

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Pencemaran Lingkungan Air Permukaan

Pencemaran air permukaan adalah masalah utama di banyak negara, termasuk Indonesia. Pencemaran air dapat mengancam kualitas sungai sebagai sumber air minum, irigasi, dan habitat organisme. Kualitas air sungai perlu dijaga untuk kelangsungan hidup (DLHK DIY, 2021). Namun adanya aktivitas manusia sering menyebabkan terjadinya penurunan kualitas air permukaan akibat polusi dari limbah domestik, industri, dan pestisida yang tidak terkendali (Rahman *et al.*, 2021).

Adapun jenis-jenis pencemaran air permukaan meliputi:

- a) Pencemaran organik dari limbah seperti sisa makanan dan kotoran hewan yang meningkatkan BOD dan merugikan kehidupan akuatik.
- b) Pencemaran kimiawi dari logam berat, pestisida, dan detergen yang berbahaya bagi kesehatan dan ekosistem air.
- c) Pencemaran mikroplastik dari plastik sekali pakai dan serat sintetis yang mengancam biota air.

Terdapat 3 kategori sumber pencemaran sungai, yaitu:

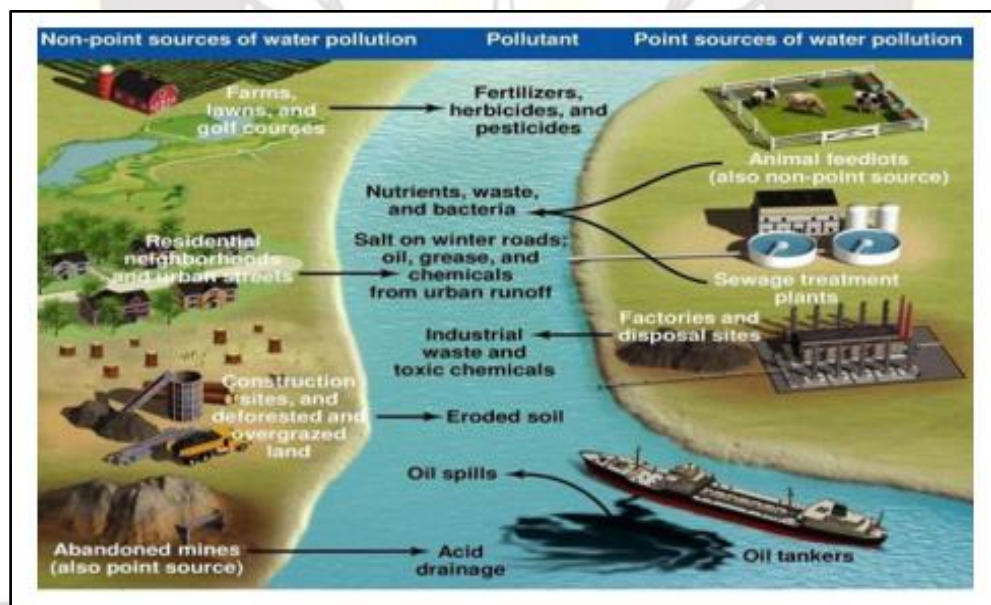
- a) Sumber tetap (*point source*) seperti limbah industri, domestik, dan pertanian pada satu titik pencemaran.
- b) Sumber tidak menetap (*diffuse source*) yang berasal dari berbagai lokasi, termasuk limbah rumah tangga, industri, dan pertanian.

c) Gabungan sumber tetap dan tidak menetap (*compound area source*).

Tabel 2.1 merupakan klasifikasi sumber pencemar air, sedangkan Gambar 2.1 merupakan gambaran dari sumber pencemar air permukaan sungai.

Tabel 2.1 Klasifikasi Sumber Pencemar Air (Menteri Negara Lingkungan Hidup, 2010)

Karakteristik Limbah	Sumber Tertentu (<i>Point Sources</i>)	Sumber Tak Tentu (<i>Diffuse Sources</i>)
Limbah Domestik	Aliran limbah urban dalam sistem saluran dan sistem pembuangan limbah domestik terpadu.	Aliran limbah daerah pemukiman di Indonesia Pada umumnya.
Limbah Non Domestik	Aliran limbah industri, pertambangan.	Aliran limbah pertanian, peternakan, dan kegiatan usaha kecil-menengah.



Gambar 2.1 Gambaran Sumber Pencemar Air (Ahmed & Yousef, 2019)

2.2 Kajian Dampak Pencemaran Lingkungan Air Permukaan

Pencemaran air permukaan berdampak signifikan terhadap lingkungan dan kesehatan manusia, dengan beberapa dampak utama yang ditimbulkan, antara lain:

- a) Dampak kerusakan ekosistem perairan, yaitu terjadinya pencemaran air yang dapat mengganggu kehidupan biota air, termasuk ikan, plankton, dan tumbuhan air. Masuknya polutan seperti limbah industri dan rumah tangga dapat menurunkan kadar oksigen terlarut dalam air, menghambat proses fotosintesis tanaman air, dan menyebabkan kematian organisme perairan.
- b) Dampak penurunan kualitas air tanah, yaitu terjadinya pencemaran air permukaan yang dapat meresap ke dalam tanah dan mencemari air tanah yang sering digunakan sebagai sumber air minum. Kandungan bakteri atau zat kimia berbahaya dalam air tanah yang tercemar dapat menimbulkan risiko kesehatan bagi manusia.
- c) Dampak kesehatan pada manusia, yaitu dimana manusia mengkonsumsi atau menggunakan air yang tercemar sehingga dapat menyebabkan berbagai penyakit, seperti diare, kolera, tifus, hepatitis A, dan iritasi kulit. Paparan jangka panjang terhadap air yang mengandung zat berbahaya juga dapat meningkatkan risiko kanker.
- d) Dampak gangguan rantai makanan, yaitu terjadinya akumulasi polutan dalam air pada organisme perairan melalui rantai makanan hingga mencapai manusia. Hal ini dapat menyebabkan efek toksik dan gangguan kesehatan lainnya.
- e) Dampak penurunan estetika lingkungan, yaitu air yang tercemar seringkali berbau tidak sedap dan berwarna keruh, mengurangi nilai estetika lingkungan dan dapat berdampak negatif pada pariwisata serta kualitas hidup masyarakat sekitar.

Untuk mengurangi dampak pencemaran air, perlu dilakukan pencegahan

dan penanggulangan, seperti pengelolaan limbah yang baik, pengurangan bahan kimia berbahaya, dan peningkatan kesadaran masyarakat dalam menjaga kebersihan lingkungan. Beberapa upaya untuk mengelola dan mencegah pencemaran air permukaan meliputi:

- a) Melakukan pengelolaan limbah dengan mengimplementasi sistem pengolahan limbah domestik dan industri yang efektif.
- b) Melakukan pengawasan penggunaan bahan kimia dengan mengontrol penggunaan pestisida dan bahan kimia berbahaya lainnya melalui regulasi ketat.
- c) Melakukan edukasi dan kesadaran masyarakat dengan berkampanye tentang kelestarian lingkungan untuk meningkatkan kesadaran masyarakat akan pentingnya menjaga kebersihan air permukaan.

2.3 Kajian Kualitas Air Permukaan Sungai

Kualitas air diukur berdasarkan standar baku mutu dan melibatkan komponen kimia, biologis, dan fisik. Sungai yang tercemar dapat merugikan karena memberikan banyak manfaat seperti sumber kehidupan, ekosistem, dan transportasi. Kualitas air bervariasi dari hulu ke hilir, dengan hulu yang lebih jernih dan hilir yang lebih rentan terhadap pencemaran.

2.3.1 Parameter Kualitas Air

Parameter kualitas air terdiri dari parameter fisik, kimia, dan biologi.

a) Parameter Fisik

i. Suhu

Suhu adalah ukuran energi gerakan molekul dan penting untuk proses

kehidupan serta penyebaran organisme. Suhu air yang lebih tinggi dari rata-rata dapat menjadi tanda adanya konsentrasi tinggi senyawa terlarut, seperti sulfur atau fenol, atau adanya proses dekomposisi bahan organik oleh mikroorganisme.

ii. Kekeruhan

Air yang jernih dan tidak keruh merupakan tanda air yang baik. Lumpur dan limbah industri merupakan contoh unsur biologis dan anorganik yang dapat menghasilkan kekeruhan. Turbiditas air dapat menghalangi penetrasi sinar matahari, membahayakan ikan serta organisme yang menjadi makanan ikan, dan juga dapat mempengaruhi karakteristik optik perairan.

iii. TDS

TDS (*Total Dissolved Solids*) merupakan ukuran keseluruhan dari jumlah zat padat terlarut dalam air. TDS menjadi salah satu parameter penting untuk mengevaluasi kualitas air, baik untuk konsumsi manusia, penggunaan industri, maupun untuk melindungi kesehatan ekosistem akuatik. TDS mencakup berbagai jenis ion atau partikel yang terlarut dalam air, seperti mineral, garam, logam, dan senyawa organik.

b) Parameter Kimia

i. pH

pH (*Potential Hydrogen*) merupakan satuan yang digunakan untuk pengukuran yang menyatakan logaritma negatif dari konsentrasi ion H dan menunjukkan seberapa asam atau basa suatu lingkungan. Air yang baik adalah air yang tidak tercemar dan bersifat netral. Jika terdapat zat

pencemar, air bisa menjadi asam atau basa. pH penting dalam pengolahan air untuk meningkatkan kualitas, karena mempengaruhi toksisitas senyawa kimia, proses biokimia, dan metabolisme organisme air. Limbah yang mengandung asam karbonat, asam mineral bebas, dan senyawa FeS_2 yang bereaksi dengan air menghasilkan H_2SO_4 dan ion Fe^{2+} terlarut merupakan penyebab utama rendahnya pH.

ii. COD

Seluruh jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi bahan organik secara kimiawi dikenal sebagai *Chemical Oxygen Demand* (COD). COD juga mengukur kadar limbah anorganik berdasarkan jumlah oksigen yang diperlukan untuk memecahnya. Semakin banyak sampah anorganik dalam air, semakin tinggi kebutuhan oksigen mikroorganisme untuk memecahnya, sehingga angka COD meningkat.

iii. BOD

Jumlah oksigen yang dikonsumsi oleh bakteri di dalam air untuk mengurai bahan organik disebut *Biological Oxygen Demand* (BOD). Parameter ini menunjukkan seberapa banyak bahan organik dalam air yang dapat terurai secara biologis. Angka BOD meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah limbah organik karena mikroorganisme diperlukan untuk menguraikan.

iv. DO

Jumlah oksigen terlarut dalam air sebagai hasil fotosintesis dan penyerapan udara dikenal sebagai *Dissolved Oxygen* (DO). Karena fotosintesis dan

difusi, menyebabkan kadar oksigen lebih tinggi di permukaan air. Berkurangnya proses fotosintesis dan sedikitnya oksigen yang digunakan untuk pernapasan serta oksidasi bahan organik dan anorganik pada kedalaman yang lebih dalam menyebabkan jumlah oksigen terlarut menurun. Nilai DO yang rendah menunjukkan air yang tercemar, sedangkan nilai DO yang tinggi menunjukkan kualitas air yang baik.

c) Parameter Biologi

i. Coliform

Sebagai indikator biologi untuk mengidentifikasi pencemaran dalam air dari bakteri total coliform yang terbentuk dari bahan organik. Bakteri ini dapat ditemukan di lingkungan yang terpengaruh oleh air permukaan dan limbah manusia serta hewan, meskipun sifatnya sebagian besar tidak berbahaya, namun adanya indikasi ini menunjukkan adanya pencemaran lingkungan.

2.3.2 Baku Mutu Air Sungai

Kriteria baku mutu air sungai ditetapkan berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 Tentang Penyelenggaraan Pengelolaan dan Perlindungan Lingkungan Hidup, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Baku Mutu Air Sungai

No.	Parameter	Unit	Kelas 1	Kelas 2	Kelas 3	Kelas 4	Keterangan
1.	Temperatur	°C	Dev 3	Dev 3	Dev 3	Dev 3	Perbedaan dengan suhu udara di atas permukaan air
2.	TDS (Padatan terlarut total)	mg/L	1.000	1.000	1.000	2.000	Tidak berlaku untuk muara
3.	TSS (Padatan tersuspensi total)	mg/L	40	50	100	400	

No.	Parameter	Unit	Kelas 1	Kelas 2	Kelas 3	Kelas 4	Keterangan
4.	Warna	Pt-Co Unit	15	50	100	-	Tidak berlaku untuk air gambut (berdasarkan kondisi alamnya)
5.	pH (Derajat keasaman)		6 - 9	6 - 9	6 - 9	6 - 9	Tidak berlaku untuk air gambut (berdasarkan kondisi alamnya)
6.	BOD (Kebutuhan oksigen biokimiawi)	mg/L	2	3	6	12	
7.	COD (Kebutuhan oksigen kimiawi)	mg/L	10	25	40	80	
8.	DO (Oksigen terlarut)	mg/L	6	4	3	1	Batas minimal
9.	SO ₄ (Sulfat)	mg/L	300	300	300	400	
10.	Cl (Klorida)	mg/L	300	300	300	600	
11.	Nitrat	mg/L	10	10	20	20	
12.	Nitrit	mg/L	0,06	0,06	0,06	-	
13.	Amonia	mg/L	0,1	0,2	0,5	-	
14.	Total Nitrogen (N)	mg/L	15	15	25	-	
15.	Total Fosfat (P)	mg/L	0,2	0,2	1.0	-	
16.	Fluorida (F)	mg/L	1	1,5	1,5	-	
17.	Belarang (H ₂ S)	mg/L	0,002	0,002	0,002	-	
18.	Sianida (CN)	mg/L	0,02	0,02	0,02	-	
19.	Klorin bebas	mg/L	0,03	0,03	0,03	-	Bagi air baku air minum tidak dipersyaratkan
20.	Barium (Ba)	mg/L	1,0	-	-	-	
21.	Boron (B)	mg/L	1,0	1,0	1,0	1,0	
22.	Merkuri (Hg)	mg/L	0,001	0,002	0,002	0,005	
23.	Arsen (As)	mg/L	0,05	0,05	0,05	0,10	
24.	Selenium (Se)	mg/L	0,05	0,05	0,05	0,05	

No.	Parameter	Unit	Kelas 1	Kelas 2	Kelas 3	Kelas 4	Keterangan
25.	Besi (Fe)	mg/L	0,3	-	-	-	
26.	Kadmium (Cd)	mg/L	0,01	0,01	0,01	0,01	

Sumber: PP Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021

Penjelasan klasifikasi empat kelas adalah sebagai berikut:

- Kelas satu:** adalah air yang dapat dimanfaatkan untuk air baku untuk minum, serta untuk keperluan lain yang mensyaratkan mutu air yang sama dengan keperluan tersebut.
- Kelas dua:** adalah air yang dapat dimanfaatkan untuk irigasi pertanian, peternakan, budidaya ikan air tawar, prasarana dan jasa rekreasi air, serta untuk keperluan lain yang mensyaratkan mutu air yang sama dengan keperluan tersebut.
- Kelas tiga:** adalah air yang dapat digunakan untuk akuakultur (budidaya ikan air tawar), peternakan, irigasi tanaman, serta untuk keperluan lain yang mensyaratkan mutu air yang sama dengan keperluan tersebut.
- Kelas empat:** Air ini dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan yang memerlukan kualitas air yang sama, seperti mengairi pertanian.

2.4 Kajian Pemodelan Sistem Kualitas Air

Pemodelan pengendalian lingkungan air permukaan semakin berkembang dengan *software* seperti Eulerian, WASP, QUAL2Kw, dan ANN, yang membantu memantau kualitas air sungai melalui grafik prediksi kondisi atau kejadian tertentu.

2.4.1 Pemodelan Eulerian dan Lagrangian

Pemodelan Eulerian umumnya digunakan untuk sungai karena menekankan unsur adveksi lebih dari dispersi, sementara pemodelan Lagrangian lebih cocok

untuk danau atau waduk karena menyoroiti keseimbangan dispersi dan adveksi, terutama untuk waduk yang luas dan dalam.

2.4.2 Pemodelan *Water Quality Analysis Simulation Program* (WASP)

Model WASP menerapkan teori konservasi massa pada analisis kualitas air di berbagai badan air. Tujuannya adalah menyederhanakan pemahaman perilaku kejadian tertentu (Ambrose, 2017).

Model ini memerlukan *input* seperti replikasi, pemetaan, dan data adveksi serta dispersi. WASP mensimulasikan zat terlarut menggunakan rumus keseimbangan massa dan kinetika kimia, mempertimbangkan masukan, keluaran, serta perubahan fisik, kimia, dan biologis (Hindriani, 2013). Metode *finite difference* digunakan untuk membagi model menjadi bagian lebih kecil, mengontrol variabel perubahan, pemuatan, dan pemindahan zat terlarut dalam satu dimensi vertikal dan lateral.

2.4.3 Pemodelan QUAL2Kw

USEPA telah mengembangkan model QUAL2Kw menggunakan Microsoft Excel dan VBA, sebagai versi terbaru dari QUAL2E. Model ini dapat mereplikasi berbagai faktor yang mempengaruhi kualitas air, seperti suhu, konduktivitas, oksigen terlarut, nitrogen, fosfor, fitoplankton, detritus, patogen, dan pH (Pelletie, Chapra, & Tao, 2006).

Qual2Kw menggunakan teknik aliran satu dimensi untuk merepresentasikan sungai dalam berbagai ukuran dan kondisi stabil (Hossain, Sujaul, & Nasly, 2014). Model ini dapat menggambarkan perpindahan zat pencemar dan aliran sungai yang tidak seragam serta mewakili sumber pencemaran dari *point sources* dan *nonpoint*

sources. Hasil simulasi ditampilkan dalam grafik, dan validitas model diperiksa dengan metode MRE (*Mean Relative Error*) (Zaman & Syafrudin, 2007), dimana MRE kurang dari 10% dianggap valid (Setiawan, Widyastuti, & Hadi, 2018).

2.4.4 Pemodelan ANN (*Artificial Neural Network*)

Suatu metode *Artificial Neural Network* (ANN) menggunakan perangkat lunak komputer untuk meniru cara otak manusia belajar. Seperti teknologi pembelajaran mesin, ANN dapat memprediksi keadaan atau peristiwa tertentu (Kusumadewi, 2003)

Pemanfaatan ANN dengan *Rapidminer* untuk pemantauan kualitas air bertujuan meningkatkan kecepatan, akurasi, efisiensi, dan kegunaan informasi. ANN dapat menangani fungsi non linier dan kompleks, memerlukan data besar untuk pelatihan dan prediksi. ANN telah diterapkan dalam berbagai bidang, termasuk prediksi kualitas air sungai, yang dievaluasi menggunakan metode RMSE (*Root Mean Square*) serta R^2 (*R-squared*) untuk mengukur ketepatannya (Azamathulla, Rathnayake, & Shatnawi, 2018).

2.5 Kajian Sistem Informasi Geografis (SIG)

Sistem Informasi Geografis (SIG) adalah teknologi komputer yang digunakan untuk mengumpulkan, menyimpan, mengatur, memodifikasi, dan menampilkan data spasial dan geografis dari dunia nyata (Irwansyah, 2013).

SIG meliputi subsistem untuk *input*, *output*, manajemen, modifikasi, dan analisis data, serta komponen tambahan seperti perangkat lunak dan perangkat keras. Kemampuannya dalam mengelola data geografis dan atribut menjadikannya alat bantu pengambilan keputusan yang potensial (Kraak & Ormeling, 2007).

Fungsi umum SIG termasuk perhitungan, menampilkan peta dengan atribut berbeda, menyusun *database* non-spasial, *overlay*, *buffering*, memperbarui data, menghubungkan data spasial, dan menghasilkan peta tematik untuk perencanaan pembangunan.

2.5.1 Data Spasial

Perangkat lunak SIG didesain untuk mengelola data spasial atau geografis mencakup informasi posisi, hubungan antar fitur, dan detail karakter non-spasial. Data spasial dalam SIG disajikan dalam format *raster* dan *vector* (Eddy, 2002).

a) Data *raster*

Data raster adalah data spasial yang disusun dalam *grid* kotak terstruktur, digunakan untuk membuat peta seperti gambar digital atau citra satelit, dengan informasi spasial disimpan dalam matriks atau piksel.

b) Data *vector*

Data vector, atau data yang direkam sebagai koordinat titik, digunakan untuk menampilkan, menemukan, dan menyimpan data spasial menggunakan titik, garis, kurva, atau area (poligon) dan atributnya. Tiga elemen yang membentuk representasi grafis suatu objek pada data vektor dijelaskan sebagai berikut:

i. Titik

Representasi grafis paling dasar dari suatu objek adalah titik. Titik merupakan simbol non-dimensi yang dapat ditampilkan pada peta atau layar komputer, seperti lokasi fasilitas medis.

ii. Garis (*line*)

Garis mewakili objek satu dimensi seperti selokan, sungai, jalan, dan lain

sebagainya, dan merupakan bentuk linier yang menghubungkan dua titik atau lebih.

iii. Area (poligon)

Poligon merupakan representasi objek dalam dua dimensi, contohnya yaitu danau, persil tanah dan lain sebagainya.

Dalam pemrosesan data spasial perlu diperhatikan beberapa hal yang penting, antara lain:

a) Pemasukan Data

Data spasial adalah data dengan referensi terestrial yang dimasukkan ke dalam SIG, meliputi peta analog, foto udara, gambar digital, dan propertinya. Data masukan SIG terdiri dari dua komponen utama: data visual dan data spasial konvensional, yang dikategorikan dalam tiga kelompok, yaitu:

- i. Data statistik dari peta analog, sensus, catatan lapangan, dan sumber data tabular lainnya adalah sumber data atribut, atau informasi numerik.
- ii. Data grafis atau spasial diperoleh dari peta analog, seperti foto udara dan citra penginderaan jauh lainnya dalam format cetak.
- iii. Data penginderaan jauh digital diperoleh dari gambar udara yang ditangkap oleh pesawat penumpang atau *drone*, serta rekaman satelit seperti Landsat, SPOT, NOAA, IKONOS, dan Quickbird.

b) Pemrosesan Data

Pemrosesan data dalam SIG melibatkan manajemen, manipulasi, dan analisis data yang dapat dikelola, diperbarui, atau dimodifikasi. SIG memungkinkan *overlay* peta, pembuatan peta jarak melalui *buffer*, transformasi koordinat, dan

klasifikasi data, yang meningkatkan kemudahan, efektivitas, dan efisiensi analisis.

c) Keluaran data

Hasil keluaran SIG dapat berupa cetakan digital atau *hard copy*, seperti peta atau tabel, yang digunakan untuk tujuan tertentu atau pengambilan keputusan yang memerlukan pertimbangan spasial.

2.5.2 Pemodelan Spasial

Pemodelan adalah representasi dari dunia nyata yang melibatkan asumsi dan penyederhanaan untuk memprediksi, memahami, dan mendeskripsikan fenomena atau sistem. Ada dua jenis model, yaitu model representatif yang menggambarkan objek di permukaan bumi, dan model proses yang mensimulasikan fenomena yang terjadi di permukaan bumi.

a) Model Representatif

- i. Deskripsi bagian pada permukaan bumi, seperti aliran air, hutan, dan bangunan.
- ii. Pembuatan model dengan Sistem Informasi Geografis dalam *layer* data.
- iii. Dapat berupa *vector*/raster.
- iv. Menjelaskan informasi objek (misalnya bentuk bangunan, luas) dan hubungan dengan objek lain (misalnya distribusi bangunan).
- v. Model atribut dari objek (misalnya siapa pemilik bangunan atau lahan pertanian) termasuk dalam model deskriptif (*descriptive models*).

b) Model Proses

Mendeskripsikan interaksi atau hubungan objek-objek yang dimodelkan dalam

gambaran model. Beberapa contoh model proses antara lain:

- i. Pemodelan Kesesuaian untuk menentukan lokasi pendidikan, tambang, industri, dan permukiman.
- ii. Pemodelan Jarak untuk perhitungan jarak terdekat, seperti aplikasi ojek *online* dan Google Maps.
- iii. Pemodelan Hidrologi untuk memodelkan arah aliran air yang mempengaruhi pencemaran sungai.
- iv. *Surface Modeling* untuk memodelkan tingkat polusi atau pencemaran suatu daerah.

Dari model representatif dan model proses, maka model dapat diklasifikasikan menjadi 4 jenis, antara lain:

a) Deskriptif dan Preskriptif

Model deskriptif yang mendeskripsikan suatu objek atau kondisi *existing* misalnya penggunaan lahan, model preskriptif adalah model yang memprediksi suatu objek atau kondisi yang seharusnya, misalnya rencana tata ruang.

b) Deterministik dan Stokastik (probabilitas/statistik)

Model deterministik mengasumsikan variabel yang memiliki nilai unik (*unique value*) contohnya DEM (*Digital Elevation Model*) TerraSAR, sedangkan model stokastik mengasumsikan variabel mengikuti beberapa distribusi probabilitas, contohnya DEM hasil interpolasi titik ketinggian.

c) Dinamik dan Statik

Model dinamik yaitu pemodelan yang memperlakukan waktu sebagai variabel yang berubah, menggambarkan perilaku sistem seiring waktu, sedangkan

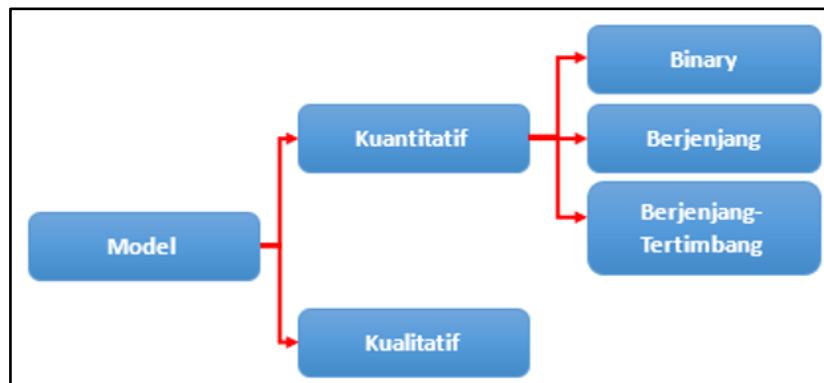
model statik pemodelan yang memperlakukan waktu sebagai variabel konstan dan fokus pada struktur sistem yang tidak berubah. Model dinamis lebih fleksibel dan dapat menyesuaikan dengan perubahan waktu, seperti perubahan di tambak dan pemukiman, sementara model statis, seperti kontaminasi lingkungan dan kualitas air, cenderung lebih kaku dan tidak berubah secara *real-time*.

d) Deduktif dan Induktif

Pemodelan deduktif lebih mengacu pada teori, contohnya potensi longsor atau banjir, sedangkan pemodelan induktif lebih mengacu pada data empiris, contohnya pemodelan longsor atau banjir berdasarkan data historis.

Pemodelan spasial dapat dikategorikan menjadi 2 seperti yang nampak pada Gambar 2.2, antara lain:

- a) Kualitatif yaitu pemodelan yang klasifikasi data secara kualitatif, misalnya data yang menjelaskan secara karakteristik, non-matematis, serta data nominal maupun ordinal, contohnya pemodelan sebaran jumlah sarjana, data jenis kelamin, data sebaran pemenang pemilu.
- b) Kuantitatif yaitu pemodelan spasial yang menggunakan model matematis, merupakan hasil perhitungan dan pengukuran serta data interval dan rasio. Terdapat 3 kategori antara lain *binary*, berjenjang dan berjenjang-tertimbang, contohnya pemodelan potensi banjir, pemodelan tingkat kualitas air sungai, pemodelan kesesuaian lahan.



Gambar 2.2 Kategori Pemodelan Spasial (Irwansyah, 2013)

- i. **Binary** adalah notasi yang digunakan bersifat biner yang terdiri dari 0 dan 1 (benar/salah, terjadi/tidak terjadi, sesuai/tidak sesuai, dan lain-lain).
- ii. **Berjenjang** adalah setiap kelas dalam parameter memiliki harkat yang berbeda, namun antar parameter memiliki bobot yang sama.
- iii. **Berjenjang Tertimbang** adalah setiap kelas dalam parameter memiliki harkat yang berbeda dan antar parameter memiliki bobot yang berbeda.

2.5.3 *Analytical Hierarchy Process (AHP)* atau **Proses Hirarki Analitik (PHA)**

Analytical Hierarchy Process (AHP) adalah metode kompleks yang membagi masalah multi kriteria menjadi pilihan terbaik menggunakan hierarki dan nilai numerik, membantu menetapkan prioritas, mengalokasikan sumber daya, dan perencanaan (Riadi, 2020). AHP didasarkan pada tiga prinsip pokok dalam analisis (Syukron, 2013), yaitu:

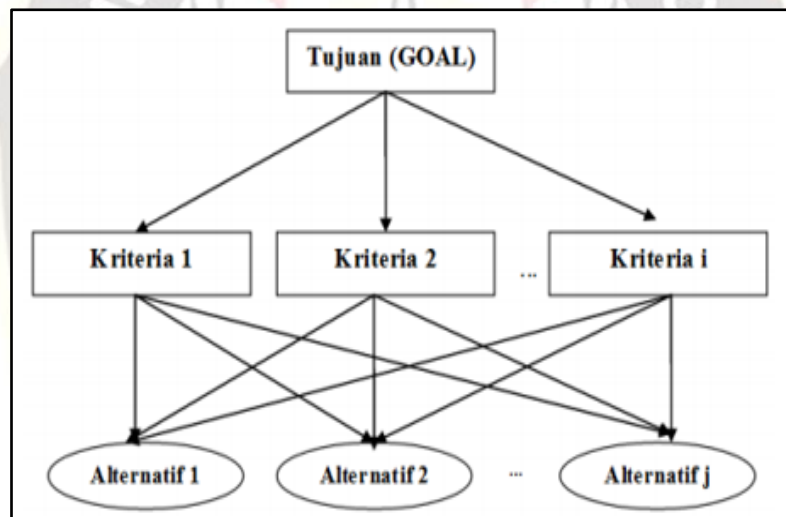
- a) Penyusunan hirarki, yang mengorganisir realitas kompleks menjadi komponen dan subkomponen secara hierarkis untuk memperoleh informasi tepat.
- b) Menentukan prioritas, yang melibatkan pandangan para ahli atau pihak berkompeten dalam pengambilan keputusan.

- c) Konsistensi logis, yang menggabungkan aspek kualitatif dan kuantitatif untuk menyampaikan penilaian dan preferensi secara jelas.

Sedangkan menurut (Mulyono, 2016) prinsip-prinsip yang digunakan dalam penyelesaian permasalahan dengan metode AHP adalah sebagai berikut:

- a) Dekomposisi

Dengan menggunakan sistem proses pengambilan keputusan yang saling berhubungan, prinsip ini dapat menyelesaikan situasi kompleks menjadi bagian-bagian komponennya. Bentuk struktur dekomposisi digambarkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Hierarki Keputusan AHP (Mulyono, 2016)

Seperti yang nampak pada Gambar 2.3, untuk memperoleh hasil yang akurat, penyelesaian permasalahan pada setiap tingkat penyusunan harus mencapai solusi yang tidak memungkinkan untuk diselesaikan lebih lanjut, menghasilkan solusi pada beberapa tingkat. Struktur hierarki keputusan dapat berupa lengkap atau tidak lengkap, di mana hierarki tidak lengkap berarti elemen pada satu tingkat tidak terhubung dengan semua elemen pada tingkat berikutnya.

b) *Comparative Judgement*

Prinsip AHP digunakan untuk mengevaluasi signifikansi relatif dua elemen pada satu tingkat terhadap tingkat di atasnya. Matriks *pairwise comparison* menunjukkan tingkat preferensi alternatif berdasarkan kriteria tertentu, dengan skala preferensi dari 1 (terendah) hingga 9 (tertinggi). Tabel 2.3 menyajikan skala untuk perbandingan berpasangan.

Tabel 2.3 Skala Perbandingan Berpasangan (Mulyono, 2016)

Intensitas Kepentingan	Definisi
1	Sama pentingnya dibanding dengan yang lain
3	Sedikit lebih penting dibanding dengan yang lain
5	Cukup penting dibanding dengan yang lain
7	Sangat penting dibanding dengan yang lain
9	Ekstrem pentingnya dibanding dengan yang lain
2, 4, 6, 8	Nilai diantara dua penilaian yang berdekatan
Resiprokal	Jika elemen 1 memiliki salah satu angka di atas dibandingkan elemen j, maka j memiliki nilai kebalikannya ketika dibanding dengan i

c) *Synthesis of Priority*

Prinsip ini menggunakan matriks *pairwise comparison* untuk menemukan vektor *eigen* dan memperoleh prioritas lokal, yang kemudian disintesis untuk mendapatkan prioritas global di setiap tingkat.

d) *Logical Consistency*

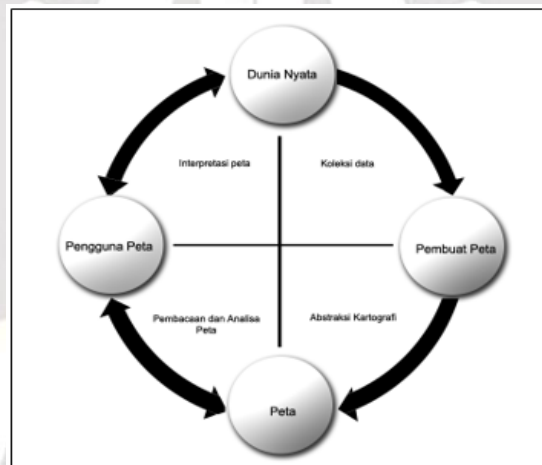
Merupakan karakteristik yang paling penting. Proses pembuatan vektor *composite* yang menghasilkan urutan pengambilan keputusan melibatkan penggabungan semua vektor *eigen* yang diperoleh dari tingkat hierarki.

2.5.4 Representasi Data Spasial

Representasi data spasial mengubah data tabular menjadi peta grafis dengan

simbol, warna, dan teks. Warna menunjukkan fitur seperti kemiringan lereng, simbol garis menandakan batas administratif dan jalan, sedangkan penataan teks untuk memudahkan pemahaman ruang. Peta kartografi menggambarkan wilayah dan muka bumi berdasarkan aspek lingkungan nyata, meningkatkan pemahaman pengguna melalui pembacaan, analisis, dan interpretasi peta (Kraak & Ormeling, 2007).

Pada Gambar 2.4 menunjukkan hubungan langsung antara pembuat dan pengguna peta, di mana pembuat peta mengumpulkan data dan menyajikannya dalam bentuk grafis untuk memudahkan pengguna. Keberhasilan penggunaan peta tergantung pada pemahaman pembaca terhadap kebutuhan pengguna, serta pada penggunaan simbol yang sesuai dengan skala dan bentuk peta agar akurat merepresentasikan dunia nyata. Hubungan yang baik antara pembuat dan pengguna peta sangat penting untuk komunikasi yang efektif (Muehrcke, 1972)



Gambar 2.4 Proses Komunikasi Dalam Kartografi (Muehrcke, 1972)

2.6 Kajian Jaringan Syaraf Tiruan (JST) *Backpropagation*

Jaringan Syaraf Tiruan (JST) adalah metode *machine learning*, khususnya

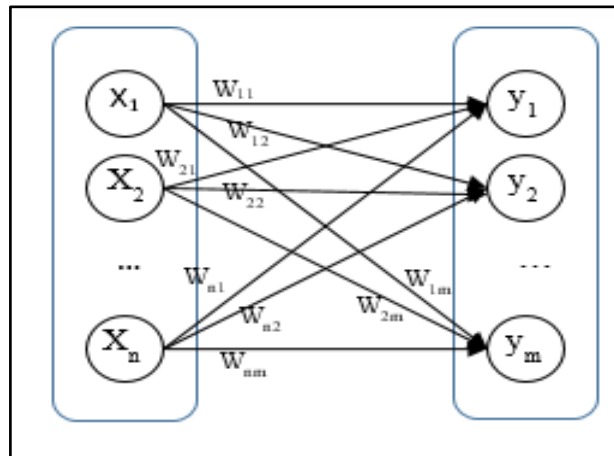
deep learning yang meniru cara kerja saraf manusia, memprediksi data berdasarkan pembelajaran sebelumnya, dan memberikan keputusan untuk data baru. Teknik ini populer karena mensimulasikan pembelajaran melalui pembobotan nilai dan menggunakan unit komputasi berupa lapisan (*neuron*) (Aggarwal & Sahoo, 2018).

Jaringan saraf tiruan dibentuk sebagai generalisasi model matematika dari jaringan saraf biologis manusia, dengan asumsi bahwa:

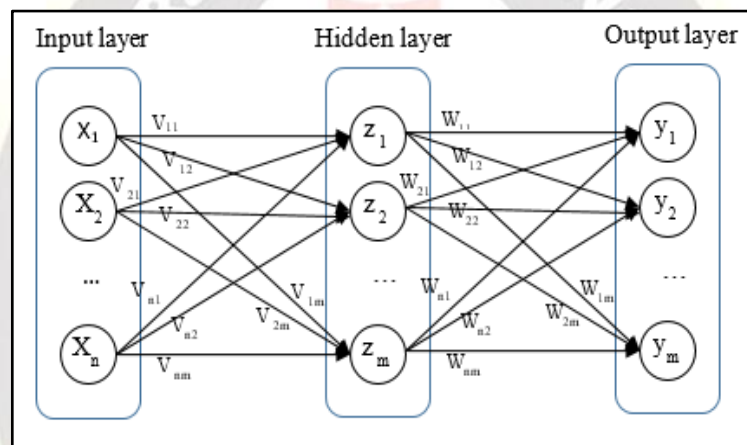
- a) Banyak komponen dasar seperti *neuron* dalam pemrosesan informasi.
- b) *Neuron* berkomunikasi satu sama lain melalui koneksi.
- c) Ada bobot dalam koneksi antara *neuron* yang menentukan seberapa kuat atau lemah sinyal tersebut.
- d) Fungsi aktivasi yang biasanya merupakan fungsi non linier, diterapkan pada kuantitas masukan yang diterima oleh setiap *neuron* untuk menentukan keluaran. Kemudian, batas ambang dibandingkan dengan besarnya keluaran.

Neuron disusun dalam lapisan-lapisan pada jaringan saraf tiruan yang terdiri dari lapisan masukan, tersembunyi, dan keluaran, dengan informasi ditransmisikan antar *neuron*. Arsitektur yang paling umum digunakan adalah jaringan multi lapis dengan pembelajaran *backpropagation* (Masruroh & Mauladi, 2020).

Satu atau lebih *hidden layer* hadir dalam jaringan disajikan pada Gambar 2.5 dan Gambar 2.6. Jaringan multi lapis lebih baik dalam memecahkan masalah pada proses pelatihan daripada jaringan satu lapis yang dalam proses pelatihannya bisa jadi lebih sulit.



Gambar 2.5 Arsitektur Jaringan Lapisan Tunggal



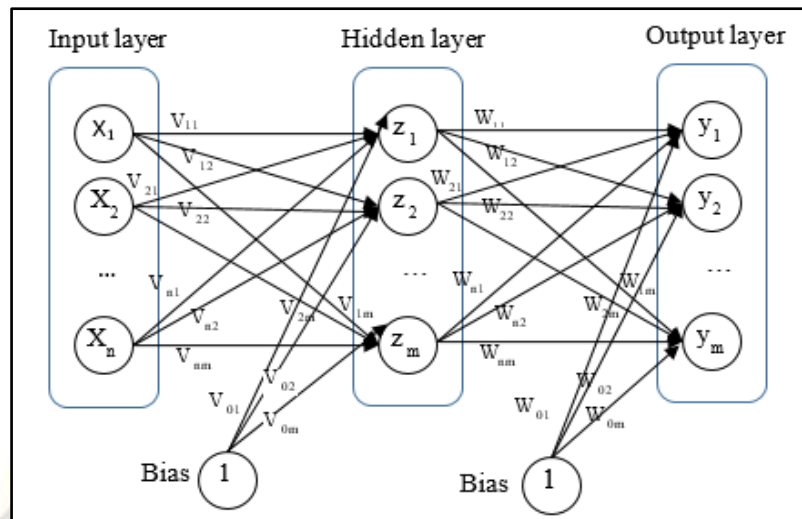
Gambar 2.6 Arsitektur Jaringan Banyak Lapisan

Backpropagation adalah algoritma Jaringan Syaraf Tiruan (JST) yang menyesuaikan bobot untuk mengurangi kesalahan prediksi, unggul dalam mengenali pola dengan akurasi tinggi, serta fleksibel dalam mempelajari data baru, menjadikannya cocok untuk prediksi dan pengenalan pola (Wanto, 2019).

Backpropagation memiliki kelemahan seperti hasil pelatihan yang tidak konsisten, kurangnya transparansi, serta risiko peramalan tidak valid jika *input* berada di luar *range* pelatihan atau data latih tidak mencukupi (Masruroh & Mauladi, 2020).

Backpropagation pada Jaringan Syaraf Tiruan menyesuaikan bobot untuk

meminimalkan perbedaan antara *output* yang dihasilkan dan yang diinginkan melalui proses iteratif. Jaringan ini terdiri dari tiga lapisan: masukan, tersembunyi, dan keluaran. Komponen lapisan (*layer*) tersebut tampak pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Arsitektur Jaringan JST *Backpropagation* 1 Hidden Layer

Penjelasan masing-masing bagian pada Gambar 2.7 adalah sebagai berikut:

a) *Input Layer* (Lapisan Masukan)

Neuron pada lapisan masukan berfungsi sebagai *input* dalam JST *Backpropagation*. Jumlahnya dapat disesuaikan dengan jumlah data atau parameter yang dianalisis dan dikenal sebagai *neuron input layer*. Pada Gambar 2.7 nampak bahwa *neuron input layer* disimbolkan dengan X_i ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$).

b) *Hidden Layer* (Lapisan Tersembunyi)

Layer ini berfungsi sebagai jembatan antara lapisan *input* dan *output* dalam JST dan terletak di tengah. Z_i mewakili *neuron* ini ($Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_n$).

c) *Output Layer* (Lapisan Keluaran)

Neuron yang dihasilkan oleh JST *Backpropagation* ditemukan di lapisan ini.

Y_i ($Y_1, Y_2, \dots, Y_n$) mewakili lapisan keluaran *neuron*.

d) Bobot V + Bias

Pada *input layer* dan *hidden layer*, bobot dan bias menghubungkan setiap *neuron*. Bobot yang dikenal sebagai Bobot V_{ij} berfungsi sebagai penghubung antara *neuron input layer* dan *hidden layer*. Bobot V , yang menghubungkan setiap *neuron* pada *input layer* ke *hidden layer*, merupakan komponen penting. Pada sisi lain, bias yang dapat dihilangkan atau diabaikan, meningkatkan laju pembelajaran.

e) Bobot W + Bias

Bobot dan bias menghubungkan setiap *neuron* di *hidden layer* dan *output layer*. Bobot W_{ij} adalah bobot yang menghubungkan *neuron* di lapisan tersembunyi ke lapisan keluaran. Bias yang dapat dihilangkan atau diabaikan dapat meningkatkan laju pembelajaran. Bobot W , pada sisi lain komponen penting untuk menghubungkan setiap *neuron* di *hidden layer* ke *output layer*.

Penentuan pembobot dan simulasinya adalah sebagai berikut:

- a) Dengan menggunakan rentang nilai antara 0 dan 1 atau -1 dan 1, bobot V awal, bobot W awal, dan bias awal ditentukan secara acak. Nilai bobot awal tidak terlalu tinggi atau terlalu besar berkat pemilihan kedua jarak. Jumlah *neuron* di *input layer* dan *hidden layer* menentukan jumlah bobot V . Jumlah bobot V yang menghubungkan kedua lapisan ini adalah 16 jika ada 4 *neuron* di *input layer* dan 4 *neuron* di *hidden layer*.
- b) Besarnya bobot W juga didasarkan pada jumlah *neuron* pada *hidden layer* dan *output layer*, sama halnya dengan bobot V . Bila terdapat 3 *neuron* pada *hidden*

layer dan 1 pada *output layer*, maka total bobot W yang menghubungkan kedua lapisan tersebut adalah 3.

Langkah prediksi pada *JST Backpropagation* (Pohan, Warsito, & Suryono, 2020) adalah sebagai berikut:

- a) Inisialisasi parameter untuk jumlah *neuron input*, *neuron tersembunyi*, *neuron* lapisan *output*, *learning rate*, jumlah iterasi dan toleransi *error* dengan persamaan:

$$\begin{aligned} \text{Value } V &= (n_{\text{input}} + 1) * n_{\text{hidden}} \\ \text{Value } W &= (n_{\text{hidden}} + 1) * n_{\text{output}} \end{aligned} \quad (2.1)$$

- b) Hitung nilai *neuron* pada lapisan keluaran (nilai Z) termasuk perhitungan nilainya dari Z ($Z_1, Z_2, Z_3, \dots Z_n$) menggunakan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} Z_{\text{in}_j} &= V_{oj} + \sum_{i=0}^n X_i V_{ij} \\ Z_j &= f(Z_{\text{in}_j}) \end{aligned} \quad (2.2)$$

- c) Menghitung nilai *neuron* pada lapisan *output* (nilai Y) termasuk perhitungan nilainya dari Y_i ($Y_1, Y_2, Y_3, \dots Y_n$) menggunakan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} Y_{\text{in}_k} &= W_{ok} + \sum_{j=0}^n Z_j W_{jk} \\ Y_k &= f(Y_{\text{in}_j}) \end{aligned} \quad (2.3)$$

- d) Melakukan perhitungan propagasi mundur (*backpropagation*) dari lapisan *output* ke lapisan tersembunyi untuk memperbarui bobot yang menghubungkan lapisan keluaran dan lapisan tersembunyi (bobot W), menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} W_{jk}(\text{new}) &= W_{jk}(\text{old}) + \Delta W_{jk} \\ W_{ok}(\text{new}) &= W_{ok}(\text{old}) + \Delta W_{ok} \end{aligned} \quad (2.4)$$

- e) Melakukan perhitungan propagasi mundur (*backpropagation*) dari lapisan tersembunyi ke lapisan *input* untuk memperbarui berat V menggunakan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} V_{ij}(\text{new}) &= V_{ij}(\text{old}) + \Delta V_{ij} \\ V_{0j}(\text{new}) &= V_{0j}(\text{old}) + \Delta V_{0j} \end{aligned} \quad (2.5)$$

2.7 Kajian Jaringan Sensor Nirkabel Berbasis SMS Gateway

2.7.1 Arsitektur Jaringan Sensor Nirkabel

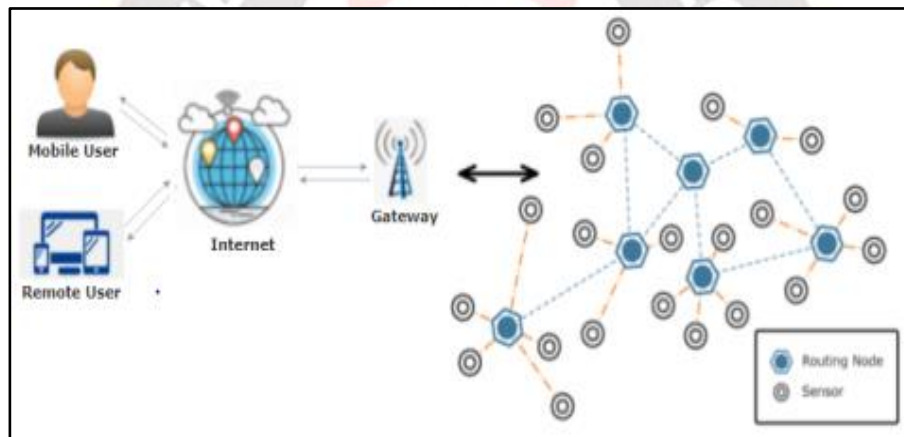
Jaringan sensor nirkabel bermanfaat untuk pemantauan secara waktu nyata di area yang sulit dijangkau. Keunggulannya meliputi fleksibilitas, skalabilitas, biaya rendah, efisiensi energi, serta ketahanan terhadap kegagalan. Teknologi ini banyak diterapkan dalam pemantauan lingkungan, *smart home*, *smart city*, keamanan, dan kesehatan (Ahmad, Wazirali, & Abu-Ain, 2022).

Jaringan sensor nirkabel kini menggunakan teknologi IoT, dengan *Narrowband-IoT* (NB-IoT) berbasis *Long-Term Evolution* (LTE) untuk koneksi efisien. NB-IoT memanfaatkan spektrum yang ada tanpa gangguan, mendukung keamanan, pelacakan, dan otentikasi, serta terintegrasi dengan infrastruktur LTE untuk konektivitas yang lancar (Jawad *et al.*, 2017).

Pada Gambar 2.8 menunjukkan aplikasi dari jaringan sistem sensor nirkabel, sedangkan pada Gambar 2.9 merupakan gambaran dari arsitektur jaringan nirkabel dengan beberapa titik pantau.

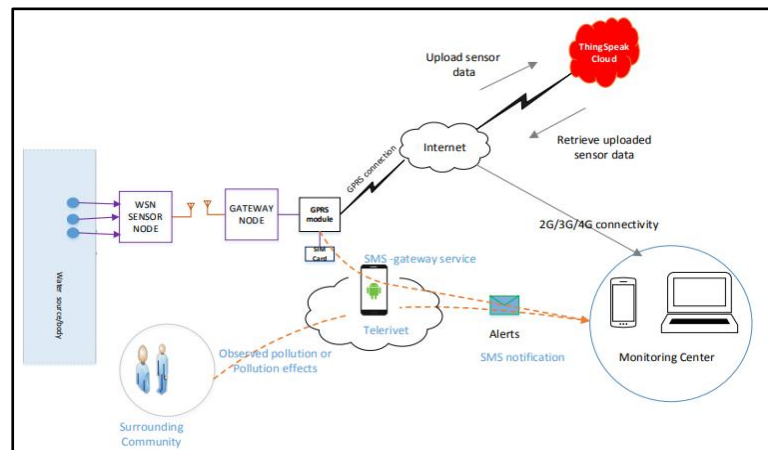


Gambar 2.8 Aplikasi Jaringan Sensor Nirkabel (Ahmad, Wazirali, & Abu-Ain, 2022)



Gambar 2.9 Arsitektur Jaringan Nirkabel *Multi Node* (Majid *et al.*, 2022)

Jaringan sensor nirkabel berkembang pesat dalam monitoring lingkungan dengan biaya rendah dengan teknologi kecerdasan buatan secara terdistribusi. Sistem ini mengurangi biaya instalasi dan pemeliharaan serta memungkinkan pemantauan secara waktu nyata, seperti monitoring air limbah (Zakaria & Michael, 2017). Jaringan sensor nirkabel yang terdiri dari sensor, komputasi dan titik pantau secara komunikasi nirkabel memungkinkan monitoring dan pengumpulan data parameter tertentu di lingkungan termasuk kualitas air seperti yang disajikan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Arsitektur Jaringan Sistem Nirkabel Pada Kualitas Air
(Zakaria & Michael, 2017)

2.7.2 Arsitektur SMS Gateway

SMS adalah layanan pesan teks yang dikembangkan oleh ETSI untuk pengiriman pesan melalui jaringan GSM. SMS Gateway adalah perangkat lunak yang memungkinkan pengiriman pesan dari sistem informasi ke perangkat seluler, banyak digunakan dalam beberapa proyek sebagai dukungan pelanggan (*user*). Perangkat ini dapat diintegrasikan dengan PC dan ponsel yang disesuaikan sesuai kebutuhan. Fitur-fitur umum yang dibuat dalam aplikasi SMS Gateway meliputi:

- a) **Auto-reply**, pada SMS Gateway otomatis merespons pesan masuk. Ketika pengirim mengirim SMS dalam format yang dikenali, seperti permintaan informasi, aplikasi secara otomatis membalas dengan mengirimkan informasi yang diminta bersama SMS tersebut.
- b) **Pengiriman massal**, nama lainnya adalah SMS *broadcast*, dan tujuannya adalah untuk mengirimkan SMS ke beberapa penerima sekaligus. Misalnya, untuk memberikan informasi produk terbaru kepada klien.

- c) **Pengiriman terjadwal**, SMS dapat diprogram agar terkirim secara otomatis pada waktu tertentu kepada penerima tertentu. Misalnya, untuk tujuan memantau lingkungan.

SMS Gateway menggunakan SMSC (*Short Message Service Center*) untuk mengirim dan menyimpan pesan, dengan kemampuan mengirim SMS dalam jumlah besar melalui jalur operator seluler. Namun, akses ke SMSC sulit bagi bisnis kecil, sehingga alternatifnya adalah menggunakan ponsel atau modem GSM/CDMA (*Global System for Mobiles/Code Division Multiple Access*) yang terhubung ke komputer. Metode ini lebih mudah diterapkan karena jaringan GSM yang stabil. Pembangunan SMS Gateway memerlukan perangkat sederhana seperti komputer, modem, kabel data, dan aplikasi pendukung, dengan bahasa pemrograman seperti PHP, ASP, Delphi, atau Visual Basic. Selain itu, SMS dapat dikelola tanpa pemrograman menggunakan *database* administration seperti PhpMyAdmin.

a) **AT Command**

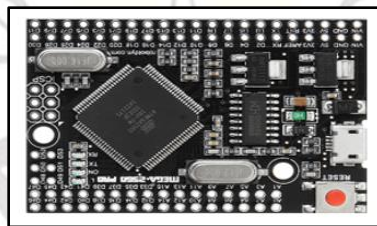
AT Command adalah perintah untuk komunikasi antara komputer dan modem GSM/*handphone* melalui *serial port*, memungkinkan akses informasi dalam modem seperti membaca sinyal dan mengelola pesan. Komunikasi data dilakukan secara serial, biasanya melalui RS232, antara modem dan perangkat seperti mikrokontroler.

b) **Mikrokontroler Arduino**

Untuk mendukung perangkat keras (*hardware*) pada sistem SMS gateway diperlukan suatu pengendali atau yang sering dikenal dengan mikrokontroler.

Mikrokontroler (pengendali mikro) berfungsi sebagai pengendali yang akan mengatur proses kerja dari suatu rangkaian elektronik (Novianta & Setyaningsih, 2017).

Arduino adalah board mikrokontroler *open source* seperti yang nampak pada Gambar 2.11 dengan desain skematik dan PCB yang dapat digunakan dan dimodifikasi. *Software* Arduino ditulis menggunakan Java dan memungkinkan penulisan serta kompilasi kode tanpa harus terhubung dengan *hardware*. Kode baru diunggah ke *hardware* hanya saat diperlukan. Tanpa *hardware* Arduino, *sketch* dapat dijalankan menggunakan emulator. Namun, IDE Arduino memiliki keterbatasan karena tidak mendukung *debugging hardware* atau *software* (Istianto, 2014).



Gambar 2.11 Board Mikrokontroler Arduino

c) **SIM 800L**

SIM 800L yang digambarkan pada Gambar 2.12, adalah modul mikrokontroler yang berisi solusi *dual band* GSM/GPRS lengkap dan dapat diintegrasikan ke dalam aplikasi pengguna.



Gambar 2.12 Modul GSM SIM 800L

SIM800L adalah modul GSM/GPRS dengan konsumsi daya rendah dan performa pada frekuensi 900/1800 MHz. Modul ini memiliki ukuran kecil dan ramping, memudahkan penggunaannya dalam desain sistem. Pengoperasian modul ini mudah menggunakan perintah *AT command* yang kompatibel dengan Arduino.

2.7.3 Jenis-Jenis Sensor Monitoring Kualitas Air

Pada penelitian disertasi ini untuk memonitoring perubahan parameter kualitas fisika dan kimia air permukaan sungai digunakan sensor temperatur (suhu), TDS, pH, DO dan turbidity.

a) Sensor temperatur (suhu)

Sensor suhu adalah komponen yang mengukur perubahan suhu pada suatu benda dengan mengubah panas menjadi sinyal listrik. Sensor ini termasuk dalam keluarga transduser, mengukur energi panas atau dingin yang dihasilkan oleh suatu benda untuk menghasilkan *output* analog atau digital (Siswanto & Rony, 2018).



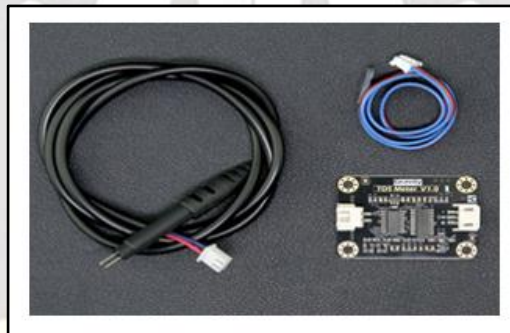
Gambar 2.13 Sensor Suhu

Pada Gambar 2.13 menampilkan sensor suhu DS18B20 yang merupakan komponen elektronik untuk mengukur variasi suhu sekitar dan mengubahnya menjadi nilai listrik. Sensor ini merupakan sebuah sensor digital yang dapat berkomunikasi dengan mikrokontroler melalui satu kabel. Sensor ini memiliki

keistimewaan karena sensor suhu dengan kode serial DS18B20 yang memungkinkan untuk penggunaan lebih dari satu komunikasi satu kabel.

b) Sensor TDS

Metode pengoperasian sensor TDS melibatkan pengukuran konduktivitas larutan, semakin keruh larutannya maka semakin bervariasi nilainya. Dengan kata lain, cairan dengan kandungan mineral tinggi akan memiliki konduktivitas yang lebih tinggi dan *output* yang lebih besar dan sebaliknya. Untuk mendeteksi nilai konduktivitas listrik dari sampel cairan, sensor TDS seperti yang digambarkan pada Gambar 2.14, menggunakan dua elektroda yang terpisah. Sementara sensor tingkat kekeruhan air memanfaatkan variasi intensitas cahaya yang ditransmisikan melalui sampel dari sumber cahaya, pembacaan konduktivitas listrik pada sensor TDS dipengaruhi oleh sifat elektrolit atau konsentrasi partikel ion dari suatu cairan.



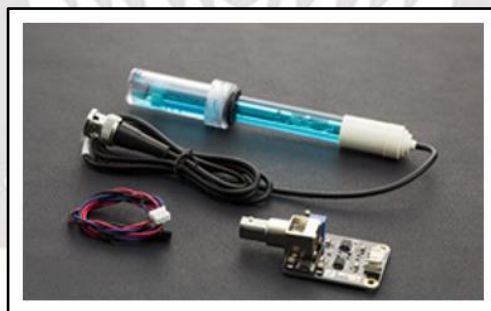
Gambar 2.14 Sensor TDS (*Total Dissolved Solids*)

Light dependent resistor (LDR), yang memiliki sensitivitas tinggi terhadap cahaya, merupakan dasar pengoperasian sensor ini (Wirman, Wardhana, & Isnaini, 2019). Satuan yang digunakan untuk TDS sensor adalah PPM (*Part per million*) yang merupakan satuan untuk pengukuran jumlah partikel terlarut. Biasanya TDS sensor diaplikasikan untuk pengecekan air minum isi ulang, air

reverse osmosis, air PAM, air destilasi, air aki, air tanah, air limbah regulasi, air sadah, budidaya hidroponik, dan koloid perak.

c) Sensor pH

Sensor pH digunakan untuk mengukur konsentrasi ion hidrogen dan menentukan nilai dari sifat asam atau basa suatu larutan. Pada skala pH, nilai 7 dianggap netral, nilai di bawah 7 menunjukkan sifat asam, dan nilai di atas 7 menunjukkan sifat basa. Skala pH mencakup rentang dari 1 hingga 14 (Saputra & Endra, 2020). Karena batang sensor pH mencakup larutan elektrolit lemah, prinsip dasar sensor ini adalah semakin banyak elektron dalam sampel, semakin asam sampel tersebut, dan sebaliknya. Gambar 2.15 mengilustrasikan sensor pH analog dan digital. Dalam analisis kimia kuantitatif, sensor ini umumnya digunakan *probe* pH yang akan mendeteksi pH dengan mengukur aktivitas ion hidrogen di sekitar kaca ber dinding tipis pada tegangan tertentu (sekitar 0,06 volt per unit pH), yang kemudian diubah menjadi pembacaan pH.



Gambar 2.15 Sensor pH

d) Sensor DO

Prosedur pengukuran kuantitas konsentrasi oksigen terlarut dalam satuan volume air disebut sebagai "sensor oksigen terlarut" atau "sensor DO". Penilaian pencemaran air dan persyaratan akuakultur merupakan penggunaan

utama dalam pengukuran DO. Kapasitas perairan untuk mendukung biota air termasuk ikan dan mikroba, serta kapasitas air untuk membersihkan polutan keduanya dijelaskan oleh jumlah oksigen terlarut dalam air (Wang *et al.*, 2021). Keakuratan data konsentrasi oksigen terlarut di air sangat penting untuk memahami perubahan akibat fenomena alam atau aktivitas manusia. Oksigen terlarut berasal dari reaksi atmosfer dan fotosintesis tanaman air. Terdapat dua metode utama untuk mengukurnya yaitu amperometri dan galvanik. Metode amperometri, juga dikenal sebagai polarografi dan voltametri, menggunakan tegangan eksternal sekitar 800mV untuk mengukur oksigen yang bereaksi pada elektroda, dengan perubahan arus yang sebanding dengan jumlah oksigen. Proses ini menggunakan larutan elektrolit seperti KCL atau KBr dan elektroda dari emas, platinum, atau paladium. Metode ini diterapkan dalam sensor DO yang digunakan dalam penelitian disertasi.

Sensor DO seperti yang nampak pada Gambar 2.16, merupakan bagian dari jenis-jenis sensor elektrokimia, dimana reaksi gas oksigen dengan larutan elektrolit menghasilkan sinyal elektrik dengan besaran yang sebanding dengan jumlah konsentrasi oksigen.



Gambar 2.16 Sensor DO (*Dissolved Oxygen*)

e) Sensor turbidity

Sensor turbidity, seperti yang nampak pada Gambar 2.17, digunakan untuk

mengukur tingkat kekeruhan air dalam menentukan kualitasnya. Sensor ini menggunakan pengukuran daya hantar dan hamburan cahaya yang berkorelasi erat dengan kandungan *Total Suspended Solids* (TSS), untuk mengidentifikasi partikel tersuspensi di air. Tingkat kekeruhan air meningkat seiring dengan peningkatan konsentrasi TSS (Fatturahman & Irawan, 2019).



Gambar 2.17 Sensor Turbidity

2.8 Kajian *Internet of Things*

Internet of Things (IoT) adalah jaringan perangkat komputer yang terhubung dengan identitas unik dan dapat berkomunikasi tanpa interaksi manusia. IoT menghubungkan dunia fisik dan virtual melalui internet, diterapkan dalam berbagai sektor seperti kota pintar, rumah pintar, dan energi pintar (Rehman *et al.*, 2022). Diperkenalkan pada 1999 oleh Kevin Ashton, IoT berpotensi menghubungkan miliaran perangkat dan memberikan dampak besar dalam meningkatkan efisiensi, produktivitas, dan inovasi (Tripathy & Anuradha, 2017). IoT juga memungkinkan komunikasi *Machine-to-Machine* (M2M) serta pengendalian jarak jauh dalam berbagai aplikasi.

Dalam hal teknologi, IoT mengandung beberapa elemen tambahan yang memungkinkannya berfungsi secara optimal, seperti:

a) Sensor

Sensor memiliki kekuatan untuk mengubah perangkat *Internet of Things* (IoT) dari sistem pasif berbasis jaringan menjadi sistem dinamis yang terintegrasi dengan lingkungan.

b) Kecerdasan Buatan

Kecerdasan buatan (AI) memainkan peran penting dalam teknologi IoT dengan mengoptimalkan aktivitas dan memungkinkan komunikasi cerdas antar perangkat. *Artificial Intelligence* (AI) memungkinkan perangkat IoT melakukan tugas analitis canggih seperti pengumpulan data, manajemen jaringan, dan pengembangan algoritma. Perangkat IoT yang dilengkapi AI dapat berfungsi secara mandiri tanpa perlu panduan pengguna.

c) Koneksi Jaringan

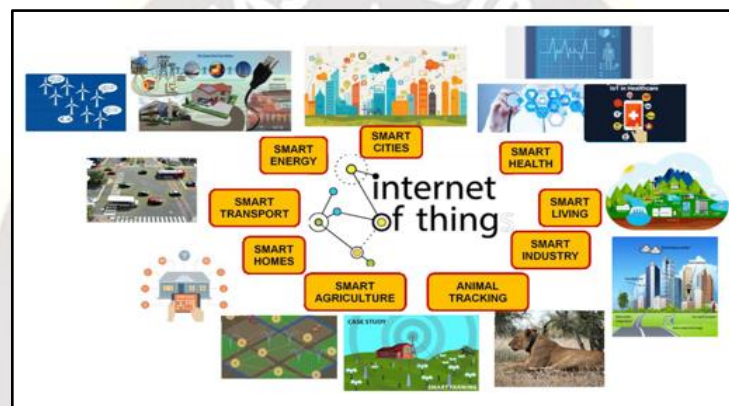
Elemen lain yang memungkinkan *Internet of Things* berkomunikasi secara efektif adalah koneksi jaringan. Konektivitas yang diperlukan tidak harus tersedia pada beban yang besar, konektivitas tersebut hanya harus berfungsi secara konsisten.

d) Perangkat Mikro

Unjuk kerja dari *Internet of Things* dapat dibuat lebih akurat, terukur, dan fleksibel dengan menyertakan perangkat berukuran mikro atau kecil. Belum lagi nilai ekonomis yang semakin sedikit dikarenakan semakin kecil ukuran perangkatnya.

Internet of Things (IoT) beroperasi melalui pemrograman yang memungkinkan perangkat terhubung berinteraksi secara otomatis tanpa partisipasi

manusia, dengan jaringan internet sebagai penghubung utama. Pada tahap ini, manusia berperan sebagai pengawas perangkat. Penggunaan IoT digambarkan pada Gambar 2.18 menyentuh berbagai aspek kehidupan, termasuk bidang tanggap darurat, kesehatan, energi, pertanian, transportasi, dan lainnya, serta memainkan peran penting dalam menciptakan lingkungan "pintar (*smart*)" di berbagai sektor (Susilawati, 2019).



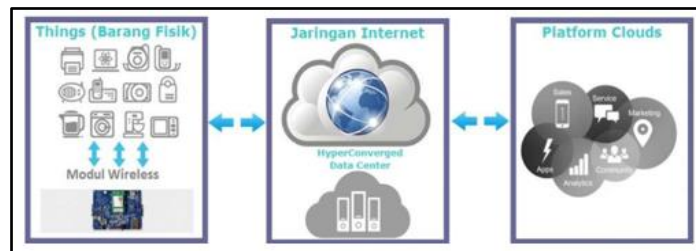
Gambar 2.18 Aplikasi IoT di Berbagai Bidang (Susilawati, 2019)

Internet of Things (IoT) merujuk pada perangkat yang dapat mengirimkan data melalui internet tanpa memerlukan interaksi manusia langsung. Kendali atas perangkat ini dilakukan secara jarak jauh, memungkinkan perkembangan *big data* dan pusat data, yang berdampak pada sektor teknologi di Indonesia (Solution, 2019).

Pada Gambar 2.19 merupakan konsep dari teknologi IoT, sebenarnya cukup sederhana dengan cara kerja mengacu pada 3 elemen utama pada arsitektur IoT, yaitu:

- a) Barang fisik yang dilengkapi modul IoT.
- b) Perangkat koneksi ke internet seperti *modem* dan *router wireless speedy* seperti di rumah.

c) *Cloud Data Center* tempat untuk menyimpan aplikasi beserta *database*.



Gambar 2.19 Konsep Teknologi IoT (Solution, 2019)

2.8.1 *Web Base Server*

Web server adalah perangkat lunak yang menerima permintaan HTTP/HTTPS dari klien (peramban web) seperti Chrome dan Firefox lalu mengirimkan halaman web sebagai respon. MySQL digunakan untuk membangun sistem basis data, seperti tabel kualitas air yang mencatat informasi tentang parameter air. Modul sensor menyediakan data dinamis untuk sistem peringatan dini, yang dikodekan dengan HTML, PHP, dan JavaScript, lalu dikompilasi menggunakan Notepad++ (Budiyanto *et al.*, 2021).

2.8.2 *GUI (Graphical User Interface)*

Otomatisasi GUI awalnya digunakan dalam pengujian antarmuka pengguna grafis sejak 1990-an, dimana alat otomatisasi hanya dapat memanipulasi *mouse* dan *keyboard* melalui *script* (Ionescu, 2021). *Graphical User Interface* (GUI) adalah sistem visual yang memungkinkan pengguna berinteraksi dengan *software* komputer melalui elemen-elemen grafis seperti tombol, menu, dan kursor. GUI menggunakan prinsip *model-view-controller* untuk menyampaikan informasi dan mewakili aksi dari pengguna seperti yang nampak pada Gambar 2.20 tanpa memerlukan *input* kode, mempermudah interaksi, dan membuat penggunaan sistem lebih mudah dipahami serta lebih menarik.



Gambar 2.20 Contoh Tampilan *Graphical User Interface* (GUI)

