensi dan spesies hidup. Jumlah DO meningkat pada air terjun atau jeram, DO menurun pada daerah dengan aliran lambat dan aliran yang terdapat senyawa organik dan mikroba. (Ibanez, 2014).

DO menjadi salah satu parameter kunci penentuan kualitas air di Indonesia sesuai dengan Peraturan Pemerintah no. 82 tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air. Baku mutu parameter DO untuk setiap kelas air adalah :

Tabel 12. Baku Mutu Parameter DO untuk Setiap Kelas Air

Parameter	Satuan	Kelas	Ket
-----------	--------	-------	-----

		I	II	III	IV	
DO	mg/L	6	4	3	0	Angka batas minimum

Sumber : PP no. 82 tahun 2001

II.10.2. Biochemical oxygen demand (BOD)

Nilai BOD yang terukur menjadi ciri oksigen yang diperlukan untuk degradasi biokimia bahan organik dan oksigen yang digunakan untuk mengoksidasi bahan anorganik (Raud & Kikas, 2013). Pengukuran BOD mulai digunakan pada tahun 1908 sebagai indikator pencemaran sungai oleh Kerajaan Inggris, untuk pengukuran BOD dibutuhkan waktu 5 hari karena 5 hari merupakan waktu terlama yang dibutuhkan air sungai untuk melakukan perjalanan dari sumbernya ke muara di Inggris. Pada tahun 1936 parameter ini diadopsi oleh *American Public Health Association Standard Methods Committee* sebagai indikator terjadinya biodegradasi bahan kimia dan zat berbahaya, nilai BOD biasanya dinyatakan dalam milligram O₂ per liter (Jouanneau *et al*, 2014).

Nilai BOD dalam suatu perairan dapat menggambarkan fraksi yang siap terurai dari bahan organik yang mengalir di dalam air dan BOD juga dapat menjadi tanda terjadinya pencemaran di suatu perairan, semakin tinggi nilai BOD maka perairan tersebut semakin tercemar (Sara *et al*, 2018).

BOD menjadi salah satu parameter kunci dalam penentuan kualitas air sesuai dengan Peraturan Pemerintah no. 82 tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air.

Tabel 13. Baku Mutu Parameter BOD untuk Setiap Kelas

Parameter	Satuan	Kelas				Ket
		I	II	III	IV	
BOD	mg/L	2	3	6	12	

Sumber : PP no. 82 tahun 2001

II.10.3. Chemical Oxygen Demand (COD)

Menurut Yao *et al* (2014) *Chemical Oxygen Demand* (COD) adalah parameter yang digunakan secara luas untuk menentukan jumlah polutan organik dalam air limbah, COD didefinisikan sebagai angka setara oksigen yang dikonsumsi dalam oksidasi senyawa organik

oleh zat pengoksidasi kuat, seperti dikromat dan permanganat, dan merupakan indikasi jumlah polutan organik yang ada dalam air.

Chemical Oxygen Demand (COD) adalah parameter penting untuk penentuan beban organik dalam air, khususnya untuk pengoperasian IPAL, penentuan pajak limbah cair, serta untuk karakteristik kualitas air, parameter ini digunakan di seluruh dunia. Oksidasi dari beban organik dengan kalium dikromat ($K_2Cr_2O_7$) adalah metode standar yang digunakan untuk menentukan nilai COD secara internasional sejak akhir tahun 1970 (Kolb *et al*, 2017). COD merupakan parameter penting untuk menentukan beban pencemaran organik di perairan. Tingginya nilai COD di suatu perairan disebabkan oleh tingginya limbah organik yang berasal dari limbah rumah tangga, limbah industri dan peternakan (Lumaela *et al*, 2013).

Sesuai Peraturan Pemerintah no. 82 tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air bahwa COD menjadi salah satu parameter kunci dalam penentuan kualitas air dengan baku mutu sebagai berikut :

Tabel 14. Baku Mutu Parameter COD untuk Setiap Kelas Air

Parameter	Satuan	Kelas				Ket
		I	II	III	IV	
COD	mg/L	10	25	50	100	

Sumber : PP no. 82 tahun 2001

II.10.4. TSS dan TDS

Konsentrasi partikel tersuspensi sangat berkorelasi dengan kekeruhan, parameter seperti densitas, ukuran dan bentuk partikel, serta warna air juga memberikan pengaruh terhadap nilai TSS dan kekeruhan (Nasrabadi *et al*, 2016). TSS merupakan materi atau bahan tersuspensi yang menyebabkan kekeruhan air terdiri dari lumpur, pasir halus serta jasad-jasad renik yang terutama disebabkan oleh kikisan tanah atau erosi yang terbawa badan air. TSS merupakan salah satu faktor penting menurunnya kualitas perairan sehingga menyebabkan perubahan secara fisika, kimia dan biologi. Banyaknya TSS yang berada dalam perairan dapat menurunkan kesediaan oksigen terlarut. Tingginya TSS juga dapat secara langsung mengganggu biota perairan seperti ikan karena tersaring oleh insang. Nilai TSS dapat menjadi salah satu parameter biofisik perairan yang secara dinamis mencerminkan perubahan yang terjadi di daratan maupun di perairan (Rinawati *et al*, 2016). Tingginya nilai TSS di suatu perairan menyebabkan penurunan kualitas air dan meningkatkan suhu pada air permukaan, padatan

tersuspensi dapat membawa logam berat, polutan dan nutrisi yang dapat memberikan dampak buruk terhadap perairan, akumulasi padatan tersuspensi dapat menghambat masuknya sinar matahari ke dalam kolom perairan, sehingga menghambat produktivitas dan menghambat fungsi ekosistem, padatan tersuspensi di perairan berasal dari berbagai sumber diantaranya *run off* air hujan, kegiatan pengerukan, *resuspensi* dan arus pasang surut (Balasubramanian *et al*, 2020).

TDS mengandung berbagai zat terlarut (baik itu zat organik, anorganik, stsu material lainnya) dengan diameter < 10-3 μm yang terdapat pada sebuah larutan yang terlarut dalam air. Sumber utama untuk TDS dalam perairan adalah limbah dari pertanian, limbah rumah tangga, dan industri. Perubahan dalam konsentrasi TDS dapat berbahaya karena akan menyebabkan perubahan salinitas, perubahan komposisi ion-ion, dan toksisitas masing-masing ion (Rinawati *et al*, 2016). Menurut Cahyani *et al* (2016) TDS adalah jumlah material yang terlarut di dalam air. Material ini dapat berupa karbonat, bikarbonat, klorida, sulfat, fosfat, nitrat, kalsium, magnesium, natrium, ion-ion organik, senyawa koloid dan lain-lain. Alat yang digunakan untuk mengukur TDS adalah TDS meter, selain itu pengukuran TDS bisa juga menggunakan teknik gravimetri dan konduktivitas listrik.

Peraturan Pemerintah no. 82 tahun 2001 mengatur besarnya konsentrasi TSS dan TDS di dalam air yang diperbolehkan :

Tabel 15. Baku Mutu Parameter TSS dan TDS untuk Setiap Kelas Air

Parameter	Satuan	Kelas				Ket
		I	II	III	IV	
TDS	mg/L	1000	1000	1000	2000	
TSS	mg/L	50	50	400	400	Bagi pengolahan air secara konvensional, ≤ 5000 mg/L

Sumber : PP no. 82 tahun 2001

II.10.5. Fosfat

Fosfor merupakan unsur yang banyak digunakan dalam bidang pertanian dan industri, kelebihan fosfor di perairan dapat memicu terjadinya eutrofikasi, fosfor di lingkungan dapat berbentuk fosfat, polifosfat dan fosfor organik, namun yang paling dominan adalah fosfat (Wan *et al*, 2020). Fosfat pada perairan berbentuk ortofosfat (PO_4), Kandungan fosfat dalam perairan

pada umumnya berasal dari limpasan pupuk pada pertanian, kotoran manusia maupun hewan, kadar sabun, pengolahan sayuran, serta industri pulp dan kertas (Patricia *et al*, 2018).

Sutamihardja *et al* (2018) melakukan penelitian terkait dinamika fosfat di air Sungai Ciliwung hulu, pada siang hari kadar fosfat di dalam air Sungai Ciliwung meningkat disebabkan karena tingginya aktivitas yang terjadi di siang hari yaitu penggunaan fosfat sebagai sumber utama zat hara yang digunakan fitoplankton dalam fotosintesis. Keberadaan senyawa fosfat dalam air sangat berpengaruh terhadap keseimbangan ekosistem perairan. Bila kadar fosfat dalam perairan rendah maka pertumbuhan organisme atau tumbuhan air akan terhambat, sedangkan bila kadar fosfat dalam perairan tinggi maka pertumbuhan organisme atau tumbuhan air menjadi tidak terbatas, sehingga akan merusak kelestarian ekosistem air. Kandungannya fosfat di Sungai Ciliwung fluktuatif disebabkan oleh tingginya difusi fosfat dari sedimen, dan meningkatnya pencemaran yang terjadi di sepanjang aliran sungai Ciliwung dan terjadinya banjir di Jakarta. Dinamika peningkatan nilai fosfat pada DAS Ciliwung memiliki kesamaan hubungan terhadap peningkatan nilai suhu, TSS, BOD, nitrat, serta penurunan nilai pH dan DO.

Peraturan Pemerintah no. 82 tahun 2001 mengatur besarnya konsentrasi fosfat di dalam air yang diperbolehkan :

Tabel 16. Baku Mutu Parameter Fosfat untuk Setiap Kelas Air

Parameter	Satuan	Kelas				Ket
		I	II	III	IV	
Total fosfat sebagai P	mg/L	0,2	0,2	1	5	

II.10.6. pH

pH normal untuk kehidupan berkisar antara 6,6 – 7,5, nilai pH sangat dipengaruhi oleh kadar CO₂, pada siang hari pH akan meningkat dan pada malam hari pH akan turun. Pada musim penghujan pH cenderung lebih tinggi diakibatkan akumulasi senyawa bikarbonat. Nilai pH menunjukkan aktivitas ion Hidrogen di dalam air (Wartiniyati, 2016)

Tabel 17. Pengaruh pH terhadap Komunitas Biologi Perairan

Nilai pH	Pengaruh Umum
6,0 – 6,5	a. Keanekaragaman plankton dan bentos sedikit menurun

	b. Kelimpahan total, biomassa, dan produktivitas tidak mengalami perubahan
5,0 – 5,5	a. Penurunan nilai keanekaragaman plankton dan bentos semakin tampak b. Kelimpahan total, biomassa dan produktivitas belum mengalami perubahan berarti, serta algae hijau berfilamen mulai tampak pada zona litoral
5,0 – 5,5	Penurunan keanekaragaman, komposisi jenis plankton perifiton, bentos semakin besar, terjadi penurunan kelimpahan total dan biomassa zooplankton dan bentos, dan algae hijau berfilamen semakin banyak serta proses nitrifikasi terhambat
4,5 – 5,0	Penurunan keanekaragaman, komposisi jenis plankton perifiton, bentos semakin besar, algae hijau berfilamen semakin banyak serta proses nitrifikasi terhambat dan penurunan kelimpahan total dan biomassa zooplankton dan bentos

Sumber : Novorty Olem dalam Wartiniyati, 2016

Peraturan Pemerintah no. 82 tahun 2001 mengatur besarnya pH di dalam air yang diperbolehkan :

Tabel 18. Baku Mutu Parameter pH untuk Setiap Kelas Air

Parameter	Satuan	Kelas				Ket
		I	II	III	IV	
pH	-	6-9	6-9	6-9	5-9	Apabila secara alamiah di luar rentang tersebut, maka ditentukan berdasarkan kondisi alamiah

II.10.7. Suhu

Suhu merupakan salah satu parameter fisik yang dipersyaratkan dalam kriteria mutu air di Indonesia. Secara umum suhu air yang tinggi di sungai disebabkan oleh intensitas sinar matahari yang masuk ke badan air cukup tinggi, intensitas paparan radiasi sinar matahari yang masuk ke badan air serta kerapatan vegetasi di sekitar bantaran sungai juga mempengaruhi suhu air sungai (Marlina *et al*, 2017).

Suhu perairan merupakan salah satu faktor yang amat penting bagi kehidupan organisme di perairan. Suhu merupakan salah satu faktor eksternal yang paling mudah untuk diteliti dan ditentukan. Aktivitas metabolisme serta penyebaran organisme air banyak

dipengaruhi oleh suhu air, suhu juga sangat berpengaruh terhadap kehidupan dan pertumbuhan biota air, suhu pada badan air dipengaruhi oleh musim, lintang, waktu dalam hari, sirkulasi udara, penutupan awan dan aliran serta kedalaman air (Hamuna *et al*, 2018).

Suhu perairan dipengaruhi oleh intensitas cahaya matahari, ketinggian geografis, dan faktor penutupan pepohonan (kanopi) dari vegetasi yang tumbuh disekitarnya, perbedaan lainnya disebabkan karena adanya perbedaan waktu pengukuran, juga diduga disebabkan karena adanya perbedaan kandungan nutrient atau ion-ion garam yang secara fisik dapat meningkatkan daya hantar panas. Pola suhu perairan dapat dipengaruhi oleh faktor antropogen (yang disebabkan oleh aktivitas manusia) seperti limbah panas, yang berasal dari air pendingin pabrik, penggundulan hutan yang menyebabkan hilangnya perlindungan badan air (Khairul, 2017).

Peraturan Pemerintah no. 82 tahun 2001 mengatur besarnya suhu di dalam air yang diperbolehkan :

Tabel 19. Baku Mutu Parameter Suhu untuk Setiap Kelas Air

Parameter	Satuan	Kelas				Ket
		I	II	III	IV	
Temperatur	°C	deviasi 3	deviasi 3	deviasi 3	deviasi 5	deviasi temperatur dari keadaan alamiahnya

II.10.8. Nitrit

Nitrit di perairan berasal dari oksidasi amonia dengan memanfaatkan ketersediaan oksigen terlarut dalam air, amonia masuk ke dalam perairan melalui pembusukan organisme yang sudah mati dan limbah serta pengikatan nitrogen oleh bakteri (Utomo *et al*, 2013). Menurut Ihsan *et al* (2019) aktivitas pertanian dapat mengurangi kualitas air akibat pencemaran oleh kandungan Nitrat dan Nitrit dari pupuk. Dalam perairan alami, nitrit (NO₂) ditemukan dalam jumlah yang sangat sedikit, dikarenakan nitrit bersifat tidak stabil dengan keberadaan oksigen. Nitrit merupakan anion dari garam nitrit anorganik seperti natrium nitrit, nitrit terbentuk secara alami oleh siklus nitrogen selama proses fiksasi nitrogen dan kemudian diubah menjadi nitrat yang merupakan nutrisi utama pada tanaman dan bahan pakan ternak (Cockburn *et al*, 2013)

Nitrit merupakan bentuk peralihan (intermediate) dari amonia menjadi nitrat pada proses nitrifikasi, dan dari nitrat menjadi gas nitrogen pada proses denitrifikasi, kandungan

senyawa nitrit yang tinggi di perairan disebabkan oleh aktifitas yang tinggi dari bakteri pengurai akibat pembuangan limbah rumah tangga, pertanian, serta industri. Kandungan nitrit yang tinggi di perairan dapat berbahaya bagi kesehatan manusia karena senyawa nitrit memiliki sifat toksik yaitu mampu mengoksidasi ion ferrous (Fe^{2+}) menjadi ion ferric (Fe^{3+}) di dalam hemoglobin (Hb), yang dapat mengubah hemoglobin menjadi methaemoglobin (MetHb) di dalam darah (Juliasih *et al*, 2017).

Peraturan Pemerintah no. 82 tahun 2001 mengatur konsentrasi Nitrit di dalam air yang diperbolehkan :

Tabel 20. Baku Mutu Parameter Nitrit untuk Setiap Kelas Air

Parameter	Satuan	Kelas				Ket
		I	II	III	IV	
Nitrit sebagai N	mg/L	0,06	0,06	0,06	-	Bagi pengolahan air minum secara konvensional, $\text{NO}_2\text{-N} \leq 1$ mg/L

II.11. Klorofil-a

Klorofil-a adalah kandungan utama fotosintesis pada tumbuhan, konsentrasi dari klorofil-a mengindikasikan adanya fitoplankton dan eutrofikasi di perairan (Qanita *et al*, 2019). Klorofil-a adalah salah satu parameter indikator tingkat kesuburan di suatu perairan. Tinggi rendahnya kandungan klorofil-a dipengaruhi oleh faktor hidrologi perairan (suhu, salinitas, pH, DO, arus, nitrat, fosfat), Beberapa parameter fisika kimia yang mempengaruhi sebaran klorofil-a adalah intensitas cahaya dan nutrisi (Sihombing & Aryawati, 2013).

Klorofil-a merupakan pigmen fitoplankton yang berperan penting dalam proses fotosintesis. Proses fotosintesis juga dipengaruhi oleh sinar cahaya yang masuk di dalam perairan sehingga apabila kekeruhan di suatu perairan tinggi dapat menyebabkan berkurangnya penetrasi cahaya yang masuk ke dalam perairan, salah satu penentu tingkat kesuburan suatu perairan bergantung pada konsentrasi klorofil-a perairan, semakin tinggi nilai klorofil-a maka semakin tinggi kesuburan suatu perairan, konsentrasi klorofil-a sangat terkait dengan kondisi oseanografi suatu perairan, klorofil-a merupakan salah satu parameter untuk menduga biomassa fitoplankton dan menentukan produktivitas primer di perairan (Nuzapril *et al*, 2019).

Beberapa metode yang dapat dilakukan dalam analisis klorofil-a diantaranya :

- a. Metode Trichromatic (Hadiningrum, 2018)

Tahap pertama yang dilakukan adalah menyaring air sampel dengan menggunakan kertas filter yang berporositas 1,2 μm . Kemudian menambahkan larutan aseton 90% hingga 10 ml di dalam tabung sentrifus. Selanjutnya mensentrifus tabung-tabung ekstraksi pada putaran 2000 rpm selama 30 menit. Lalu mencari nilai absorbansi sampel dengan menggunakan spektrofotometer. Konsentrasi klorofil-a dihitung dengan menggunakan rumus :

$$Ca = 11,85 (E664) - 1,54 (E647) - 0,08 (E630), \text{ mg/L}$$

$$\text{Klorofil-a, mg/m} = \frac{\text{Ca} \times \text{vol.ekstrak,L}}{\text{vol.contoh uji,m}^3}$$

Keterangan : Ca = Klorofil-a, E = absorbansi pada panjang gelombang

b. Penginderaan jarak jauh

Sartika *et al* (2019) melakukan pemetaan sebaran Total Suspended Solid (TSS) dan klorofil-a (Chl-a) di perairan Sungai Wanggu menggunakan Citra Sentinel-2, pada penelitian tersebut dilakukan 2 analisis yaitu analisis citra dan analisis satelit. Analisis satelit Sentinel-2B diawali dengan koreksi atmosferik atas (TOA) dan koreksi atmosferik bawah (BOA), koreksi TOA menggunakan aplikasi QGIS dan untuk mendapatkan nilai reflakstansi BOA sesuai dengan European Space Agency's (ESA) digunakan rumus :

$$R_{ts} : R_t/\pi$$

Keterangan :

R_{ts} : Reflektansi BOA

R_t : Reflektansi TOA

π : Nilai π pada software SNAP

Analisis klorofil-a dari citra Sentinel-2B menggunakan algoritma :

$$\text{Chla} = 25.985x^{3.117}$$

Keterangan : $x = \frac{Rrs(\lambda 5)}{Rrs(\lambda 4)}$, Rrs adalah Reflektansi citra Sentinel-2

Qanita *et al* (2019) melakukan analisis sebaran kandungan TSS dan klorofil-a di Banjir Kanal Barat menggunakan citra Landsat-8 dan Sentinel-2A, pembuatan model sebaran kandungan klorofil-a dengan menggunakan Citra Landsat 8 OLI dengan fitur band math pada perangkat lunak ENVI, dilakukan dengan melihat nilai reflektansi cahaya tampak di badan air sesuai dengan kanal pada citra. Pendugaan model pada penelitian kemudian dilakukan dengan persamaan-persamaan klorofil-a dari penelitian sebelumnya yaitu :

a. Penelitian Arief dan Laksmi tahun 2006

$$\text{Chl-a} = 17,912 \times \left(\frac{b_1 - b_2}{b_4}\right) \times 0,3343$$

Keterangan : b1 = Kanal biru (Kanal 1 Landsat 7 ETM+)

b2 = Kanal Hijau (Kanal 2 Landsat 7 ETM+)

b. Penelitian Nuriya, dkk tahun 2010

$$C = 0,2818 \times \left(\frac{TM4+TM5}{TM3} \right)^{3,497}$$

Keterangan :

TM 3 = Nilai reflektansi kanal 3 dari Landsat

TM 4 = Nilai reflektansi kanal 4 dari Landsat

TM 5 = Nilai reflektansi kanal 5 dari Landsat

c. Penelitian Pentury tahun 1987

$$Chl-a = 2,3868 \left(\frac{B3}{B2} \right) - 0,4671$$

Keterangan :

B2 = Nilai reflektansi kanal 2 Landsat

B3 = Nilai reflektansi kanal 3 Landsat

II.12. *Analytic Hierarchy Process (AHP)*

Analytic Hierarchy Process (AHP) merupakan metode yang memberikan suatu kerangka berpikir yang terorganisir, rasional dan komprehensif dalam menstrukturkan suatu problem yang memungkinkan pengambilan keputusan efektif (Marimin *et al*, 2015).

Model proses analisis hirarki (berjenjang) ini diperkenalkan pertama kali oleh Thomas L. Saaty pada era 1970-an di mana ciri khas dari model ini adalah penentuan skala prioritas atas alternatif pilihan berdasarkan suatu proses analitis secara berjenjang, terstruktur atas variabel keputusan, AHP (*Analytical Hierarchy Process*) memiliki sebuah hirarki fungsional dengan input utamanya persepsi manusia. Dengan hirarki, suatu masalah kompleks dan tidak terstruktur dipecahkan ke dalam kelompok-kelompoknya dan diatur menjadi suatu bentuk hirarki (Agustin, 2012). Achu *et al* (2020) menyebutkan bahwa AHP adalah metode terstruktur untuk menganalisis dan memecahkan masalah yang kompleks dengan cara dekomposisi, penilaian komparatif dan pembuatan prioritas. Dekomposisi masalah menangkap elemen dasar masalah dan struktur hierarkinya dikembangkan dengan mengatur tujuan, sasaran, atribut dan alternatif.

Margana (2017) menyebutkan bahwa langkah-langkah dalam metode AHP adalah :

a. Membuat matriks perbandingan berpasangan

$$A = [a_{in}] = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

Matriks perbandingan berpasangan hanya mengisi nilai pada segitiga atas dan diagonal utamanya. Nilai pada diagonal utama selalu bernilai 1 karena perbandingan kriteria a dan kriteria a hasilnya 1. Untuk mengisi nilai segitiga atas, digunakan perbandingan intensitas kepentingan. Nilai pada segitiga bawah adalah bentuk kebalikan dari segitiga atas. Penilaian perbandingan paling baik adalah menggunakan skala 1 sampai 9.

Tabel 21. Skala intensitas kepentingan pada matriks *pairwise comparison*

Intensitas kepentingan	Keterangan
1	Kedua kriteria sama penting
3	Kriteria yang satu sedikit lebih penting dari pada kriteria lainnya
5	Kriteria yang satu lebih penting dari pada kriteria lainnya
7	Kriteria yang satu jelas lebih mutlak penting dari pada kriteria lainnya
9	Kriteria yang satu mutlak penting dari pada kriteria lainnya
2,4,6,8	Nilai-nilai diantara dua nilai pertimbangan kriteria yang berdekatan
Kebalikan	Jika aktivitas i mendapat satu angka dibandingkan dengan aktivitas j, maka j memiliki nilai kebalikan dari i

- b. Menormalisasi matriks keputusan dengan cara setiap kolom matriks dijumlahkan, lalu masing-masing nilai kolom pada matriks dibagi dengan nilai total kolomnya.
- c. Menentukan bobot kriteria dengan cara merata-ratakan baris matriks pada langkah sebelumnya sejumlah n bobot w, yaitu w1, w2,, wn

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{ij}$$

- d. Menentukan tingkat konsistensi dari matriks perbandingan berpasangan yang telah didapat dari langkah sebelumnya :
 - Menentukan $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ yang didapat dengan cara mengalikan bobot setiap kriteria dengan jumlah kolom matriks keputusan pada langkah b.
 - Menentukan nilai λ_{maks} dimana $\lambda_{maks} = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n$
 - Menghitung *Consistency Index* (CI) sebagai berikut :

$$CI = \frac{\lambda_{max} - \bar{n}}{n - 1} \quad n = \text{banyaknya kriteria}$$

- Menghitung *Consistency Ratio* (CR) dengan rumus

$$CR = \frac{CI}{IR} \quad IR = \text{Index Random}$$

Tabel 22. Tabel Index Random

Ukuran Matriks	1	2	3	4	5	6	7	8
Nilai IR	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41

Jika nilai $CR \leq 0,1$, maka matriks perbandingan berpasangan dapat dikatakan konsisten dan bobot yang dihasilkan dapat digunakan.

II. 13. Uji Validitas, Reliabilitas dan Metode Estimasi Kesalahan Pengukuran

Validitas adalah suatu indeks yang menunjukkan alat ukur itu benar-benar mengukur apa yang hendak diukur. Pengujian validitas menggunakan SPSS, pengujian validitas tiap butir kuisisioner pada program SPSS dengan menggunakan teknik korelasi product moment antara skor tiap butir kuisisioner dengan skor total (jumlah tiap skor kuisisioner). Instrumen dikatakan valid apabila nilai korelasi (*pearson correlation*) adalah positif, dan nilai probabilitas korelasi [*sig. (2-tailed)*] < taraf signifikan (α)0,05. Reliabilitas adalah indeks yang menunjukkan sejauh mana suatu alat pengukur dapat dipercaya atau diandalkan. Hal ini menunjukkan sejauh mana hasil pengukuran itu tetap konsisten bila dilakukan dua kali atau lebih terhadap gejala yang sama, dengan menggunakan alat ukur yang sama. Alat ukur dikatakan reliabel jika menghasilkan hasil yang sama meskipun dilakukan pengukuran berkali-kali. Metode yang digunakan untuk mengukur reliabilitas kuisisioner adalah dengan metode Cronbach's Alpha. Kuisisioner dikatakan reliabel, jika nilai Cronbach Alpha lebih besar dari r tabel (Widi, 2011).

Kesalahan pengukuran menunjuk pada sejauh mana inkonsistensi hasil pengukuran terjadi apabila pengukuran dilakukan ulang pada kelompok subjek yang sama. Semakin kecil harga kesalahan pengukuran maka pengukuran semakin cermat dan semakin dapat dipercaya. Ada dua macam kesalahan dalam pengukuran yaitu kesalahan sistematis dan kesalahan acak. Ada beberapa sumber kesalahan yang mempengaruhi hasil pengukuran yang meliputi alat ukur, objek yang diukur, lingkungan pengukuran, dan subjek yang mengukur. Salah satu metode untuk mengestimasi besarnya kesalahan pengukuran didasarkan pada root mean square error (RMSE) yang dihasilkan oleh masing-masing metode. RMSE digunakan untuk

membandingkan metode-metode estimasi yang digunakan, yaitu untuk menentukan metode estimasi yang paling akurat. Keakuratan metode estimasi kesalahan pengukuran diindikasikan dengan adanya RMSE yang kecil. Metode estimasi yang mempunyai RMSE lebih kecil dikatakan lebih akurat daripada metode estimasi yang mempunyai RMSE lebih besar (Widayati, 2009).

II.14. Pengelolaan lingkungan sungai

Pengelolaan DAS merupakan upaya manusia dalam mengendalikan hubungan timbal balik antara sumberdaya alam dengan manusia dan segala aktifitasnya, dengan tujuan membina kelestarian dan keserasian ekosistem serta meningkatkan kemanfaatan sumberdaya alam bagi manusia secara berkelanjutan (Ekawati *et al*, 2005)

Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (DAS) dalam pelaksanaannya melibatkan banyak *stakeholders* dan pengambil keputusan, khususnya dalam pemanfaatan sumberdaya alam dengan berbagai tujuannya, sehingga pendekatan multidisiplin merupakan keharusan esensial. Kegiatan dalam pengelolaan DAS harus melibatkan institusi pemerintah dari berbagai bidang atau sektor serta berbagai kelompok masyarakat. Partisipasi kelembagaan dalam pengelolaan DAS perlu dibatasi pada komunitas yang secara langsung berpengaruh dan berkaitan (Paimin *et al*, 2012). Partisipasi stakeholder adalah aspek yang sangat penting dalam pengelolaan DAS terkait proses pengambilan keputusan dan penentuan kebijakan lingkungan, sering kali dalam pengelolaan sungai harus menghadapi interaksi yang kompleks antara aktor dan sektor yang bertentangan, maka perlu pemahaman terhadap keberadaan *stakeholder* sangat penting, sehingga dapat mengerti peranan dan posisi pihak-pihak yang terlibat (Alviya *et al*, 2016).

Pengelolaan DAS tidak terlepas dari berbagai permasalahan, antara lain masalah penurunan sumberdaya alamiah, polusi dari berbagai sumber, serta konflik penggunaan lahan disekitar DAS. DAS memikul beban yang sangat berat dengan meningkatnya pemanfaatan atau eksploitasi sumber daya alam secara intensif sehingga kondisi DAS mengalami degradasi, selain penurunan kualitas air terjadi pula kecenderungan peningkatan bencana di sekitar DAS seperti tanah longsor, erosi dan sedimentasi. Keterkaitan antara sungai, pengelolaan dan kondisi masyarakat sungai merupakan sebuah bentang alam yang panjang, terbagi menjadi banyak bagian-bagian dengan karakteristik dan masalah yang berbeda, pengelolaan sungai harus dilihat sebagai suatu kesatuan alamiah yang terdiri dari wilayah hulu, tengah dan hilir (*one river, one plan, one management*) (Suganda *et al*, 2009).

Putra et al (2019) menyebutkan bahwa keberlanjutan DAS dapat tercapai apabila setiap aktivitas pengelolaan dijalankan berdasarkan prinsip kelestarian yang memadukan keseimbangan antara produktivitas dan konservasi untuk mencapai tujuan pengelolaan DAS yaitu :

1. Meningkatkan stabilitas tata air
2. Meningkatkan stabilitas tanah, termasuk mengendalikan proses degradasi lahan
3. Meningkatkan pendapatan petani
4. Meningkatkan perilaku masyarakat ke arah kegiatan konservasi yang mengendalikan aliran permukaan dan banjir.

Pengelolaan DAS terpadu adalah upaya terpadu dalam pengelolaan sumber daya alam, meliputi tindakan pemanfaatan, penataan, pemeliharaan, pengawasan, pengendalian, pemulihan dan pengembangan DAS beraskan pelestarian kemampuan lingkungan yang serasi dan seimbang untuk menunjang pembangunan yang berkesinambungan bagi peningkatan kesejahteraan manusia (Sudaryono, 2002).



Sekolah Pascasarjana