

**TESIS**

**PEMODELAN HIDROGEOLOGI UNTUK PENGELOLAAN  
AIR TANAH KOTA MAJENE SULAWESI BARAT**

***HYDROGEOLOGICAL MODELING FOR GROUNDWATER  
MANAGEMENT IN MAJENE CITY, WEST SULAWESI***

**AHMAD FITHRY ARIEF LOPA  
NIM D112201007**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK PERTAMBANGAN  
DEPERTEMEN TEKNIK PERTAMBANGAN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**GOWA  
2023**

**PENGAJUAN TESIS**

**PEMODELAN HIDROGEOLOGI UNTUK PENGELOLAAN  
AIR TANAH KOTA MAJENE SULAWESI BARAT**

Tesis  
Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister  
Program Studi Ilmu Teknik Pertambangan

Disusun dan diajukan oleh



**AHMAD FITHRY ARIEF LOPA  
D112211002**

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2023**

# TESIS

## PEMODELAN HIDROGEOLOGI UNTUK PENGELOLAAN AIR TANAH KOTA MAJENE SULAWESI BARAT

**AHMAD FITHRY ARIEF LOPA**  
**D112201007**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 22 Agustus 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama



Dr. Eng. Ir. Muhammad Ramli, MT.  
NIP. 19680718 199309 1 001

Pembimbing Pendamping



Dr. Ir. Irzal Nur, M.T.  
NIP. 19660409 199703 1 002

Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin



Prof. Dr. Eng. Muhammad Isran Ramli, ST., MT.  
NIP. 19730926 200012 1 002

Ketua Program Studi  
S2 Teknik Pertambangan



Dr. Ir. Irzal Nur, MT.  
NIP. 19660409 199703 1 002

## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ahmad Fithry Arief Lopa

NIM : D112201007

Program Studi : Magister Teknik Pertambangan

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul “Pemodelan Hidrogeologi Untuk Pengelolaan Air Tanah Kota Majene Sulawesi Barat” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing utama Dr. Eng. Ir. Muhammad Ramli, M.T. dan pembimbing pendamping Dr. Ir. Irzal Nur, M.T. Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi manapun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah dipublikasikan di Prosiding Internasional berindeks *scopus* (*EICSE*) sebagai artikel dengan judul “*Groundwater Balance Analysis of Majene City, West Sulawesi*”.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin

Gowa, 25 Agustus 2023

Yang menyatakan



Ahmad Fithry Arief Lopa

## KATA PENGANTAR

Ucapan rasa syukur kepada Allah Subhanahu Wata'ala merupakan hal yang paling utama, karena berkat izin dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penulisan tesis ini dengan judul “Pemodelan Hidrogeologi Untuk Pengelolaan Air Tanah Kota Majene Sulawesi Barat“, Shalawat serta salam penulis haturkan kepada Rasullulah Muhammad Sallallahu'alihiwasallam sebagai figur utama yang menjadi pedoman hidup dalam menjalani kehidupan di dunia ini.

Penyusunan tesis ini merupakan syarat terakhir yang harus ditempuh untuk menyelesaikan pendidikan pada jenjang Strata Dua di Departemen Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Meskipun tesis ini dibuat sebagai syarat selesainya jenjang pendidikan S-2, tetapi gagasan penelitian ini lahir karena keresahan penulis sebagai praktisi *engineer* di daerah melihat kondisi pengelolaan dan eksploitasi air tanah yang tidak terarah dan tanpa perencanaan yang baik dalam penggunaannya dalam rangka pemenuhan kebutuhan masyarakat.

Tentunya bukan suatu hal yang mudah untuk menyelesaikan penyusunan tesis ini, oleh karena itu penulis ucapan terima kasih kepada Bapak Dr. Eng. Ir. Muhammad Ramli, M.T dan Bapak Dr. Ir. Irzal Nur, M,T., selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktunya untuk membimbing dan memberi arahan kepada penulis. Penulis juga mengucapkan banyak terima kasih kepada dosen penguji yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan koreksi terhadap penelitian penulis. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada staf pengajar dan staf akademik dan tata usaha di lingkungan program studi Magister Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin yang selalu membantu penulis selama penulis melaksanakan studi dan rekan-rekan seperjuangan yaitu keluarga besar mahasiswa Magister Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin dan seluruh anggota LBE Hidrologi dan Lingkungan Tambang Universitas Hasanuddin.

Penulis juga mengucapkan terima kasih pada seluruh pihak yang secara langsung maupun tidak langsung membantu penulis selama penulisan tesis. Penulis menyadari, bahwa penulisan tesis ini masih terdapat kekurangan, oleh karena itu

penulis menyampaikan permohonan maaf atas semua kekurangan yang dijumpai di dalam dokumen tesis ini. Semoga tesis ini dapat memberikan manfaat bagi kita semua. Penulis mengharapkan saran dari pembaca agar dapat menjadi masukan bagi perbaikan di masa yang akan datang.

Gowa, 25 Agustus 2023

**Ahmad Fithry A. Lopa**

## ABSTRAK

**AHMAD FITHRY A. LOPA.** Pemodelan Hidrogeologi Untuk Pengelolaan Air Tanah Kota Majene Sulawesi Barat (dibimbing oleh **Muhammad Ramli, Irzal Nur**)

Pemanfaatan air tanah sebagai sumber air sudah menjadi hal yang umum untuk daerah lahan kering di berbagai belahan dunia. Terkhusus di Kota Majene, peranan air tanah makin lama semakin penting karena air tanah menjadi sumber air utama untuk memenuhi kebutuhan pokok hajat hidup orang banyak seperti air minum, kebutuhan rumah tangga, industri, irigasi, dan lain sebagainya. Informasi tentang ketersediaan sumber daya air tanah, dan besaran konsumsinya perlu diketahui sebelum melakukan eksploitasi untuk mencapai pemanfaatan yang berkelanjutan. Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan analisis neraca air tanah, pemodelan hidrogeologi, dan analisis kualitas air tanah di Kota Majene. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah Metode *Ffoliot* untuk neraca air tanah, metode beda hingga untuk pemodelan hidrogeologi, sedangkan untuk kualitas air menggunakan metode Spektrofotometri Serapan Atom (SSA). Hasil perhitungan neraca air per-tahun yang pada sistem air tanah Kota Majene pada tahun 2021, 2026, dan 2031 adalah  $12.557.414 \text{ m}^3$ ,  $-24.651.060 \text{ m}^3$ , dan  $-24.836.726 \text{ m}^3$ . Hasil analisis tersebut menunjukkan bahwa besaran infiltrasi air tanah pada 5 dan 10 tahun yang akan datang dalam keadaan defisit sehingga untuk mengantisipasi kondisi tersebut direkomendasikan untuk melakukan imbuhan air hujan ke dalam akuifer. Pemodelan hidrogeologi menggambarkan bahwa terdapat lapisan batupasir di bagian selatan Kota Majene, lapisan tersebut merupakan lapisan akuifer bebas. Nilai kedudukan muka air tanah daerah penelitian yaitu 0 hingga 40 meter dengan arah aliran tanah menyebar dari utara ke arah selatan, barat dan timur kota Majene mengikuti bentuk garis pantai. Hasil analisis kualitas air tanah menunjukkan bahwa air tanah di Kota Majene sudah mengalami intrusi air laut, hal tersebut berdasarkan analisis diagram *trilinier piper* dan rasio klorida bikarbonat yang menunjukkan bahwa air tanah telah mengalami intrusi air laut pada tingkat sedang.

**Kata Kunci** : Neraca air, Pemodelan Hidrogeologi, SSA

## ABSTRACT

**AHMAD FITHRY A. LOPA** Hydrogeological Modeling for Groundwater Management in Majene City, West Sulawesi. (supervised by **Muhammad Ramli, Irzal Nur**)

The utilization of groundwater as a water source has become common in arid regions worldwide, particularly in Majene City, where groundwater plays an increasingly vital role in meeting the basic needs of numerous people, including freshwater supply, household usage, industrial activities, irrigation, and more. To ensure sustainable utilization, it is crucial to have comprehensive information about groundwater availability and consumption. This study aims to identify the groundwater balance, conduct hydrogeological modeling, and analyze groundwater quality in Majene City. The methods used in this study include the Ffoliot method for groundwater balance analysis, the finite difference method for hydrogeological modeling, and the Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) method for assessing water quality. The results of the calculation of the annual water balance in the groundwater system of Majene City in 2021, 2026, and 2031 are 12,557,414 m<sup>3</sup>, -24,651,060 m<sup>3</sup>, and -24,836,726 m<sup>3</sup>. The results of the analysis show that the amount of groundwater infiltration in the next 5 and 10 years is in deficit so to anticipate these conditions it is recommended to add rainwater to the aquifer. Hydrogeological modeling illustrates the presence of an unconfined aquifer layer composed of sandstone in the southern part of Majene City, with hydraulic head values ranging from 0 to 40 meters with groundwater flow oriented north to south, west, and east of Majene City in conformance with the coastal configuration. Furthermore, the analysis indicates that groundwater in Majene City has been affected by seawater intrusion, this is based on the analysis of the Piper Trilinear Diagram and the ratio of bicarbonate chloride which shows that groundwater has experienced seawater intrusion at a moderate level.

**Keywords:** Groundwater balance, hydrogeological modeling, AAS

## DAFTAR ISI

**Halaman**

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>PENGAJUAN TESIS.....</b>	<b>ii</b>
<b>PERSETUJUAN TESIS .....</b>	<b>iii</b>
<b>PERNYATAAN KEASLIAN TESIS .....</b>	<b>iv</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>	<b>xv</b>
<b>DAFTAR SINGKATAN ARTI DAN SIMBOL .....</b>	<b>xvi</b>
<b>BAB I    PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Permasalahan .....	3
1.3. Tujuan Penelitian .....	3
1.4. Manfaat Penelitian .....	4
1.5. Ruang Lingkup.....	4
<b>BAB II    TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>5</b>
2.1. Geologi Bawah Permukaan.....	5
2.1.1. Aplikasi Data Geologi dalam Mengetahui Kondisi Hidrogeologi .....	5
2.1.2. Survey Geolistrik .....	9
2.2. Pemodelan Air Tanah.....	10
2.2.1. Manfaat Model.....	12
2.2.2. Tahapan Pemodelan Hidrogeologi.....	13
2.2.3. Data Pemodelan .....	13
2.2.4. Konseptual Model .....	14
2.2.5. Kondisi Batas ( <i>Boundary Condition</i> ).....	15
2.2.6. Pemodelan Numerik.....	17
2.3. Neraca Air Tanah.....	18
2.4. Imbuhan Air ke dalam <i>Aquifer</i> .....	19
2.4.1. Curah Hujan Rencana .....	20
2.4.2. Evapotranspirasi.....	22
2.4.3. Tata Guna Lahan (Koefisien Limpasan).....	24
2.5. Abstraksi Air Tanah dari <i>Aquifer (Output)</i> .....	24

2.5.1.	Pola Konsumsi Air .....	25
2.5.2.	Tingkat Aksesibilitas Air .....	26
2.5.3.	Metode Proyeksi Penduduk .....	28
2.6.	Kualitas Air Tanah .....	29
<b>BAB III</b>	<b>METODE PENELITIAN .....</b>	<b>35</b>
3.1.	Lokasi Penelitian .....	35
3.2.	Pemodelan Hidrogeologi .....	35
3.2.1.	Data Geologi .....	36
3.2.2.	Data Topografi .....	37
3.2.3.	Data Geolistrik .....	37
3.3.	Analisis Neraca Air Hidrogeologi .....	41
3.3.1.	Data Klimatologi .....	41
3.3.2.	Data Tata Guna Lahan .....	42
3.3.3.	Data Akses Air Bersih .....	42
3.4.	Observasi Sumur Existing .....	43
3.4.1.	Pengukuran Muka Air Tanah .....	44
3.4.2.	Kualitas Air Tanah .....	44
3.5.	Bagan Alir Penelitian .....	49
<b>BAB IV</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>50</b>
4.1.	Pemodelan Hidrogeologi Kabupaten Majene .....	50
4.1.1.	Model Konseptual .....	50
4.1.2.	Model Numerik .....	61
4.2.	Infiltrasi .....	64
4.2.1.	Perhitungan Curah Hujan dan Temperatur .....	65
4.2.2.	Perhitungan Evapotranspirasi .....	66
4.2.3.	Perhitungan Infiltrasi DAS Kota Majene .....	68
4.3.	Proyeksi Kebutuhan Air .....	70
4.4.	Analisis Neraca Air Tanah Kota Majene .....	72
4.5.	Kualitas Air Tanah .....	74
4.6.	Perencanaan Sistem Pengelolaan Air Tanah .....	78
<b>BAB V</b>	<b>PENUTUP .....</b>	<b>82</b>
5.1.	Kesimpulan .....	82
5.2.	Saran .....	83
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>84</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>		<b>87</b>

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel</b>	<b>Halaman</b>
<b>Tabel 1</b> Kebutuhan data dalam pemodelan hidrogeologi (Middlemis, 2000) .....	14
<b>Tabel 2</b> Tipe-tipe Kondisi batas (Nadira, 2015).....	16
<b>Tabel 3</b> Koefisien Limpasan .....	24
<b>Tabel 4</b> Ukuran SPM sub bidang air minum daerah kabupaten/kota.....	27
<b>Tabel 5</b> Daftar persyaratan kualitas air bersih secara fisik.....	31
<b>Tabel 6</b> Klasifikasi rasio klorida bikarbonat (Revelle, 1941).....	33
<b>Tabel 7</b> Persyaratan kualitas air secara kimia (Permenkes RI, 1990) .....	34
<b>Tabel 8</b> Tipe dan sumber data yang digunakan dalam pemodelan hidrogeologi .....	36
<b>Tabel 9</b> Data curah hujan Kabupaten Majene tahun 2012 hingga 2021.....	41
<b>Tabel 10</b> Data suhu Kabupaten Majene tahun 2012 hingga 2021 .....	41
<b>Tabel 11</b> Penduduk Kota Majene tahun 2012 hingga 2021 .....	42
<b>Tabel 12</b> Perbandingan jumlah jiwa akses PDAM dengan akses sumur.....	43
<b>Tabel 13</b> Tipe airtanah berdasarkan kandungan dominan ion kation dan anion. ....	47
<b>Tabel 14</b> Pembagian fasies air tanah berdasarkan kombinasi kandungan ion kation maupun ion anion (Walton, 1970) .....	48
<b>Tabel 15</b> Rancangan grid daerah model.....	62
<b>Tabel 16</b> Hasil observed dengan calculated pada sampel sumur.....	63
<b>Tabel 17</b> Data curah hujan dan curah hujan rencana Kabupaten Majene .....	65
<b>Tabel 18</b> Data suhu dan suhu rencana Kabupaten Majene.....	65
<b>Tabel 19</b> Nilai faktor koreksi pada lintang selatan 3°.....	66
<b>Tabel 20</b> Nilai evapotranspirasi tahun 2021.....	67
<b>Tabel 21</b> Nilai evapotranspirasi tahun 2026 dan tahun 2031 .....	67
<b>Tabel 22</b> Perhitungan koefisien limpasan gabungan.....	69
<b>Tabel 23</b> Perhitungan nilai infiltrasi tahun 2021 .....	69
<b>Tabel 24</b> Perhitungan nilai infiltrasi tahun 2026 dan tahun 2031 .....	70
<b>Tabel 25</b> Perhitungan proyeksi penduduk dengan 2 metode.....	71
<b>Tabel 26</b> Perhitungan proyeksi kebutuhan air tanah Kota Majene.....	71
<b>Tabel 27</b> Neraca air tanah Kota Majene tahun 2021, 2026, dan 2031 .....	73
<b>Tabel 28</b> Hasil analisis kimia sampel air.....	74
<b>Tabel 29</b> Berat atom dan valensi kation dan anion.....	75
<b>Tabel 30</b> Kation dan anion dalam mEq/L .....	75
<b>Tabel 31</b> Persentase kation dan anion .....	76

<b>Tabel 32</b> Tingkat penyusupan air laut (Revelle, 1941) .....	77
<b>Tabel 33</b> Data akses air bersih wilayah Kota Majene .....	79
<b>Tabel 34</b> Data rekomendasi pemanfaatan air tanah.....	81

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar</b>	<b>Halaman</b>
<b>Gambar 1</b> Jenis Akuifer menurut Kruseman (1994) .....	8
<b>Gambar 2</b> Contoh konseptual model (Surinaidu, 2014) .....	16
<b>Gambar 3</b> Contoh Boundary Condition (Surinaidu, 2014).....	17
<b>Gambar 4</b> Contoh hasil kalibrasi pemodelan (Bhagu, 2013).....	18
<b>Gambar 5</b> Lokasi penelitian .....	35
<b>Gambar 6</b> Peralatan geolistrik .....	38
<b>Gambar 7</b> Peta sebaran pengukuran geolistrik .....	40
<b>Gambar 8</b> Kegiatan pengambilan data geolistrik .....	40
<b>Gambar 9</b> Kegiatan pengukuran muka air tanah .....	44
<b>Gambar 10</b> Kenampakan fisik air pada salah satu sumur observasi.....	45
<b>Gambar 11</b> Pengambilan sampel air tanah pada sumur observasi.....	46
<b>Gambar 12</b> Diagram Trilinier Piper .....	47
<b>Gambar 13</b> Diagram alir penelitian .....	49
<b>Gambar 14</b> Peta geologi daerah penelitian.....	51
<b>Gambar 15</b> Kenampakan Clay pada Stasiun 1 .....	52
<b>Gambar 16</b> Batugamping yang menyusun batupasir gampingan pada Stasiun 1 .....	52
<b>Gambar 17</b> Kenampakan batugamping pasiran pada Stasiun 3 .....	53
<b>Gambar 18</b> Kenampakan batugamping pasiran pada Stasiun 2 .....	53
<b>Gambar 19</b> Kenampakan Napal pada Stasiun 6 .....	54
<b>Gambar 20</b> Kenampakan napal kontak dengan batugamping pada Stasiun 5 .....	54
<b>Gambar 22</b> Kurva hasil pengolahan data geolistrik.....	55
<b>Gambar 22</b> Nilai resistivitas VES-01 dan VES-02.....	56
<b>Gambar 23</b> Nilai resistivitas VES-03 dan VES-04.....	57
<b>Gambar 24</b> Nilai resistivitas VES-05 dan VES-06.....	58
<b>Gambar 25</b> Nilai resistivitas VES-07 dan VES-08.....	59
<b>Gambar 26</b> Tabel resistivitas VES-07 dan VES-08.....	59
<b>Gambar 27</b> Model konseptual daerah penelitian dalam fence diagram.....	60
<b>Gambar 28</b> Boundary daerah model berdasarkan topografi.....	61
<b>Gambar 29</b> Grid daerah model .....	62
<b>Gambar 30</b> Hasil simulasi model muka air tanah Kota Majene .....	63
<b>Gambar 31</b> Hasil koefisien korelasi antara hasil simulasi dan observasi .....	64
<b>Gambar 32</b> Tata guna lahan Kota Majene .....	68
<b>Gambar 33</b> Sebaran titik pengambilan sampel air sumur Kota Majene .....	75

<b>Gambar 34</b>	Diagram trilinear piper pada sampel air tanah Kota Majene.....	76
<b>Gambar 35</b>	Peta prediksi intrusi air laut Kota Majene .....	78
<b>Gambar 36</b>	Penyebaran Rencana Titik Bor Air Tanah.....	80
<b>Gambar 37</b>	Overlay titik pemboran dengan peta hydraulic head .....	80

## DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1** Peta Geologi Daerah Penelitian
- Lampiran 2** Data Geolistrik
- Lampiran 3** Peta Kedalaman Muka Air Tanah
- Lampiran 4** Intepretasi Elevasi dengan Google Earth
- Lampiran 5** Peta Rekomendasi Pengambilan Air Tanah

## DAFTAR SINGKATAN ARTI DAN SIMBOL

Lambang dan Singkatan	=	Arti dan Keterangan
AC	=	<i>Alternating Current</i>
BAPPEDA	=	Badan Perencanaan dan Pembangunan Daerah
BMKG	=	Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika
BPS	=	Badan Pusat Statistik
DC	=	<i>Direct Current</i>
ESDM	=	Energi dan Sumber Daya Mineral
ET	=	Evapotranspirasi
PAMSIMAS	=	Program Penyedia Air Minum Berbasis Masyarakat
PDAM	=	Perusahaan Daerah Air Minum
PDSI	=	<i>Palmer Drought Severity Index</i>
PUPR	=	Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
Q	=	Debit
RDI	=	<i>Reconnaissance Drought Index</i>
<i>Runoff</i>	=	Aliran Permukaan
<i>Slope</i>	=	Kemiringan
SPEI	=	<i>Standardized Precipitation Evapotranspiration Index</i>
SPM	=	Standar Pelayanan Minimum

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1. Latar Belakang**

Air merupakan komponen utama dalam kehidupan manusia, namun berdasarkan kondisi yang ada di Kota Majene saat ini terdapat populasi penduduk yang padat pada luasan wilayah yang kecil sehingga menimbulkan masalah seperti adalah ketersediaan juga berkelanjutannya air bersih untuk memenuhi kebutuhan penduduk. Kabupaten Majene merupakan sebuah daerah yang terletak di provinsi Sulawesi Barat dengan luas wilayah 947,84 m<sup>2</sup> yang terdiri dari 8 kecamatan yaitu Kecamatan Banggae, Kecamatan Banggae Timur, Kecamatan Pamboang, Kecamatan Sendana, Kecamatan Tammerodo, Kecamatan Tubo, Kecamatan Malunda, dan Kecamatan Ulumanda. Pusat kota di Kabupaten Majene terletak di dua kecamatan yaitu Kecamatan Banggae dan Banggae Timur dengan luas wilayah 55,16 m<sup>2</sup> atau hanya 5,82% dari total luas keseluruhan wilayah. Jumlah penduduk keseluruhan pada akhir tahun 2021 berjumlah 175.780 jiwa, sedangkan jumlah penduduk di Kota Majene berjumlah 69.668 jiwa atau sekitar 40% dari total jumlah penduduk. (BPS, 2022).

Berdasarkan letak geografis, wilayah Kota Majene berada di pesisir pantai Selat Makassar sehingga ada kemungkinan kondisi air tanah bisa terpengaruh oleh air laut yang menyebabkan air tanah menjadi asin. Saat ini cara masyarakat mendapatkan air bersih adalah melalui penggalian sumur atau sumur bor, namun di beberapa wilayah pada saat musim panas bisa mengalami kekeringan sumur. Kondisi ini juga diperparah dengan kondisi ketersediaan air melalui jaringan PDAM sering mengalami masalah dalam penyalurannya karena keterbatasan volume air yang tidak cukup untuk melayani seluruh masyarakat yang ada di kota. Saat ini total air yang mampu diproduksi oleh PDAM hanya sekitar 900.000 m<sup>3</sup> pertahun, jika dikonversikan dengan jumlah kebutuhan air masyarakat jumlah tersebut hanya mampu melayani sekitar 20.000 hingga 25.000 jiwa. Berdasarkan data BAPPEDA Kabupaten Majene, jumlah masyarakat terlayani PDAM saat ini hanya 24.697 jiwa dari total 69.668 atau hanya 35% penduduk kota yang mengakses air dari layanan PDAM. Melihat kondisi tersebut masyarakat akhirnya

harus mempunyai opsi lain dalam memperoleh air bersih yaitu dengan memanfaatkan air tanah.

Beberapa dekade terakhir ini, tren pemanfaatan air tanah sebagai sumber air sudah menjadi hal yang umum untuk daerah lahan kering di berbagai belahan dunia. Terkhusus di wilayah Indonesia peranan air tanah makin lama semakin penting karena air tanah menjadi sumber air utama untuk memenuhi kebutuhan pokok hajat hidup orang banyak seperti air minum, kebutuhan rumah tangga, industri, irigasi, dan lain sebagainya. Bahkan di beberapa tempat sudah menjadi komoditi strategis ekonomi.

Eksplorasi air tanah yang kian marak juga erat kaitannya dengan adanya kemajuan di bidang pengeboran dan teknologi pompa serta berkembangnya ilmu hidrogeologi. Namun demikian air tanah merupakan sumberdaya alam yang jumlahnya terbatas dan kerusakan air tanah dapat berdampak luas dan sulit dipulihkan. Informasi tentang sumber air tanah, ketersediaan air tanah, dan besaran konsumsinya perlu diketahui sebelum melakukan eksploitasi untuk mencapai pemanfaatan yang berkelanjutan (*sustainable*).

Evaluasi rencana pengelolaan jangka panjang untuk penggunaan optimal sumber daya air tanah membutuhkan pemahaman factor hidrologi dan hidrogeologi. Oleh karena itu, pengelolaan air tanah memerlukan aplikasi pemodelan terintegrasi yang dapat mensimulasikan proses yang terjadi di permukaan dan sistem bawah permukaan yang mempengaruhi sistem air tanah. Pemodelan sangat penting untuk digunakan dalam mengelola, merencanakan, dan mengoperasikan sistem sumber daya air di masa lalu atau di masa mendatang. Pemodelan dapat mengukur efek dari beberapa perubahan tertentu yang mungkin terjadi pada suatu permukaan tanah atau wilayah (penggunaan lahan, sistem irigasi, infrastruktur sumber daya air permukaan, dll.) baik kuantitas dan kualitas air kondisi subsistem air tanah yang terkena dampak. (Ehtiat *et al.*, 2017)

Penelitian ini akan memuat eksplorasi keberadaan air tanah dengan pengamatan kondisi geologi dan peta geologi regional dikombinasikan dengan data geolistrik dan pengamatan muka air tanah. Selanjutnya, dilakukan analisis *water balance* untuk mengetahui dampak dari siklus hidrologi terhadap akuifer

dan pemodelan dengan *Modflow* dilakukan untuk mendapatkan potensi air tanah atau akuifernya.

## **1.2. Rumusan Permasalahan**

Penyelesaian masalah krisis air bersih di Kota Majene membutuhkan penanganan yang solutif. Oleh karena itu, dalam menciptakan pola pemanfaatan air yang berkelanjutan perlu memperhatikan faktor-faktor yang saling mendukung satu sama lain. Penelitian ini akan berfokus pada rumusan masalah berikut ini:

1. Potensi air selalu berkaitan dengan neraca air; meliputi interaksi air permukaan dan air tanah yang terjadi pada wilayah/daerah tersebut.
2. Daerah Cekungan Air Tanah (CAT) terbentuk karena hubungan antara material batuan dan struktur geologi yang memungkinkan terjadinya akumulasi air di bawah permukaan.
3. Metode terbaik untuk merepresentasikan kondisi air tanah dan aliran air tanah di bawah permukaan adalah dengan pemodelan numerik.
4. Air layak konsumsi adalah air bersih dan hygiene yang memenuhi syarat kesehatan baik secara fisik maupun kimia.

## **1.3. Tujuan Penelitian**

Pemodelan hidrogeologi diperlukan memberikan informasi bagi pemerintah dan masyarakat dalam mengelola air tanah yang berkelanjutan. Secara khusus tujuan penelitian ini adalah:

1. Analisis neraca air tanah berdasarkan interaksi air tanah dan air permukaan.
2. Rekonstruksi model konseptual berdasarkan kondisi geologi dan simulasi numerik aliran air tanah kota Majene.
3. Analisis kualitas air tanah kota Majene.

#### 1.4. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi penting bagi lokasi penelitian seperti:

1. Memberikan informasi tentang ketersediaan dan kebutuhan air pada tahun sekarang dan akan datang.
2. Sebagai acuan penyediaan air untuk kebutuhan domestik di Kota Majene.
3. Sebagai masukan tentang ketersediaan air untuk pemerintah setempat dalam mengelola air tanah.

#### 1.5. Ruang Lingkup

Penelitian ini dilakukan terkhusus pada daerah kota Majene yang merupakan wilayah padat penduduk. Adapun beberapa cakupan penelitian beserta batasannya adalah sebagai berikut:

1. Perhitungan nilai *infiltrasi* dilakukan dengan memperhitungkan nilai koefisien dari tutupan lahan (tata guna lahan) tanpa memperhitungkan kemiringan/topografi wilayah penelitian dan jenis vegetasi yang ada.
2. Parameter kualitas air tidak memperhitungkan kandungan bakterial/pencemar pada air tanah tetapi hanya kandungan zat-zat kimia yang kemungkinan bisa menurunkan kualitas air tanah yaitu tingkat salinitas.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1. Geologi Bawah Permukaan**

Survei geologi dan geofisika dilakukan bisa dilakukan untuk mengidentifikasi potensi air tanah suatu daerah. Survei geologi bertujuan untuk mengidentifikasi dan memetakan geomorfologi dan fitur geologi, terutama unit bentuk lahan dan unit litologi *expose*. Untuk penyelidikan geofisika, survei tahanan jenis (*resistivity*) adalah metode yang efektif untuk investigasi air tanah. Metode ini merupakan pendekatan geofisika berbasis konduktivitas/resistivitas kontras yang digunakan untuk menentukan konduktivitas / resistivitas distribusi bahan bumi di bawah permukaan, sehingga metode ini sangat cocok untuk mengidentifikasi unit litologi dan variasi satuan litologi di dalamnya serta untuk studi air tanah dan akuifer. Selain itu, metode geofisika ini juga merupakan metode yang populer karena biayanya yang rendah, pengoperasian yang sederhana, dan efisiensi di daerah dengan tinggi kontras resistivitas (Nazaruddin *et al.*, 2017)

##### **2.1.1. Aplikasi Data Geologi dalam Mengetahui Kondisi Hidrogeologi**

Geologi suatu wilayah tentu memainkan peran mendasar dalam pengisian ulang air tanah. Hal ini diperkuat dengan pendapat Acharya dan Nag (2013) yang menyatakan bahwa formasi, struktur, karakteristik, dan faktor hidrogeologi atau geologi lainnya secara langsung maupun tidak langsung mempengaruhi imbuhan air tanah serta fenomena lainnya, yang selanjutnya mempengaruhi kondisi air tanah suatu wilayah. Distribusi dua dimensi dari setiap formasi litologi tertentu, serta urutan penampang melintang tiga dimensi dari stratigrafi litologi, sangat penting dalam penelitian air tanah (Bhattacharya *et al.* 2020).

Keadaan alami dan penyebaran dari *aquifer*, *aquiflude* dan *aquitard* dalam sistem geologi dipengaruhi oleh litologi, stratigrafi dan struktur geologi dari material endapan geologi dan formasi batuan. Litologi merupakan susunan fisik dan endapan geologi termasuk komposisi mineral, ukuran butir dan kumpulan

butir yang terbentuk dari sedimentasi atau batuan yang menghasilkan sistem geologi.

Stratigrafi menjelaskan hubungan geometri dan umur antara macam-macam lensa, dasar dan formasi dalam sistem geologi dari asal terjadinya sedimentasi. Bentuk struktur sendiri diantaranya pecahan (*cleavages*), retakan (*fracture*), lipatan (*folds*) dan patahan (*fault*), merupakan sifat-sifat geometri dari sistem geologi yang dihasilkan oleh perubahan bentuk (deformasi) akibat adanya proses pengendapan (*deposition*) dan proses kristalisasi (*crystallization*) dari batuan. Pada endapan yang belum terkonsolidasi (*unconsolidated deposits*) litologi dan stratigrafi merupakan pengendali yang paling penting. Air tanah mengalir dalam lapisan pembawa air (akuifer) yang dibatasi oleh batas hidrogeologi berupa batuan, patahan, lipatan atau tubuh air permukaan. Batas – batas ini menentukan tiga elemen penting dalam anatomi cekungan hidrogeologi, yaitu kawasan imbuhan (*recharge area*), kawasan aliran (*flowing area*) dan kawasan luapan (*discharge area*) (Prastistho dkk., 2017).

Berkaitan dengan geometri dan konfigurasi akuifer, Zeffitni (2011) menjelaskan bahwa batasan bahwa penentuan batas lateral dan vertikal cekungan air tanah akan menunjukkan geometri cekungan air tanah. Penentuan batas lateral dan vertikal akuifer maupun non akuifer menunjukkan konfigurasi sistem akuifer. Tinjauan terhadap air tanah memiliki cakupan yang cukup luas, diantaranya: jenis akuifer, parameter akuifer yang menunjukkan karakteristik akuifer, maupun pemanfaatan serta kualitasnya. Informasi geologi diantaranya: penampang (*cross section*) geologi, log pemboran dan sumur yang dikombinasi dengan informasi hidrogeologi akan menunjukkan unit hidrostratigrafi cekungan air tanah. Penampang (*cross section*) geologi dapat menunjukkan formasi geologi, unit stratigrafi, bidang piezometrik, kandungan kimia air dan korelasi formasi dari log pemboran dari beberapa sumur.

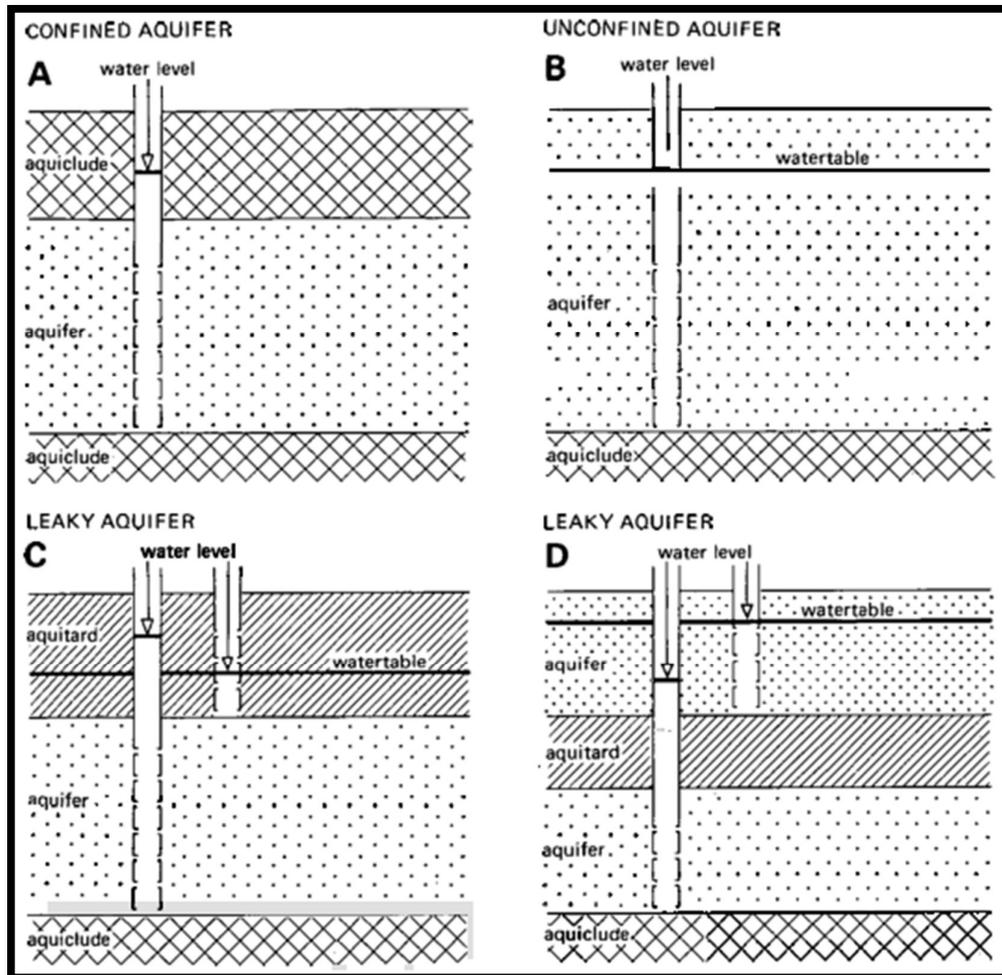
Pemetaan hidrogeologi merupakan pekerjaan lapangan yang dilakukan guna menyusun kerangka hasil dalam penentuan jenis sistem air tanah di suatu lokasi. Meliputi pengamatan mata air (dilakukan dengan mencatat koordinat lokasi dan mendeskripsi kondisi geologi, jenis, dan debit mata air), pengamatan sumur gali (dilakukan dengan mencatat koordinat lokasi, kedalaman atau elevasi

muka air tanah, informasi keadaan air pada musim kemarau) dan pengamatan sumur bor (dilakukan dengan mencatat koordinat lokasi, kedalaman, diameter, posisi saringan, muka air tanah, dan debit pengambilan air tanah).

Hal-hal yang perlu diperhatikan dalam pemetaan hidrogeologi yaitu pengkajian kondisi geologi terlebih dahulu karena berkaitan erat dengan hubungan antara keduanya. Penelitian kondisi geologi baik kondisi geomorfologi, stratigrafi dan struktur geologi yang ada, guna menentukan peran batuan yang bertindak sebagai akuifer, akuitard, akuiklud dan akufug. Pemetaan hidrogeologi ini bertujuan dalam penentuan pola dan arah air aliran tanah. Analisis muka air tanah dilakukan untuk mengetahui arah aliran air tanah bebas dengan aspek-aspek pengontrolnya baik morfologi, litologi, struktur geologi maupun jenis sungai yang dianalisis berdasarkan data elevasi muka air tanah pada sumur gali, sumur bor, geolistrik maupun mata air. Selain itu pemetaan hidrogeologi yaitu berperan dalam penentuan tipe batas cekungan air tanah dan potensi pengisian air tanah (*groundwater recharge*).

Menurut Kruseman (1994) akuifer didefinisikan sebagai unit geologi cukup baik meloloskan air untuk menghasilkan jumlah air masuk ke sumur. Akuifer yang paling umum adalah pasir dan kerikil yang tidak terkonsolidasi, tetapi batuan sedimen permeabel seperti batu pasir dan batu kapur, dan batuan vulkanik dan kristal yang sangat retak atau lapuk juga dapat diklasifikasikan sebagai akuifer. Aquitard adalah unit geologi yang cukup permeabel untuk mentransmisikan air dalam jumlah yang signifikan bila dilihat di area yang luas dan periode yang lama, tetapi permeabilitasnya tidak cukup untuk menghasilkan sumur produksi. Tanah liat, lempung, dan serpih adalah litologi jenis akuitard. Aquiclude adalah unit geologi kedap air yang tidak mentransmisikan air sama sekali. Batuan beku atau metamorf padat yang tidak retak adalah batuan tipe aquiclude. Di alam, unit geologi yang benar-benar kedap air jarang terjadi; Semuanya bocor sampai batas tertentu, dan karenanya harus diklasifikasikan sebagai akuitard. Namun, dalam praktiknya, unit geologis dapat diklasifikasikan sebagai aquicludes ketika permeabilitasnya beberapa kali lipat lebih rendah daripada akuifer di atasnya atau yang di dasarnya.

Ada tiga jenis utama akuifer yaitu; tertekan, bebas, dan semi-tertekan (Gambar 1).



**Gambar 1** Jenis Akuifer menurut Kruseman (1994)

- 1) Akuifer tertekan (*Confined Aquifer*) dibatasi di atas dan di bawah oleh akuiklude. Dalam akuifer tertekan, tekanan air biasanya lebih tinggi daripada permukaan, sehingga jika sumur mengenai akuifer, air di dalamnya bergerak di atas bagian atas akuifer, atau bahkan di atas permukaan tanah yang kemudian disebut sebagai sumur artesis.
- 2) Akuifer bebas (*Unconfined Aquifer*), dibatasi di bawah oleh akuiklude, tetapi tidak dibatasi oleh lapisan pembatas di atasnya. Batas atasnya adalah muka air, yang bebas naik dan turun. Air dalam sumur yang menembus

akuifer bebas berada pada tekanan atmosfer dan tidak naik di atas permukaan air.

- 3) Akuifer semi-tertekan (*Leaky Aquifer*), adalah akuifer yang batas atas dan bawahnya merupakan akuitard, atau satu batas adalah akuitard dan yang lainnya adalah akuiklud. Air bebas bergerak melalui akuitard, baik ke atas atau ke bawah. Jika akuifer bocor berada dalam kesetimbangan hidrologi, ketinggian air dalam sumur mungkin sejajar dengan permukaan air. Ketinggian air juga dapat berada di atas atau di bawah permukaan air, tergantung pada kondisi pengisian dan keluaran air.

### 2.1.2. Survey Geolistrik

Metode survey geolistrik merupakan survey geofisika yang sangat umum dipakai dalam kegiatan pencarian air tanah. Adapun metode survey ini terdiri dari beberapa metode. Metode survey geolistrik yang paling efektif adalah metode tahanan jenis (*resistivity method*). Metode ini menggunakan perbedaan tahanan jenis berdasarkan jenis batuan, banyaknya rongga dan kondisi kandungan air pada lapisan batuan. Berdasarkan hal tersebut dapat diperkirakan klasifikasi lapisan batuan maupun struktur bawah tanah, sehingga gambaran air tanah dapat dipahami (Prastistho dkk, 2017).

Metode resistivitas pada dasarnya adalah pengukuran harga resistivitas (tahanan jenis) batuan. Prinsip kerja metode ini adalah dengan menginjeksikan arus ke bawah permukaan bumi sehingga diperoleh beda potensial, yang kemudian akan didapat informasi mengenai tahanan jenis batuan. Hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan keempat elektroda yang disusun sebaris, salah satu dari dua buah elektroda yang berbeda muatan digunakan untuk mengalirkan arus ke dalam tanah, dan dua elektroda lainnya digunakan untuk mengukur tegangan yang ditimbulkan oleh aliran arus tadi, sehingga resistivitas bawah permukaan dapat diketahui. Resistivitas batuan adalah fungsi dari konfigurasi elektroda dan parameter-parameter listrik batuan. Arus yang dialirkan di dalam tanah dapat berupa arus searah (DC) atau arus bolak-balik (AC) berfrekuensi rendah. Untuk menghindari potensial spontan, efek polarisasi dan menghindarkan pengaruh kapasitansi tanah yaitu kecenderungan tanah untuk menyimpan muatan

maka biasanya digunakan arus bolak balik yang berfrekuensi rendah (Bhattacharya & Patra, 1968).

Survey geolistrik dapat menghasilkan suatu analisis geometri akuifer air tanah yang dikaji berdasarkan pemetaan muka air tanah pada sumur gali, mata air, sumur bor dan geolistrik. Analisis pendugaan geolistrik dikorelasikan dengan sumur bor dalam untuk menggambarkan ketebalan akuifer air tanah dan menghasilkan suatu diagram balok yang nantinya dapat menunjukkan sebaran vertikal maupun horisontal air tanah (Prastistho dkk., 2017).

## 2.2. Pemodelan Air Tanah

Pemodelan air tanah adalah peniruan kondisi sistem air tanah dengan cara penyederhanaan sistem air tanah dan upaya manusia dalam pengelolaan yang berkaitan dengan air tanah. Prinsip pemodelan air tanah adalah untuk memperkirakan seberapa jauh perubahan kondisi muka air tanah akan terjadi di masa mendatang akibat pola pengembangan air tanah yang sedang berlangsung atau akibat usulan pengelolaan baru (Segel Ginting dan Heni Renggani, 2010).

Pemodelan sistem hidrogeologi sangat diandalkan untuk memahami mengapa sistem aliran berperilaku dengan cara tertentu dan untuk memprediksi bagaimana sistem aliran akan berperilaku di masa depan. Selain itu, model dapat digunakan untuk menganalisis situasi aliran dan hipotetis untuk mendapatkan pemahaman umum tentang jenis sistem aliran tersebut. (C.W. Fetter Jr, 2014)

Untuk melihat perilaku aliran air tanah maka dilakukan pemodelan dengan menggunakan persamaan-persamaan yang telah umum digunakan. Pemodelan air tanah merupakan pendekatan suatu sistem yang ada di dalam tanah. Jadi proses pemodelan tersebut sedapat mungkin dilakukan peniruan sistem aliran air tanah yang terjadi dengan melihat kondisi kenyataan di lapangan.

Agar supaya dapat melakukan peniruan sistem tersebut maka diperlukan karakteristik dari daerah tersebut yaitu berupa parameter air tanah. Parameter tersebut merupakan masukan dari program *MODFLOW* agar dapat dijalankan. Pemodelan air tanah dengan *MODFLOW* dapat berjalan apabila data yang diperlukan tersedia, untuk itu maka diperlukan pengumpulan data yang berkaitan dengan air tanah.

*MODFLOW* mewakili dengan baik proses fisik yang terkait untuk aliran air tanah dengan didasarkan pada skema beda hingga. Disajikan dengan pembagian sel persegi panjang, manajemen terhadap apa yang masuk dan keluar cukup tepat dan tidak sulit untuk dilakukan simulasi. (Wasif and Hasan, 2020)

Perkembangan perangkat lunak maupun perangkat keras dalam bidang komputasi akhir-akhir ini sangat cepat, sehingga aplikasinya dapat dimanfaatkan hampir di berbagai bidang. Penyelesaian suatu masalah hidrogeologi dapat dianalisis dengan baik dan tepat, apabila dapat dibuat konsep model hidrogeologi itu sendiri. Konsep itu dapat dibuat dalam suatu model fisik, analog maupun model matematik yang dapat diselesaikan secara numerik dan analitik. Pembuatan model numerik dibuat, apabila perhitungan secara analitis dan pengukuran di lapangan relatif sulit dilakukan. Model numerik yang dapat digunakan adalah model *finite difference* maupun model *finite element*.

Model adalah suatu pendekatan terhadap kenyataan di alam yang kompleks dan bukan merupakan kenyataan itu sendiri. Domenico (1972) mendefinisikan model sebagai wakil kenyataan yang berusaha untuk menjelaskan tingkah laku beberapa aspek kenyataan dan selalu tidak sekompleks sistem yang sesungguhnya diwakili. Ketepatan hasil dari suatu model tergantung tingkat penyederhanaan serta ketepatan dan kelengkapan dari parameter-parameter yang dipakai dalam menentukan model. Dengan demikian model hidrogeologi adalah sebagai sajian sederhana (*simple representation*) dari suatu sistem hidrogeologi yang kompleks. Suatu model matematik mensimulasikan secara tidak langsung aliran air tanah menggunakan pemisalan/persamaan yang menunjukkan proses fisik yang terjadi di dalam sistem (Anderson dan Woessner, 1992).

Model matematik baik numerik maupun analitik menggunakan perangkat komputer dengan *software* tertentu seperti GMS v 2.1, *Modpath*, *Visual Modflow Flex*, *FEFLOW* 5.3 maupun program lain untuk mensimulasikan perilaku dari air tanah. Model matematik menyajikan sistem dalam rangkaian yang menggambarkan hubungan antar variabel dan parameter.

Secara umum model menunjukkan hubungan sebab akibat antar komponen dalam sistem dan antara sistem dengan lingkungannya. Suatu model dapat digunakan, apabila model tersebut memenuhi persyaratan berlakunya model

tersebut. Dalam penyusunan model hidrogeologi selalu dilakukan beberapa asumsi dan batasan-batasan tertentu serta melalui beberapa tahapan pemodelan. Semakin kompleks suatu model semakin banyak parameter yang ditinjau, sehingga hasilnya semakin mendekati kenyataan dan dapat diterapkan pada beberapa macam kasus dengan hasil cukup baik.

### 2.2.1. Manfaat Model

Hendrayana (1994) menyatakan, bahwa manfaat penting dari model hidrogeologi adalah sebagai alat dalam pengelolaan air tanah, yaitu sebagai alat bantu dalam menentukan kebijakan-kebijakan yang perlu diambil dalam rangka pengelolaan air tanah secara terpadu dengan mendasarkan hasil-hasil pemodelan dan simulasinya. Simulasi dalam pemodelan yang menyangkut kelakuan sistem di bawah kondisi yang bervariasi mencakup tiga tujuan utama, yaitu:

1. Prediksi terhadap tanggapan sistem, yaitu dengan anggapan parameter sistem sudah dapat diketahui
2. Evaluasi parameter-parameter dalam sistem, apabila tanggapan terhadap sistem telah diketahui
3. Penentuan penekanan sistem, yaitu apabila parameter sistem dan tanggapan terhadap sistem telah diketahui atau dibatasi

Salah satu *software* tentang pemodelan hidrogeologi adalah Visual *ModFlow Flex*, Aplikasi Visual MODFLOW *Flex* dapat digunakan untuk berbagai aplikasi air tanah, seperti:

- Mengevaluasi sistem sumur dan sumber daya air
- Menetapkan zona tangkapan / *Wellhead Protection Areas* (WHPA)
- Menilai dampak lingkungan dari *mine dewatering*
- Menilai kuantitas air dan masalah kualitas air di lokasi tambang
- Mengevaluasi dampak dari situs yang terkontaminasi seperti daerah situs industri.
- Mengevaluasi dampak kontaminasi dari situs TPA
- Merancang/mengoptimalkan solusi perbaikan untuk situs yang terkontaminasi air tanah
- Menilai dan mengurangi dampak intrusi air asin di akuifer pesisir

- Dewatering untuk Konstruksi dan Penggalian
- Perkiraan pergerakan panas di bawah permukaan dan potensi Energi Panas Bumi
- *Modeling Fate and Transport* Nitrat dari Sistem Septik, Air Limbah, dan Praktek Pertanian

### **2.2.2. Tahapan Pemodelan Hidrogeologi**

Dalam tahapan pemodelan hidrogeologi berikut ini hanya ditekankan pada pemodelan air tanah dengan metode numerik. Semakin kompleks suatu model yang disusun, maka semakin banyak parameter yang ditinjau dan dipakai dalam pemodelan, sehingga hasil model akan semakin mendekati kenyataan sebenarnya. Langkah tersebut secara umum ada tiga bagian utama yakni akuisisi data, pengembangan konseptual model serta pelaksanaan pemodelan secara numerik.

### **2.2.3. Data Pemodelan**

Kebutuhan data untuk pemodelan air tanah disajikan pada tabel 1, yang terdiri dari kerangka hidrogeologi/*hydrogeological framework* dan data hidrologi. Kerangka hidrogeologi yang dibutuhkan meliputi sifat fisik dari kondisi geologi meliputi topografi, litologi serta karakteristik sistem akuifer seperti ketebalan, porositas, transmisivitas, konduktivitas hidrolika serta parameter lain yang tidak berubah menurut waktu, sedangkan data hidrologi meliputi data hidrolika air yang bersifat dinamis dan data klimatologi serta penggunaan lahan. Pengumpulan data tersebut dibutuhkan dalam rangka pemahaman kondisi alami dari sistem air tanah serta proses hidrologi yang mengontrol atau memberikan dampak terhadap sistem aliran air tanah. Hal inilah yang menjadi dasar untuk membuat konseptual model. Kebutuhan data akan sangat kompleks pada suatu daerah model yang memiliki tingkat kekompleksan kondisi geologi dan hidrogeologi. Akuisisi data dan interpretasi merupakan aktivitas yang terus berlangsung untuk melengkapi konseptual model, sehingga menghasilkan konseptual model yang akurat dan handal.

**Tabel 1** Kebutuhan data dalam pemodelan hidrogeologi (Middlemis, 2000)

<i>Hydrogeological Framework</i>	
Tipe Data	Sumber Data
1. Sistem fisik (geologi, stratigrafi, litologi, topografi, drainase permukaan)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Peta geologi atau hidrogeologi</li> <li>2. Peta topografi yang menunjukkan fitur drainase permukaan dan data lainnya untuk menentukan geometri drainase (luas dan elevasi)</li> </ol>
2. Parameter akuifer, tipe batasan, ketinggian, ketebalan, serta konfigurasi batuan dasar	Laporan pekerjaan sebelumnya, termasuk pengeboran, tes dan analisis pemompaan, studi geofisika, hidrologi, dll
3. Parameter akuifer hidrolik (konduktivitas hidrolik, transmisivitas, anisotropi, <i>specific yield</i> , koefisien penyimpanan, dan porositas)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Laporan pengeboran (konstruksi dan <i>logging</i> litologi, serta penampangnya bila ada)</li> <li>2. Jurnal dan makalah konferensi, tesis mahasiswa</li> <li>3. Basis data lembaga negara, laporan dan database perusahaan swasta</li> </ol>
<i>Hydrological Stress</i>	
Tipe Data	Sumber Data
1. <i>Sources and sinks</i> , dan data untuk mengukur pengaruhnya terhadap aliran dan ketinggian dalam akuifer	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <i>Database</i> arah aliran suatu sistem hidrologi</li> <li>2. Data ketinggian air tanah serta pemompaan dari observasi pengeboran</li> <li>3. Abstraksi dari air tanah dan air permukaan</li> </ol>
2. Area <i>recharge</i> dan <i>discharge</i> alami, baik dari segi tingkatan, pola dan durasinya	Area irigasi, jenis tanaman pada areal serta penyebarannya
3. Interaksi aliran pada suatu akuifer	1. Proyeksi permintaan/pengambilan air dan seberapa besar pembuangan limbah pada suatu areal
4. Proses injeksi dan beberapa drainase sekitar area	1. Kualitas air tanah dan air permukaan area sekitar
5. Tataguna lahan, irigasi, evapotranspirasi, vegetasi dan curah hujan	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Database klimatologi</li> <li>2. Basis data suatu lembaga negara, laporan dan <i>database</i> perusahaan swasta, serta beberapa catatan pemilik lahan</li> </ol>

#### 2.2.4. Konseptual Model

Konseptual model adalah gambaran sederhana dari kondisi sistem hidrogeologi yang utama dan perilaku sistem air tanah di daerah model.

Konseptual model biasanya disajikan dalam grafik yang berupa sayatan melintang (*cross section*) ataupun blok diagram dengan penjelasan secara deskriptif dan kuantitatif mengenai gambaran sistem. Konseptual model dibentuk dari kajian menyeluruh dari akuisisi data lapangan dan data sekunder serta analisis data. Konseptual model merupakan gambaran ideal dari pemahaman kondisi alam dan kunci utama bagaimana sistem tersebut bekerja dengan beberapa asumsi. Beberapa asumsi diperlukan sebagai penyederhanaan kondisi geologi maupun hidrogeologi alam yang kompleks serta tingkat kesediaan data pendukung.

#### 2.2.5. Kondisi Batas (*Boundary Condition*)

Batas hidrologi merupakan batas yang tidak tetap bergantung pada waktu. Batas ini terdiri atas batas muka badan air seperti permukaan air laut, danau, waduk dan sungai serta batas aliran air tanah yang dapat berhimpit dengan batas aliran air permukaan, seperti daerah gunung api. Ada tiga jenis kondisi batas yang dapat digunakan pada domain dari suatu model aliran air tanah, yaitu:

1) Kondisi batas tipe *Dirchlet*

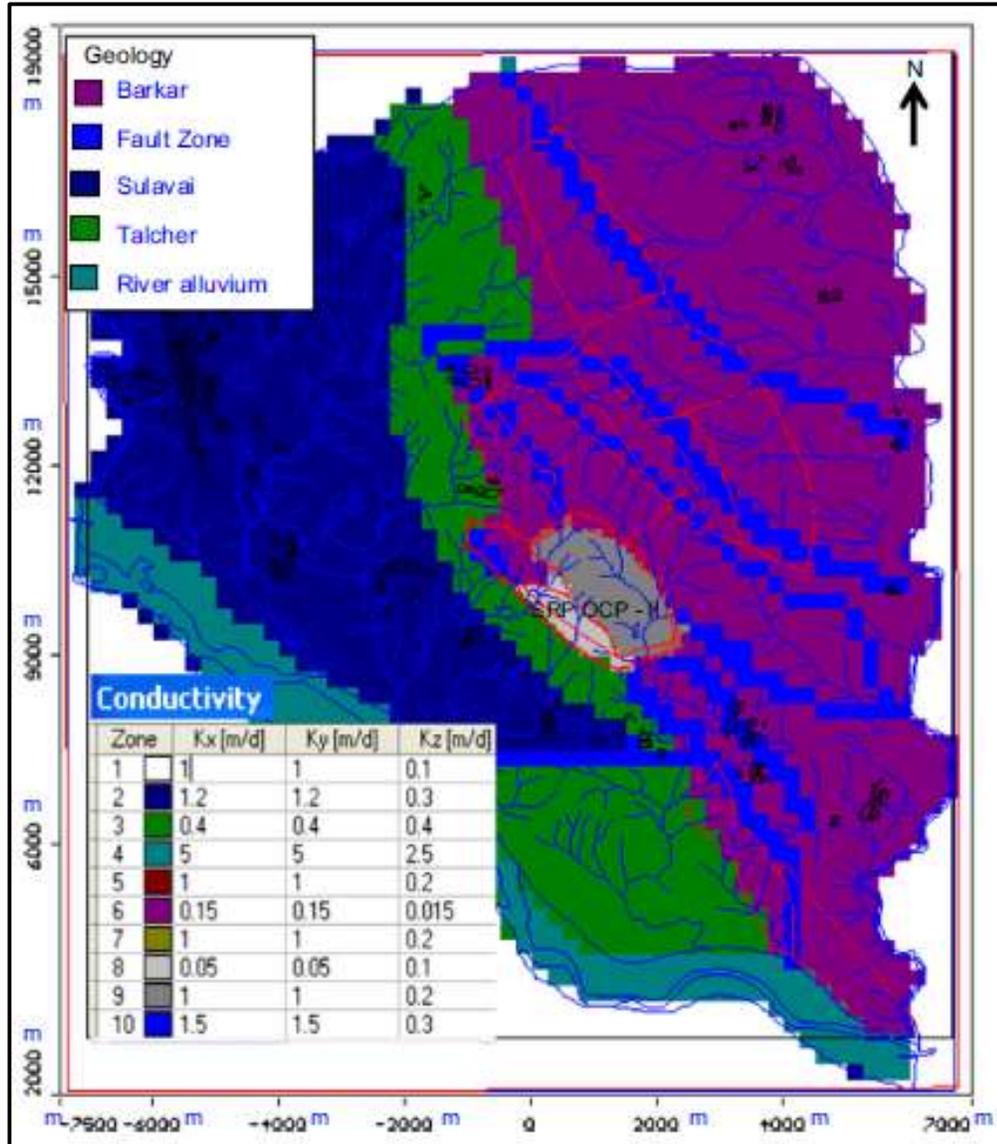
Kondisi batas ini berupa *head* hidraulik yang telah ditentukan. Batas dapat berupa suatu garis lurus ataupun melengkung dalam bidang  $xy$  dan  $f(x,y,t)$  adalah fungsi yang diketahui. Dalam suatu model domain diperlukan paling tidak satu kondisi batas dari tipe *Dirchlet*.

2) Kondisi batas tipe *Neumann*

Kondisi batas ini berupa fluks aliran yang telah ditentukan. Batas berpotongan tegak lurus dengan gradient hidraulik dan  $f(x,y,t)$  adalah fungsi yang diketahui.

3) Kondisi batas tipe *Chauchy*

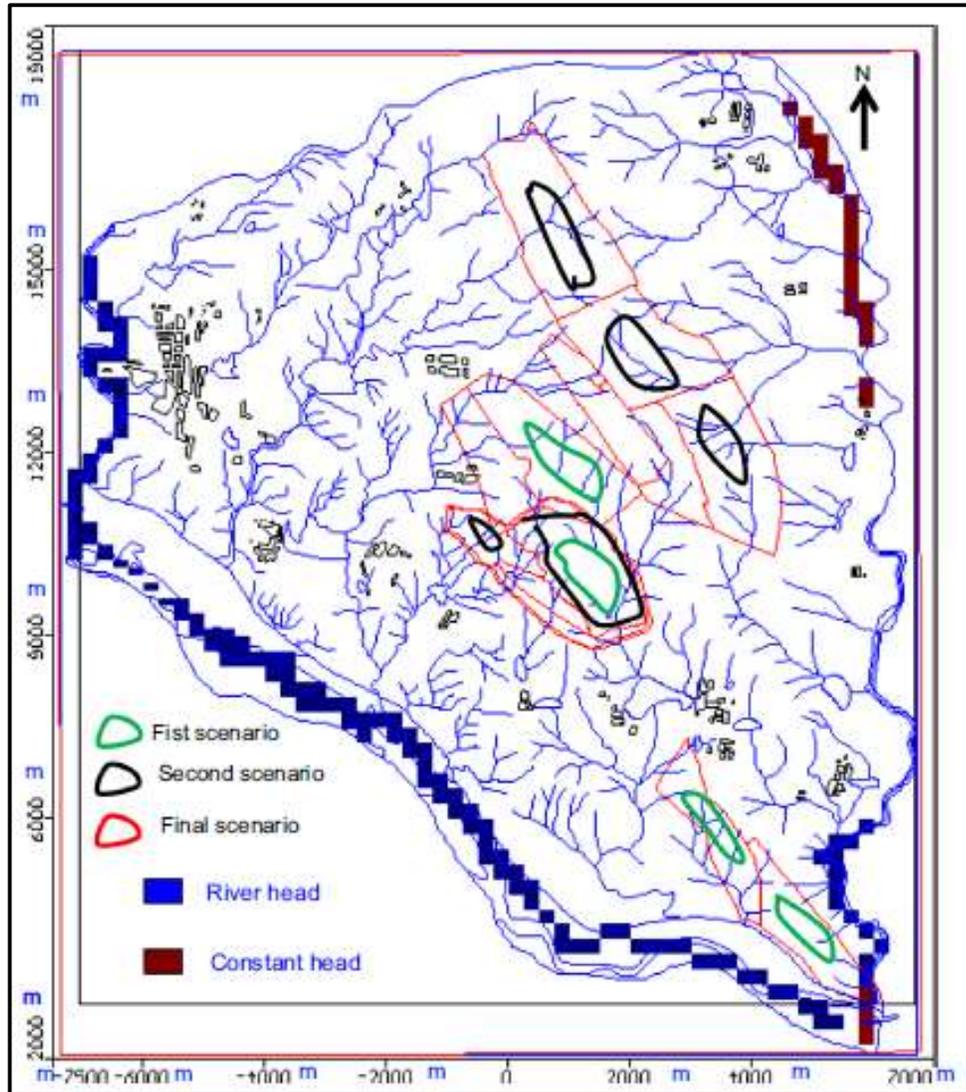
Kondisi batas ini berupa kombinasi antara *head* dan fluks. Kondisi batas ini dapat digunakan pada batas semikedap air. Kondisi tipe ini biasanya mengandung informasi hubungan antara variabel dalam persamaan dan turunannya.



**Gambar 2** Contoh konseptual model (Surinaidu, 2014)

**Tabel 2** Tipe-tipe Kondisi batas (Nadira, 2015).

Tipe Kondisi Batas	Kondisi Batas	Contoh Penggunaan
<i>Dirchlet</i>	<i>Head</i> yang telah ditentukan	Danau, sungai, mata air, <i>constant-head well</i>
<i>Neumann</i>	Fluks yang telah ditentukan	Batas kedap air, batas pemisah air, infiltrasi, penguapan
<i>Chaucy</i>	Batas semipermeabel atau fluks yang tergantung <i>head</i>	<i>Leaky river, drain, deepage face</i>



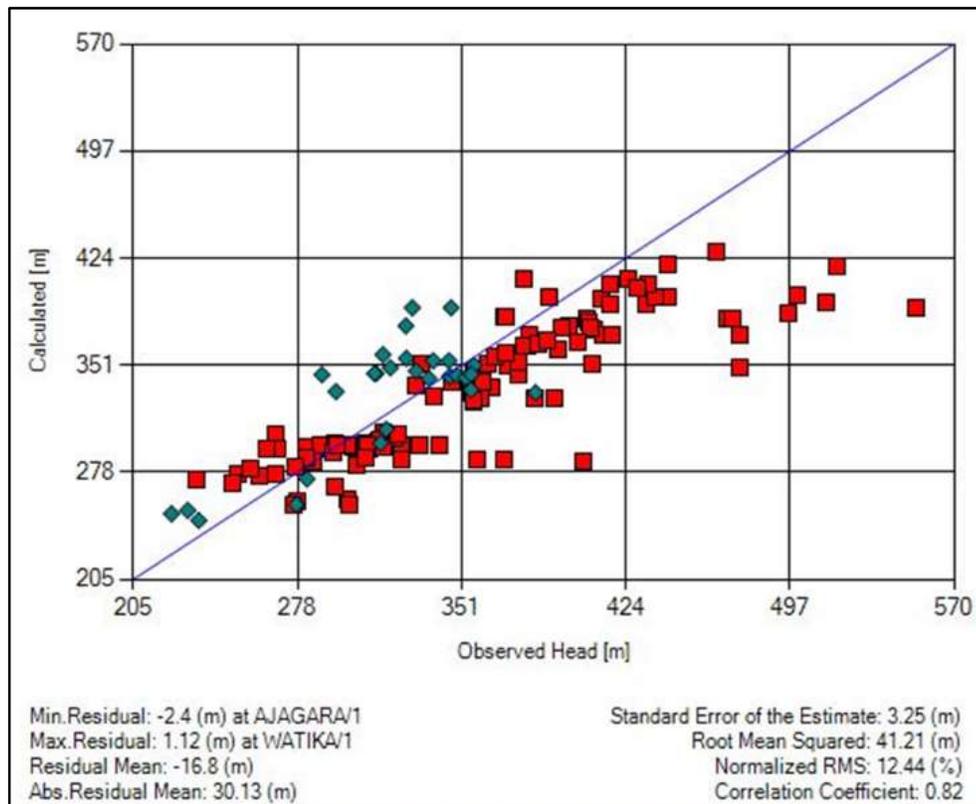
**Gambar 3** Contoh Boundary Condition (Surinaidu, 2014).

### 2.2.6. Pemodelan Numerik

Pemecahan permasalahan aliran air tanah dengan metode numerik atau dapat juga disebut sebagai cara diskret diwujudkan dalam model numerik aliran air tanah. Penyelesaian ini memerlukan diskretisasi domain solusi, yang berarti membagi-bagi daerah kasus / sistem akuifer menjadi grid-grid dengan ukuran X dan Y masing-masing pada sumbu X dan Y. Proses diskretisasi domain menurut Anderson dan Woessner (1992) dibagi menjadi dua, yaitu diskretisasi blok/*block centered grid* dan diskretisasi titik yang berhubungan/*mesh-centered grid*. Pada diskretisasi blok semua nilai parameter sistem yang digunakan sebagai masukan

model terletak di titik tengah blok, sedangkan pada jaringan diskretisasi titik terletak pada titik di keempat sisi blok.

Hasil *running* pemodelan aliran air tanah dilakukan kalibrasi dalam kondisi aliran air tanah tetap (*steady state*) dengan menghitung rata-rata perbedaan kuadrat *calculated heads* ( $h_{cal}$ ) dengan *observed heads* ( $h_{obs}$ ). Semakin kecil nilai RMS (*Root Mean Square*) yang didapat, maka hasil model mendekati kenyataan di lapangan (Putranto, 2011).



**Gambar 4** Contoh hasil kalibrasi pemodelan (Bhagu, 2013).

### 2.3. Neraca Air Tanah

Ezuar *et al.*, (2018) menyatakan bahwa neraca air tanah ( $\Delta S$ ) dapat dihitung menggunakan persamaan neraca air tanah, berdasarkan data ketersediaan dan permintaan air tanah. Hal ini sejalan dengan pendapat Davi de Carvalho *et al.*, (2015) yang mengatakan neraca air dapat memperkirakan pengisian ulang pada suatu area yang diteliti dan untuk setiap jenis tutupan vegetasi dan / atau tanah. Pengisian ulang (*Groundwater Recharge*) dapat diperkirakan dengan

mempertimbangkan berbagai jenis tata guna lahan. Perhitungan neraca air secara umum dilakukan dengan melakukan pengurangan antara data ketersediaan air tanah dengan data permintaan (kebutuhan) air tanah.

Estimasi dengan pendekatan neraca air dapat dilakukan untuk memprediksi ketersediaan air pada suatu wilayah. Hal ini dilakukan dengan membandingkan antara kebutuhan air terhadap ketersediaan air sehingga mampu menggambarkan keseimbangan air (*water balance*) dalam pemanfaatan sumber daya air. Semakin pesatnya pertumbuhan penduduk dan maraknya pembangunan perumahan berdampak pada timbulnya masalah banjir dan wilayah resapan air semakin kecil.

Ada beberapa faktor yang harus diperhitungkan dalam melakukan perhitungan keseimbangan air tanah seperti jumlah air yang keluar yaitu pola konsumsi air tanah penduduk dan jumlah air yang masuk (*recharge*) yaitu jumlah air yang kembali terserap ke dalam *aquifer* yang mana hal ini berkaitan dengan air hujan, evapotranspirasi dan koefisien resapan air. Perhitungan neraca air bisa dilakukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$Q_{\text{ketersediaan}} - Q_{\text{kebutuhan}} = \Delta S \quad (1)$$

Keterangan:

$Q_{\text{ketersediaan}}$	= Input Air / Debit air yang masuk ke <i>aquifer</i> (m <sup>3</sup> /tahun)
$Q_{\text{kebutuhan}}$	= Output Air / Debit air yang keluar dari <i>aquifer</i> (m <sup>3</sup> /tahun)
$\Delta S$	= Jumlah simpanan air (m <sup>3</sup> /tahun)

#### 2.4. Imbuhan Air ke dalam *Aquifer*

*Groundwater Recharge* merupakan hal yang sangat penting untuk menjaga ketersediaan air tanah yang bisa diidentifikasi dengan menggunakan informasi geologi. Terdapat lima komponen yang berpengaruh terhadap pengisian air tanah yaitu; (1) Tekstur Tanah, (2) Surplus Hujan, (3) *Slope*, (4) Tutupan Lahan, dan (5) Koefisien *Runoff*. (Mahmoud *et al.*, 2014)

Air yang masuk ke dalam *aquifer* merupakan kapasitas infiltrasi dari suatu wilayah DAS. Kapasitas infiltrasi dapat diperkirakan dengan menggunakan metode koefisien limpasan yang dimodifikasi dari metode rasional berdasarkan aturan yang dikeluarkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup nomor 17 tahun 2009, nilai infiltrasi dapat diketahui dengan persamaan tersebut.

Persamaan *Ffolliot* (1980) digunakan untuk mengetahui akumulasi air yang terserap kedalam tanah dengan pendekatan empiris sebagai berikut:

$$R = (P-ET) \cdot A_i \cdot (1-C_{ro}) \quad (2)$$

Keterangan:

R	= Volume air yang meresap (m <sup>3</sup> )
P	= Curah Hujan (mm)
ET	= Evapotranspirasi (mm/th)
A <sub>i</sub>	= Luas Lahan (m <sup>2</sup> )
C <sub>ro</sub>	= Koefisien Limpasan Permukaan

Berdasarkan persamaan 2 di atas, perhitungan jumlah air yang meresap ke dalam aquifer (*recharge*) ialah infiltrasi air hujan (curah hujan) yang nilainya dipengaruhi oleh evapotranspirasi serta koefisien limpasan berdasarkan tata guna lahan pada suatu wilayah DAS.

#### 2.4.1. Curah Hujan Rencana

Siklus hidrologi adalah pergerakan air ke udara, kemudian jatuh ke permukaan bumi lagi sebagai hujan. Hujan yang jatuh ke tanah hampir semuanya langsung mengalir ke laut dan ada juga yang meresap ke dalam tanah. Air yang meresap ke dalam tanah disebut infiltrasi. Infiltrasi adalah bagian yang hilang pada aliran limpasan yang terjadi (Khaeruddin *et al.*, 2019).

Curah hujan merupakan faktor terbesar yang mempengaruhi infiltrasi. Tingkat isi ulang dari curah hujan langsung tergantung pada jumlahnya dan durasi presipitasi pada suatu wilayah. Curah hujan dapat diartikan sebagai banyaknya air hujan yang terkumpul pada suatu tempat yang datar tanpa meresap atau meluap. Curah hujan 1 (satu) milimeter, yaitu dalam luasan satu meter persegi di atas tanah datar dapat terakumulasi satu milimeter air atau satu liter air.

Pengukuran curah hujan harian, bulanan, dan tahunan pada suatu tempat dapat menggunakan 3 cara, yaitu (Salsabila dan Nugraheni, 2020):

- 1) Rata-rata aritmatika, rata-rata dari penjumlahan seluruh alat pengukur curah hujan dalam periode waktu hujan tertentu dan dibagi dengan jumlah alat pengukur yang digunakan. Teknik pengukuran ini dianggap sebagai teknik pengukuran yang paling mudah. Namun, pengukuran rata-rata aritmatik ini perlu mempertimbangkan beberapa faktor, yaitu lokasi alat pengukur curah

hujan harus tersebar merata dan daerah pengamatan harus seragam terutama dalam hal ketinggian.

- 2) Teknik poligon, menghubungkan satu alat pengukur curah hujan terpasang dengan alat pengukur lainnya (interpolasi). Poligon Thiessen merupakan salah satu metode interpolasi yang paling banyak dipakai. Teknik poligon dapat digunakan untuk menentukan curah hujan suatu daerah. Teknik ini tidak cocok digunakan di daerah bergunung dan daerah dengan intensitas curah hujan yang tinggi. Stasiun terdekat terhadap setiap titik di dalam DAS dapat dicari dengan menghubungkan stasiun-stasiun yang ada secara grafis, kemudian dibuat garis tegak lurus yang membagi dua stasiun terdekat, dan membentuk poligon yang mengelilingi tiap stasiun. Luasan di dalam poligon menunjukkan wilayah yang paling dekat dengan stasiun di dalamnya sehingga pemberatan yang dilakukan terhadap stasiun tersebut adalah perbandingan antara luas poligon terdekat dengan luas total DAS.
- 3) Isohyet, garis kontur diinterpolasi dan dihubungkan titik-titik stasiun yang jumlah curah hujannya sama. Teknik ini dinilai sebagai teknik yang paling baik. Daerah tangkapan air dan daerah yang dibatasi garis isohyet dihitung luasnya dengan menggunakan planimeter. Curah hujan untuk daerah tangkapan air tersebut dihitung berdasarkan jumlah perkalian antara luas masing-masing bagian isohyetal dengan curah hujan dari setiap daerah yang bersangkutan kemudian dibagi luas total daerah tangkapan air.

Analisis terhadap curah hujan ini dapat dilakukan dengan *Annual series* yaitu; metode dengan mengambil satu data maksimum setiap tahunnya yang berarti hanya besaran maksimum setiap tahun saja yang dianggap berpengaruh dalam analisis data penelitian. *Partial duration series*, yaitu metode dengan menentukan lebih dahulu batas awal tertentu curah hujan, selanjutnya data yang lebih besar dari batas awal tersebut diambil dan dijadikan data yang akan di analisis.

Angka-angka curah hujan yang diperoleh sebelum diterapkan dalam rencana pengendalian air permukaan, harus diolah terlebih dahulu. Data curah hujan yang akan dianalisis adalah besarnya curah hujan harian maksimum. Pengolahan data curah hujan meliputi:

#### 1) Periode ulang hujan

Curah hujan biasanya terjadi dalam pola tertentu, curah hujan tertentu biasanya berulang dalam kurun waktu tertentu yang disebut dengan periode ulang hujan. Periode ulang hujan didefinisikan sebagai waktu dimana curah hujan dengan besaran tertentu akan disamai atau dilampaui sekali dalam jangka waktu tertentu. Misalnya, dengan periode ulang hujan 10 tahun, kejadian yang relevan (hujan, banjir) terjadi rata-rata sekali dalam periode 10 tahun. Peristiwa tersebut tidak harus berlangsung 10 tahun, tetapi rata-rata 10 tahun sekali, misalnya 10 kali dalam 100 tahun, 25 kali dalam 250 tahun, dan seterusnya. Periode ulang ini menjelaskan bahwa semakin panjang periode ulang maka semakin tinggi curah hujan. Penentuan waktu kembali hujan sebenarnya lebih dititikberatkan pada masalah yang harus diperhatikan dalam rencana tersebut. Dalam menentukan periode ulang hujan, risiko yang mungkin timbul yaitu hujan melebihi curah hujan yang direncanakan atau yang telah diperhitungkan.

#### 2) Curah hujan rencana

Hujan rencana adalah curah hujan paling tinggi yang mungkin terjadi selama umur penyaliran yang direncanakan. Hujan rencana ini ditentukan dari hasil analisis frekuensi data curah hujan, dan dinyatakan dalam curah hujan dengan periode ulang tertentu.

Dalam analisis frekuensi data hujan atau data debit guna memperoleh nilai hujan rencana atau debit rencana, dikenal beberapa distribusi probabilitas kontinu yang sering digunakan, yaitu: Gumbel, Normal, Log Normal, dan Log Pearson Type III. Guna mendapatkan hasil perhitungan yang meyakinkan maka penggunaan suatu distribusi probabilitas biasanya diuji dengan metode Chi-Kuadrat atau Smirnov Kolmogorov (Kamiana, 2011).

### **2.4.2. Evapotranspirasi**

Salah satu komponen terpenting dalam pelepasan/pembuangan pada air tanah adalah evapotranspirasi. Evapotranspirasi adalah perpaduan dua proses yakni evaporasi dan transpirasi. Evaporasi adalah proses penguapan atau hilangnya air dari tanah dan badan-badan air (abiotik), sedangkan transpirasi

adalah proses keluarnya air dari tanaman (biotik) akibat proses respirasi dan fotosintesis. Transpirasi pada dasarnya merupakan proses dimana air menguap dari tanaman melalui daun ke atmosfer. Sistem perakaran tanaman mengadopsi air dalam jumlah yang berbeda-beda dan ditransmisikan melalui tumbuhan dan melalui mulut daun. Kombinasi dua proses yang saling terpisah dimana kehilangan air dari permukaan tanah melalui proses evaporasi dan kehilangan air dari tanaman melalui proses transpirasi disebut sebagai evapotranspirasi (Salsabila dan Nugraheni, 2020).

Analisis nilai evapotranspirasi terdiri dari dua jenis yaitu evapotranspirasi potensial dan evapotranspirasi aktual. Evapotranspirasi potensial adalah yang mungkin terjadi pada kondisi air yang tersedia berlebihan. Faktor penting yang mempengaruhi evapotranspirasi adalah tersedianya air yang cukup banyak. Evapotranspirasi potensial akan terjadi jika evapotranspirasi pada suatu daerah sempit di tengah-tengah daerah yang luas, tidak terpisah, seluruh permukaan tertutup vegetasi seragam. Dan terjadi jika dalam kondisi kelembaban tanah tidak terbatas. Evapotranspirasi aktual adalah jumlah air tidak berlebihan atau terbatas dipengaruhi oleh proporsi permukaan luar yang tidak tertutupi tumbuhan hijau pada musim kemarau.

Data meteorologi yaitu suhu tertinggi dan suhu terendah digunakan sebagai dasar perhitungan. Metode *Thornthwaite* (Thornthwaite dan Mather, 1957) adalah salah satu yang paling andal dan dapat diterapkan di antara metode *water budget* yang ada. Persamaan *Thornthwaite* banyak digunakan sebagai metode sederhana untuk estimasi  $ET_0$ . Banyak indeks kekeringan terkenal (seperti PDSI, RDI, SPEI) menggunakan persamaan *Thornthwaite* untuk memperkirakan evapotranspirasi. Persamaan ini berkorelasi suhu bulanan rata-rata dengan evapotranspirasi sebagaimana ditentukan oleh studi keseimbangan air yang dilakukan untuk Amerika Serikat wilayah timur / tengah (Trajkovic *et al.*, 2019). Metode *Thornthwaite* digunakan untuk mengevaluasi evapotranspirasi potensial dan aktual. Evapotranspirasi potensial ( $E_p$  dalam mm) didefinisikan sebagai nilai maksimum yang dapat diperoleh evapotranspirasi dalam kondisi tanah basah (Aksever *et al.*, 2015).

### 2.4.3. Tata Guna Lahan (Koefisien Limpasan)

Penutupan tanah dengan vegetasi dapat meningkatkan laju infiltrasi suatu lahan, perbedaan kapasitas infiltrasi pada berbagai penggunaan lahan menunjukkan bahwa faktor vegetasi memiliki peran besar dalam menentukan kapasitas infiltrasi sehingga tingkat *recharge* air ke dalam tanah juga sangat dipengaruhi oleh fungsi lahan pada daerah tersebut. Dalam suatu wilayah DAS terdiri dari berbagai jenis penggunaan lahan seperti pertanian, pemukiman, sampai industri, yang mana setiap dari jenis penggunaan lahan tersebut tentunya akan memberikan dampak yang berbeda terhadap proses hidrologi. Besarnya aliran limpasan dapat dinyatakan berdasarkan tipe-tipe penggunaan lahan seperti pada tabel berikut:

**Tabel 3** Koefisien Limpasan

Penutupan Lahan	Harga Koefisien Limpasan
Hutan Lahan Kering Sekunder	0,03
Belukar	0,07
Hutan Primer	0,02
Hutan Tanaman Industri	0,05
Hutan Rawa Sekunder	0,15
Perkebunan	0,4
Pertanian Lahan Kering	0,1
Pertanian Lahan Kering Campur Semak	0,1
Pemukiman	0,6
Sawah	0,15
Tambak	0,05
Terbuka	0,2
Perairan	0,05

Sumber: Kodoatie dan Syarief, 2005

### 2.5. Abstraksi Air Tanah dari Aquifer (*Output*)

Air tanah adalah air yang terdapat di bawah permukaan tanah yang terkandung di dalam pori-pori tanah dan retakan pada batuan. Secara global, 50% air minum dan 43% air untuk pertanian bersumber dari air tanah. Secara keseluruhan, air tanah berkontribusi pada kesejahteraan manusia, pembangunan ekonomi, dan fungsi ekosistem. Namun, karena tetap berada di bawah tanah, pemahaman tentang sumber daya ini oleh publik dan pengambil keputusan masih

rendah, dan dibandingkan dengan air permukaan, hal ini belum banyak tercakup dalam kebijakan pengelolaan sumber daya air (Rajeevan and Mishra, 2019).

Pada tingkat global, penggunaan air diperkirakan akan terus meningkat sebagai fungsi dari pertumbuhan penduduk, pembangunan ekonomi dan perubahan pola konsumsi, dan beberapa faktor-faktor lainnya. Populasi dunia diperkirakan akan meningkat dari 7,7 miliar penduduk pada tahun 2017 menjadi antara 9,4 dan 10,2 miliar penduduk pada tahun 2050, dengan dua pertiga populasi tinggal di wilayah kota (World Water Development Report, 2018).

Faktanya, dalam lima dekade terakhir tingkat abstraksi air tanah global telah meningkat tiga kali lipat dan terus meningkat sebesar 1–2% setiap tahun. Bahkan, pada beberapa lokasi air tanah telah diabstraksi melebihi tingkat pembaruannya. Mayoritas air tanah yang diambil digunakan untuk irigasi di pertanian (70%) diikuti oleh industri (20%) dan keperluan rumah tangga (10%) (Rajeevan and Mishra, 2019).

Pada daerah penelitian air tanah telah diabstraksi dari *aquifer* untuk kebutuhan domestik. Total abstraksi diestimasikan berdasarkan tingkat penggunaan air tanah dalam suatu wilayah yang akan berfungsi sebagai nilai *output* ( $Q_{\text{kebutuhan}}$ ) dalam perhitungan neraca air.

### 2.5.1. Pola Konsumsi Air

Berdasarkan kebijakan pembangunan air bersih, maka kebutuhan air pada suatu kota didasarkan pada besarnya jumlah penduduk yang dilayani dikalikan dengan tingkat pelayanan/kebutuhan per-kapita sesuai dengan klasifikasi kota dengan mempertimbangkan kebutuhan untuk non domestik seperti sosial, komersial, industri, dan sektor lainnya (Burako, 2018).

Penggunaan air untuk keperluan domestik diperhitungkan dari jumlah penduduk di daerah perkotaan dan pedesaan yang terdapat di Daerah Aliran Sungai (DAS). Berdasarkan SNI 19-6728.1 Tahun 2002 Tentang Penyusunan Neraca Sumber Daya Air Spasial, pemanfaatan air dibagi menjadi tiga yaitu untuk kebutuhan domestik, industri dan pertanian. Penggunaan air untuk keperluan domestik diperhitungkan dari jumlah penduduk di daerah perkotaan dan pedesaan yang terdapat di Daerah Aliran Sungai (DAS). Pada penduduk perkotaan

diperlukan 120L/hari/kapita, sedang penduduk pedesaan memerlukan 60L/hari/kapita. Dengan diketahui kebutuhan per hari per kapita penduduk maka dapat diformulasikan perhitungan kebutuhan air domestik pada wilayah Kota Majene adalah sebagai berikut:

$$Q_{\text{kebutuhan}} = \Sigma \text{ pengguna air tanah(jiwa)} \times 365 \times 120 \text{ L} \quad (3)$$

### 2.5.2. Tingkat Aksesibilitas Air

Dalam perencanaan suatu sistem distribusi air minum, diperlukan beberapa kriteria sebagai dasar perencanaan. Tujuan dari pengajuan beberapa kriteria perencanaan adalah untuk mendapatkan suatu hasil perencanaan yang tepat dan terkondisi untuk suatu wilayah perencanaan.

Kebutuhan air bersih semakin lama semakin meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah penduduk di masa yang akan datang. Bertambahnya lokasi pemukiman masyarakat mengakibatkan adanya masyarakat yang mungkin tidak memiliki akses terhadap air dikarenakan kapasitas debit air tidak mampu melayani seluruh masyarakat.

Sumber air utama yang digunakan masyarakat diperoleh dari sistem jaringan air bersih yang disediakan oleh PDAM yang tersebar di seluruh daerah di Indonesia. Namun, tidak semua daerah memiliki jaringan PDAM yang mampu melayani semua masyarakat yang ada di suatu daerah, sehingga salah satu opsi terbanyak yang digunakan masyarakat untuk mendapatkan akses air bersih adalah dengan menggunakan air tanah baik melalui sumur gali (air tanah dangkal) maupun sumur bor (air tanah dalam).

Kategori mendapatkan akses air bersih yang dimaksud adalah berdasarkan PermenPUPR-2018 mengenai standar pelayanan minimum PUPR yang menjelaskan bahwa ukuran standar pelayanan minimum sub-bidang air minum memiliki dua indikator yaitu kuantitas dan kualitas, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada tabel berikut ini:

**Tabel 4** Ukuran SPM sub bidang air minum daerah kabupaten/kota

No	Indikator	Sub Indikator
1	Kuantitas	Kebutuhan pokok minimal air minum sehari-hari sejumlah 60 liter/orang/hari diperuntukkan kepada daerah kabupaten/kota yang tidak ada sumber air baku. Untuk daerah kabupaten/kota yang memiliki sumber air baku, maka pemenuhan kebutuhan pokok minimal air minum sehari-hari dengan menyesuaikan pada penggunaan air di kawasan tersebut.
2	Kualitas	Parameter fisik kualitas air yang tidak langsung berhubungan dengan kesehatan, antara lain: <ul style="list-style-type: none"> <li>a. Keruh: air minum keruh, tidak jernih/ tidak bening.</li> <li>b. Berwarna: air minum terlihat berwarna seperti kekuningan, kemerahan, dan kecoklatan atau warna lainnya.</li> <li>c. Berasa: air minum terasa asam, manis, pahit atau asin. Misalkan ketika digunakan untuk berkumur. Rasa asam disebabkan oleh adanya asam organik maupun anorganik, sedangkan rasa asin disebabkan adanya garam yang larut dalam air</li> <li>d. Berbusa, air minum mengeluarkan busa baik saat diaduk maupun tidak.</li> <li>e. Berbau, air minum yang berbau jika dicium. Air berbau busuk bila mengandung bahan organik yang mengalami dekomposisi (penguraian) oleh mikroorganisme air. Parameter tersebut diatas disesuaikan Keputusan Menteri Kesehatan, serta disesuaikan Pedoman Konsep dan Definisi Susenas.</li> </ul>

Sumber: Permen PUPR Nomor 29 /PRT/M/2018

Berdasarkan indikator tersebut maka dibuat suatu data dasar akses air bersih masyarakat yang dibuat oleh tiap kabupaten oleh instansi yang terkait dengan data misalnya BAPPEDA berkoordinasi dengan Dinas PUPR kabupaten dan Pelaku Pamsimas. Data ini akan di-*update* setiap tiga bulan untuk mengetahui perkembangan akses masyarakat terhadap air bersih.

### 2.5.3. Metode Proyeksi Penduduk

Dalam perencanaan suatu sistem distribusi air minum, diperlukan beberapa kriteria sebagai dasar perencanaan. Tujuan dari pengajuan beberapa kriteria perencanaan adalah untuk mendapatkan suatu hasil perencanaan yang tepat dan terkondisi untuk suatu wilayah perencanaan.

Kebutuhan air bersih semakin lama semakin meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah penduduk di masa yang akan datang, untuk itu diperlukan proyeksi penduduk untuk tahun perencanaan. Walaupun proyeksi bersifat ramalan, dimana kebenarannya bersifat subyektif, namun bukan berarti tanpa pertimbangan dan metode.

Banyak metode yang digunakan dalam memperkirakan laju perkembangan jumlah populasi. Metode perkiraan populasi dihitung dengan menggunakan 2 metode sebagai bahan perbandingannya. Metode tersebut antara lain adalah: (1). Metode Aritmatika dan Metode Geometri (Suheri dkk, 2019).

#### a) Metode Aritmatika

Menurut McGhee (1991), metode aritmatika didasarkan pada anggapan bahwa laju perubahan populasi konstan, menggunakan asumsi bahwa pertumbuhan penduduk dengan jumlah sama setiap tahun. Bentuk matematis model aritmetik adalah sebagai berikut:

$$P_t = P_0(1 + rt) \quad (4)$$

$$r = \frac{1}{t} \left( \frac{P_t}{P_0} - 1 \right) \quad (5)$$

dengan:  $P_t$  : Jumlah penduduk pada tahun t (mendatang)  
 $P_0$  : Jumlah penduduk pada tahun dasar  
 $r$  : Laju pertumbuhan penduduk  
 $t$  : Periode waktu antara tahun dasar dan tahun t

#### b) Metode Geometrik

Metode ini dengan asumsi bahwa pertumbuhan penduduk yang menggunakan dasar bunga majemuk. Angka pertumbuhan penduduk dianggap sama untuk setiap tahun, bentuk matematis model geometrik adalah sebagai berikut:

$$P_t = P_0(1 + r)^t \quad (6)$$

$$r = \left( \frac{P_t}{P_0} \right) - 1 \quad (7)$$

dengan:  $P_t$  : Jumlah penduduk pada tahun t (mendatang)  
 $P_0$  : Jumlah penduduk pada tahun dasar  
 $r$  : Laju pertumbuhan penduduk  
 $t$  : Periode waktu antara tahun dasar dan tahun t

## 2.6. Kualitas Air Tanah

Syarat kualitas air bersih dapat diartikan sebagai ketentuan-ketentuan berdasarkan Permenkes RI No. 416/ MENKES/ PER/ IX/ 1990 yang biasanya dituangkan dalam bentuk pernyataan atau angka yang menunjukkan persyaratan-persyaratan yang harus dipenuhi. Kualitas air adalah sifat air dan kandungan makhluk hidup, zat, energi, atau komponen lain dalam air yang mencakup kualitas fisik, kimia, dan biologis (Effendi, 2003).

### 1) Kualitas Fisik

Menurut Kusnaedi (2010), syarat-syarat sumber mata air yang bisa digunakan sebagai air bersih adalah sebagai berikut :

#### a) Tidak berwarna

Air untuk keperluan rumah tangga harus jernih. Air yang berwarna berarti mengandung bahan-bahan lain yang berbahaya bagi kesehatan, artinya sebaiknya air minum tidak berwarna untuk alasan estetis dan untuk mencegah keracunan dari berbagai zat kimia maupun mikroorganisme yang berwarna. Warna dapat disebabkan tanin dan asam humat atau zat organik, sehingga bila terbentuk bersama klor dapat membentuk senyawa kloroform yang beracun, sehingga berdampak terhadap kesehatan pengguna air (Slamet, 2004).

#### b) Tidak berbau

Air yang baik memiliki ciri tidak berbau bila dicium dari jauh maupun dari dekat. Air yang berbau busuk mengandung bahan organik yang sedang mengalami penguraian oleh mikroorganisme air.

c) Rasanya tawar

Secara fisika, air bisa dirasakan oleh lidah. Air yang terasa asam, manis, pahit, atau asin menunjukkan bahwa kualitas air tersebut tidak baik. Rasa asin disebabkan adanya garam-garam tertentu yang larut dalam air, sedangkan rasa asam diakibatkan adanya asam organik maupun asam anorganik. Air dengan rasa yang tidak tawar dapat menunjukkan kehadiran berbagai zat yang membahayakan kesehatan, seperti rasa logam (Slamet, 2004).

d) Kekeruhan

Air yang berkualitas harus memenuhi persyaratan fisik seperti berikut jernih atau tidak keruh. Air yang keruh disebabkan mengandung partikel bahan yang tersuspensi sehingga memberikan warna/rupa yang berlumpur dan kotor. Untuk standar air bersih ditetapkan oleh Permenkes RI No. 416/MENKES/PER/IX/1990, yaitu kekeruhan yang dianjurkan maksimum 25 NTU.

e) Temperaturnya normal

Air yang baik harus memiliki temperatur sama dengan temperatur udara ( $\pm 30^\circ\text{C}$ ). Air yang secara mencolok mempunyai temperatur di atas atau di bawah temperatur udara berarti mengandung zat-zat tertentu yang mengeluarkan atau menyerap energi dalam air. Berdasarkan aspek suhu air, diketahui bahwa suhu air yang tidak sejuk atau berlebihan dari suhu air yang normal akan mempermudah reaksi zat kimia, sehingga secara tidak langsung berimplikasi terhadap keadaan kesehatan pengguna air (Slamet, 2004).

f) Tidak mengandung zat padatan

Bahan padat adalah bahan yang tertinggal sebagai residu pada penguapan dan pengeringan pada suhu  $103\text{-}105^\circ\text{C}$ .

Sedangkan berdasarkan Keputusan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 416/ MENKES/ PER/ IX/ 1990, persyaratan fisika air bersih adalah sebagai berikut:

**Tabel 5** Daftar persyaratan kualitas air bersih secara fisik

No.	Parameter	Satuan	Kadar Maksimum yang diperbolehkan	Keterangan
1	Bau	-	-	Tidak berbau
2	Jumlah zat padat terlarut(TDS)	mg/L	1500	-
3.	Kekeruhan	Skala NTU	25	-
4.	Rasa	-	-	Tidak berasa
5.	Suhu	<sup>0</sup> C	Suhu udara $\pm 3^{\circ}$ C	-
6.	Warna	Skala TCU	-	-

Sumber: Permenkes RI, 1990

## 2) Kualitas Kimia

Kualitas air bisa dikatakan baik apabila memenuhi persyaratan kimia sebagai berikut :

### a) pH netral

pH digunakan sebagai ukuran sifat asam atau basa pada air. Skala pH diukur dengan pH meter atau lakmus. Air yang netral mempunyai pH 7. Apabila nilai pH dibawah 7 berarti air bersifat asam, sedangkan bila di atas 7 bersifat basa.

### b) Tidak mengandung bahan kimia beracun

Air yang berkualitas baik tidak mengandung bahan kimia beracun seperti sianida sulfida, fenolik (Kusnaedi, 2010).

### c) Tidak mengandung garam-garam atau ion-ion logam

Air yang berkualitas baik tidak mengandung garam atau ion-ion logam (Kusnaedi, 2010):

#### 1. Besi (Fe)

Besi adalah satu dari lebih unsur-unsur penting dalam air permukaan dan air tanah. Perairan yang mengandung besi sangat tidak diinginkan untuk keperluan rumah tangga, karena dapat menyebabkan bekas karat pada pakaian, porselin dan alat-alat lainnya serta menimbulkan rasa yang tidak enak pada air minum dengan konsentrasi diatas kurang lebih 0,31 m/l, sifat kimia perairan dari besi adalah sifat redoks, pembentukan

kompleks, metabolisme oleh mikroorganisme, dan pertukaran dari besi antara fase cair dan fase padat yang mengandung besi karbonat, hidroksida dan *sulphide*. Kelebihan logam besi dalam tubuh dapat menimbulkan efek- efek kesehatan seperti serangan jantung, gangguan pembuluh darah bahkan kanker hati. Logam ini bersifat akumulatif terutama di organ penyaringan sehingga dapat mengganggu fungsi fisiologis tubuh. Nilai estetika juga dapat dirusak oleh keberadaan logam-logami ini karena dapat menimbulkan bercak-bercak hitam pada pakaian. Air yang tercemar oleh logam ini biasanya nampak pada intensitas warna yang tinggi pada air, berwarna kuning bahkan berwarna merah kecoklatan, dan terasa pahit atau masam (Wardhana, 2004).

## 2. Nitrat, nitrit

Nitrat dan nitrit dalam jumlah besar dapat menyebabkan gangguan GI (Gastro Intestinal), diare campur darah, disusul oleh konvulsi, koma, dan bila tidak tertolong akan meninggal. Keracunan kronis menyebabkan depresi umum, sakit kepala, dan gangguan mental. Nitrit terutama bereaksi dengan haemoglobin dan membentuk Methemoglobin (metHb). Dalam jumlah melebihi normal Methemoglobin akan menimbulkan Methemoglobinemia. Pada bayi Methemoglobinemia sering dijumpai karena pembentukan enzim untuk mengurai Methemoglobinemia menjadi Haemoglobin masih belum sempurna. Sebagai akibat Methemoglobinemia, bayi akan kekurangan oksigen, maka mukanya akan tampak biru, karenanya penyakit ini juga dikenal sebagai penyakit 'blue babies' (Wardhana, 2004).

Salah satu contoh sumber pencemaran nitrat terhadap air minum yakni akibat kegiatan pertanian. Meskipun pencemaran nitrat juga dapat terjadi secara alami, tetapi yang paling sering yakni akibat pencemaran yang berasal dari air limbah pertanian yang banyak mengandung senyawa nitrat akibat pemakaian pupuk nitrogen (urea) (Wardhana, 2004).

Senyawa nitrat dalam air minum dalam jumlah yang besar dapat menyebabkan methaemoglobinemia, yakni kondisi dimana hemoglobin di dalam darah berubah menjadi methaemoglobin sehingga darah menjadi kekurangan oksigen. Hal ini dapat mengakibatkan pengaruh yang fatal, serta dapat mengakibatkan kematian khususnya pada bayi (Wardhana, 2004).

### 3. Klorida

Klorida adalah ion dominan yang terdapat pada air laut dan dalam keadaan normal hanya terdapat dalam jumlah yang sedikit dalam air tanah. Keberadaan klorida dalam air tanah dapat menyebabkan air menjadi payau bahkan asin, sehingga analisis kandungan klorida ini bisa menjadi parameter dalam identifikasi intrusi air laut dalam *aquifer* dengan membandingkannya dengan senyawa bikarbonat yang disebut *Chloride Bicarbonate Ratio* yaitu rasio  $Cl^{-}/(CO_3^{2-}+HCO_3^{-})$ .

**Tabel 6** Klasifikasi rasio klorida bikarbonat (Revelle, 1941)

Nilai R	Tingkat Penyusupan Air Laut
< 0,5	Air tanah tawar
0,5 – 1,3	Terjadi penyusupan air laut sedikit
1,3 – 2,8	Terjadi penyusupan air laut sedang
2,8 – 6,6	Terjadi penyusupan air laut agak tinggi
6,6 – 15,5	Terjadi penyusupan air laut tinggi
> 15,5	Air laut

### 4. Kesadahan rendah

Kesadahan adalah sifat air yang disebabkan oleh adanya ion-ion (kation) logam valensi dua (Sutrisno, 2004). Tingginya kesadahan berhubungan dengan garam-garam yang terlarut di dalam air terutama garam Ca dan Mg (Kusnaedi, 2010).

### 5. Tidak mengandung bahan organik

Berdasarkan Keputusan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 416/MENKES/PER/IX/1990, persyaratan kimia air bersih adalah sebagai berikut:

**Tabel 7** Persyaratan kualitas air secara kimia (Permenkes RI, 1990)

<b>No.</b>	<b>Parameter</b>	<b>Satuan</b>	<b>Kadar maksimum yang diperbolehkan</b>
1.	Air raksa	mg/L	0,001
2.	Arsen	mg/L	0,05
3.	Besi	mg/L	1,0
4.	Fluorida	mg/L	1,5
5.	Kadnium	mg/L	0,005
6.	Kesadahan (CaCO <sub>3</sub> )	mg/L	500
7.	Klorida	mg/L	600
8.	Kromium, valensi 6	mg/L	0,05
9.	Mangan	mg/L	0,5
10.	Nitrat	mg/L	10
11.	Nitrit	mg/L	1,0
12.	pH	mg/L	6,5-9,0
13.	Selenium	mg/L	0,01
14.	Seng	mg/L	15
15.	Sianida	mg/L	0,1
16.	Sulfat	mg/L	400
17.	Timbal	mg/L	0,05