

SKRIPSI

**PEMODELAN SISTEM DINAMIS NERACA AIR TANAH
KOTA PAREPARE**

Disusun dan diajukan oleh:

**VANECIA GABRIELA WATTIMURY
D111 20 1046**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK PERTAMBANGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**



Optimized using
trial version
www.balesio.com

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

PEMODELAN SISTEM DINAMIS NERACA AIR TANAH KOTA PAREPARE

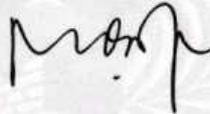
Disusun dan diajukan oleh

Vanecia Gabriela Wattimury
D111 20 1046

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada tanggal 29 Juli 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Dr. Eng. Ir. Muhammad Ramli, M.T.
NIP. 196807181993091001

Ketua Program Studi,



Dr. Ir. Aryanti Virtanti Anas, S.T., M.T.
NIP. 197010052008012026



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini ;

Nama : Vanecia Gabriela Wattimury

NIM : D111 20 1046

Program Studi : Teknik Pertambangan

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Pemodelan Sistem Dinamis Neraca Air Tanah
Kota Parepare

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilalihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 29 Juli 2024

Yang Menyatakan



Vanecia Gabriela Wattimury



ABSTRAK

VANECIA GABRIELA WATTIMURY. *Pemodelan Sistem Dinamis Neraca Air Tanah Kota Parepare* (dibimbing oleh Muhammad Ramli)

Air sangat penting untuk memenuhi kebutuhan manusia dalam berbagai hal. Kota Parepare diproyeksikan memiliki 5 juta m³/tahun air tanah dalam yang tersedia dan 1,345 juta m³/tahun air tanah dangkal. Peningkatan penggunaan air tanah disebabkan oleh pertumbuhan populasi manusia sehingga sumber daya air tanah di Kota Parepare mengalami penurunan. Perencanaan dan pengelolaan sumber daya diperlukan karena terbatasnya ketersediaan sumber daya air tersebut. Oleh karena itu, penelitian ini perlu dilakukan untuk mengevaluasi neraca air tanah dan rencana pengelolaan air tanah Kota Parepare. Analisis yang dilakukan menggunakan pemodelan sistem dinamis dengan bantuan STELLA 10.0.4 sebagai *software* utama. Hasil pemodelan neraca air tanah Kota Parepare pada tahun 2021-2030 mengindikasikan bahwa akan terjadi masalah air tanah pada bulan-bulan musim kemarau, terkhususnya bulan September. Hal ini karena neraca air tanah Kota Parepare terpengaruh ketika jumlah air tanah menjadi lebih sedikit. Mengevaluasi sistem jaringan distribusi PAM Tirta Karajae untuk air tanah yang disalurkan ke masyarakat merupakan salah satu metode pengelolaan air tanah yang berkelanjutan untuk Kota Parepare. Berdasarkan skenario yang dijalankan, menurunkan persentase kehilangan air tanah dapat meningkatkan neraca air tanah rata-rata Kota Parepare tahun 2021-2030 sebesar 102.684,18 m³.

Kata Kunci: Ketersediaan air tanah, Kebutuhan air, Neraca air tanah, Model sistem dinamik



ABSTRACT

VANECIA GABRIELA WATTIMURY. *System Dynamic Modelling of Groundwater Balance of Parepare City (supervised by Muhammad Ramli)*

Water is essential to provide for human needs in a variety of ways. It is projected that Parepare City has 5 million m³/year of deep groundwater available and 1.345 million m³/year of shallow groundwater. Because of increased groundwater usage brought on by the growing human population, Parepare City's groundwater resource is declining. Planning and resource management are necessary due to the limited availability of these water resources. Thus, it is necessary to conduct this study in order to evaluate Parepare City's groundwater balance and groundwater management plan. The analysis is carried out using system dynamic modeling with the help of STELLA 10.0.4 as the main software. The results of the groundwater balance modeling of Parepare City in 2021-2030 indicate that there will be groundwater problems in the dry months, especially in September. This is because the groundwater balance of Parepare City is affected when the amount of groundwater becomes less. Evaluating the PAM Tirta Karajae distribution network system for groundwater distributed to the community is one of the sustainable groundwater management methods for Parepare City. Based on the scenario implemented, reducing the percentage of groundwater loss can increase the average groundwater balance of Parepare City in 2021-2030 by 102,684.18 m³.

Keywords: Groundwater availability, Water demand, Groundwater balance, System dynamic model



DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK	iii
<i>ABSTRACT</i>	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL.....	vii
DAFTAR LAMPIRAN	viii
KATA PENGANTAR	ix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Ruang Lingkup.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Ketersediaan Air	4
2.2 Kebutuhan Air.....	6
2.3 Pengelolaan Air Tanah.....	8
2.4 Model Sistem Dinamis.....	10
2.5 Analisis Kebijakan Model Sistem Dinamis	12
BAB III METODE PENELITIAN.....	15
3.1 Lokasi Penelitian.....	15
3.2 Variabel Penelitian.....	16
3.3 Alat Penelitian.....	16
3.4 Teknik Pengumpulan Data.....	16
3.5 Teknik Analisis Data.....	17
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	23
4.1 Analisis Ketersediaan Air	23
4.2 Analisis Kebutuhan Air Total	36
4.3 Analisis Model Neraca Air Tanah	40
4.4 Analisis Kebijakan Pengelolaan Air Tanah	43
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	46
5.1 Kesimpulan	46
5.2 Saran.....	46
DAFTAR PUSTAKA	47



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Peta lokasi penelitian.....	15
Gambar 2. <i>Causal loop diagram</i> neraca air tanah.....	21
Gambar 3. Diagram alir penelitian.....	22
Gambar 4. Prediksi total curah hujan tahun 2021-2030 (mm).....	23
Gambar 5. Prediksi curah hujan maksimum tahun 2021-2030 (mm).....	26
Gambar 6. Intensitas curah hujan tahun 2021-2030 (mm).....	27
Gambar 7. Peta tata guna lahan Kota Parepare.....	28
Gambar 8. Volume limpasan permukaan tahun 2021-2030 (mm).....	30
Gambar 9. Evapotranspirasi tahun 2021-2030 (mm).....	32
Gambar 10. Perubahan penyimpanan air tanah tahun 2021-2030 (mm).....	35
Gambar 11. Kebutuhan air total tahun 2021-2030 (m ³).....	38
Gambar 12. Neraca air tanah tahun 2021-2030 (juta m ³).....	42
Gambar 13. Analisis sensitivitas persentase kehilangan air tanah.....	44
Gambar 14. Analisis sensitivitas produksi air permukaan.....	44
Gambar 15. Skenario penurunan persentase kehilangan air tanah.....	45



DAFTAR TABEL

Tabel 1. Nilai koefisien limpasan.....	5
Tabel 2. Standar kebutuhan air domestik.....	7
Tabel 3. Standar kebutuhan air peternakan.....	8
Tabel 4. Kalibrasi hasil prediksi curah hujan tahun 2021-2023 (mm).....	24
Tabel 5. Data curah hujan maksimum tahun 2019-2023 (mm).....	25
Tabel 6. Data luas penggunaan lahan Kota Parepare 2016-2020 (km ²).....	28
Tabel 7. Prediksi perubahan luas penggunaan lahan 2021-2030 (km ²).....	29
Tabel 8. Kalibrasi hasil simulasi volume limpasan tahun 2021-2023 (mm).....	30
Tabel 9. Kalibrasi hasil prediksi evapotranspirasi tahun 2021-2023 (mm).....	33
Tabel 10. Kalibrasi perubahan penyimpanan air tanah tahun 2021-2023.....	35
Tabel 11. Data penduduk, ternak dan industri Kota Parepare 2019-2023.....	37
Tabel 12. Standar kebutuhan air berbagai sektor.....	37
Tabel 13. Kalibrasi hasil simulasi kebutuhan air total tahun 2021-2023 (m ³).....	38
Tabel 14. Persentase kehilangan air tanah.....	41
Tabel 15. Neraca air tanah Kota Parepare tahun 2021-2023 (juta m ³).....	42



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Peta lokasi penelitian	51
Lampiran 2 Peta lokasi tata guna lahan.....	53
Lampiran 3 Data curah hujan maksimum (2019-2023)	55
Lampiran 4 Data klimatologi (2019-2023)	61
Lampiran 5 Data produksi air PAM (Januari – Desember 2022)	67
Lampiran 6 <i>Stock-flow diagram</i>	92
Lampiran 7 Hasil pemodelan dinamis neraca air tanah (2021-2030)	94
Lampiran 8 Formula model.....	105
Lampiran 9 Kartu konsultasi.....	113



KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis ucapkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas kasih dan berkat-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “Pemodelan Sistem Dinamis Neraca Air Tanah Kota Parepare”. Penulisan skripsi ini merupakan salah satu syarat wajib untuk menyelesaikan program sarjana di Program Studi Sarjana Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Kegiatan penelitian ini penting dilakukan untuk meningkatkan pemahaman mahasiswa Program Studi Sarjana Teknik Pertambangan dan memberikan kemampuan pemecahan masalah yang lebih dalam.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada setiap pihak yang telah mendukung, serta membantu penulis selama proses penulisan skripsi ini. Ucapan terima kasih penulis sampaikan dengan hormat kepada Kepala Laboratorium Hidrologi dan Lingkungan Tambang serta sebagai dosen pembimbing penulis, Bapak Dr. Eng. Ir. Muhammad Ramli, M.T., yang telah membimbing dan memberikan pembekalan kepada penulis sehingga pengerjaan skripsi ini dapat berlangsung dengan lancar. Ucapan terima kasih juga disampaikan penulis kepada para penguji, yaitu Ibu Dr. Aryanti Virtanti Anas, S.T., M.T., dan Bapak Ir. Asta Arjunoarwan Hatta, S.T., M.T., atas kritik dan masukan untuk perbaikan penulisan skripsi ini. Terima kasih juga kepada segenap dosen dan staf administrasi Program Studi Sarjana Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.

Ungkapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada Kak A. Suci Puji Astuti dan Kak Angelie Santosa IGNEOUZ 2019, yang telah membantu penulis dalam proses pengumpulan dan pengolahan data. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada teman-teman DRILLING 2020, teman-teman anggota Laboratorium Hidrologi dan Lingkungan Tambang, serta sahabat-sahabat penulis atas dukungan dan saran yang diberikan kepada penulis selama proses penelitian. Terima kasih yang sebesar-besarnya kepada orang tua dan kedua kakak penulis yang selalu membawa nama penulis dalam setiap doa. Terima kasih untuk cinta terhitung jumlahnya, nasehat dan dukungan kepada penulis dalam setiap n hidup.



Penulis menyadari bahwa untuk kepentingan perbaikan skripsi ini, dibutuhkan kritik dan saran dari pembaca. Oleh karena itu, penulis sangat berterima kasih apabila ada yang ingin memberikan kritik dan saran yang bersifat membangun. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat bermanfaat dan memberikan pengetahuan serta pengembangan wawasan bagi para pembaca, terkhususnya terkait pengelolaan air tanah yang berkelanjutan.

Gowa, 29 Juli 2024

Vanecia Wattimury



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Salah satu komponen penting dalam menunjang kebutuhan hidup adalah air. Sumber daya air yang ada di dunia sekitar 0,3% digunakan untuk memenuhi kebutuhan hidup manusia. Penggunaan air yang tidak sebanding dengan sumber daya air menyebabkan terjadi kekurangan air pada beberapa tempat (Kilic, 2020). Ketersediaan air merupakan tantangan yang dihadapi di berbagai wilayah di seluruh dunia, termasuk di Indonesia. Hal ini menjadi tantangan global yang sangat penting karena kebutuhan air diproyeksikan akan meningkat seiring meningkatnya populasi, dan kegiatan ekonomi (Santikayasa dan Wiranta, 2022).

Air tanah merupakan komponen penting dari pasokan air untuk pertanian, daerah perkotaan, industri, dan ekosistem. Pengelolaan air tanah menjadi suatu tantangan karena sulit untuk memetakan, mengukur, dan mengevaluasi air tanah. Tata kelola air tanah dapat didefinisikan sebagai prosedur yang menentukan siapa yang mendapatkan, kapan, dan berapa banyak air. Hal ini merupakan kerangka kerja menyeluruh dari undang-undang, peraturan, dan kebiasaan penggunaan air tanah, serta proses melibatkan sektor publik, swasta, dan masyarakat sipil. Tata kelola yang lebih baik perlu dikaitkan dengan tujuan pembangunan tertentu di masyarakat (Barati, *et al.*, 2019).

Menurut Kumar, *et al.* (2020), kelangkaan sumber daya air yang tersedia akibat pertumbuhan populasi mengharuskan adanya perencanaan dan pengelolaan sumber daya tersebut. Berdasarkan hasil sensus yang dilakukan Badan Pusat Statistik Sulawesi Selatan, jumlah penduduk Kota Parepare setiap tahunnya terus meningkat. Jumlah penduduk Kota Parepare akan mencapai 160.920 jiwa pada tahun 2024. Oleh karena itu, perlu adanya peningkatan yang sesuai dalam konservasi dan daur ulang sumber daya air (Kumar, *et al.*, 2020).

Pemanfaatan air tanah memerlukan penentuan kuantitas dan kualitas air yang ada dalam akuifer (Listyani dan Putranto, 2020). Ketersediaan air dari kualitas sangat bergantung pada penggunaan lahan suatu wilayah. Salah satu lahan yang sering terjadi pada daerah perkotaan yakni kondisi resapan yang



tidak lagi optimal dalam menampung air ketika intensitas curah hujan tinggi sehingga menyebabkan air sungai meluap. Beberapa daerah di Parepare mulai mengalami kritis daerah resapan. Hal ini tentunya akan berpengaruh pada total ketersediaan air tanah yang dimiliki Kota Parepare (Uca, dkk., 2021).

Menurut Nurhakim dan Firdaus (2022), Kota Parepare diperkirakan memiliki ketersediaan air tanah dangkal sebesar 1,345 juta m^3 /tahun dan air tanah dalam sebesar 5 juta m^3 /tahun. Cadangan air tanah tersebut dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan air bersih dalam berbagai sektor. Bahkan, pemanfaatan air tanah di Kota Parepare lebih besar dibanding pemanfaatan air permukaan. Akses terhadap air bersih harus diimbangi dengan pentingnya mengelola air secara berkelanjutan. Pengelolaannya perlu mempertimbangkan variabel lingkungan dan sosial lainnya.

Pertimbangan dampak pembangunan ekonomi, sosial dan politik dalam mensimulasikan proses hidrologi maupun hidrogeologi dapat dilakukan dengan menerapkan sistem dinamik (Abdolabadi, *et al.*, 2018). Sistem dinamik merupakan alat yang efektif dalam bidang pengelolaan sumber daya air, terkhususnya dinamika air tanah (Huang, *et al.*, 2022). Simulasi ini dapat memprediksi ketersediaan dan kebutuhan air tanah di Kota Parepare dalam beberapa tahun ke depan. Oleh karena itu, pemodelan sistem dinamik untuk pengelolaan pasokan air dapat merujuk pada pembuatan kebijakan pengelolaan sumber daya air yang tepat.

1.2 Rumusan Masalah

Setiap tahunnya akan ada perubahan yang terjadi, baik itu dari segi populasi manusia, pembangunan, bahkan keadaan alam. Perubahan-perubahan tersebut berdampak besar terhadap neraca air suatu daerah, termasuk Kota Parepare. Kota ini memanfaatkan air tanah untuk memenuhi kebutuhan air bersih bagi masyarakat setempat. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian ini untuk menganalisis beberapa permasalahan berikut:

1. Bagaimana neraca air tanah di Kota Parepare?



2. Bagaimana strategi pengelolaan air tanah Kota Parepare menggunakan model sistem dinamis?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari kegiatan penelitian ini sebagai berikut:

1. Menganalisis neraca air tanah Kota Parepare menggunakan model sistem dinamis.
2. Menganalisis strategi pengelolaan air tanah yang dapat diterapkan oleh pemerintah Kota Parepare menggunakan model sistem dinamis.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini dilakukan sebagai bentuk pemenuhan Tugas Akhir. Penelitian ini berguna dalam memberikan informasi-informasi mengenai ketersediaan dan kebutuhan air tanah Kota Parepare, serta strategi pengelolaannya. Hasil dari penelitian ini juga dapat digunakan oleh pemerintah Kota Parepare untuk merencanakan program keberlanjutan air tanah Kota Parepare.

1.5 Ruang Lingkup

Penelitian ini dilakukan di Kota Parepare, Provinsi Sulawesi Selatan. Kegiatan penelitian ini dimulai dengan pengumpulan data yang didapatkan dari Badan Pusat Statistik Kota Parepare, Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika Sulawesi Selatan, serta PAM Tirta Karajae Kota Parepare. Proses pengumpulan data dilakukan dari tanggal 7 – 10 April 2024.

Fokus penelitian ini adalah keberlanjutan air tanah Kota Parepare. Keberlanjutan air tanah Kota Parepare dapat dievaluasi melalui pemenuhan ketersediaan air tanah terhadap kebutuhan air di Kota Parepare. Penelitian ini juga mensimulasikan beberapa skenario sebagai bentuk strategi pengelolaan air tanah yang berkelanjutan. Simulasi keberlanjutan air tanah dilakukan dengan bantuan *software* STELLA 10.0.4.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Ketersediaan Air

Ketersediaan air merupakan volume air yang terdapat dalam siklus hidrologi di suatu wilayah yang merupakan gabungan dari air hujan, air permukaan, dan air tanah. Air hujan yang jatuh ke permukaan bumi akan mengalami proses evapotranspirasi, infiltrasi, dan sisanya akan mengalir sebagai limpasan air permukaan. Aliran permukaan yang berkumpul akan membentuk aliran sungai, kemudian secara spasial dapat dibatasi sebagai DAS (Nurkholis, dkk., 2018).

Suatu DAS harus di lihat sebagai kombinasi dari area drainase permukaan dan bagian dari tanah di bawah permukaan, serta formasi geologi yang melandasinya. Proses hidrologi bawah permukaan sama pentingnya dengan proses di permukaan. Hal ini dikarenakan sifat material bawah permukaan yang mengendalikan laju infiltrasi, dan laju infiltrasi mempengaruhi waktu dan distribusi spasial limpasan permukaan (Freeze *and* Cherry, 1979).

Curah hujan merupakan salah satu parameter penting dalam melakukan analisis hidrologi. Curah hujan adalah ketebalan air hujan yang terkumpul dalam tempat yang datar, tidak menguap, tidak meresap, dan tidak mengalir. Data hujan bisa didapatkan dari stasiun-stasiun hujan di sekitar lokasi daerah aliran sungai (DAS) atau didapatkan dari instansi-instansi yang mengelola data hujan (Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi, 2018).

Limpasan adalah air hujan yang mengalir dari tempat yang lebih tinggi ke tempat yang lebih rendah sebelum mencapai badan air. Air yang terlimpas dapat dihitung dengan menggunakan parameter waktu konsentrasi, intensitas curah hujan, koefisien air limpasan dan *catchment area* (Siahaan, dkk., 2017). Penentuan nilai koefisien limpasan dilakukan dengan memperkirakan kemiringan dan tata guna lahan tutupan sehingga didapat koefisien limpasan (Syarifuddin, dkk., 2017).

Koefisien limpasan (C) menampilkan perbandingan antara besaran aliran dan besarnya hujan. Nilai C umumnya berkisar antara 0-1. Air hujan infiltrasi sepenuhnya ke dalam tanah, secara matematis ditunjukkan dengan 0. Nilai $C = 1$ menunjukkan bahwa air hujan yang mengalir sebab aliran



permukaan. Nilai koefisien di masing-masing daerah dapat di lihat pada Tabel 1 (Madhatillah dan HAR, 2020).

Tabel 1. Nilai koefisien limpasan

Jenis Tutupan Lahan	C	Jenis Tutupan Lahan	C
Hutan	0,6	Pertahanan dan keamanan	0,7
Hutan bakau	0,6	Perumahan	0,95
Hutan rawa	0,65	Peternakan	0,35
Industri	0,8	Rawa	0,75
Padang rumput	0,6	Sarana olah raga	0,95
Pasir/Bukit pasir	0,7	Sarana pelayanan umum	0,95
Pemukaman umum	0,6	Sawah irigasi	0,56
Pelabuhan	0,95	Sawah tadah hujan	0,56
Perdagangan dan jasa	0,95	Semak belukar/Alang-alang	0,5
Pergudangan	0,8	Sungai	0,5
Perkantoran	0,95	Tambak	0,8
Perkebunan/Kebun	0,8	Tanah kosong/Gundul	0,7
Pertambangan	0,95	Tegalan/Ladang	0,6

Sumber: Madhatillah dan HAR (2020)

Evapotranspirasi merupakan proses penguapan atau hilangnya air dari tanah dan badan-badan air, serta tanaman ke atmosfer. Perubahan evapotranspirasi sangat dipengaruhi oleh iklim regional sehingga memegang peranan penting dalam perhitungan ketersediaan air tanah. Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk mengestimasi evapotranspirasi potensial, dimana data-data yang diperlukan adalah temperatur, kelembaban udara, lama penyinaran matahari dan kecepatan angin (Nurhayati dan Aminuddin, 2016; Mopangga, 2019).

Pembentukan air tanah berkaitan erat dengan siklus hidrologi. Siklus hidrologi mencakup proses hidrologi dan dikendalikan oleh radiasi matahari dan gravitasi (Yang, *et al.*, 2021). Gravitasi merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi pergerakan aliran air tanah. Gravitasi akan menarik air hujan untuk masuk ke dalam tanah menuju muka air tanah, kemudian merembes dan keluar sebagai aliran dasar (*base flow*) (Setianto, dkk., 2022).



Air tanah berasal dari air hujan yang mengalami infiltrasi dan perkolasi. Oleh karena itu, sebagian besar air tanah dapat ditemukan dekat dengan permukaan tanah atau jauh dari permukaan tanah. Pergerakan aliran air, baik itu dalam tanah, permukaan tanah, maupun udara, terjadi dalam siklus yang seimbang (Salsabila dan Nugraheni, 2020).

Proses infiltrasi terjadi melalui zona tidak jenuh ke permukaan air tanah, sering disebut juga sebagai pengisian ulang air tanah (*groundwater recharge*). Terdapat beberapa metode untuk mengestimasi imbuhan air tanah, salah satunya adalah *water-budget methods*. Metode ini menjelaskan hubungan antara proses pengisian ulang dan proses-proses lain dalam siklus hidrologi. Hubungan matematis dari siklus hidrologi menurut *water-budget methods* ditunjukkan pada Persamaan 1 (Healy, 2010).

$$P = \Delta S + ET + R_{\text{off}} + Q_{\text{pump}} \quad (1)$$

Dimana:

P = Presipitasi (m^3)

ΔS = perubahan penyimpanan air tanah (m^3)

ET = Evapotranspirasi (m^3)

R_{off} = *Run off* atau limpasan permukaan (m^3)

Q_{pump} = debit pemompaan (m^3)

2.2 Kebutuhan Air

Kebutuhan manusia akan air menjadi sangat penting apabila dikaitkan dengan empat hal, yaitu penambahan penduduk, kebutuhan pangan, peningkatan industrialisasi dan perlindungan ekosistem terhadap teknologi. Semua kegiatan kehidupan manusia memerlukan air dengan jumlah dan kualitas yang cukup sesuai dengan kebutuhannya. Kebutuhan air pada umumnya digunakan manusia untuk keperluan domestik (air minum, rumah tangga), *non-domestik* (pelayanan kantor, perdagangan, hidran dan lainnya), irigasi pertanian, peternakan, perikanan, kit tenaga listrik dan pariwisata (Susilo, dkk., 2017).



berdasarkan Standar Nasional Indonesia 6728.1:2015 tentang Penulisan pasial Sumber Daya Alam – Bagian 1: Sumber Daya Air, penggunaan air

untuk keperluan domestik diperhitungkan dari jumlah penduduk yang terdapat di daerah aliran sungai (DAS). Standar penggunaan air domestik dapat di lihat pada Tabel 2. Total kebutuhan air domestik yang diperlukan oleh suatu daerah secara sistematis ditunjukkan pada Persamaan 2.

$$Q \text{ (DMI)} = q_d \times p \quad (2)$$

Dimana:

$Q \text{ (DMI)}$ = Kebutuhan air domestik (L/hari)

q_d = Standar kebutuhan air domestik (L/jiwa/hari)

p = Jumlah penduduk (jiwa)

Tabel 2. Standar kebutuhan air domestik

Kategori Kota	Jumlah Penduduk (Jiwa)	Standar Kebutuhan Air (L/jiwa/hari)
Ibu kota kecamatan/desa	3000-20000	60-90
Kota kecil	20000-100000	90-110
Kota sedang	100000-500000	100-125
Kota besar	500000-1000000	120-150
Metropolitan	> 1000000	150-200

Sumber: Badan Standar Nasional (2015)

Perhitungan kebutuhan air rata-rata untuk peternakan tergantung pada populasi ternak dan jenis ternak. Standar kebutuhan air untuk peternakan ditunjukkan pada Tabel 3. Total kebutuhan air yang diperlukan untuk peternakan secara sistematis ditunjukkan pada Persamaan 3 (Badan Standarisasi Nasional, 2015).

$$Q \text{ (L)} = \Sigma(q_t \times p_t) \quad (3)$$

Dimana:

$Q \text{ (L)}$ = Kebutuhan air peternakan (L/hari)

q_t = Standar kebutuhan air peternakan (L/ekor/hari)

= Jumlah ternak (ekor)



Tabel 3. Standar kebutuhan air peternakan

Jenis Ternak	Standar Kebutuhan Air (L/ekor/hari)
Sapi/kerbau/kuda	40
Kambing/domba	5
Babi	6
Unggas	0,6

Sumber: Badan Standar Nasional (2015)

Kebutuhan air industri umumnya relatif konstan terhadap waktu. Peningkatan laju pertumbuhan industri berbanding lurus dengan kebutuhan air industri. Kebutuhan air industri dapat dikaitkan dengan ukuran besarnya industri tersebut, misalnya melalui banyaknya produk yang dihasilkan, atau banyaknya tenaga kerja. Oleh karena itu, perhitungan kebutuhan air industri dapat diperhitungkan berdasarkan atas jumlah karyawan, luas air industri dan jenis/tipe industri (Badan Standarisasi Nasional, 2015).

2.3 Pengelolaan Air Tanah

Pemanfaatan air tanah akan lebih baik jika mempertimbangkan seluruh akuifer atau unit hidrogeologi. Pengambilan air tanah lokal yang hanya terkonsentrasi pada wilayah yang sempit akan memengaruhi kinerja pemompaan sumur bor karena air tanah pada sistem akuifer yang diturap telah semuanya terambil. Neraca kesetimbangan air juga penting untuk diperhitungkan dalam pengambilan air tanah. Kesetimbangan antara volume abstraksi akuifer dengan jumlah imbuhan air tanah pada skala waktu tertentu akan mempertahankan upaya pemanfaatan air tanah yang berkelanjutan (Darwis, 2018).

Pemanfaatan sumberdaya air tanah yang direncanakan secara ilmiah harus menjadi tujuan utama dalam konsep pembangunan berkelanjutan di suatu wilayah secara keseluruhan. Jika eksploitasi melampaui tingkat yang tidak aman, maka kerusakan terhadap sistem akuifer dapat terjadi. Oleh karena itu, perhitungan sumberdaya air tanah dengan mengacu pada pengisian ulang dan gan, serta ketersediaan air tanah dalam penyimpanan menjadi penting (2018).



Berdasarkan Peraturan Daerah Kota Parepare No. 10 Tahun 2014 tentang Pengelolaan Air Tanah, pengelolaan air tanah perlu dilakukan untuk tercapainya keselarasan dan keseimbangan dalam pemanfaatan sumber daya air. Kegiatan ini dilakukan juga untuk menjamin terpenuhinya kebutuhan air di masa sekarang dan masa depan. Pengelolaan air tanah terdiri atas inventarisasi air tanah, penetapan zona konservasi air tanah, serta penulisan dan penetapan rencana pengelolaan air tanah.

Rencana pengelolaan air tanah memuat program konservasi, pendayagunaan dan pengendalian daya rusak air tanah. Konservasi air tanah dilaksanakan secara menyeluruh pada cekungan air tanah yang mencakup daerah imbuhan dan daerah lepasan air tanah, seperti yang diatur dalam Peraturan Daerah Kota Parepare No. 10 Tahun 2014 tentang Pengelolaan Air Tanah. Menurut Peraturan Walikota Parepare No. 63 Tahun 2020 tentang Pengelolaan Kawasan Resapan Air dan Kawasan Mata Air, konservasi kawasan resapan air dilakukan agar mendapat sebanyak mungkin cadangan pasokan air tanah. Beberapa kegiatan konservasi yang dapat dilakukan di kawasan resapan air sebagai berikut:

1. Pengembangan tutupan vegetasi pada kawasan resapan air dengan menentukan jenis vegetasi yang sesuai.
2. Pemeliharaan kondisi dan struktur fisik tanah agar tetap memiliki kapabilitas untuk menyerap dan menyimpan air.
3. Pembangunan sumur resapan atau embung.

Beberapa alternatif strategi manajemen air tanah berdasarkan pendekatan umum sebagai berikut (Alley, *et al.*, 1999):

1. Menggunakan sumber air, selain air tanah setempat

Alternatif ini dapat dilakukan dengan mengalihkan pemanfaatan air dari sumber air tanah ke air permukaan. Alternatif lain yang dapat dilakukan adalah dengan mengimpor air dari luar daerah aliran sungai.

2. Meningkatkan perubahan atau pola spasial pompa air tanah

Manajemen air tanah dapat dilakukan dengan peningkatan pemompaan yang

menghasilkan keseimbangan baru dari sistem air tanah. Strategi ini juga dapat dilakukan dengan penurunan pemompaan yang menghasilkan keseimbangan baru dari sistem air tanah. Perubahan dalam distribusi spasial pemompaan



digunakan untuk meminimalkan efek yang ada atau potensial yang tidak diinginkan.

3. Meningkatkan pengisian ulang ke sistem air tanah

Alternatif ini menggunakan pemompaan yang dirancang untuk menginduksi aliran masuk dari badan air permukaan. Pengisian ulang air permukaan atau air yang digunakan kembali berkualitas baik dengan penyebaran permukaan atau injeksi melalui sumur, juga dapat menjadi opsi untuk menjalankan strategi ini.

4. Mengubah volume air tanah dalam penyimpanan pada skala waktu yang berbeda

Jangka pendek yang dikelola (skala waktu bulan dan tahun) mempertimbangkan peningkatan dan penurunan penyimpanan di reservoir air tanah. Hal ini menunjukkan potensi reservoir air tanah dapat dikelola pada skala waktu yang sebanding dengan pengelolaan reservoir air permukaan. Penurunan jangka panjang yang berkelanjutan (skala waktu yang mungkin dekade dan abad) dalam penyimpanan air tanah. Penipisan penyimpanan akuifer yang lengkap atau hampir lengkap bukanlah strategi untuk keberlanjutan, tetapi pendekatan ekstrem yang dapat dipertimbangkan dalam beberapa situasi.

2.4 Model Sistem Dinamis

Secara umum sistem dinamik (SD) dapat digunakan sebagai kerangka kerja yang cocok untuk memasang dan menerjemahkan model yang ada ke dalam format sistem dinamik. Pendekatan ini adalah metode pemodelan untuk menganalisis sistem dinamik *non*-linier yang kompleks. Hal ini dilakukan dengan mengidentifikasi dan melibatkan variabel-variabel yang relevan untuk membentuk struktur model dan perilakunya (Abdolabadi, *et al.*, 2018).

Perilaku sistem harus dipahami dalam hubungan kausal yang akan membentuk struktur sistem. Model dinamika sistem yang dibuat terdiri dari model model dengan skenario. Model dasar dari dinamika sistem adalah sistem adi saat ini tanpa intervensi kebijakan yang dilaksanakan (Baskoro, dkk., nerapan sistem dinamika dalam pemodelan sistem yang kompleks menilai



bagaimana perilaku sistem berubah karena perubahan parameter dan interaksinya, dan memperhitungkan mekanisme umpan balik, penundaan, dan *non*-linieritas sistem. Faktor-faktor tersebut yang berkontribusi terhadap perilaku sistem, bukan pada kekuatan prediktifnya (Libey, *et al.*, 2022).

Skema pemodelan konvensional tidak dapat digunakan untuk mengkarakterisasi hubungan umpan balik yang dinamis antara aspek fisik neraca air dan pertumbuhan penduduk, perkembangan pertanian dan industri, atau penggunaan sumber daya lainnya. Fitur yang paling penting dari pemodelan sistem dinamis adalah penerapannya dalam menjelaskan interaksi di antara berbagai elemen dalam konteks pengambilan keputusan. SD mendasarkan hubungan antara struktur dan perilaku pada konsep umpan balik informasi dan kontrol (Huang, *et al.*, 2022).

Pemahaman tentang model sistem dinamik secara umum memiliki beberapa tahapan yaitu mendefinisikan masalah di lapangan, menentukan variabel signifikan terhadap sistem, menentukan persamaan matematika yang dapat menggambarkan perilaku sistem, dan menentukan jangka waktu simulasi. Penentuan variabel yang menggambarkan perilaku suatu sistem dapat dilakukan dengan menggunakan beberapa kriteria berikut (Baskoro, dkk., 2021):

1. Variabel-variabel ini penting dan secara signifikan memengaruhi perilaku sistem. Hal ini tergantung dari batasan yang dibuat oleh pemodel, faktor di luar sistem dianggap tidak penting dan tidak diperhitungkan dalam pembuatan model.
2. Variabel serupa harus digabungkan karena beberapa faktor akan menghindari kompleksitas yang tidak perlu.
3. Variabel harus didefinisikan dengan tepat.

Causal loop diagram (CLD) menggambarkan hubungan sebab-akibat di antara komponen-komponen sistem. Lingkaran sebab-akibat yang terhubung dengan elemen yang dipilih dibuat melalui operasi pemodelan. CLD adalah alat analisis utama yang digunakan untuk mengidentifikasi dan menggambarkan

variabel penting dan keterkaitannya. CLD memungkinkan peneliti akan pendekatan sistem untuk memahami berbagai skala dan perspektif masalah (Rajarethinam, *et al.*, 2021). Kekurangan dari CLD adalah tidak



mungkin untuk menggambarkan perilaku sistem dari waktu ke waktu secara kuantitatif. Oleh karena itu, analisis sistem kuantitatif dilakukan menggunakan *stock flow diagram* (SFD) (Naeem, *et al.*, 2024).

SFD adalah alat kuantitatif yang memodelkan dan menganalisis perilaku sistem dari waktu ke waktu. SFD mengukur sistem menggunakan konsep stok dan aliran. Stok mewakili akumulasi kuantitas dari waktu ke waktu, dan aliran mewakili arus masuk atau keluar jumlah ke dalam stok dari waktu ke waktu. Model SFD dikembangkan berdasarkan interaksi sistem sumber daya air dan sub sistem sosial ekonomi yang menunjukkan permintaan air. Hal ini dikarenakan, peningkatan pembangunan sosial ekonomi memengaruhi peningkatan permintaan air dari waktu ke waktu dan memberikan tekanan pada pasokan sumber daya air (Naeem, *et al.*, 2024).

Setelah melakukan simulasi pada model, perlu mengkalibrasi koefisien model untuk membangun kepercayaan pada kinerja model simulasi (Abdolabadi, *et al.*, 2018; Naeem, *et al.*, 2024). Kalibrasi dalam pemodelan dapat dilakukan menggunakan *mean absolute percentage error* (MAPE). Pengujian MAPE dapat digunakan untuk mendapatkan informasi tentang akurasi antara data asumsi dan data aktual, seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 4 (Sihotang, dkk., 2016).

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum \frac{|A_i - F_i|}{A_i} \times 100\% \quad (4)$$

Dimana:

A_i = Data aktual (m^3)
 F_i = Data prediksi (m^3)
 N = Jumlah data

2.5 Analisis Kebijakan Model Sistem Dinamis

Aspek penting dalam proses analisis kebijakan dengan menggunakan metode sistem dinamis adalah simulasi model. Simulasi model merupakan suatu peniruan perilaku sistem nyata sehingga proses analisisnya lebih cepat, bersifat menyeluruh, hemat, dan dapat dipertanggungjawabkan. Simulasi model untuk analisis kebijakan

menjadi pengembangan kebijakan alternatif dan analisis kebijakan alternatif (Sihotang, dkk., 2001).



Pengembangan kebijakan alternatif adalah suatu proses menciptakan ide-ide baru tentang tindakan yang diperlukan dalam rangka mempengaruhi sistem untuk mencapai tujuan. Pengembangan ide kebijakan baru dapat dilakukan dengan menyimulasikan model tetap atau model yang diubah. Model tetap yang diubah adalah parameter dari fungsi-fungsi dalam model dengan mengurutkan semua parameter dalam model dan sensitivitasnya. Parameter yang memiliki sensitivitas tinggi adalah jenis parameter yang dapat mencapai tujuan dalam periode waktu tertentu. Proses ini disebut pengembangan alternatif kebijakan fungsional (Muhammadi, dkk., 2001).

Berbeda dengan model tetap, alternatif yang kedua dilakukan dengan perubahan model sehingga menghasilkan beberapa model alternatif dengan parameter tertentu. Proses ini disebut pengembangan alternatif kebijakan struktural. Perubahan model dapat dilakukan dengan dua cara sebagai berikut (Muhammadi, dkk., 2001):

1. Perubahan unsur dan/atau mekanisme dalam model

Langkah ini berorientasi pada pemecahan masalah. Sumber-sumber mekanisme yang menjadi penyebab terjadi penyimpangan, *overshoot*, dan kolaps ditelusuri sehingga dipahami permasalahan yang terjadi pada struktur model. Selanjutnya terdapat beberapa opsi yang dapat dilakukan sebagai berikut:

- a. Memotong mekanisme permasalahan tersebut dengan cara menghilangkan variabel-variabel tertentu.
- b. Memintas mekanisme permasalahan tersebut, dengan cara merubah fungsi-fungsi *non*-linier tertentu.
- c. Menambah unsur baru dengan mekanisme baru, dengan cara menambah/menghilangkan variabel yang mempengaruhi unsur tertentu.

2. Perubahan struktur dasar dari model

Alternatif ini berorientasi pada penciptaan sistem yang bernilai lebih. Alternatif ini mengungkapkan sejauh mana kinerja sistem yang berlaku masih ok dengan lingkungan sistem. Struktur-struktur dasar yang menyusun em perlu diidentifikasi terdahulu, kemudian mengidentifikasi perubahan-ubahan yang telah terjadi dalam lingkungan sistem, dan mengembangkan



alternatif struktur model baru yang diinginkan dan layak kemudian simulasikan. Kemudian, lakukan analisis kebijakan perubahan struktur tersebut.

Analisis kebijakan pada dasarnya adalah menemukan langkah strategis untuk mempengaruhi sistem. Pemilihan langkah ini dikaitkan dengan prakiraan kecenderungan lingkungan sistem ke depan. Analisis kebijakan melalui simulasi model sistem dinamis berguna untuk mengurai dan memahami masalah dunia nyata yang mengandung kerumitan, perubahan cepat dan ketidakpastian. Intervensi model sistem dinamis baik secara fungsional maupun struktural memberikan informasi tentang pandangan antisipatif terhadap hasil dan dampak suatu kebijakan terhadap sistem skala besar dalam jangka panjang (Muhammadi, dkk., 2001).

