

BAB II

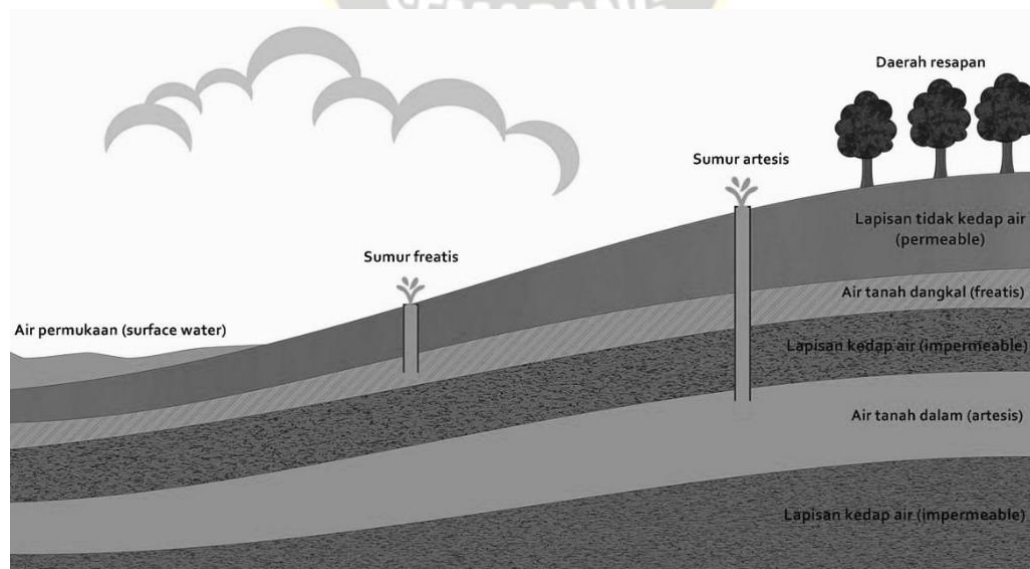
TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Air Tanah Dalam

Air tanah adalah air yang terdapat dalam lapisan tanah atau batuan di bawah permukaan tanah, berdasarkan Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 17 Tahun 2019 tentang Sumber Daya Air. Terdapat dua tipe air tanah yang berdasarkan asalnya, yaitu air tanah dangkal/freatik dan air tanah dalam/artesis.

Air tanah freatik (*phreatic groundwater*) merupakan air tanah yang dicirikan dengan elevasi muka air tanah bebas. Aliran air masuk dan keluar berdampak langsung pada elevasi muka air tanah dangkal mengakibatkan variasi yang besar.

Air tanah artesis (*artesian groundwater*) atau air tanah dalam merupakan air yang terdapat di lapisan akuifer dalam, yang biasanya terletak di bawah lapisan akuifer dangkal. Air ini terperangkap di antara lapisan batuan kedap air (impermeable) dan membutuhkan pengeboran sumur dalam untuk mengaksesnya. Sumber air tanah dalam umumnya berasal dari infiltrasi air hujan yang meresap melalui lapisan tanah dan batuan dalam waktu yang lama (Todd & Mays, 2005).

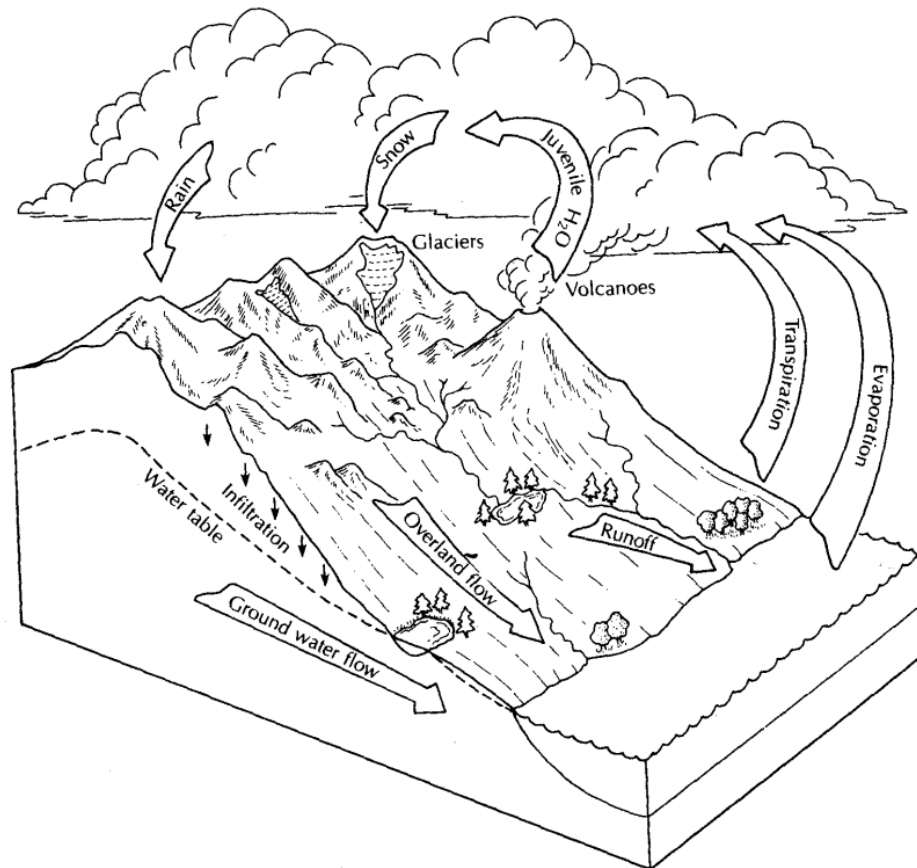


Gambar 2. 1. Skema lapisan air tanah (Puspita, Aprilia, Sunaryo, & Putro, 2022)

Ketersediaan air tanah dalam tidak terlepas dari siklus hidrologi aliran air permukaan dan aliran air tanah pada Gambar 2.1. Siklus hidrologi tersebut terdiri dari empat proses besar, yaitu (Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi, 2017):

1. **Presipitasi** adalah proses jatuhnya cairan dari atmosfer ke permukaan bumi, berupa air, es, maupun salju. Beberapa faktor yang mempengaruhi presipitasi adalah jumlah uap air di atmosfer, faktor meteorologi (suhu, kelembaban, dan pergerakan awan), sistem sirkulasi suatu tempat, dan morfologi alam (pegunungan, lembah, dsb).
2. **Evaporasi/evapotranspirasi** adalah proses berubahnya air menjadi uap yang bergerak di permukaan bumi ke atmosfer. Pada keadaan jenuh awan (kumpulan uap air) akan berkondensasi menjadi bintik-bintik air yang jatuh ke permukaan bumi dalam bentuk air, es, maupun salju.
3. **Infiltrasi/perkolasi** adalah proses meresapnya air di permukaan bumi ke dalam tanah. Air bergerak ke dalam tanah melalui celah dan pori di tanah dan bebatuan.
4. **Limpasan air permukaan** (*surface run off*) adalah proses adanya aliran pada permukaan tanah, contohnya sungai, danau, waduk, dan rawa. Air hujan yang jatuh ke permukaan tanah akan melewati jalurnya masing-masing. Larian permukaan bebas (*surface run off*), aliran antara (*interflow/subsurface run off*), dan aliran air tanah (*groundwater flow*).

SEKOLAH PASCASARJANA



Gambar 2. 2. Skema siklus hidrologi (Fetter, 2001)

Pada lapisan air tanah setelah terjadi infiltrasi, terdapat pergerakan air dalam kapiler tanah. Pergerakan air tanah ini terjadi secara vertikal dan horizontal. Semakin jenuh permukaan tanah akan air, maka kecepatan infiltrasi akan menurun (Bedient, Huber, & Vieux, 2013).

Proses pengisian ulang air tanah ke dalam akuifer disebut sebagai *recharge*. Dalam hidrogeologi, respons muka air tanah (*water table*) terhadap presipitasi (curah hujan) tidak terjadi secara instan, melainkan mengalami fenomena yang dikenal sebagai *time lag* atau keterlambatan waktu. Keterlambatan ini didefinisikan sebagai selang waktu antara puncak (*peak*) kejadian hujan dengan puncak respons kenaikan muka air tanah di sumur pantau. Lamanya *time lag* sangat dipengaruhi oleh karakteristik hidrogeologis setempat, seperti konduktivitas hidraulik dan porositas material pembentuk akuifer serta zona tak jenuh. Selain itu, faktor tutupan lahan, intensitas hujan, dan kondisi kelembaban awal zona tak jenuh juga turut

mempengaruhi besarnya *time lag* (Healy & Cook, 2002) (Lerner, Issar, & Simmers, 1990).

Sementara proses pengeluaran air tanah ke permukaan adalah *discharge*. Proses *discharge* secara alami adalah melalui mata air atau evaporasi, proses *discharge* secara buatan adalah dengan pembuatan sumur-sumur pengambilan air tanah (Fetter, 2001). Apabila kuantitas *discharge* lebih besar daripada *recharge* maka terjadi penurunan volume air tanah, yang dapat dilihat dari perubahan elevasi muka air tanah. Penurunan elevasi muka air tanah (muka air tanah tidak tertekan atau muka air tanah tertekan) dihitung dari kedudukan elevasi muka air tanah awal sebagai titik referensi (Hendrayana, 2012). Menurut Permen ESDM No 31 tahun 2018 tentang pedoman penetapan zona konservasi air tanah, berdasarkan penurunan elevasi muka air tanahnya, tingkat kerusakan air tanah dapat dibagi menjadi 4 (empat) tingkatan sebagai berikut:

- Aman : penurunan elevasi muka air tanah $< 40\%$
- Rawan : penurunan elevasi muka air tanah 40% hingga 60%
- Kritis : penurunan elevasi muka air tanah $> 60\%$ hingga 80%
- Rusak : penurunan elevasi muka air tanah $> 80\%$

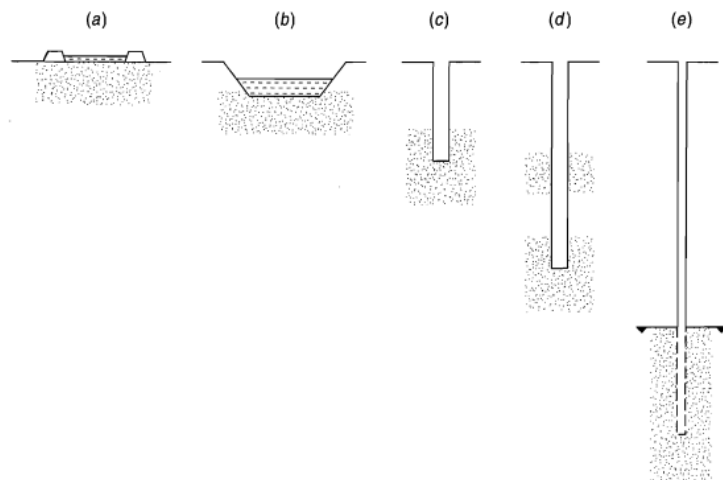
2.2. Pengisian Air Tanah

Pengisian air tanah merupakan proses di mana air dari presipitasi (hujan/salju), air permukaan, dan sumber air lain menginfiltrasi tanah dan mengisi akuifer. Usaha-usaha untuk meningkatkan pengisian air tanah dapat dilakukan secara alami dan buatan (Saha, Villholth, & Shamrukh, 2024). Pengisian air tanah secara alami terjadi lewat infiltrasi air hujan/salju/permukaan ke tanah dan akuifer. Pengisian secara alami bergantung pada permeabilitas tanah, tutupan vegetasi, dan kondisi iklim. Upaya peningkatan pengisian air tanah secara alami dapat dilakukan dengan meningkatkan luas lahan terbuka hijau dan tutupan vegetasi.

Peraturan mengenai ruang terbuka di Indonesia telah diatur dalam Undang-Undang Nomor 26 Tahun 2007 tentang Penataan Ruang dan Peraturan Pemerintah Pengganti Undang-Undang (PERPPU) Nomor 2 Tahun 2022 tentang Cipta Kerja yang telah ditetapkan dengan Undang-Undang No. 6 Tahun 2023 tentang Penetapan

PERPPU Nomor 2 Tahun 2022 tentang Cipta Kerja menjadi Undang-Undang. Berdasarkan peraturan, disebutkan bahwa ruang terbuka hijau terdiri dari ruang terbuka hijau publik dan privat. Proporsi ruang terbuka hijau pada wilayah kota adalah paling sedikit sebanyak 30 (tiga puluh) persen dari luas wilayah kota, dengan proporsi ruang terbuka hijau publik sebesar 20 (dua puluh) persen dari luas wilayah kota. Pada Undang-Undang Nomor 26 Tahun 2007 pasal 29 ayat 1 dijelaskan bahwa ruang terbuka hijau publik merupakan ruang terbuka hijau yang dimiliki dan dikelola oleh pemerintah daerah kota yang digunakan untuk kepentingan masyarakat secara umum, antara lain; taman kota, taman pemakaman umum, dan jalur hijau sepanjang jalan, sungai, dan pantai. Sementara yang termasuk ruang terbuka hijau privat adalah kebun atau halaman rumah/gedung milik masyarakat/swasta yang ditanami tumbuhan.

Pengisian air tanah secara buatan (*artificial recharge*) didefinisikan sebagai penambahan pergerakan air di permukaan ke dalam formasi bawah tanah dengan metode pembangunan, penyebaran air, dan secara buatan mengubah kondisi alam (Todd & Mays, 2005). Sistem pengisian air tanah buatan dapat dibagi berdasarkan kedalaman pengisian air tanah yang dikehendaki seperti pada Gambar 2.3. Metode daerah aliran air buatan/cekungan (*basin*), yaitu dengan menyediakan area khusus air permukaan untuk menyebar (*water spreading*) dan menginfiltrasi tanah, contohnya di tanggul resapan (*dikes*), tanggul resapan/penahan air (*levees*), atau galian ekskavasi lain (*excavation*). Metode ini banyak digunakan karena secara umum mampu dilakukan; pembuatan yang murah dan perawatan yang mudah. Kelemahan dari metode ini adalah laju pengisian air yang cukup lama dan penggunaan lahan yang luas. Pola galian dapat dilakukan di dekat sungai atau danau alami (*stream-channel*) atau saluran galian/galian (*ditch-furrow/trench*). Metode ini dilakukan dengan membanjiri (*flooding*) area galian, pembuatan cekungan dilakukan untuk menghalangi air permukaan mengalir ke tempat lain.



Gambar 2. 3. Sistem pengisian air tanah buatan; *surface basin* (a), *excavated basin* (b), *trench*(c), *shaft or vadose zone well* (d), dan *aquifer well*(e) (Todd & Mays, 2005)

Metode pengisian air tanah buatan selain metode cekungan adalah metode sumur resapan galian. Sumur resapan galian (*recharge well*) didefinisikan sebagai sumur yang mengalirkan air permukaan menuju akuifer air tawar (Todd & Mays, 2005). Pengisian air menggunakan sumur resapan dilakukan pada zona tidak jenuh air (*vadose zone well*) atau akuifer tertahan dalam (*confined aquifer*) yang membutuhkan pengisian, atau wilayah dengan nilai ekonomi tinggi seperti kawasan perkotaan (*area urban*) (Gdoura, 2024).

Urbanisasi mengakibatkan terjadinya perubahan permukaan tanah, dari lahan terbuka menjadi lahan terbangun. Lahan terbangun yang makin meluas menyebabkan penurunan jumlah pengisian air tanah (Salem, Abduljaleel, Dezso, & Loczy, 2023). Oleh karena itu, untuk meningkatkan debit air tanah diperlukan tindakan pengisian air buatan. Peta sebaran sumur resapan di Lereng Gunung Merbabu yang termasuk wilayah Magelang, Boyolali, dan Semarang memperlihatkan ada lebih 1.000 unit sumur resapan (PDAM Kota Semarang, 2020). Kabag Teknik PDAM Kota Salatiga menyatakan bahwa dalam kurun tiga tahun terdapat peningkatan debit air tanah mata air Senjoyo di Salatiga dari 800 liter/detik menjadi 1.100 liter/detik.

Kota Semarang tidak memiliki peraturan khusus mengenai sumur resapan, namun terdapat Peraturan Wali Kota Semarang Nomor 23 Tahun 2023 tentang

Zonasi Bebas Air Tanah. Peraturan tersebut bertujuan untuk mengendalikan pengambilan air tanah dan mencegah penurunan elevasi muka air tanah dengan penetapan zona perlindungan dan pemanfaatan. Apabila terjadi pelanggaran zona, maka akan dikenakan sanksi berupa teguran lisan, teguran tertulis, dan penutupan sementara.

2.3. Penggunaan Air Tanah

Kota Semarang memiliki variasi ketinggian daratan yang besar yaitu dalam rentang ketinggian 0 hingga 500 meter di atas permukaan laut, dari dataran rendah di wilayah utara (kawasan bawah) hingga perbukitan di selatan (kawasan atas) (Aditiya & Ito, 2023). Perbedaan kondisi lingkungan ini berdampak pada distribusi air bersih perpipaan. Kota Semarang memiliki perusahaan daerah yang mengelola air bersih perpipaan yaitu Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) Tirta Moedal Kota Semarang.

Pada tahun 2015, total pemakaian air bersih perpipaan pada cabang barat PDAM Tirta Moedal Kota Semarang adalah 2,5 juta m³ per tahun untuk 9.152 pelanggan atau 45.760 penduduk. Sementara kebutuhan total untuk cabang barat adalah 12,4 juta m³ per tahun untuk 446.274 penduduk (Awan, Samudro, & Nugraha, 2015). Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa kekurangan air sebesar 9,9 juta m³ per tahun dipenuhi dari sumber air selain air perpipaan.

Pada tahun 2023, cakupan pelayanan air bersih perpipaan Kota Semarang mencapai 60% dengan 181.549 pelanggan (PDAM Kota Semarang, 2023). Sementara pada tahun 2023 jumlah penduduk Kota Semarang adalah 1,69 juta jiwa (Badan Pusat Statistik Kota Semarang, 2024). Apabila kebutuhan air bersih adalah 54,5 m³ per jiwa tiap tahunnya, maka untuk 1,69 juta jiwa kebutuhan air bersih diperkirakan sebesar 91 juta m³ per tahun. Kesenjangan antara kebutuhan air dan pelayanan perpipaan ini mengakibatkan banyak masyarakat memanfaatkan air tanah. Jika 80% kebutuhan air bersih dipenuhi dari air tanah maka jumlah air tanah yang dieksploitasi pada tahun 2023 adalah 73 juta m³.

Pengelolaan air bersih di Kota Semarang dibagi dalam dua sistem; sistem perpipaan yang dikelola PDAM dan sistem yang dikelola secara mandiri oleh

masyarakat (Alihar, 2018). Sistem yang dikelola secara mandiri oleh masyarakat biasanya menggunakan air bersih dari mata air atau air tanah. Dalam menjaga elevasi muka air tanah diperlukan penggunaan dan penggunaan kembali (*reuse*) air. Penggunaan air tanah yang salah dapat mengakibatkan masuknya zat pencemar pada air tanah, sehingga mengurangi kuantitas air tanah yang dapat digunakan/bersih.

Dalam meminimalkan penggunaan air tanah dapat dilakukan penggantian sumber air bersih dengan air hujan, melalui pemanenan air hujan (*rainwater harvesting*) (Kahinda, 2007). Pemanenan air hujan yang dikumpulkan dari atap-atap masyarakat dapat dialirkan dan difilter sebelum disimpan pada tangki bawah tanah (Srivastava, Shukla, & Jemni, 2023).

2.4. Jenis Penggunaan Lahan

Keputusan Menteri Permukiman dan Prasarana Wilayah No 327 Tahun 2002 tentang Penetapan Enam Pedoman Bidang Penataan Ruang menyatakan bahwa analisis penggunaan lahan dilakukan untuk mengetahui pola penguasaan, penggunaan, dan kesesuaian pemanfaatan lahan untuk kegiatan budidaya dan lindung. Distribusi spasial penggunaan lahan seperti permukiman, industri, dan pertanian memiliki pengaruh signifikan terhadap variasi elevasi muka air tanah dalam. Berikut beberapa jenis penggunaan lahan dan proses *discharge-recharge* yang terjadi pada jenis penggunaan lahan tersebut (Kafri & Yechieli, 2010).

Berdasarkan Keputusan Menteri Permukiman dan Prasarana Wilayah No 327 Tahun 2002 tentang Penetapan Enam Pedoman Bidang Penataan Ruang, kawasan didefinisikan sebagai wilayah dengan fungsi utama lindung atau budidaya. Kawasan lindung adalah kawasan yang ditetapkan dengan fungsi utama melindungi kelestarian lingkungan hidup yang mencakup sumber daya alam dan sumber daya buatan. Sementara kawasan budidaya merupakan kawasan yang ditetapkan dengan fungsi utama untuk dibudidayakan atas dasar kondisi dan potensi sumber daya alam, sumber daya manusia, dan sumber daya buatan.

Kawasan lindung terdiri dari 6 (enam) jenis kawasan, yaitu:

- a. Kawasan yang memberikan perlindungan kawasan bawahnya, yang terdiri dari kawasan hutan lindung, kawasan bergambut, dan kawasan konservasi dan resapan air.
- b. Kawasan perlindungan setempat, yang terdiri dari sempadan pantai, sempadan sungai, kawasan sekitar danau/waduk, kawasan sekitar mata air, dan kawasan terbuka hijau.
- c. Kawasan suaka alam terdiri dari cagar alam dan suaka margasatwa.
- d. Kawasan pelestarian alam terdiri dari taman nasional, taman hutan raya, taman wisata alam, dan kawasan cagar budaya.
- e. Kawasan rencana bencana alam terdiri dari kawasan rawan letusan gunung api, kawasan rawan gempa bumi, kawasan rawan tanah longsor, dan kawasan rawan gelombang pasang dan banjir.
- f. Kawasan lindung lainnya yang terdiri dari taman buru, cagar biosfer, kawasan perlindungan plasma nutfah, kawasan pengungsian satwa, dan kawasan pantai berhutan bakau.

Kawasan budidaya terdiri dari 7 (tujuh) kawasan, yaitu:

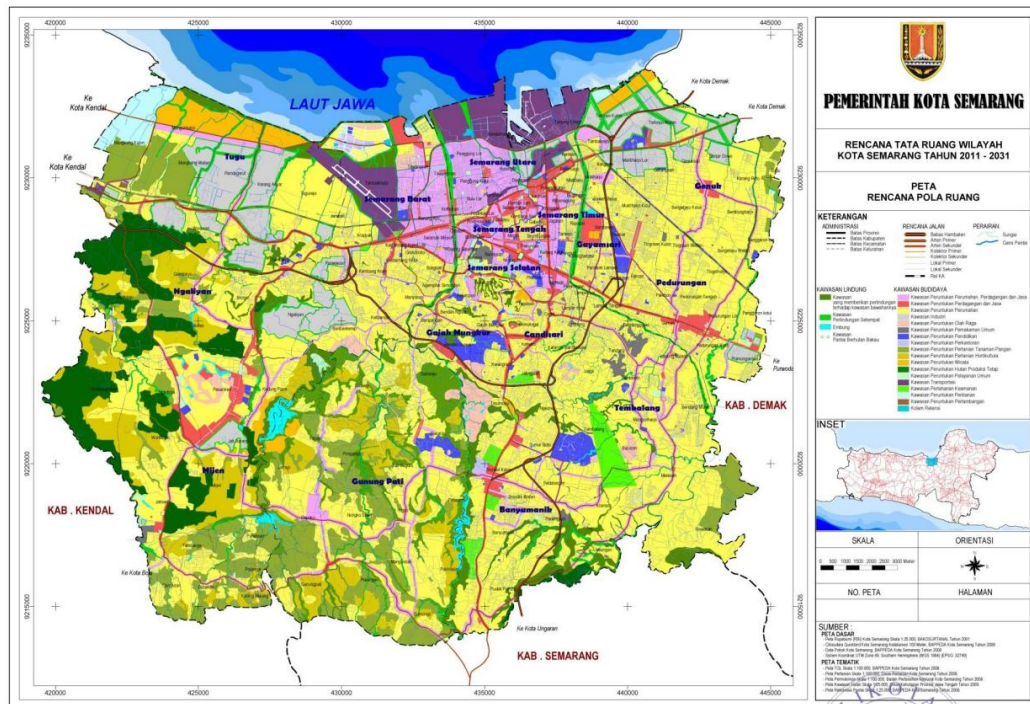
- a. Kawasan hutan produksi terdiri dari kawasan hutan produksi terbatas, kawasan hutan produksi tetap, kawasan hutan yang dapat dikonversi, dan kawasan hutan rakyat.
- b. Kawasan pertanian yang terdiri dari kawasan pertanian lahan basah, kawasan pertanian lahan kering, kawasan tanaman tahunan/Perkebunan, kawasan peternakan, dan kawasan perikanan.
- c. Kawasan pertambangan yang terdiri dari golongan bahan galian strategis, golongan bahan galian vital, dan golongan bahan galian yang tidak termasuk kedua golongan sebelumnya.
- d. Kawasan peruntukan industri
- e. Kawasan pariwisata
- f. Kawasan pemukiman
- g. Kawasan konservasi budaya dan sejarah (artefak/bangunan bersejarah)

Penggunaan lahan tidak terlepas dari rencana tata ruang. Rencana tata ruang merupakan suatu dokumen perencanaan yang mengatur pemanfaatan ruang dalam suatu wilayah, baik itu tingkat nasional, regional, maupun lokal. Rencana tata ruang bertujuan untuk menciptakan keteraturan, keseimbangan, dan keberlanjutan dalam penggunaan ruang, sehingga dapat mendukung pembangunan yang berwawasan lingkungan (Levy, 2017). Beberapa jenis tata ruang yaitu:

1. Rencana Tata Ruang Wilayah Nasional (RTRWN) mengatur pola dan struktur ruang secara nasional.
2. Rencana Tata Ruang Wilayah Provinsi (RTRWP) sebagai penjabaran dari RTRWN yang disesuaikan dengan kondisi dan kebutuhan provinsi.
3. Rencana Tata Ruang Wilayah Kabupaten/Kota (RTRWK) mengatur pemanfaatan ruang di tingkat kabupaten atau kota.
4. Rencana Detail Tata Ruang (RDTR) merupakan penjabaran lebih rinci dari RTRWK, mencakup kawasan tertentu dalam wilayah kabupaten/kota.

UU No. 26 Tahun 2007 tentang Penataan Ruang pasal 14 dan 15 menyebutkan bahwa masa berlaku rencana tata ruang adalah 20 tahun, dengan masa peninjauan kembali yang dilakukan setiap 5 tahun sekali untuk menyesuaikan dengan perubahan kondisi dan kebutuhan pembangunan. Permen Agraria/Kepala BPN No. 10 Tahun 2021 tentang Pedoman Penyusunan, Peninjauan Kembali, dan Revisi Tata Ruang menyebutkan bahwa revisi rencana tata ruang dapat dilakukan sebelum masa berlaku berakhir apabila terjadi perubahan mendasar. Contoh perubahan mendasar adalah perubahan kebijakan nasional/regional, bencana alam yang mengakibatkan perubahan kondisi wilayah, dan perkembangan teknologi atau dinamika sosial yang signifikan.

Rencana Tata Ruang Wilayah Kota Semarang diatur dalam Peraturan Daerah Nomor 14 Tahun 2011 tentang Rencana Tata Ruang Wilayah Kota Semarang Tahun 2011 – 2031, yang ditampilkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4. Peta Rencana Tata Ruang Wilayah Kota Semarang Tahun 2011-2031

Jenis guna lahan memiliki tutupan permukaan yang berbeda-beda, hal ini mempengaruhi tingkat limpasan yang dihasilkan (Salem, Abduljaleel, Dezso, & Loczy, 2023). Salah satu indikator untuk menentukan jumlah limpasan air permukaan adalah dengan koefisien limpasan (*run off coefficient*). Koefisien limpasan (C) adalah perbandingan jumlah volume air yang menjadi limpasan saat hujan terhadap volume presipitasi total dalam periode tertentu (Bedient, Huber, & Vieux, 2013).

SEKOLAH PASCASARJANA

Tabel 2. 1. Koefisien limpasan (*run off coefficient*) untuk tiap jenis guna lahan
(Hardjosuprpto, 1998) (Suripin, 2004)

No	Jenis Guna Lahan	Koefisien Limpasan (C)
1.	Bisnis • Perkotaan • Pinggiran	0,70 – 0,95 0,50 – 0,70
2.	Perumahan • Rumah tunggal • Multiunit terpisah • Multiunit tergabung • Perkampungan • Apartemen	0,30 – 0,50 0,40 – 0,60 0,60 – 0,75 0,25 – 0,40 0,50 – 0,70
3.	Industri • Ringan • Berat	0,50 – 0,80 0,60 – 0,90
4.	Perkerasan • Aspal dan beton • Batu bata, paving	0,70 – 0,95 0,50 – 0,70
5.	Halaman, tanah berpasir • Datar, <2% • Rata-rata, 2 – 7% • Curam, >7%	0,05 – 0,10 0,10 – 0,15 0,15 – 0,20
6.	Halaman tanah berat • Datar, <2% • Rata-rata, 2 – 7% • Curam, >7%	0,13 – 0,17 0,18 – 0,22 0,25 – 0,35
7.	Hutan • Datar, <5% • Bergelombang, 5 – 10% • Berbukit, 10 – 30%	0,10 – 0,40 0,25 – 0,50 0,30 – 0,60

Nilai koefisien limpasan berguna untuk memahami pengaruh karakteristik permukaan terhadap respons hidrologi saat hujan. Nilai koefisien limpasan dipengaruhi intensitas air hujan, kepadatan tanah, vegetasi, jenis tanah, dan kemiringan tanah (Machado, Cardoso, & Mortene, 2022). Nilai koefisien limpasan

terhadap jenis guna lahan dapat dilihat pada Tabel 2.1. Nilai koefisien limpasan yang tinggi menunjukkan bahwa semakin banyak volume hujan menjadi limpasan air permukaan. Koefisien limpasan pada lahan terbangun lebih tinggi daripada lahan terbuka. Permukaan yang kedap air (*impermeable*) di area perkotaan seperti jalan, bangunan, dan trotoar mengurangi kemampuan air hujan untuk menginfiltrasi permukaan tanah (Kiflay, Schirmer, Foppen, & Moeck, 2025).

2.5. Pengamatan Lapangan

Pengamatan lapangan memegang peranan penting dalam mengkuantifikasi data kualitatif dan memvalidasi data yang didapatkan secara sekunder. Pengamatan lapangan dapat dilakukan dengan berbagai metode; pendekatan fisik-hidrogeologi, dan pengamatan sosial-perilaku. Pendekatan fisik-hidrogeologi adalah pengamatan yang bertujuan untuk mengukur keadaan fisik-dalam hal ini hidrogeologi suatu lingkungan. Sementara pengamatan sosial-perilaku adalah pengamatan yang mendokumentasikan aksi dan perilaku masyarakat dalam suatu lingkungan.

Pendekatan fisik-hidrogeologi dilakukan dengan pemantauan elevasi muka air tanah, pemantauan kualitas dan kuantitas air limbah domestik, dan pemetaan infrastruktur konservasi. Pemantauan elevasi muka air tanah merupakan pengukuran berkala di sumur pantau domestik dan sumur produksi milik masyarakat (Hutabarat, 2017). Pemantauan kualitas dan kuantitas air limbah domestik adalah pengamatan terhadap volume dan kualitas *greywater* (air bekas cucian dan mandi) yang digunakan kembali dapat menunjukkan kontribusi praktis masyarakat dalam mengurangi penggunaan air tanah (Winarni, Kusumadewi, Ratnaningsih, Hadisoebroto, & Wijayanti, 2020). Pemetaan infrastruktur konservasi adalah pendokumentasian dan pengukuran jumlah, jenis, dan sebaran infrastruktur buatan masyarakat seperti; sumur resapan, biopori, dan lubang injeksi (Sasongko, 2023).

Pengamatan sosial-perilaku dilakukan dengan observasi partisipatif, survei pemanfaatan lahan dan air berbasis rumah tangga, dan dokumentasi aktivitas komunitas. Observasi partisipatif adalah hadirnya peneliti di dalam komunitas untuk mengamati secara langsung praktik harian, seperti efisiensi penggunaan air,

adopsi teknologi hemat air, dan partisipasi dalam kerja bakti pembuatan biopori (Notario, Suprata, Canti, & Karmawan, 2021). Survei pemanfaatan lahan dan air berbasis rumah tangga adalah pengamatan terhadap pola tanam di perkotaan dari tanaman yang boros air menjadi yang lebih hemat air, atau dari tanaman dengan akar serabut menjadi akar tunggang, hal ini dapat menunjukkan perubahan perilaku secara kolektif (Irwan, Handayani, & Ilmiah, 2023). Dokumentasi aktivitas komunitas adalah dengan mencatat frekuensi dan partisipasi masyarakat dalam kegiatan seperti penyuluhan, pelatihan, dan aksi penghijauan yang diselenggarakan oleh kelompok masyarakat atau LSM lokal, hal ini memberikan indikator tingkat kesadaran dan mobilisasi sosial (Velinsca & Herman, 2025).

2.6. Pemodelan Elevasi Muka Air Tanah

Pemodelan elevasi muka air tanah semakin banyak memanfaatkan pendekatan *machine learning*, dengan berbagai algoritma yang telah diterapkan. Salah satu algoritma yang menonjol adalah *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS) yang secara konsisten menunjukkan kinerja unggul dalam berbagai studi komparatif. Kemampuan ANFIS dalam mengintegrasikan logika fuzzy dengan kemampuan pembelajaran *neural network* menjadikannya alat yang efektif untuk memodelkan hubungan non-linier yang kompleks dalam sistem air tanah.

ANFIS telah terbukti unggul dibandingkan berbagai algoritma *machine learning* lainnya. Pada penelitian di Daerah Aliran Sungai Pravara, India, ANFIS menghasilkan nilai R rata-rata yang lebih tinggi dan RMSE yang lebih rendah dibandingkan *Artificial Neural Networks* (ANN). Keunggulan serupa ditunjukkan dalam penelitian di Bangladesh, dimana ANFIS dengan optimasi *Improved Alpha-Grey Wolf Optimization* (IA-GWO) mencapai RMSE 0,11 dan KGE 0,98, mengungguli semua varian ANN (Navale & Mhaske, 2023) (Cui, et al., 2023). Penelitian di Dataran Ardebil, Iran juga menunjukkan bahwa secara umum ANFIS lebih unggul dari ANN dan SVM (Seifi, Ehteram, Singh, & Mosavi, 2020).

Kinerja ANFIS tetap konsisten di berbagai jenis akuifer dan kondisi hidrogeologi. Studi di Akuifer Qazvin, Iran menempatkan ANFIS sebagai model terbaik kedua setelah LSSVM dengan nilai R^2 0,90 dan RMSE 0,56. Sementara di

Akuifer Dehgolan, ANFIS konsisten menjadi model terbaik di semua titik pengamatan dengan nilai R^2 minimal 0,97. Penelitian di Dataran Ardebil juga mengonfirmasi keunggulan ANFIS dibandingkan ANN dan Support Vector Machine (SVM) dalam memprediksi elevasi muka air tanah (Samani, Vadiati, Azizi, Zamani, & Kisi, 2022) (Kayhomayoon, et al., 2022).

Fleksibilitas ANFIS dalam mengolah berbagai variabel input menjadi salah satu faktor keunggulannya. Algoritma ini mampu mengintegrasikan berbagai parameter seperti elevasi muka air tanah periode sebelumnya, curah hujan, temperatur, evapotranspirasi, dan penggunaan irigasi. Kemampuan ini membuat ANFIS dapat diadaptasi untuk berbagai kondisi geografis dan iklim, dari daerah aliran sungai di India hingga lahan gambut tropis di Kalimantan Barat, dimana analisis SHAP menunjukkan presipitasi sebagai variabel paling penting dalam pemodelan (Yonekura, et al., 2025). Kemampuan ANFIS yang adaptif juga memungkinkan peneliti untuk menggunakan algoritma tidak hanya memprediksi di waktu ke depan, tetapi juga memprediksi lokasi yang tidak dilakukan pengambilan data (Abdi, Ali, Santos, Olusola, & Ghorbani, 2024).

Berdasarkan berbagai penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa ANFIS merupakan salah satu algoritma *machine learning* yang paling handal untuk pemodelan elevasi muka air tanah. Konsistensi kinerja ANFIS lebih tinggi dibandingkan algoritma lain. Kemampuan adaptasinya yang baik terhadap berbagai kondisi akuifer, dan fleksibilitasnya dalam mengolah variabel input yang beragam menjadikan ANFIS sebagai pilihan yang tepat untuk mendukung perencanaan dan pengelolaan sumber daya air tanah yang berkelanjutan.

Salah satu tantangan kritis muncul dalam pemodelan adalah ketika titik pengukuran curah hujan dan sumur pantau air tanah memiliki lokasi yang berbeda atau berjauhan. Kondisi ini dapat menyebabkan kesalahan representasi proses imbuhan (*recharge*). Kesalahan representasi ini secara signifikan mempengaruhi perhitungan *time lag* yang diperoleh dari model (Beyene, Zimale, & Gebrekristos, 2024)(Shimodaira, Sugiyama, Storkey, Gretton, & David, 2009).

2.7. Prapengolahan Data

Prapengolahan data merupakan langkah penting dalam *machine learning* yang bertujuan untuk mempersiapkan data mentah menjadi format yang sesuai dalam model *machine learning* (Jafari, 2022). Proses ini melibatkan berbagai teknik dalam membersihkan, mengubah, dan mengorganisir data agar model dapat belajar dengan lebih efektif. Salah satu metode prapengolahan data adalah metode agregasi data.

Metode agregasi data adalah proses penyederhanaan data yang mentah menggunakan perhitungan statistik. Tujuan agregasi data adalah untuk menyederhanakan data dan mengurangi gangguan (*noise*). Hal tersebut mempermudah analisis, terutama dalam jangka waktu yang panjang (Hyndman & Athanasopoulos, 2021).

$$\text{Kumulatif Bulanan} = \sum \text{Data Harian dalam Satu Bulan} \quad (2.1)$$

$$\text{Rata – Rata Bulanan} = \frac{\sum \text{Data Harian dalam Satu Bulan}}{\text{Jumlah Hari dalam Bulan}} \quad (2.2)$$

Sebagian besar algoritma *machine learning* tidak dapat bekerja dengan dataset yang tidak lengkap, sehingga memerlukan pengolahan data yang hilang yaitu mengisi data yang tidak lengkap atau imputasi (Memon, Wamala, & Kabano, 2023). Data hilang merupakan sesuatu yang wajar dalam penelitian kuantitatif, dalam menangani hal ini maka dilakukan beberapa metode *ad-hoc*. Contoh metode *ad-hoc* adalah hanya menggunakan catatan yang lengkap dalam analisis dan membuang data dengan nilai hilang. Metode-metode tersebut dapat menyebabkan kehilangan data yang signifikan, kesalahan standar yang tinggi, dan kesimpulan yang salah dalam analisis. Terdapat tiga jenis data hilang, yaitu:

- MCAR (*Missing Completely at Random*)

MCAR adalah keadaan data hilang dalam variabel tidak sistematis, probabilitas hilang data tidak berhubungan dengan variabel lain dan tidak berhubungan dengan variabel yang hilang datanya sendiri. Contohnya data hilang akibat respon survei yang hilang saat dipaketkan.

- MAR (*Missing at Random*)

MAR adalah keadaan saat probabilitas data hilang dalam variabel berhubungan dengan variabel terukur lain, tapi tidak berhubungan dengan variabel yang mengalami kehilangan data. Contohnya saat data hilang akibat kebanyakan pria tidak merespon survei tentang depresi (data hilang berkaitan dengan jenis kelamin tetapi tidak pada tingkat depresi).

- MNAR (*Missing Not at Random*)

MNAR adalah keadaan saat data hilang berhubungan dengan variabel yang kehilangan data. Contohnya data hilang akibat responden dengan tingkat depresi tinggi tidak mampu mengisi survei.

Data hilang juga dapat diklasifikasikan sebagai tiga jenis berdasarkan panjang data yang hilang, yaitu data hilang terisolasi, data hilang jangka pendek, dan data hilang jangka panjang (Song, et al., 2025). Nilai hilang terisolasi adalah nilai indikator terpantau yang hilang, tetapi nilai indikator lainnya tetap ada. Data hilang jangka pendek adalah nilai indikator terpantau yang hilang secara terus menerus dalam jangka waktu yang pendek. Terakhir, data hilang jangka panjang adalah nilai indikator terpantau yang hilang secara terus menerus dalam jangka panjang, yang secara signifikan mengganggu keberlangsungan deret waktu. Data hilang terjadi karena faktor alami seperti kegagalan sensor, gangguan sinyal transmisi, dan kegagalan pengunggahan data. Selain faktor alami, data hilang juga dapat terjadi karena faktor manusia seperti data tidak valid dan data abnormal yang terhapus.

Pemodelan *machine learning* tidak dapat dijalankan apabila data yang digunakan untuk melatih model masih memiliki data hilang. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengisian data hilang tersebut. Pengisian data hilang perlu dilakukan dengan memikirkan bentuk data secara keseluruhan. Pola data elevasi muka air tanah dalam adalah bergerak sesuai musim (*seasonal*).

Terdapat banyak metode imputasi data deret waktu yaitu dengan nilai rata-rata (*mean*) atau nilai median. Namun walaupun hal tersebut sederhana dan mudah untuk dilakukan tetapi terdapat kelemahan. Penggunaan nilai rata-rata atau median

mengubah karakter statistik data (nilai rata-rata dan variasi) secara buatan. Ketidaksesuaian ini menciptakan divergensi antara distribusi empiris data dengan distribusi teoritis yang diharapkan dapat dimodelkan, menghasilkan penurunan presisi. Selain itu metode tersebut juga dapat memasukkan untuk diskontinuitas pada data deret waktu, yang tidak natural dan dapat mengganggu korelasi antar fitur (Gama, et al., 2025).

Salah satu metode imputasi adalah *Last Observation Carried Forward* (LOCF), yaitu metode yang digunakan untuk menggantikan nilai yang hilang dengan nilai terakhir yang tersedia sebelum titik yang hilang tersebut. Sementara untuk imputasi data deret waktu musiman dapat digunakan (Little & Rubin, 2019) LOCF Periodik, yaitu yang menggantikan nilai hilang pada bulan tertentu dengan nilai pada tahun terdekat di bulan tersebut (Enders, 2022). Keunggulan metode LOCF adalah sederhana dan mudah diimplementasikan, metode ini juga mampu mempertahankan tren jangka pendek. Kelemahan metode ini adalah adanya bias apabila terdapat tren penurunan/kenaikan, tidak cocok untuk data yang sangat fluktuatif, dan mengabaikan perubahan yang dapat mengubah pola data.

Metode normalisasi Min-Max adalah salah satu teknik normalisasi data yang digunakan untuk mengubah nilai-nilai data ke dalam rentang tertentu, biasanya antara 0 dan 1 (Geron, 2019). Teknik ini berguna untuk menyamakan skala data sehingga semua fitur memiliki kontribusi yang seimbang dalam analisis. Persamaan normalisasi Min-Max ada pada (2.4).

$$X_{normalisasi} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (2.4)$$

$X_{normalisasi}$ adalah nilai setelah dinormalisasi, x adalah nilai data sebelum dinormalisasi, x_{min} adalah nilai terkecil dalam populasi data, dan x_{max} adalah nilai terbesar dalam populasi.

2.8. Regresi Linear

Regresi linear adalah metode statistik yang digunakan untuk memodelkan hubungan antara satu variabel dependen (respons) dengan satu atau lebih variabel

independen (prediktor). Model ini bertujuan untuk menemukan persamaan linear yang paling sesuai dengan data, sehingga dapat memprediksi nilai variabel dependen berdasarkan nilai variabel independen (Montgomery, Peck, & Vining, 2021). Dalam konteks uji signifikansi variabel, regresi linear digunakan untuk menentukan apakah variabel independen secara statistik memiliki pengaruh yang signifikan terhadap variabel dependen (Field, *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics 5th Ed*, 2018).

$$Y = a + bX + \varepsilon \quad (2.5)$$

Regresi linear secara umum dinyatakan dalam persamaan (2.5), di mana Y adalah variabel dependen, X adalah variabel independen, a adalah *intercept*, b adalah koefisien kemiringan (*slope*), dan ε adalah *error term* yang mewakili variabilitas yang tidak dijelaskan oleh model (Montgomery, Peck, & Vining, 2021).

Kelebihan utama regresi linear untuk uji signifikansi terletak pada kemudahan interpretasinya, di mana koefisien regresi secara langsung menunjukkan besaran dan arah hubungan antar variabel, serta dukungan perangkat lunak yang luas sehingga mudah diimplementasikan untuk identifikasi prediktor berpengaruh. Namun, metode ini memiliki kekurangan yang signifikan karena bergantung pada serangkaian asumsi klasik—seperti linearitas, normalitas residual, homoskedastisitas, dan tidak adanya multikolinearitas—yang sering kali dilanggar oleh data riil, sehingga dapat menghasilkan kesimpulan yang bias atau tidak valid. Selain itu, regresi linear juga sangat sensitif terhadap outlier dan tidak mampu menangkap hubungan yang non-linear, yang membatasi penerapannya pada hubungan variabel yang lebih kompleks (Gujarati & Porter, 2009).

2.9. Pemodelan ANFIS (*Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*)

Adaptive Neuro-Fuzzy Interference System (ANFIS) merupakan metode yang diajukan Jang pada tahun 1993 sebagai metode yang mengkombinasikan kemampuan penafsiran dari sistem fuzzy dan kemampuan belajar mandiri dari *neural network*, sehingga menghasilkan metode dengan akurasi dan penafsiran yang tinggi (Zhang & Chen, 2024). Susunan dasar ANFIS terdiri dari lima lapisan

dengan output noda di tiap lapisan direpresentasikan oleh O_{ij} dengan i adalah indeks noda dari lapisan j .

Pada lapisan pertama, noda lapisan ini adalah skor membership yang dihasilkan dari nilai variabel input, yang didefinisikan sebagai persamaan (2.6)

$$O_i^1(x_1) = \mu_{A_i}(x_1), O_i^1(x_2) = \mu_{B_i}(x_2), O_i^1(x_3) = \mu_{C_i}(x_3) \quad (2.6)$$

x_1, x_2, x_3 merupakan nilai dari tiga variabel input dan A_i, B_i, C_i adalah tetapan fuzzy yang diasosiasikan dengan noda ini, dan $\mu_{A_i}, \mu_{B_i}, \mu_{C_i}$ merupakan *membership function (mf)* dari tiap label A_i, B_i dan C_i . Dengan i adalah indeks bernilai 1, 2, 3. Seluruh fungsi kontinu yang dapat didiferensiasi perpotong mampu digunakan sebagai *mf* di lapisan ini, contohnya adalah fungsi gaussian, trapezoid, dan triangular (Jang, 1993).

Pada lapisan kedua, tiap noda menunjukkan akumulasi kekuatan tembak (kuantifikasi kekuatan premis aturan) dari anteseden aturan (kondisi yang perlu dipenuhi agar aturan dapat dijalankan) lewat operator t-norm seperti pada persamaan (2.7)

$$O_i^2 = w_i = \mu_{A_i}(x_1) \times \mu_{B_i}(x_2) \times \mu_{C_i}(x_3), i = 1, 2, 3 \quad (2.7)$$

Pada lapisan ketiga, tiap noda menghasilkan kekuatan tembak ternormalisasi seperti pada persamaan (2.8)

$$O_i^3 = \bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_i w_i} \quad (2.8)$$

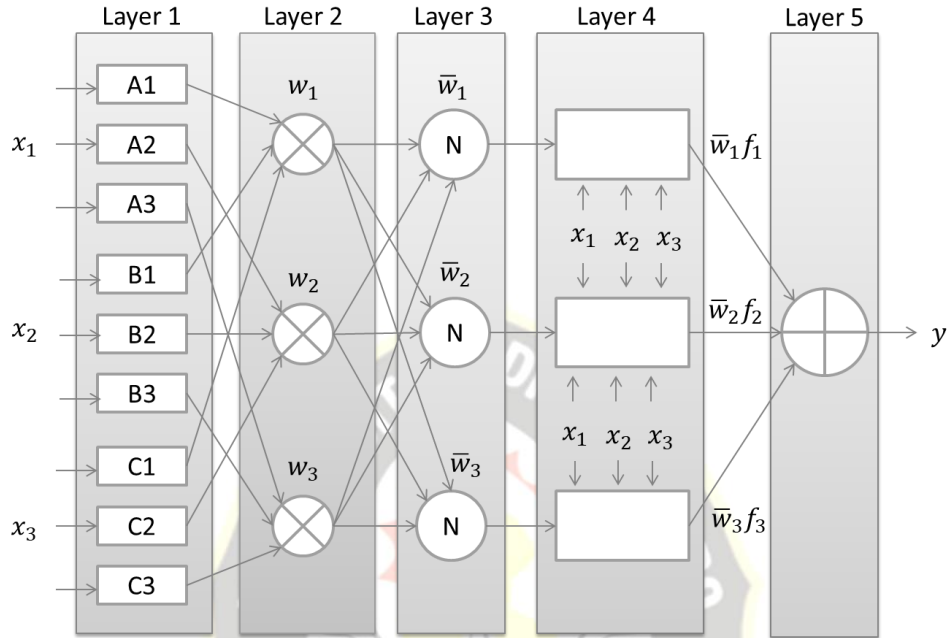
Pada lapisan keempat, tiap aturan dihitung dengan parameter yang berhubungan yaitu p_i, q_i, r_i, s_i seperti pada persamaan (2.9)

$$O_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x_1 + q_i x_2 + r_i x_3 + s_i) \quad (2.9)$$

Kemudian setelah nilai dari parameter premis diketahui, mada noda tunggal di lapisan kelima merupakan hasil penjumlahan kombinasi linear dari tiap output. Seperti pada persamaan (2.10)

$$O_i^5 = \sum_i \bar{w}_i f_i = \bar{w}_1 f_1 + \bar{w}_2 f_2 + \bar{w}_3 f_3 \quad (2.10)$$

Gambar 2.4 menunjukkan ANFIS dengan tiga input, tiga aturan, dan satu output, yang tiap inputnya memiliki tiga *mf* Gaussian.



Gambar 2. 5. ANFIS dengan 3 input dan 1 output

Model ANFIS secara umum memiliki performa yang lebih baik apabila dibandingkan dengan model lain (Samanataray & Sahoo, 2021). Hal ini dapat dilihat dari Tabel 2.2 tentang rangkuman tinjauan pustaka pemodelan elevasi muka air tanah dalam

2.10. Parameter Evaluasi Model

MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) mengukur kesalahan prediksi dalam bentuk persentase absolut terhadap nilai aktual (De Myttenaere, Golden, Le Grand, & Rossi, 2016). Metrik ini berguna ketika kita ingin mengevaluasi kesalahan prediksi dalam konteks persentase. Persamaan MAPE ada pada (2.11) dengan interpretasi pada Tabel 2.2.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{X_{aktual} - X_{prediksi}}{X_{aktual}} \right| \times 100\% \quad (2.11)$$

Tabel 2. 2. Interpretasi nilai MAPE (Lewis, 1982)

MAPE	Interpretasi
$\leq 10\%$	Prediksi yang sangat akurat
10-19%	Prdiksi yang baik
20-49%	Prediksi yang cukup
$\geq 50\%$	Prediksi yang tidak akurat

SMAPE (*Symmetric Mean Absolute Percentage Error*) mengukur kesalahan prediksi dalam bentuk persentase absolut terhadap rata-rata nilai aktual dan prediksi absolut, sehingga ia berbentuk simetris (melakukan penilaian pada nilai prediksi yang lebih ataupun kurang (*over/under prediction*) secara sama) dan mampu menghindari galat yang terjadi pada pembagian nol (Kuhn & Johnson, Applied Predictive Modeling, 2013). Persamaan SMAPE ada pada (2.12) dengan interpretasi pada Tabel 2.3.

$$SMAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|x_{prediksi} - x_{aktual}|}{(|x_{aktual}| + |x_{prediksi}|)/2} \times 100\% \quad (2.12)$$

Tabel 2. 3. Interpretasi nilai SMAPE (Lewis, 1982)

SMAPE	Interpretasi
$\leq 10\%$	Prediksi yang sangat akurat
10-19%	Prdiksi yang baik
20-49%	Prediksi yang cukup
$\geq 50\%$	Prediksi yang tidak akurat