

## I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Salah satu sumberdaya alam yang memiliki peranan penting dan mendapatkan perhatian khusus dalam pemanfaatan dan menjaga pelestariannya adalah sumberdaya air (Santosa dan Adji 2014), karena merupakan inti dari suatu sistem ekologi (Selvakuamar *et al.* 2017), dan telah menjadi kebutuhan utama seperti domestik, irigasi (Jain *et al.* 2010; Khashogji dan El Maghraby 2013), industri, pariwisata dan sektor ekonomi lainnya (Bhuiyan *et al.* 2016). Hal ini berdampak pada peningkatan permintaan pasokan air (Selvakumar *et al.* 2017) diberbagai wilayah.

Indonesia, memiliki rerata ketersediaan air yaitu  $\pm 15.000 \text{ m}^3/\text{kapita/tahun}$ , sedangkan di dunia secara keseluruhan sebesar  $600 \text{ m}^3/\text{kapita/tahun}$  (Marwah 2014). Dengan demikian ketersediaan air di Indonesia relatif sangat besar yaitu  $\pm 25$  kali rerata ketersediaan per kapita per tahun dunia. Akan tetapi sebaran dan ketersediaan air tersebut tidak merata dan bervariasi menurut ruang dan waktu (Purnama 2004; Zeffitni 2012). Dalam pemenuhan ketersediaan air tersebut terdapat sumberdaya air yang dimanfaatkan di permukaan bumi yaitu air permukaan berupa sungai, waduk, danau, telaga, rawa atau reservoir lainnya, maupun air hujan serta air bawah permukaan berupa air tanah dan mata air.

Sumber daya air yang umumnya digunakan untuk pemenuhan kebutuhan air manusia adalah air tanah (Santosa dan Adji 2014). Air tanah merupakan salah satu sumberdaya air yang potensial dari tahun ke tahun dan terus meningkat kaitannya dengan pemenuhan kebutuhan air bersih, diperkirakan 70% kebutuhan air bersih penduduk bersumber dari air tanah dan 30% bersumber dari sumberdaya air lainnya, sedangkan sektor industri, diperkirakan 90% kebutuhan air industri bersumber dari air tanah dan sisanya 10% bersumber dari sumberdaya air lainnya (Zeffitni 2012). Hal ini dapat disimpulkan bahwa air tanah berkontribusi besar dalam pemenuhan kebutuhan air bersih pada berbagai sektor, karena secara kualitas relatif lebih baik dan ketersediaannya memadai.

Air tanah memiliki berbagai keuntungan dibandingkan sumberdaya air lainnya yaitu; (a) air tanah memiliki kualitas lebih baik dibandingkan air hujan dan air permukaan serta keberadaannya relatif tidak dipengaruhi oleh musim, (b) variasi kualitas air dari waktu ke waktu relatif kecil, (c) akuifer mengandung air tanah dan mampu menyimpan cadangan air lebih besar jumlahnya, sehingga terhindar dari evaporasi dan tidak memerlukan waduk penampungan, (d) sebaran dan luasan air tanah lebih besar dibandingkan air permukaan sehingga mengurangi biaya penyaluran, (e) lahan di atas akuifer dapat digunakan untuk keperluan lainnya seperti pemukiman, industri, pertanian dan pariwisata (Sudarmadji 1991; Santosa dan Adji 2014).

Di wilayah perkotaan khususnya kota Kendari, air tanah mempunyai fungsi vital dalam menunjang pembangunan daerah sebagai sumber air baku, karena mudah didapatkan. Sebaliknya PDAM yang diandalkan sebagai penyedian kebutuhan air baku masih belum mampu menjangkau seluruh kebutuhan penduduk akibat keterbatasan volume air bersih dan jangkauan perpipaan yang tersedia. Selain itu, air tanah juga dijadikan sebagai sumber pendapatan asli daerah (PAD) berdasarkan Peraturan Daerah Kota Kendari no 4 tahun 2018 tentang Perubahan

Dewasa ini, air tanah telah menjadi permasalahan utama akibat pesatnya pertumbuhan penduduk dan perkembangan kota. Pertumbuhan penduduk berimplikasi terhadap peningkatan kebutuhan lahan guna menunjang kebutuhan hidup masyarakat. Dinamika perubahan lahan di kota Kendari selama periode 20 tahun mengalami perubahan signifikan yaitu sebanyak 6 (enam) kelas lahan mengalami penurunan luasan yaitu hutan (3 652.89 ha), semak belukar (190.48 ha), kebun campur (168.13 ha), tubuh air (149 ha), lahan terbuka (68.04 ha) dan mangrove (12.63 ha), sedangkan area permukiman dan sawah mengalami peningkatan masing-masing sebesar 4 061.77 ha dan 179.99 ha (*Kete et al. 2020*). Hal ini dapat disimpulkan wilayah ini terus mengalami perkembang fisik kota di daerah hulu untuk aktivitas perumahan dengan cara konversi lahan vegetasi ditandai dengan kawasan perumahan bersubsidi dengan tawaran harga murah dan perkembangnya sangat massif, sedangkan pada daerah hilir banyak dijumpai permukiman mewah, perhotelan, perkantoran, pusat pelayanan kesehatan, pembangunan jalan raya (*bypass*), pelabuhan PELNI/Rakyat.

Perubahan penggunaan lahan tersebut berpengaruh terhadap siklus hidrologi, seperti kemampuan laju infiltrasi tanah dan *run off* (Asdak 2018). Penggunaan lahan bervegetasi mampu meningkatkan laju infiltrasi air hujan ke dalam tanah hingga mencapai akuifer melalui rongga batuan dan menurunkan *run off*. Sebaliknya lahan terbangun dapat menghambat laju infiltrasi dan mampu meningkatkan koefisien *run off* sehingga kemampuan lahan untuk menyerap air semakin rendah. Kondisi ini menyebabkan pada musim hujan terjadi genangan, sedangkan pada musim kemarau mengalami kesulitan air bersih. Sebaliknya permintaan air tanah guna memenuhi kebutuhan berbagai sektor di wilayah ini semakin tinggi setiap tahunnya. Selain itu, pemanfaatan air tanah secara langsung dapat berdampak negatif terhadap penurunan muka air tanah (MAT), intrusi air laut terhadap air tanah di wilayah pesisir dan pencemaran air tanah (Sophiya dan Syed 2013; Santosa dan Adji 2014).

Penurunan MAT terjadi karena eksplorasi air tanah secara terus menerus dan berlebihan hingga melebihi *safety yield*. Selain itu, penurunan MAT juga menyebabkan intrusi air laut ke dalam air tanah di wilayah pesisir. Intrusi air laut terhadap air tanah di wilayah ini selain disebabkan oleh eksplorasi air tanah, juga disebabkan oleh karakteristik wilayah setempat. Secara topografi, kota Kendari memiliki jenis topografi bervariasi daerah datar meliputi 59.8% dari luas kota kendari, daerah landai meliputi 22.7 %, agak miring 15.7 % dan miring hingga terjal 1.8 % dari luas total 267.37 km<sup>2</sup> atau 0.7% dari luas daratan Provinsi Sulawesi Tenggara. Wilayah daratannya terdapat di daratan Sulawesi mengelilingi Teluk Kendari dan terdapat satu pulau yaitu pulau Bungkutoko (Kota Kendari dalam Angka, 2016).

Secara hidrologi, Kota Kendari merupakan Daerah Aliran Sungai (DAS) Wanggu bagian hilir dengan 12 (dua belas) anak sungai yang bermuara di Teluk Kendari dengan luas perairan  $\pm$  1 236.77 ha dengan bentuk penampang berupa mangkuk yang lonjong dengan panjang 7 500 m; lebar terbesar 3 000 m dan lebar terkecil 300 m. Pada bagian timur arah laut terdapat pulau kecil sebagai pintu keluar masuk pasang surut dengan ukuran sempit ( $\pm$  300 m), sehingga apabila air pasang berpapasan dengan periode banjir, maka terjadilah pembendungan

sementara sehingga terjadilah banjir rob pada daerah kerendahan di sekitar pantai sekeliling teluk (Alwi 2012), akibatnya terjadilah intrusi air laut ke dalam air tanah, sedangkan pencemaran air tanah dipengaruhi oleh faktor alamiah dan aktivitas antropogenik (Singh *et al.* 2005; Singh 2018). Faktor alamiah terdiri dari formasi geologi (Nasrabadi dan Abbasi Maedeh 2014; Islam *et al.* 2017), tanah (Ielpo *et al.* 2012) dan iklim (Bodrud-Doza *et al.* 2016) dan aktivitas antropogeik: peningkatan jumlah dan aktivitas penduduk, kegiatan industri, sampah perkotaan (Sharma 2009), urbanisasi dan pertanian (Li *et al.* 2016; Anny *et al.* 2017).

Penduduk Kota Kendari saat ini telah merasakan dampak akibat pencemaran air tanah dilihat dari nilai DHL air tanah di daerah tersebut di atas 750  $\mu\text{mhos}/\text{cm}$  yaitu berkisar 782-898  $\mu\text{mhos}/\text{cm}$  (BAPPEDA Kota Kendari 2016). Hal ini didukung oleh pernyataan penduduk bahwa air tanah (sumur gali) yang dikonsumsi telah mengalami pencemaran air dilihat dari segi rasa yaitu berasa payau hingga asin, sehingga beberapa sumur gali tidak lagi digunakan untuk air bersih hanya digunakan untuk kebutuhan MCK (mandi, cuci kakus). Sumur gali tersebut banyak dijumpai di daerah pesisir dan di kecamatan Kemaraya (pusat kota). Hal ini dapat berdampak pada kesehatan lingkungan dan kelangkaan sumber daya air sesuai baku mutu, guna mencegah permasalahan tersebut maka konsep kota ideal yang dikenal dengan istilah kota sensitif air atau *Water Sensitive City* (WSC) dapat diterapkan di wilayah ini.

Konsep WSC mengintegrasikan pengelolaan keberlanjutan siklus air dan perencanaan kota, artinya peranan air dalam menunjang aktivitas perkotaan membutuhkan tata kelola yang selaras antara pembangunan kota dan kebutuhan air yang layak, tidak hanya untuk generasi sekarang namun diharapkan dapat terus digunakan oleh generasi akan datang. Oleh karena itu, untuk mewujudkan kota Kendari sebagai WSC maka diperlukan sumber daya air alternatif dan selanjutnya diintegrasikan dengan air tanah guna menunjang kebutuhan air berbagai sektor.

## 1.2 Rumusan Masalah

Kota Kendari merupakan suatu kota pesisir dengan tingkat perkembangan yang cukup pesat baik dari segi fisik kota maupun jumlah penduduk (415.191 jiwa) akibat urbanisasi, dengan laju pertumbuhan penduduk sebesar 2.09% pertahun. Laju pertumbuhan tersebut diikuti dengan peningkatan kebutuhan akan sumber daya air dan peningkatan beban limbah yang dihasilkan oleh aktivitas antropogenik. Pada masa yang akan datang diprediksi kebutuhan air dan beban limbah terus meningkat maka akan terjadi penurunan MAT, intrusi air laut dan risiko pencemaran air tanah. Apabila diasumsikan ketersediaan air tetap bahkan berkurang akibat telah tercemar maka akan terjadi defisit air sehingga diperlukan penambahan pasokan air dengan memanfaatkan sumber daya air lainnya, pemanfaatan air kembali dan pengolahan limbah guna menutupi kelangkaan air di masa mendatang.

Dengan demikian sumber daya air tanah di wilayah ini memiliki permasalahan yang kompleks karena menyangkut multi-sektor dan multi-kepentingan. Oleh karena itu, guna mengendalikan permasalahan tersebut dan menjaga keseimbangan lingkungan kota Kendari maka diperlukan upaya pengelolaan air tanah dengan mengidentifikasi faktor-faktor kunci pada setiap dimensi ekologi, ekonomi dan sosial sebagai indikator pembangunan berkelanjutan dan dikombinasikan dengan dimensi teknologi yang begitu pesat dan kelembagaan



sebagai penentu kebijakan. Selanjutnya setelah mendapatkan faktor pengungkit dirumuskan suatu model yang dapat mengelola air tanah pada masa sekarang dan akan datang, sehingga dapat merumuskan upaya pengelolaan air tanah secara berkelanjutan. Berdasarkan permasalahan di atas maka disusun suatu pertanyaan penelitian (*research questions*) terkait penelitian yang dilakukan sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik hidrogeokimia dan potensi air tanah di kota Kendari?
2. Bagaimana risiko dan kerentanan air tanah di kota Kendari?
3. Bagaimana tingkat keberlanjutan pengelolaan air tanah di kota Kendari?
4. Bagaimana sumberdaya alternatif yang dapat mendukung keberlanjutan air tanah di kota Kendari?
5. Bagaimana model pengelolaan air tanah berkelanjutan di kota Kendari?

### 1.3 Kerangka Pemikiran

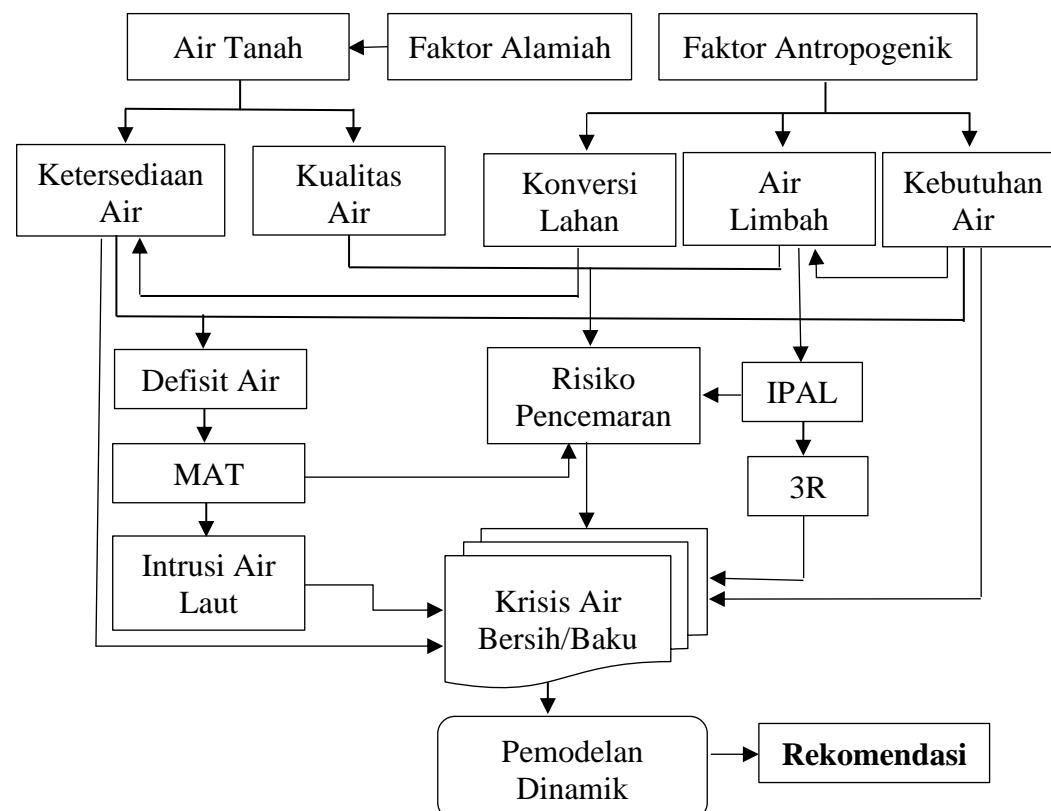
Sumber daya air merupakan unsur vital dalam keberlangsungan makhuk hidup, khususnya manusia air telah menjadi kebutuhan pokok. Selain untuk kebutuhan domestik, juga digunakan untuk berbagai keperluan, seperti industri, hotel, irigasi dan berbagai sektor komersial lainnya. Apabila sumberdaya air dapat mencukupi dan mendukung kebutuhan akan berbagai sektor tersebut, maka tidak akan terjadi permasalahan air, namun sebaliknya, apabila tidak mencukupi baik dari segi kualitas, kuantitas maupun distribusinya maka timbul permasalahan air. Umumnya, manusia cenderung menggunakan air tanah guna mencukupi dan mendukung kebutuhan air baku, karena memiliki kualitas lebih baik dari air permukaan dan ketersediaan relatif mudah diperoleh.

Pengambilan air tanah guna memenuhi kebutuhan air baku berbagai sektor terus mengalami peningkatan dari tahun ke tahun seiring dengan peningkatan jumlah penduduk dan perkembangan kota. Hal ini, apabila dalam pemanfaatannya tidak mempertimbangkan *safety yield* air tanah maka akan berdampak pada penurunan muka air tanah (MAT). Penurunan MAT berdampak pada intrusi air laut terhadap air tanah di wilayah pesisir dan pencemaran air tanah. Namun, secara alamiah air tanah juga memiliki permasalahan karena keberadaannya dipengaruhi oleh media penyusun akuifernya. Kontaminasi air tanah dengan batuan penyusunnya dalam periode lama berakibat tingginya konsentrasi unsur kimia dalam air tanah. Dengan demikian, air tanah tidak dapat digunakan untuk suatu keperluan.

Pertumbuhan penduduk juga berpotensi menghasilkan air limbah sebesar 80-90% dari pemakaian air baku. Hal ini apabila tidak dilakukan pengolahan limbah sebelum dibuang ke tanah dan/atau badan air maka berisiko terjadi pencemaran air tanah sehingga berdampak pada kesehatan lingkungan dan kelangkaan sumber daya air. Selain itu, pertumbuhan penduduk juga berimplikasi terhadap peningkatan kebutuhan lahan sebagai tempat tinggal dan aktivitas pendukung lainnya. Kebutuhan lahan yang selalu meningkat sering membuat manusia lupa bahwa alam memiliki keterbatasan pemanfaatan. Pemanfaatan lahan secara terus menerus tanpa memperhatikan daya dukungnya berpengaruh terhadap siklus hidrologi seperti kemampuan laju infiltrasi tanah dan run off (Asdak 2018). Konversi lahan vegetasi menjadi non vegetasi menurunkan laju infiltrasi air hujan ke dalam tanah dan meningkatkan *run off*, akibatnya cadangan air tanah dalam aquifer berkurang. Apabila diasumsikan ketersediaan air tanah relatif tetap, sedangkan permintaan sumber daya air tanah terus meningkat maka akan terjadi defisit air tanah pada masa

mendatang. Oleh karena itu, guna menghindari kemungkinan terburuk maka diperlukan gagasan/konsep baru dalam pengelolaan air tanah.

Konsep Water Sensitive City (WSC) merupakan solusi dari pengelolaan air tanah, konsep ini juga disebut sebagai konsep hijau karena mampu mengintegrasikan pengelolaan keberlanjutan siklus air dan perencanaan kota dengan menggunakan pendekatan sistem dinamik. Hal dapat menjadi kebaruan dalam penyusunan tata Kelola air tanah agar terjadi kesimbangan dan keselarasan antara aspek ekologi dan pembangunan kota. Model ini dibangun berdasarkan model eksisting dan model skenario kebijakan. Di dalam pemodelan ini dilakukan intervensi terhadap peubah yang membangun model dalam periode waktu 30 tahun atau hingga 2049 guna mewujudkan Kendari sebagai WSC



---

Gambar 1 Diagram Alir Penelitian

## 1.4 Tujuan

Tujuan utama dari penelitian ini adalah mendesain model pengelolaan air tanah berkelanjutan di kota Kendari. Tujuan khusus dari penelitian ini untuk mencapai tujuan utama adalah sebagai berikut:

- Mencapai tujuan utama adalah sebagai berikut:

  1. Menganalisis karakteristik hidrogeokimia dan potensi air tanah di kota Kendari.
  2. Menganalisis dan menilai risiko dan kerentanan air tanah di kota Kendari.
  3. Menganalisis tingkat keberlanjutan pengelolaan air tanah di kota Kendari.
  4. Mengidentifikasi sumberdaya air alternatif guna mendukung keberlanjutan air tanah di kota Kendari.
  5. Mendesain model pengelolaan air tanah berkelanjutan di kota Kendari.

## 1.5 Manfaat

Manfaat penelitian model pengelolaan air tanah berkelanjutan di Kota Kendari yaitu:

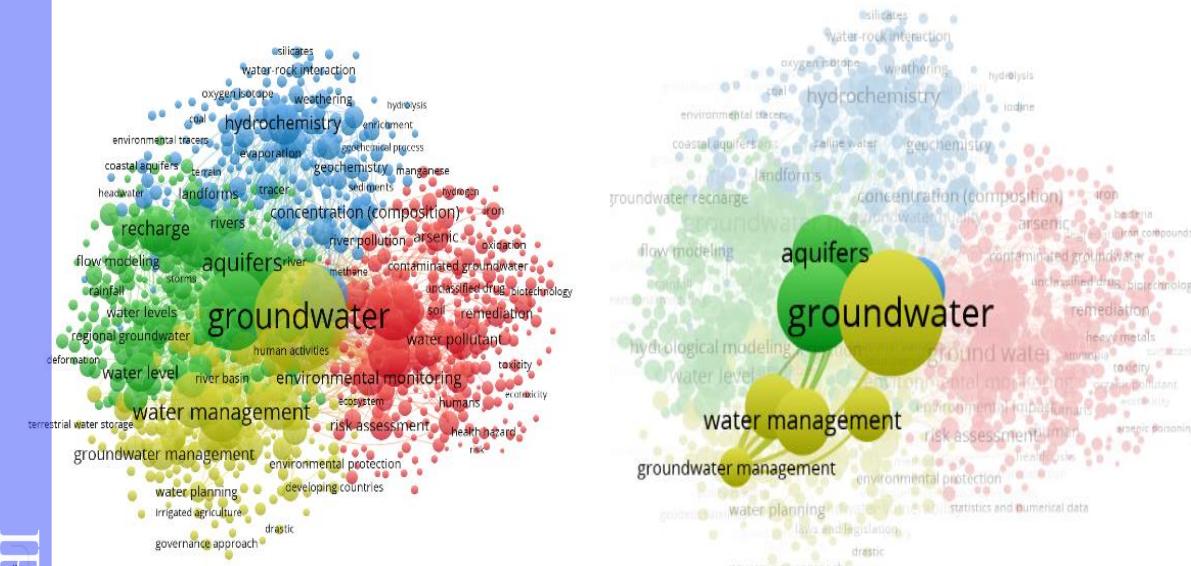
1. Sebagai bahan informasi dalam pengembangan ilmu dan pengetahuan bidang pengelolaan sumberdaya alam dan lingkungan.  
Sebagai salah satu solusi alternatif dalam pengelolaan air tanah pada wilayah perkotaan dan pesisir.  
Sebagai bahan pertimbangan bagi pemerintah dalam pengelolaan air tanah untuk sumber air baku/bersih di masa mendatang

## 1.6 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian ini memfokuskan pada kajian air tanah yang keberadaanya diatas lapisan aquifer (kedap air) umumnya disebut air tanah bebas/dangkal yang bersumber dari sumur gali dan sumur bor berdasarkan variasi bentuklahan/geomorfologi. Sedangkan konsep pengelolaan didasarkan pada UU No 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup meliputi perencanaan, pemanfaatan, pengendalian, pemeliharaan, pengawasan, dan penegakan hukum

### 1.7 Kebaruan (*Novelty*)

Novelty penelitian ini dilakukan dengan analisis bibliometric berdasarkan metadata *scopus* dengan kata kunci *groundwater* dan *ground water* periode 2000-2020, didapatkan hasil 12 867 publikasi, selanjutnya dianalisis menggunakan software *Vosviewer*. Tipe data yang dianalisis adalah *co-occurrence* menggunakan metode *full counting*. Hasil analisis menunjukkan bahwa terdapat 933 kata/istilah dengan 5 klaster yaitu klaster air tanah secara umum, klaster pemodelan akuifer, klaster hidrokimia, klaster kontaminasi air tanah dan klaster pengelolaan air dan air tanah (Gambar 2).



Gambar 2 Analisis Bibliometrik *co-occurrence*

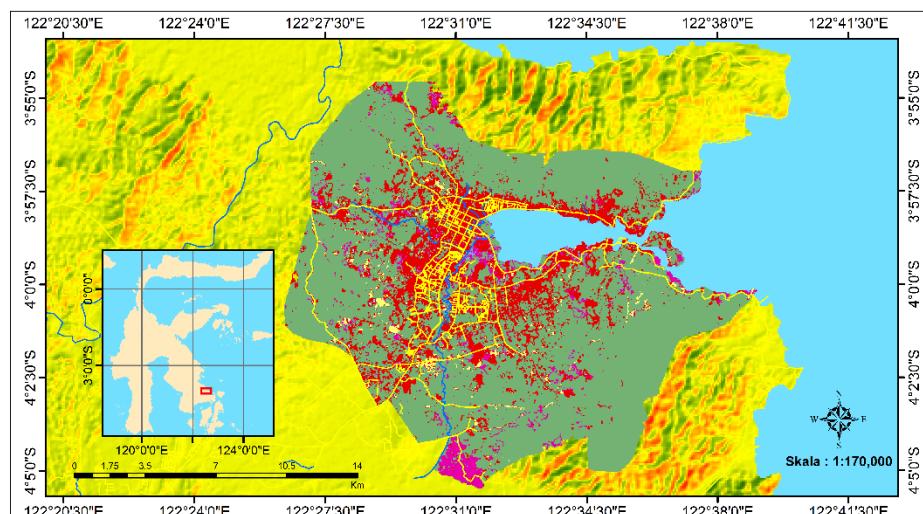
Hal ini menunjukkan bahwa pada klaster pengelolaan air dan air tanah yang menjadi fokus kajian masih sedikit diteliti dibandingkan beberapa klaster lainnya dan dibahas secara parsial. Oleh karena itu, penulis tertarik untuk mengkaji pengelolaan air tanah secara komprehensif dengan memahami karakteristik air tanah wilayah setempat guna menghindari kesalahan pengambilan keputusan. *Novelty* tersebut adalah:

1. Secara teoritis, asal usul air tanah mengikuti pola evolusi air tanah, artinya hasil penelitian ini menguatkan teori yang sudah ada. Sedangkan secara lokasi, informasi asal usul air tanah belum pernah dikaji di wilayah ini. Adapun asal usul air tanah didominasi tipe  $\text{HCO}_3^-$  mengarah ke tipe  $\text{Cl}$  akibat proses penguapan air laut oleh proses sedimentasi zaman plistosen dan holosen dan pelarutan kristal garam oleh air hujan ke dalam air tanah membentuk air evaporit dan pelarutan mineral pada bentuklahan alluvial sungai yang membentuk air bikarbonat. Proses ini dikontrol oleh geomorfologi dan umur batuan.
2. Modifikasi model GALDIT dan DRASTIC dengan bobot efektif mampu meningkatkan indeks risiko dan kerentanan air tanah berdasarkan karakteristik wilayah secara efektif, efisien dan akurat.
3. Pengelolaan air tanah dengan penerapan WSC menggunakan pendekatan sistem dinamik mampu meningkatkan suplay air baku dan menjamin ketersediaan air baku berkelanjutan.

## II METODE

### 2.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Lokasi penelitian di Kota Kendari, secara geografis terletak di bagian selatan garis khatulistiwa berada diantara  $3^\circ 54' 30'' - 4^\circ 3' 11''$  Lintang Selatan dan membentang dari Barat ke Timur diantara  $122^\circ 23' - 122^\circ 39'$  Bujur Timur, sedangkan secara administrasi sebelah utara berbatasan dengan Kabupaten Konawe, sebelah timur berbatasan dengan laut Kendari, sebelah selatan dengan Kabupaten Konawe Selatan, dan sebelah barat berbatasan dengan Konawe Selatan (Gambar 3).



Gambar 3 Peta Lokasi Penelitian



## 2.2 Jenis dan Sumber serta Teknik Pengumpulan Data

Jenis data yang digunakan dalam penelitian ini adalah mengkombinasikan data primer dan sekunder. Data primer yang digunakan dalam penelitian ini adalah air tanah yang diperoleh dengan melakukan pengamatan *in situ* dan analisis laboratorium dengan parameter fisik, kimia dan bakteriologi (lihat Tabel 1) dan wawancara mendalam (*indepth interview*) dengan *stakeholder* dan pakar. Data sekunder diperoleh dari instansi terkait, studi pustaka baik buku teks maupun jurnal dari penelitian sebelumnya di lokasi penelitian. Secara rinci dapat dilihat pada Tabel 2 mengenai matriks jenis data, sumber data, metode pengumpulan data, metode analisis dan keluaran berdasarkan tujuan penelitian.

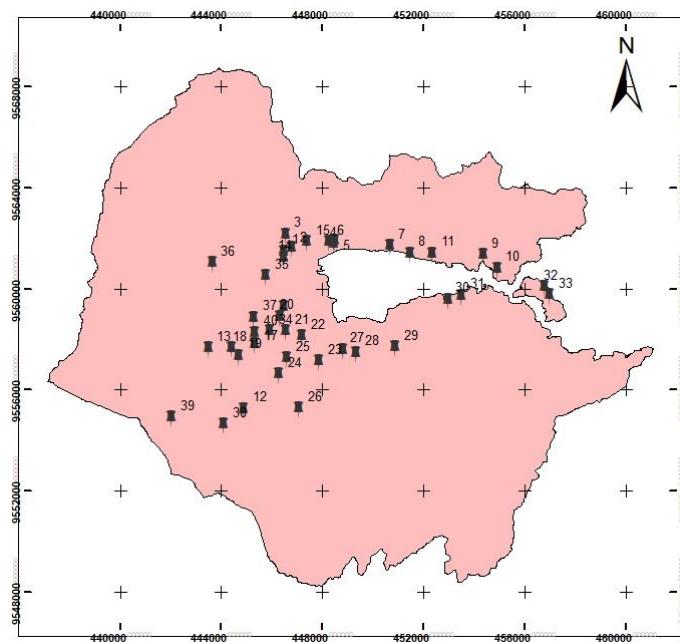
Tabel 1 Matriks Prosedur Penelitian

No	Tujuan	Sumber Data	Teknik Pengumpulan Data	Metode Analisis	Hasil
1	Menganalisis karakteristik hidrogeokimia dan potensi air tanah	Data Primer Data Sekunder	Pengukuran lapangan Analisis laboratorium Studi Pustaka	Permenkes 32/2017 Kepmenlh 115/2003 Indeks IP Indeks CCME WQI Analisis Grafis Analisis Spasial Analisis Regresi	Fasies air tanah Sebaran kualitas air tanah Indeks Pencemaran
2	Penilaian risiko dan kerentanan air tanah	Data Primer Data Sekunder	Hasi tujuan 1 Pengukuran lapangan Data Bor Data Geolistrik Studi Pustaka	GALDIT DRASTIC Analisis Spasial Analisis Korelasi	Kerentanan intrusi air laut terhadap air tanah Kerentanan dan risiko air tanah terhadap polutan
3	Menganalisis status keberlanjutan air tanah	Data Primer Data Sekunder	<i>Interview</i> Pakar Studi Pustaka	MDS	Faktor pengungkit keberlanjutan
4	Mengidentifikasi sumberdaya air alternatif untuk keberlanjutan air tanah	Data Sekunder	Data Curah hujan	Metode Rasional	Potensi sumberdaya air alternatif
5	Menyusun model pengelolaan air tanah berkelanjutan	Data Primer Data Sekunder	Hasil dari tujuan 1 hingga 3	Sistem Dinamik	Model pengelolaan air tanah berkelanjutan

## 2.3 Teknik Pengambilan Sampel

Teknik pengambilan sampel meliputi: (1) sampel air tanah, dilakukan dengan menggunakan teknik klaster berdasarkan *overlay* peta bentuk lahan, peta geologi, Peta Digital Elevation Model (DEM), kepadatan permukiman, Daya Hantar Listrik (DHL), dan kedudukan air tanah terhadap sanitasi lingkungan (Gambar 4); (2) Pemilihan informan didasarkan pada *stakeholder* kunci sebagai *decision maker* dan

pakar. Jumlah responden adalah 7 orang terdiri dari; 2 orang pengambil kebijakan tingkat provinsi (BAPPEDA dan DESDM), 3 orang pengambil kebijakan tingkat Kota (BAPPEDA, Dinas PU dan DLHK), dan 2 orang Pakar dari Perguruan Tinggi.



Gambar 4. Peta Sampling Air Tanah

### III ANALISIS KARAKTERISTIK HIDROGEOKIMIA DAN POTENSI AIR TANAH DI KOTA KENDARI

#### 3.1 Pendahuluan

Sumber daya air merupakan salah satu sumber daya alam yang sangat penting diperlukan guna memenuhi kebutuhan hidup manusia sehari-hari. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, terdapat berbagai sumber daya air yang dapat dimanfaatkan diantaranya air permukaan (sungai, danau, waduk, rawa dan lain sebagainya), air di bawah permukaan (air tanah dan mata air) dan air hujan. Namun, diantara berbagai sumber air tersebut, yang sering digunakan untuk sumber air bersih adalah air tanah. Hal ini disebabkan karena air tanah memiliki keunggulan dibandingkan sumber air lainnya. Dari segi kualitas, air tanah memiliki kualitas yang lebih baik dari air permukaan dan air hujan karena keberadaannya tidak dipengaruhi oleh musim; segi kuantitas, memiliki cadangan air tanah lebih besar dan mudah diperoleh; segi distribusi, tidak memerlukan tandon dan jaringan transmisi sehingga biaya murah (Santosa and Adji 2014; Purnama 2004; Sudarmadji 1991)

Wilayah tropis, umumnya mengandalkan air tanah sebagai sumber utama air bersih masyarakat (Aida 2007), sama halnya dengan masyarakat di kota Kendari. Hal ini disebabkan karena peranan Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) sebagai penyedia air bersih tidak optimal akibat keterbatasan volume air bersih dan jaringan perpipaan, sebaliknya permintaan akan kebutuhan air bersih terus meningkat seiring dengan peningkatan jumlah penduduk setiap tahunnya sebesar 2.94% (BPS



Kota Kendari 2020a). Oleh karena itu, sebagai upaya dalam pemenuhan kebutuhan air khususnya air minum di suatu wilayah selalu dikaitkan dengan kondisi airtanah yang layak dikonsumsi sesuai baku mutu yang telah ditentukan, ketersediaanya selalu tersedia dan biaya murah sangat didambakan oleh masyarakat. Namun, pada kenyataanya, terdapat faktor pembatas dalam pemanfaatannya baik dari segi kualitas maupun kuantitas karena dipengaruhi oleh kondisi geologi, siklus hidrologi, dan mekanika fluida (D K Todd 1981; Fetter 2001)).

Air tanah terdapat dalam beberapa tipe geologi diantaranya akuifer, yaitu formasi batuan yang dapat menyimpan dan meloloskan air dalam jumlah yang cukup, sedangkan dilihat dari kedudukannya terbagi ke dalam tiga jenis yaitu air tanah bebas atau dangkal, air tanah semi tertekan, dan air tanah tertekan atau dalam (Todd 1981; Santosa dan Adji 2014). Siklus hidrologis, menentukan suplai air ke dalam tanah dan selanjutnya masuk ke dalam akuifer melalui rongga-rongga batuan dan selama proses mengalir berinteraksi dengan material penyusun batuan atau disebut mekanika fluida, semakin lama air tanah kontak dengan batuan maka semakin jauh air tanah mengalami pergerakan hidrolik, sehingga semakin banyak dan mudah mineral batuan terlarut di dalamnya. Hal ini dapat mempengaruhi perubahan karakteristik hidrogeokimia (Todd 1981; Hem and Steele 1975; Santosa and Adji 2014; Stuyfzand 1989). Proses hidrogeokimia berkontribusi dalam mengubah komposisi kimia air tanah dan mengontrol kosentrasi ion mayor dan minor dalam air tanah berdasarkan variasi ruang dan waktu (Rajmohan dan Elango 2004; Zahid *et al.* 2008; Gunduz *et al.* 2010; Tirumalesh *et al.* 2010; Brindha dan Elango 2011; Rajesh *et al.* 2012), suhu dan lain sebagainya (Brindha dan Elango 2014). Oleh sebab itu, karakteristik dan evolusi geokimia air tanah sangat penting untuk dipahami dalam sistem hidrogeokimia pada suatu wilayah guna mengontrol parameter kimia apa saja yang mempengaruhi ketersediaan dan kualitas (potensi) air tanah suatu wilayah guna mendukung kebutuhan air bersih masyarakat.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi dan menganalisis karakteristik hidrogeokimia dan potensi air tanah untuk sumber air bersih masyarakat di kota Kendari.

### 3.2 Metode Penelitian

#### 3.2.1 Jenis dan Sumber Data

Sumber data yang digunakan adalah data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh dari pengukuran MAT dan pengambilan sampel air tanah dangkal (air sumur) penduduk secara *in situ* dan uji laboratorium di Laboratorium Kesehatan (Labkes) Provinsi Sulawesi Tenggara dengan parameter fisik, kimia dan mikrobiologi. Data sekunder diperoleh dari penelusuran literatur hasil penelitian, studi pustaka, laporan dan dokumen dari berbagai instansi yang berkaitan dengan kajian penelitian.

#### 3.2.2 Teknik Pengumpulan Data

Pengambilan sampel air tanah dilakukan dengan menggunakan Teknik *stratified random sampling* berdasarkan *overlay* peta bentuklahan, peta geologi, Peta Digital Elevation Model (DEM), kepadatan permukiman, Daya Hantar Listrik (DHL), dan kedudukan air tanah terhadap sanitasi lingkungan. Sampel air tanah dikumpulkan sebanyak 100 sampel untuk mengidentifikasi fisik kualitas air di

bulan Mei 2019, sedangkan parameter kimia dan mikrobiologi dikumpulkan pada Juni 2019 sebanyak 41 botol sampel untuk di bawah ke laboratorium.

### 3.2.3 Analisis Data

Karakteristik hidrogeokimia air tanah dianalisis dengan menggunakan diagram piper, diagram scholler dan diagram durov dengan bantuan software AqQA (Rock ware) versi trial dan analisis regresi. Potensi air tanah dilakukan dengan menganalisis ketersediaan dan kualitas air tanah. Debit air tanah dihitung dengan menggunakan prinsip hukum Darcy karena air tanah bersifat dinamis dan imbuhan air tanah sebagai penyuplai volume air tanah ke dalam akuifer secara alamiah dengan menggunakan persamaan berikut.

Keterangan: Q : Debit air tanah ( $\text{m}^3/\text{hari}$ )  
 K : Permeabilitas ( $\text{m}^3/\text{hari}$ )  
 I : Beda kemiringan *head* dari peta kontur air tanah  
 A : Luas penampang akuifer ( $\text{m}^2$ )

Keterangan:  $RC$  : Besarnya imbuhan ( $m^3/tahun$ )  
 $P$  : curah hujan rerata tahunan  
 $I$  : luas area  
 $A$  : persentase imbuhan erdasarkan kondisi geologi

Analisis kualitas air tanah mengacu pada PP 82/2001, Permenkes 32/2017 dan WHO 2012, sedangkan penilaian indeks pencemaran mengacu pada Permen LH 115/2003 dan metode CCME WQI (Lumb *et al.* 2011).

### 3.3 Hasil dan Pembahasan

### 3.3.1 Hidrologia

Secara hidrologis, daerah ini dilalui oleh 3 (tiga) sistem Daerah Aliran Sungai (DAS) yaitu DAS Nipa-Nipa seluas 91.07 km<sup>2</sup>, DAS Wanggu seluas 280.79 km<sup>2</sup> dan DAS Nanga-Nanga seluas 122.59 km<sup>2</sup> (BWS Sulawesi IV, 2015). Secara sistem pembagian DAS, kota Kendari terletak di bagian tengah-hilir sedangkan pada bagian hulu-tengah berada di Kabupaten Konawe Selatan yang kesemuanya mengalir ke teluk Kendari dengan pola aliran menyerupai cabang-ranting-pohon (*dendritic pattern*). Secara pembagian wilayah, DAS Nipa-Nipa terletak pada bagian Utara wilayah kota Kendari, DAS Wanggu bagian Tengah, dan DAS Nangga-Nangga bagian Selatan

a). Presipitasi

Curah hujan merupakan salah satu parameter yang memiliki peranan penting dalam proses hidrologi karena menjadi input utama dalam neraca air yang dapat ditransformasi menjadi limpasan (*runoff*). Data curah hujan diperoleh dari 3 (tiga) stasiun yang ada di daerah penelitian dan sekitarnya yaitu Stasiun Badan Meteorologi dan Geofisika (BMKG) memiliki elevasi pos 2 m dan terletak di wilayah kota Kendari periode 1998-2018 mewakili wilayah bagian Utara kota



Kendari, Pos Hujan Moramo memiliki elevasi pos  $\pm 8$  m dan berjarak  $\pm 45$  km dari kota Kendari periode 2009-2018 mewakili bagian Tengah dan Pos Hujan Tanea memiliki elevasi pos  $\pm 9$  m dan jarak  $\pm 35$  km dari kota Kendari periode 2007-2018 mewakili bagian Selatan.

Berdasarkan data pada stasiun BMKG yang mencakup wilayah kota Kendari bagian utara, besaran curah hujan selama periode 1998-2018 sebesar 2 067 mm dan rerata 172.3 mm dengan curah hujan bulanan tertinggi terjadi pada bulan Juni dengan jumlah hari hujan sebesar 18 hari dan terendah pada bulan September sebesar 35.1 mm dengan jumlah hari hujan 5 hari. Pada stasiun Pos Hujan Tanea yang mencakup wilayah kota Kendari bagian Tengah, besaran curah hujan selama periode 2009-2018 sebesar 1 739 mm dan rerata sebesar 144.9 mm. curah hujan bulanan tertinggi terjadi pada bulan Maret sebesar 233.7 mm dan terendah bulan September sebesar 23.8 mm dengan jumlah hari hujan masing-masing sebesar 15 hari dan 2 hari. Pada wilayah kota Kendari bagian selatan yang diwakili Pos Hujan Moramo, besaran dan rerata curah hujan selama periode 2007-2018 masing-masing sebesar 1 934 mm dan 161.2 mm dengan curah hujan bulanan dan hari hujan tertinggi dan terendah masing-masing terjadi pada bulan Mei sebesar 254.8 mm dan 12 hari, dan bulan September sebesar 56.8 mm dan 4 hari. Hal ini menunjukkan bahwa umumnya, wilayah ini memiliki pola curah hujan mulai mengalami peningkatan yaitu terjadi pada bulan November dan terus mengalami peningkatan dan kembali mengalami penurunan signifikan pada bulan Agustus, artinya wilayah ini selama periode terakhir memiliki jumlah musim hujan lebih Panjang dibandingkan musim kemarau.

Tabel 2 Rerata Curah Hujan di Kota Kendari

Bulan	Stasiun BMKG (1998-2018) <sup>1</sup>		Pos Hujan Tanea (2009-2018) <sup>2</sup>		Pos Hujan Moramo (2007-2018) <sup>2</sup>	
	CH	HH	CH	HH	CH	HH
Januari	210.1	19	127.6	9	173.8	11
Februari	215.3	18	183.2	11	198.4	12
Maret	247.9	20	233.7	15	171.5	11
April	195.7	19	221.3	12	152.2	12
Mei	257.2	18	219.8	14	254.8	12
Juni	260.8	18	193.3	11	254.1	12
Juli	196.0	13	124.1	8	240.4	11
Agustus	68.2	8	52.4	5	85.4	7
September	35.1	5	23.8	2	56.8	4
Oktober	55.1	6	54.3	5	62.3	5
November	111.4	11	120.1	6	98.2	7
Desember	214.4	19	185.5	10	186.1	12
Jumlah (mm)	2067	173	1739	107	1934	115
Rerata (mm)	172.3	14.4	144.9	8.9	161.2	9.6

Sumber: <sup>1</sup>BMKG Kendari 2019; <sup>2</sup>BWS Sulawesi IV Kendari 2019

Parameter iklim lainnya yaitu suhu udara juga mempengaruhi proses hidrologis dalam hal ini mampu mentransformasi curah hujan menjadi evapotranspirasi dan *run off*. Namun dalam kenyataan dilapangan tidak semua stasiun/pos hujan memiliki data suhu udara, oleh karena itu, dalam penelitian dihitung dengan cara mengurangi elevasi stasiun terdekat dengan stasiun hitung dan dikalikan dengan nilai 0.006. Selanjutnya nilai yang diperoleh dikurangi dengan data suhu bulanan yang diperoleh dari Stasiun terdekat yaitu Stasiun BMKG (1998-2018). Nilai rerata suhu bulanan dan tahunan masing-masing pada stasiun BMKG sebesar  $28.4^{\circ}\text{C}$  dan  $27.2^{\circ}\text{C}$  dengan suhu tertinggi terjadi pada bulan November dan terendah pada bulan Juli dan Agustus masing-masing sebesar  $28.7^{\circ}\text{C}$  dan  $26.1^{\circ}\text{C}$ . Hasil perhitungan suhu udara bulanan dan tahunan pada Pos Hujan Moramo masing-masing sebesar  $27.4^{\circ}\text{C}$  dan  $26.3^{\circ}\text{C}$ , sedangkan pada Pos Hujan Tanea sebesar  $27.3^{\circ}\text{C}$  dan  $26.1^{\circ}\text{C}$ . Elevasi suatu tempat dapat mempengaruhi kondisi suhu, semakin tinggi suatu tempat maka semakin rendah suhu udara.

### b) Evapotranspirasi

Nilai evapotranspirasi pada wilayah ini dihitung dengan menggunakan Persamaan Turc. Persamaan Turc merupakan persamaan empiris guna menghitung nilai evapotranspirasi aktual di lapangan dengan menggunakan data iklim berupa data curah hujan tahunan dan suhu rerata tahunan (Chow *et al.* 1998). Dengan menginput nilai besaran curah hujan dan suhu udara tahunan pada masing-masing wilayah diperoleh nilai evapotranspirasi aktual pada wilayah kota Kendari bagian Utara yaitu DAS Nipa-Nipa sebesar 1 527.05 mm/tahun, sedangkan pada bagian Tengah (DAS Wanggu) dan Selatan (DAS Nanga-nanga) masing-masing sebesar 1 325.75 mm/tahun dan 1 397.48 mm/tahun.

### c) Run off

*Run off* merupakan bagian dari air hujan yang mengalir di atas permukaan tanah menuju danau, sungai dan/atau laut. Besaran nilai *run off* dipengaruhi oleh intensitas hujan, jenis tanah, vegetasi, elevasi permukaan (Nugroho Hadisusanto 2011) dan kadar air tanah sebelum terjadi hujan (Fitri and Ulfa 2015). Metode perhitungan *run off* telah banyak dikembangkan, salah satu metode empiris yang sering digunakan adalah metode Sharma. Metode ini menggunakan fungsi dari rerata suhu ( $^{\circ}\text{C}$ ), curah hujan tahunan (mm/tahun) dan luas DAS ( $\text{Km}^2$ ). Dengan menginput nilai rerata suhu dan besaran curah hujan tahunan pada masing-masing wilayah diperoleh *run off* pada wilayah kota Kendari bagian Utara (DAS Nipa-Nipa) sebesar 512.27 mm/tahun, sedangkan pada bagian Tengah (DAS Wanggu) dan Selatan (DAS Nanga-Nanga) masing-masing sebesar 440.38 mm/tahun dan 487.70 mm/tahun.

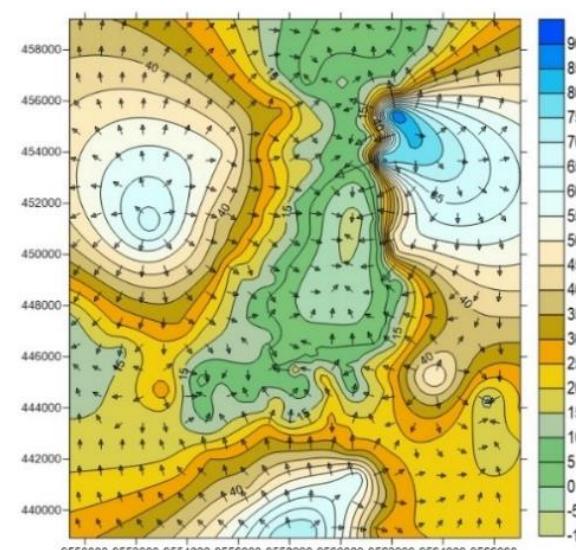
## 3.3.2 Hidrogeologi

### a) Pola Aliran Air Tanah

Pola aliran air tanah bergerak dari energi potensial tinggi ke arah rendah melalui ruang antar butir batuan. Energi potensial dapat diidentifikasi dari elevasi muka air tanah suatu tempat. Untuk menentukan pola aliran air tanah ditunjukkan melalui *flownet* (Gambar 5). Berdasarkan pola aliran air tanah dapat ditentukan daerah hulu sebagai zona *recharge* dan daerah hilir sebagai *discharge area*.

Wilayah ini terdiri dari 3 (tiga) zona *recharge* dan 6 (enam) zona *discharge*. Zona *recharge* terdiri atas *recharge* Poasia terletak di Kecamatan Poasia dan Kambu (Pegunungan Abeli) seluas 4 559 ha, *recharge* Kendari yang terletak di Kecamatan Kendari dan Kendari Barat (Pegunungan Nipa-Nipa) seluas 1 675 ha, dan *recharge* Puuwatu terletak di Kecamatan Puuwatu seluas 1 440 ha, sedangkan zona *discharge* terdiri atas *discharge* Lalodambu terletak di Lalodambu seluas 1 066 ha, *discharge* Lepo-lepo terletak di Kecamatan Baruga seluas 436 ha, *discharge* Wanggu terletak di Kecamatan Kadia seluas 327 ha, *discharge* mandonga terletak di Kecamatan Mandonga seluas 180 ha, *discharge* Baruga terletak di Kecamatan Baruga seluas 144.4 ha, dan *discharge* Wua-wua terletak di Kecamatan Kadia seluas 98 ha. Hal ini ditunjukkan pada arah aliran yang mengalir dari elevasi muka air tanah tinggi ke muka air tanah rendah.

Pola aliran air tanah pada pengunungan Nipa-Nipa, air tanah bergerak dari utara ke arah selatan dan pada pegunungan Abeli bergerak dari Barat ke arah Timur masing-masing mengalir ke arah Teluk Kendari. Pada bentuklahan daratan air tanah bergerak dari Barat ke Timur menuju Teluk Kendari dan Timur Ke Barat mengalir ke DAS Wanggu. Arah aliran bentuklahan perbukitan terbagi dua yaitu dari Timur ke Barat mengalir ke Sungai Pohara dan Barat ke Timur ke arah Teluk Kendari. Bentuklahan daratan alluvial bergerak dari Selatan ke arah Utara dan bentuklahan kipas aluvial mengalir dari Utara ke arah Selatan, selanjutnya masing-masing mengalir masuk ke DAS Wanggu hingga bermuara ke Teluk Kendari.



Gambar 4 Pola Aliran Air Tanah

#### b) Karakteristik Akuifer

Karakteristik akuifer dapat ditentukan dari nilai konduktifitas, tebal akuifer dan transmisivitas. Konduktifitas hidraulik adalah fungsi dari media porus yang memiliki prositas, tingkat hubungan antar pori-pori, tekstur dan sortasi dari material penyusun akuifer dalam meloloskan air dan disimbolkan dengan  $K$ . Semakin kasar tekstur dengan struktur lepas maka semakin tinggi batuan untuk meloloskan air, sebaliknya semakin halus tektur dengan struktur tidak beraturan maka semakin rendah batuan meloloskan air (Santosa dan Adji 2014). Nilai  $K$  dapat ditentukan dengan melakukan uji pompa (*pumping test*). Penelitian ini menggunakan data uji

pompa yang diperoleh dari Dinas Energi dan Sumberdaya Mineral (DESDM) Provinsi Sulawesi Tenggara. Wilayah ini memiliki rerata debit pemompaan sebesar 1.42 liter/detik. Selanjutnya untuk mengetahui nilai K maka nilai debit pompa dibagi dengan gradien hidraulik (Tabel 4). Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai K pada wilayah ini bervariasi dengan nilai rerata sebesar 10.2 m/hari atau tergolong tinggi ( $>10$  m/hari). Nilai K tertinggi dan terendah berada pada bentuklahan BPD sebesar 21.6 m/hari dengan material batuan berupa batupasir kasar dengan pola aliran dari Barat-Timur pada penggunaan Abeli dan terendah sebesar 3.93 m/hari pada pola aliran dari Utara-Selatan pada penggunaan Nipa-Nipa.

Tabel 3 Karakteristik Akuifer Kota Kendari

Bentuk Lahan <sup>1</sup>	Material Batuan <sup>2</sup>	Arah Aliran <sup>2</sup>	K <sup>3</sup> (m/hari)	D <sup>4</sup> (m)	T <sup>2</sup> (m/hari)
Pegunungan	Batuan Metamorf	Utara -Selatan	3.9	2.2	8.5
	Batupasir kasar	Barat – Timur	21.6	20.6	445.4
	Batugamping	Barat Timur Timur-Barat	12.3 8.6	4.6 19.9	56.6 171.7
Perbukitan	Konglomerat,	Selatan-Utara	11.8	4.0	47.1
	Batupasir				
Dataran-Gelombang	Konglomerat,	Barat-Timur	8.6	12.6	109.0
	Batupasir	Timur-Barat	7.9	2.0	15.7
Dataran	Konglomerat,	Barat-Timur	8.6	12.6	109.0
	Batupasir	Timur-Barat	7.9	2.0	15.7
Dataran Aluvial	Pasir,	Selatan-Utara	8.4	2.0	16.4
	Lempung				
Kipas Aluvial	Pasir,	Utara-selatan	8.4	28.0	235.3
	Lempung				
<b>Rerata</b>			<b>10.2</b>	<b>10.7</b>	<b>122.9</b>

Sumber: <sup>1</sup>BPDAS Sampara 2013, <sup>23</sup>DESDM Provinsi Sulawesi Tenggara 2013,<sup>3</sup> Data Primer 2019, <sup>4</sup>BAPPEDA Kota Kendari 2019

Ketebalan akuifer (D) didasarkan dari rekonstruksi hidrostratigrafi akuifer dengan pendugaan geolistrik yang diperoleh dari Badan Perencanaan Pembangunan Daerah (BAPPEDA) kota Kendari dan ESDM Provinsi Sulawesi Tenggara. Wilayah ini memiliki rerata ketebalan akuifer sebesar 10.7 m, dengan ketebalan tertinggi berada pada bentuklahan BPD dan terendah pada bentuklahan KHY dengan material batuan berupa pasir dan lempung.

Nilai transmisivitas (T) akuifer ditentukan dengan cara mengalikan nilai K dan D. Nilai T di wilayah ini berkisar 8.5-445.39 m/hari dengan rerata sebesar 122.9 m/hari atau tergolong dalam kelas rendah ( $< 300$  m/hari). Nilai T tertinggi berada pada wilayah penggunaan Abeli sebesar 445.4 m/hari atau kelas sedang (300-1 000 m/hari) dan terendah 8.5 m/hari atau kelas rendah ( $< 300$  m/hari) pada wilayah penggunaan Nipa-Nipa. Hal ini disebabkan oleh ukuran butir dan ketebalan akuifer.

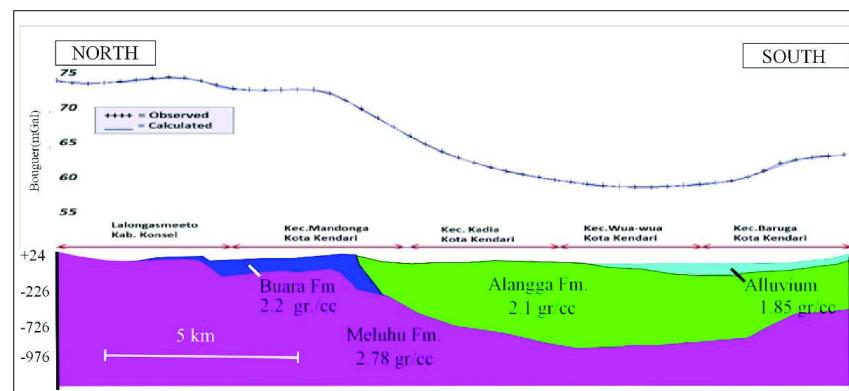
Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa bentuklahan BPD pada penggunaan Abeli memiliki potensi air tanah lebih baik dibandingkan pada bentuklahan lainnya. Hal ini disebabkan, selain memiliki karakteristik akuifer yang

tinggi, wilayah ini memiliki luasan tutupan hutan Nanga-Nanga yang tinggi sebagai *catchment area*.

### c) Sistem Akuifer

Wilayah ini memiliki sistem akuifer berlapis (multilayer aquifer) dan memiliki karakteristik hidrolik relatif sama dan memiliki keterkaitan satu sama lainnya. Pada bagian utara hingga ke selatan berturut-turut dilandasi oleh formasi meluhu berumur jutaan zaman mesozoikum dan batuan kuarter dari formasi buara, formasi alangga dan formasi alluvial berumur plisosen dan holosen (Gambar 6).

Lapisan utama penyusun cekungan air tanah di wilayah ini didominasi oleh formasi alangga tersusun atas batupasir dan konglomerat dengan ketebalan dan kedalaman beragam. Formasi alangga memiliki ketebalan dan kedalaman tertinggi masing-masing berkisar 300m dan 700m sedangkan terendah adalah lapisan alluvial.

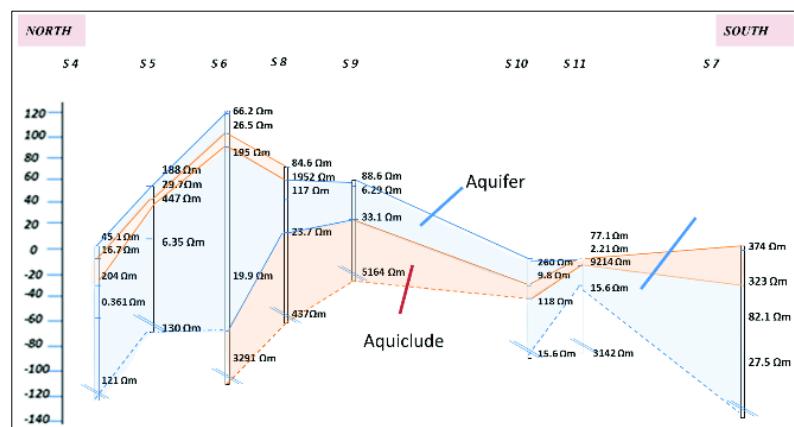


Gambar 5 Sistem Akuifer kota Kendari

Sumber: (Laesapura *et al.* 2017)

### d) Dasar Akuifer

Berdasarkan sifat fisik formasi alangga, formasi buana dan alluvial dikategorikan sebagai dasar akuifer (*aquifer basement*), sedangkan pada formasi meluhu dikategorikan sebagai dasar aquiclude (*aquiclude*) dengan kedalaman yang bervariasi karena dipengaruhi oleh sistem cekungan air tanah (Leasanpura *et al.* 2017).



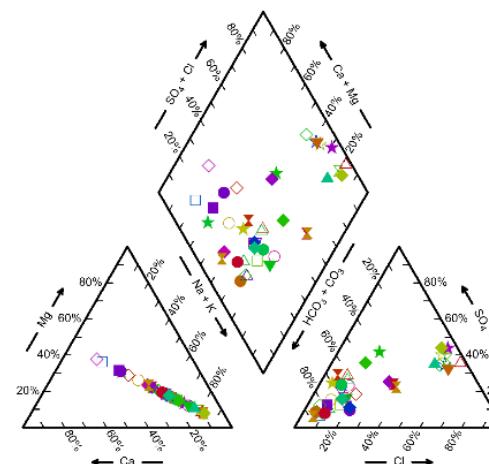
Gambar 6 Hidrostratigrafi arah utara-selatan kota kendari

Sumber: (Laesapura *et al.* 2017)

### 3.3.3 Karakteristik Hidrogeokimia Air Tanah

#### a) Fasies Hidrogeokimia Air Tanah

Hidrogeokimia air tanah dapat diidentifikasi berdasarkan perbedaan dan genesis air tanah yang sangat dipengaruhi oleh kondisi litologi batuan sebagai media akuifernya. Proses identifikasi dilakukan dengan cara memploting senyawa ion positif (kation) terdiri dari  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  dan ion negatif (anion) terdiri dari  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{F}^-$  dalam satuan milliequivalent per liter (Meq/l) pada diagram piper (Gambar 8). Diagram piper memiliki keunggulan dalam memplot komposisi air karena dapat menjelaskan hubungan dan variasi jenis air tanah pada suatu wilayah (Agarwal *et al.* 2019) dengan efektif dan efisien. Diagram piper terdiri dari dua segitiga (plot kation dan anion) dan gabungan ke dua plot tersebut yang berbentuk bujur sangkar/berlian. Dalam penelitian ini, sampel diplot dalam diagram piper menggunakan software AqQA (Rock ware) versi trial dan ion yang memiliki kandungan > 50% digunakan untuk menentukan fasies hidrogeokimia air tanah (Ravikumar *et al.* 2011).



Gambar 7 Diagram piper sampel air tanah di kota Kendari

Hasil analisis diagram piper (Gambar 8) pada bentuk bujur sangkar atau berlian, fasies air tanah didominasi oleh *mixed CaNaHCO<sub>3</sub>* (47.5%) > *NaCl* (30%) > *CaHCO<sub>3</sub>* (22.5%) (Tabel 5). Fasies *mixed CaNaHCO<sub>3</sub>* menunjukkan bahwa air tanah tersebut berasa tawar dan sedikit asin. Kondisi ini banyak dijumpai di pusat kota dan kota lama dengan karakteristik batuan metamorf, batupasir dan batugamping. Hal ini dimungkinkan akibat jebakan air asin dimasa lampau.

Fasies air tanah bertipe *NaCl* tergolong dalam *saline water* atau air payau akibat rendahnya kecepatan aliran air tanah, pertukaran ion, kontak lama antara air dengan jenis batuan (Sahu *et al.* 2016; Aghazadeh *et al.* 2017), dan intrusi air laut. Akuifer air tanah tersebut cenderung mengalami *freshing-salinization* akibat tekanan hidrolika dan pasang surut air laut (Rianda *et al.* 2017). Kondisi ini dapat dijumpai di sekitar teluk Kendari dengan karakteristik batupasir, konglomerat dan pasir.

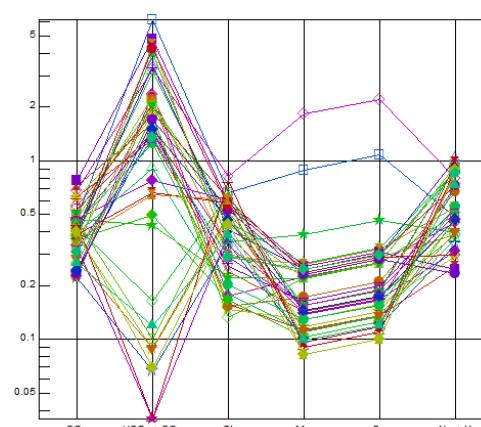
Fasies tipe *CaHCO<sub>3</sub>* menunjukkan bahwa asam lemah melebihi asam kuat (Qian *et al.* 2016) dan akuifer air tanah cenderung mengalami *freshening* (Rianda *et al.* 2017) sehingga menghasilkan kualitas air yang baik atau air tawar. Kondisi ini dijumpai pada daerah hulu dengan kondisi tutupan lahan vegetasi mendominasi.

Tabel 4 Karakteristik air tanah di kota Kendari bedasarkan diagram piper

No	Tipe	No Sampel	Jumlah Sampel	
			Nilai	%
<b>Klasifikasi Kation+Anion</b>				
	<i>Mixed CaNaHCO<sub>3</sub></i>	3-4, 7, 9-11, 13-15, 19, 22-24, 26, 31-33, 35, 40	19	47.5
	<i>NaCl type</i>	12, 17-18, 20, 25, 27-28, 34, 36-39	12	30
	<i>CaHCO<sub>3</sub> type</i>	1-2, 5-6, 8, 16, 21, 29-30	9	22.5
<b>Kation</b>				
	$\text{Na}^++\text{K}^+$	3-4, 7, 9-15, 17-20, 22-28, 31-40	31	77.5
	<i>No dominant</i>	1-2, 5-6, 8, 16, 21, 29-30	12	22.5
<b>Anion</b>				
	$\text{HCO}_3^-$	1, 3-6, 8-11, 13-16, 19, 21-24, 26-27, 29-33, 35, 38, 40	28	70
	<i>No dominant</i>	12, 17, 20, 25, 36-37, 39	7	17.5
	$\text{Cl}^-$	2, 7, 18, 28, 34	5	12.5

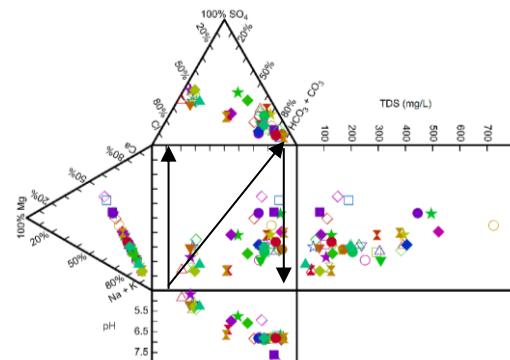
Sumber: Data Primer, 2019

Pola komposisi ion utama pada segitiga kiri bawah sebagai kation, menunjukkan bahwa sebagian besar sampel tersebar dan didominasi oleh tipe  $\text{Na}^++\text{K}^+$  (77.5%) > ion *non dominan* atau ion campuran (22.5%), sedangkan pada segitiga kanan bawah sebagai anion, didominasi oleh tipe  $\text{HCO}_3^-$  (70%) > ion *non dominan* atau ion campuran (17.5%), dan tipe  $\text{Cl}^-$  (12.5%). Hal ini menunjukkan bahwa kation tipe  $\text{Na}^++\text{K}^+$  bersumber dari air hujan yang jatuh ke permukaan dan masuk ke akuifer melalui aliran perkolasasi, sedangkan anion tipe  $\text{HCO}_3^-$  bersumber dari pelapukan karbonat akibat kontaminasi batuan dan jenis air pada akuifer dalam kurun waktu yang lama (Xiao *et al.* 2015). Selanjutnya, untuk mengetahui kosentrasi total ion utama dalam skala log digunakan diagram Schoeller (Gambar 9). Hasil analisis secara visual menunjukkan bahwa ion kation didominasi oleh kandungan  $\text{Na}^++\text{K}^+$  dan ion anion didominasi oleh  $\text{HCO}_3^-$ . Hal ini menguatkan hasil klasifikasi dari diagram piper.



Gambar 8 Diagram schoeller sampel air tanah di kota Kendari

Diagram durov menyediakan lebih banyak informasi tentang hidrogeokimia selain dapat mengidentifikasi jenis air tanah juga dapat menampilkan beberapa proses geokimia dalam memahami dan mengevaluasi kualitas air tanah. Hasil analisis diagram Durov (Gambar 10) menunjukkan bahwa sebagian besar air tanah berada dalam fase *reserve ion excanghe* atau pertukaran ion terbalik dan fase *dissolution of mixing* atau pelarutan campuran.



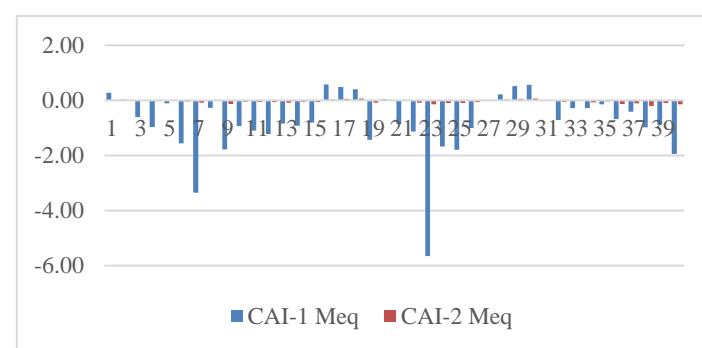
Gambar 9 Diagram durov sampel air tanah di kota Kendari

### b) Evolusi Hidrogeokimia Air Tanah

Sumber ion utama digunakan untuk mengidentifikasi evolusi hidrogeokimia air tanah akibat interaksi air dan batuan dalam akuifer yang mengarah pada pertukaran ion, pelarutan mineral karbonat dan pelapukan silika/halit (Kumar *et al.* 2009).

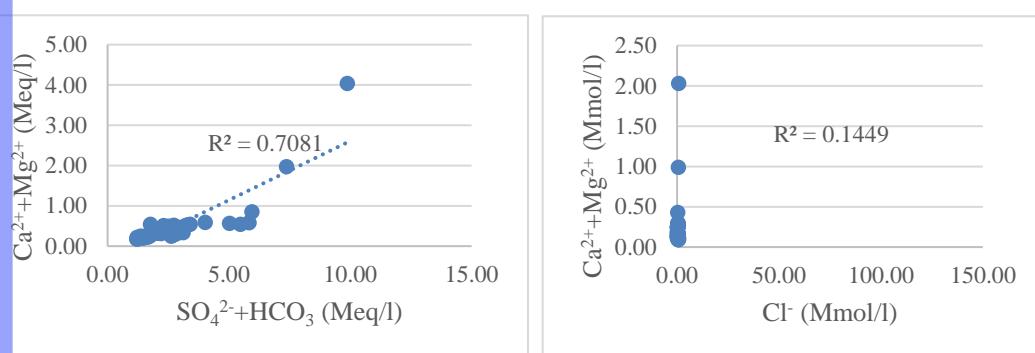
#### (1) Pertukaran ion

Pertukaran ion merupakan salah satu proses penting dalam mempengaruhi konsentrasi ion dalam air tanah. Pertukaran ion ditentukan dengan menggunakan *Chloro-alkaline indices* (CAI-1 and CAI-2). Pertukaran ion terjadi apabila  $\text{Na}^+$  atau  $\text{K}^+$  terhadap  $\text{Mg}^{2+}$  atau  $\text{Ca}^{2+}$  bernilai positif, namun apabila bernilai negatif maka terjadi pertukaran ion terbalik (Schoeller 1967). Hasil analisis menunjukkan bahwa air tanah di kota Kendari didominasi oleh pertukaran ion terbalik (75% atau 30 sampel), sedangkan pertukaran ion (25% atau 10 sampel) (Gambar 11). Selanjutnya, Plot  $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$  dengan  $\text{SO}_4^{2-}+\text{HCO}_3^-$  juga dapat menentukan pertukaran ion, jika kecenderungan titik sampel berada di bawah garis ( $> \text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-$ ) berarti terjadi pertukaran ion, sebaliknya, jika kecenderungannya berada di atas garis ( $> \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ ) maka terjadi pertukaran ion terbalik (Fisher dan Mullican 1997; Kumar *et al.* 2009).



Gambar 10 Diagram Bar CAI-1 dan CAI-2 air tanah di Kota Kendari

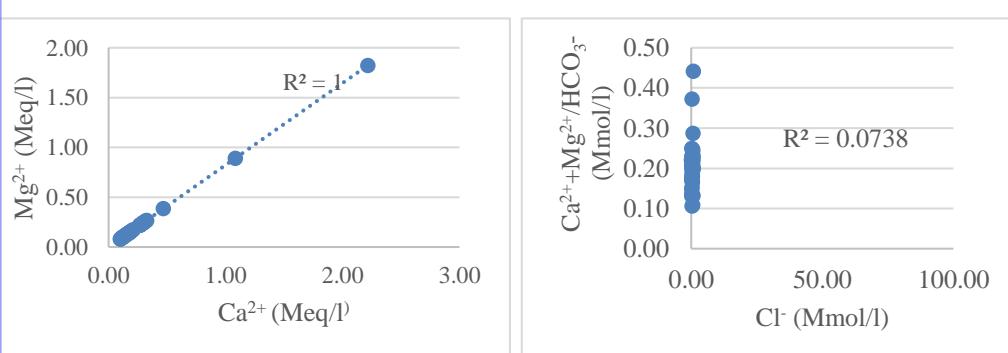
Hasil analisis menunjukkan bahwa air tanah di dominasi oleh pertukaran ion terbalik (70% atau 28 sampel) dan pertukaran ion (30% atau 12 sampel) (Gambar 12a). Hasil ini mendukung pernyataan CAI sebelumnya. Hal ini disebabkan oleh dominasi reaksi pelarutan kalsit, dolomit dan gypsum yang terletak disekitar garis 1:1 (Kumar *et al.* 2009) dengan tingkat signifikan  $R^2=0.7081$  atau berkorelasi kuat, selain itu, (Gambar 12b) Plot  $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$  dengan  $\text{Cl}^-$  (Mmol/l) menunjukkan bahwa tidak ada peningkatan  $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$  terhadap  $\text{Cl}^-$  atau tidak berkorelasi ( $R^2=0.1449$ ) sehingga mengindikasikan dan menguatkan hasil CAI dan  $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$  dengan  $\text{SO}_4^{2-}+\text{HCO}_3^-$  bahwa telah terjadi pertukaran ion terbalik pada akuifer air tanah di kota Kendari.



Gambar 11 Hubungan antara (a)  $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$  dan  $\text{SO}_4^{2-}+\text{HCO}_3^-$ , (b)  $\text{Cl}^-$  dan  $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$

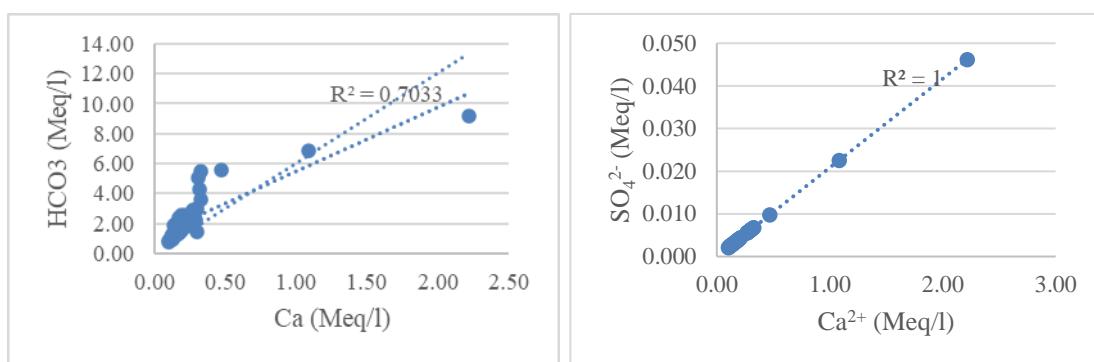
## (2) Pelapukan dan Pelarutan Karbonat

Pelapukan dan pelarutan karbonat adalah ion utama yang sangat mempengaruhi proses mineralisasi air tanah (Abbas *et al.*, 2015) dalam akuifer. Proses pelapukan dan pelarutan karbonat disebabkan oleh masuknya air ke dalam tanah/batuhan baik melalui saluran irigasi dan/atau infiltrasi curah hujan. Rasio  $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$  dengan  $\text{SO}_4^{2-}+\text{HCO}_3^-$  (Gambar 12a) adalah 1:1, titik sampel yang terletak di sepanjang garis menunjukkan bahwa ion telah dihasilkan dari pelapukan karbonat dan silikat sedangkan titik sampel yang berada di atas garis ( $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+} > \text{SO}_4^{2-}+\text{HCO}_3^-$ ) menunjukkan pelapukan karbonat dan di bawah garis ( $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+} < \text{SO}_4^{2-}+\text{HCO}_3^-$ ) indikasi pelapukan silikat (Rajmohan dan Elango 2004; Kumar *et al.* 2006; Kumar *et al.* 2009). Hasil analisis air tanah di kota Kendari didominasi oleh pelapukan karbonat (90% atau 36 sampel) dan pelapukan silikat (10% atau 4 sampel).



Gambar 12 Hubungan antara (a)  $\text{Ca}^{2+}$  dan  $\text{Mg}^{2+}$ ; (b)  $\text{Cl}^-$  dan  $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}/\text{HCO}_3^-$

Kandungan  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  dan  $\text{HCO}_3^-$  dalam air tanah menunjukkan dominasi pelarutan dolomit dan kalsit, namun juga dipengaruhi oleh pelapukan silikat dan/atau pertukaran ion (Daniele *et al.* 2013; Li *et al.* 2013). Jika rasio  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+} = 1$  maka terjadi pelarutan dolomit, dan jika menunjukkan rasio yang lebih tinggi maka dapat diindikasikan pelarutan kalsit dalam air tanah (Mayo dan Loucks 1995). Hasil analisis menunjukkan bahwa air tanah di kota Kendari dilihat dari Ca dan Mg berkorelasi kuat ( $R^2=1$ ) atau  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}=1$  (Gambar 13a) menunjukkan bahwa keseluruhan sampel air tanah memiliki komposisi air yang dihasilkan oleh pelapukan dolomit oleh asam karbonat. Rasio  $(\text{Mg}^{2+}+\text{Ca}^{2+})/\text{HCO}_3^-$  terhadap  $\text{Cl}^-$  dalam satuan Mmol tidak berkorelasi ( $R^2=0.0738$ ) atau proses pelapukan hanya bersumber dari pelapukan karbonat (Gambar 13b). Hal ini memperkuat pernyataan sebelumnya. Akan tetapi, dimungkinkan juga terdapat pelapukan kalsit oleh asam sulfat yang bersumber dari emisi kendaraan dan industri yang terlarut dalam hujan dan masuk ke dalam tanah/batuhan melalui infiltrasi dan saluran perlokasi.

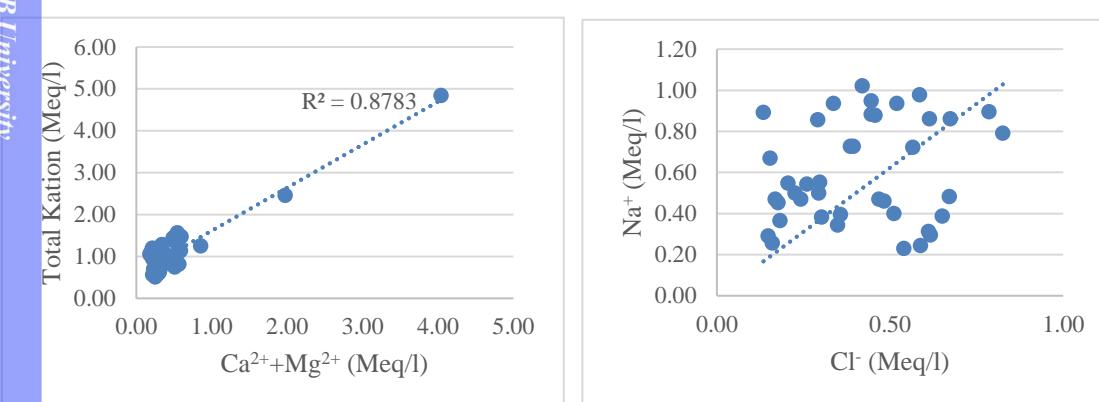


Gambar 13 Hubungan antara (a) Ca dan  $\text{HCO}_3^-$ ; (b) Ca dan  $\text{SO}_4^{2-}$

Kandungan asam karbonat dan asam sulfat dalam air tanah dapat meningkatkan reaksi pelapukan. Pelapukan dan pelarutan karbonat dipengaruhi oleh asam karbonat maka rasio  $\text{Ca}^{2+}/\text{HCO}_3^-$  terlarut 1:1, dan hasil pelapukan kalsit adalah 1:2, sedangkan jika pelapukan karbonat oleh asam sulfat maka rasio  $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$  adalah 1:1 (Das dan Kaur 2001; Kumar *et al.* 2009). Hasil analisis menunjukkan bahwa air tanah di kota Kendari sebagian besar pelapukan disebabkan oleh pelapukan karbonat atau terletak diatas garis 1:1 dan hanya satu sample yang terletak di bawah garis 1:1 atau pelapukan kalsit, sedangkan pelapukan karbonat oleh asam sulfat menunjukkan keseluruhan sampel air tanah berada di baris 1:1 atau berkorelasi kuat ( $R^2 =1$ ) (Gambar 14). Hal ini mengindikasikan bahwa dengan adanya asam sulfat dari dolomit dapat mendominasi pelapukan kalsit dan pembubaran gypsum (Kumar *et al.* 2009; Veizer dan Mackenzie 2013).

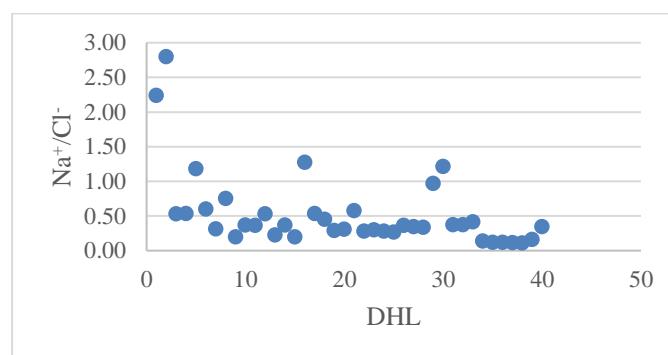
### (3) Pelapukan Silikat/Halit

Pelapukan silikat/halit merupakan salah satu proses geokimia dalam mengendalikan kandungan ion utama air tanah dalam akuifer (Rajmohan dan Elango 2004; Kumar *et al.* 2006). Identifikasi pelapukan silikat/halit ditentukan dengan menggabungkan antara  $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$  dengan total kation. Jika rasio  $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$  dengan total kation memiliki hubungan linear maka terjadi pelapukan mineral silikat/halit (Kumar *et al.* 2009).



Gambar 14 Hubungan (a)  $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$  dan Total kation; (b)  $\text{Cl}^-$  dan  $\text{Na}^+$

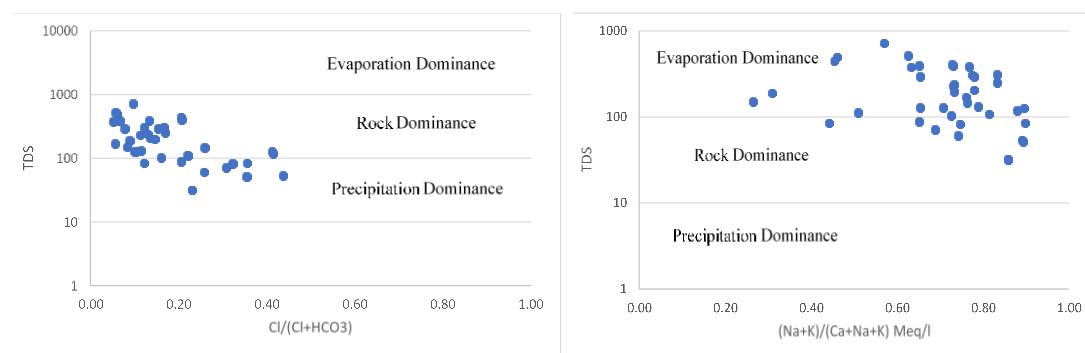
Konsentrasi  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  terhadap DHL dapat dijadikan indikator dalam proses pelapukan mineral batuan dan evaporasi (Kumar *et al.* 2009). Jika rasio  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  dalam satuan molar mendekati dan/atau sama dengan 1 maka pelapukan halit mempengaruhi  $\text{Na}^+$ , sedangkan jika  $> 1$  maka pelepasan  $\text{Na}^+$  berasal dari pelapukan silikat. Hasil analisis menunjukkan bahwa rasio  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  terhadap DHL pada sampel air tanah di kota Kendari berkisar 0.11-2.80 Mmol. Hal ini menunjukkan bahwa pelepasan  $\text{Na}^+$  sebagian besar (87.5%) dipengaruhi oleh pelapukan halit ( $< 1$  mmol), sedangkan 12.5% dipengaruhi oleh pelapukan silikat (Gambar 16).



Gambar 15 Hubungan antara  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  dengan DHL (Mmol/l)

c) Mekanisme Pembentukan Hidrogeokimia Air Tanah di Kota Kendari

Pembentukan tipe kimia air tanah dipengaruhi oleh, pelapukan batuan, penguapan, kristalisasi dan presipitasi (Salem *et al.* 2016; Aghazadeh *et al.* 2017). Wilayah tropis seperti Indonesia hanya dipengaruhi oleh faktor pelapukan batuan, penguapan dan presipitasi atau curah hujan. Gibbs telah banyak digunakan untuk studi hidrogeokimia (Feth 1971; Naseem *et al.* 2010; Liu *et al.* 2015). Hal ini digunakan untuk mengetahui hubungan hidrogeokimia air tanah dan ketiga faktor tersebut. Rasio Gibbs dihitung dengan menghubungkan rasion  $\text{Na}^+/( \text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$  dan  $\text{Cl}^-/( \text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$  terhadap nilai TDS.



Gambar 16 Diagram Gibbs (a) anion; (b) kation air tanah di kota Kendari

Hasil analisis menunjukkan bahwa sebagian besar sampel pada anion berada pada plot *rock dominance*, artinya mekanisme pembentukan hidrogeokimia air tanah dikendalikan oleh pelapukan mineral batuan (Murkute 2014). Selain itu, terdapat sampel yang dipengaruhi oleh *precipitation dominance* atau curah hujan walaupun pengaruhnya sedikit, sedangkan pada kation didominasi oleh *evaporation dominance* dan *rock dominance* (Gambar 17). Hal ini menunjukkan bahwa pembentukan hidrokimia air tanah di kota Kendari tidak hanya dipengaruhi oleh *rock dominance* namun juga dipengaruhi oleh *evaporation dominance* dan *precipitation dominance*. Hal ini mendukung pernyataan sebelumnya tentang evolusi hidrogeokimia air tanah di kota Kendari.

### 3.3.4 Potensi Air Tanah

Potensi air tanah merupakan suatu penilaian yang didasarkan pada jumlah ketersediaan dan kualitas air tanah guna mendukung penyediaan air bersih bagi masyarakat (domestik) maupun non domestik (komersil).

#### a) Ketersediaan Air Tanah

Ketersediaan air tanah suatu wilayah bersifat dinamis. Hal ini dipengaruhi oleh mekanika fluida suatu wilayah. Oleh karena itu, untuk mengetahui ketersediaan air tanah didasarkan pada hukum Darcy. Berdasarkan hasil perhitungan menunjukkan bahwa wilayah ini memiliki potensi air tanah total sebesar 37 885 m<sup>3</sup>/hari atau 13 837 372 m<sup>3</sup>/tahun, dengan potensi debit air tanah tinggi atau besar menepati satuan bentuklahan pegunungan dengan material batuan berupa batupasir dan arah aliran Barat-Timur sebesar 10 367 m<sup>3</sup>/hari, sedangkan pada arah aliran Utara-Selatan hanya sebesar 2 183 m<sup>3</sup>/hari. Pada perbukitan memiliki material berupa batugamping dengan arah aliran Barat-Timur dan Timur-

Barat masing-masing memiliki debit air sebesar  $7\ 059\ m^3/\text{hari}$  dan  $1\ 872\ m^3/\text{hari}$ . Kipas alluvial dengan materi penyusun batuan berupa pasir lempungan memiliki potensi sebesar  $6\ 946\ m^3/\text{hari}$  (Tabel 5).

Bentuklahan dataran sedimen dengan material penyusun batuan berupa batuan konglomerat dan batupasir arah aliran dari Barat ke Timur dan Timur Ke Barat masing-masing sebesar  $4\ 994\ m^3/\text{hari}$  dan  $819\ m^3/\text{hari}$ . Bentuklahan daratan sedimen campuran yang berombak sampai bergelombang memiliki potensi air tanah sebesar  $1\ 855\ m^3/\text{hari}$  dengan material batuan penyusun berupa batuan konglomerat dan batupasir dan arah aliran dari Selatan-Utara, sedangkan bentuklahan yang memiliki potensi airtanah kecil atau rendah yaitu dataran alluvial sebesar  $788\ m^3/\text{hari}$  dengan material penyusun berupa pasir dengan tekstur halus (Tabel 5).

Tabel 5 Ketersediaan Air tanah berdasarkan Satuan Bentuklahan

Bentuklahan <sup>1</sup>	Arah Aliran <sup>2</sup>	Debit Air Tanah <sup>2</sup>	
		( $m^3/\text{hari}$ )	( $m^3/\text{tahun}$ )
Pegunungan	Utara-Selatan	3 183	1 162 503
	Barat-Timur	10 367	3 786 715
Perbukitan	Barat-Timur	7 059	2 578 450
	Timur-Barat	1 872	683 704
Dataran-Gelombang	Selatan-Utara	1 855	677 656
Dataran	Barat-Timur	4 994	1 824 172
	Timur-Barat	819	299 311
Dataran Aluvial	Selatan-Utara	788	287 696
Kipas Aluvial	Utara-Selatan	6 946	2 537 165
Total		37 885	13 837 372

Sumber: <sup>1</sup>BPDAS Sampara 2013, <sup>2</sup>Data Primer 2019

#### b) Imbuhan Air Tanah

Imbuhan air tanah merupakan proses masuknya air pada zona jenuh atau proses pengisian kembali air ke dalam lapisan akuifer pada suatu cekungan air tanah baik bersumber dari air hujan maupun bersumber dari danau dan/atau sungai sebagai aliran lateral yang menyebabkan kenaikan (Rengganis dan Kusumawati 2011). Hal ini mampu menambah volume ketersediaan air tanah ke dalam akuifer secara alamiah. Penelitian ini menggunakan metode persentase curah hujan tahunan, artinya besarnya imbuhan air tanah ke dalam akuifer tergantung besaran jumlah atau intensitas air hujan pada periode tahunana dan luas wilayah, sedangkan kecepatan imbuhan dikontrol oleh kondisi geologi (Santosa dan Adji 2014)

Wilayah ini terdapat tiga *recharge* yaitu *recharge* Kendari seluas 1 675 ha, *recharge* Puuwatu seluas 1 440 ha, dan *recharge* Abeli seluas 4 559 ha. *Recharge* Kendari dan *recharge* Abeli dikontrol oleh kondisi geologi berupa batuan metamorf atau malihan, batuan metamorf lapuk (batupasir malih), dan batupasir dan konglomerat ( $R_f = 0.15$ ), sedangkan *recharge* Puuwatu dikontrol oleh kondisi geologi berupa batupasir, batu konglomerat dan alluvial ( $R_f = 0.2$ ). Insensitas hujan tahunan pada periode 2013-2018 ketiga lokasi tersebut memiliki rerata sebesar 2



340 mm/tahun (*Recharge* Kendari), 2 105 mm/tahun (*Recharge* Puuwatu), dan 2 077 mm/tahun (*Recharge* Abeli).

Hasil analisis menunjukkan total imbuhan air tanah ditiga lokasi adalah 26 589 573 m<sup>3</sup>/tahun. Zona *recharge* yang memiliki kontribusi besar hingga terkecil dalam menyuplai volume air ke dalam akuifer adalah *recharge* Abeli sebesar 14 202 197 m<sup>3</sup>/tahun, *recharge* Kendari (7 840 396 m<sup>3</sup>/tahun), dan *recharge* Puuwatu (4 546 980 m<sup>3</sup>/tahun) (Tabel 6). Besaran imbuhan air tanah selama periode 2013-2018 mengalami fluktuasi, periode 2013-2015 ketiga lokasi tersebut mengalami penurunan jumlah imbuhan air tanah, selanjutnya periode 2016-2017 mengalami kenaikan jumlah imbuhan, dan selanjutnya kembali mengalami penurunan pada tahun 2018. Hal ini disebabkan oleh jumlah atau intensitas curah hujan yang terjadi di wilayah tersebut, selain itu dipengaruhi oleh luasan zona *recharge*.

Tabel 6 Imbuhan air tanah periode 2013-2018

Tahun	<i>Recharge</i> Kendari		<i>Recharge</i> Puuwatu		<i>Recharge</i> Abeli		Total Imbuhan Air Tanah
	CH	Imbuhan	CH	Imbuhan	CH	Imbuhan	
2013	2 616	8 762 595	2 762	5 965 920	2 454	16 778 944	31 507 459
2014	2 265	7 588 420	2 669	5 765 040	2 084	14 248 015	27 601 475
2015	1 591	5 329 850	2 143	4 627 800	1 502	10 272 795	20 230 445
2016	2 153	7 211 210	1 685	3 639 600	1 916	13 101 198	23 952 008
2017	3 030	10 150 500	1 786	3 857 760	2 347	16 046 540	30 054 800
2018	2 388	7 999 800	1 586	3 425 760	2 159	14 765 689	26 191 249
rerata	2 340	7 840 396	2 105	4 546 980	2 077	14 202 197	26 589 573

Sumber: Data Primer, 2019

### c) Ketersediaan Air Tanah Total dan *Safety Yield*

Ketersediaan air tanah total adalah jumlah debit air tanah dalam suatu akuifer ditambah dengan jumlah imbuhan air tanah yang masuk ke dalam akuifer. Debit air tanah dalam penelitian ini diasumsikan memiliki volume air tanah yang sama setiap tahun, sedangkan imbuhan air tanah dipengaruhi oleh intensitas curah hujan yang jatuh dan masuk ke dalam akuifer. Hasil analisis menunjukkan bahwa wilayah ini memiliki rerata ketersediaan air tanah total sebesar 40 028 621 m<sup>3</sup>/tahun, dengan ketersediaan terendah terjadi pada tahun 2015 dan tertinggi pada tahun 2013 masing-masing sebesar 34 067 817 m<sup>3</sup>/tahun dan 45 344 831 m<sup>3</sup>/tahun (Tabel 7).

*Safety yield* merupakan nilai yang menunjukkan batas maksimal pemanfaatan air tanah dalam suatu wilayah guna menjaga keseimbangan antara ketersediaan air tanah dengan jumlah penurapan atau pengambilan sehingga tidak terjadi dampak negatif, seperti penurunan MAT, *land subsidence*, dan intrusi air laut yang pada akhirnya juga mengakibatkan kerugian ekonomi suatu wilayah, maka perlu diketahui volume penurapan/pemanfaatan aman. Volume air tanah yang dapat dimanfaatkan untuk kebutuhan air bersih hanya sebesar 0.5 dari volume air tanah total (Todd 1981). Hasil analisis menunjukkan bahwa rerata nilai *safety yield* sebesar 20 213 472 m<sup>3</sup>/tahun.

Tabel 7 Ketersediaan air tanah total dan *safety yield*

Tahun	Debit Air Tanah	Imbuhan Air Tanah	Ketersediaan Air Tanah Total	<i>Safety Yield</i>
2013	13 837 372	31 507 459	45 344 831	22 672 415
2014	13 837 372	27 601 475	41 438 847	20 719 423
2015	13 837 372	20 230 445	34 067 817	17 033 908
2016	13 837 372	23 952 008	37 789 380	18 894 690
2017	13 837 372	30 054 800	43 892 172	21 946 086
2018	13 837 372	26 191 249	40 028 621	20 014 311
Rerata	13 837 372	26 589 573	40 426 945	20 213 472

Sumber: Data Primer, 2019

### 3.3.5 Kualitas Air Tanah

Air tanah merupakan sumber utama penduduk kota Kendari dalam memenuhi kebutuhan air bersih baik melalui sumur gali maupun sumur bor, oleh karena itu, ketersediaan data kualitas air tanah sangat penting bagi masyarakat. Penelitian ini, data kualitas air tanah dilihat berdasarkan parameter fisik, kimia dan mikrobiologi secara rinci dijelaskan sebagai berikut.

#### a) Parameter Fisik

Identifikasi kualitas fisik air tanah di Kota Kendari dianalisis menggunakan beberapa parameter yaitu suhu, DHL, TDS, TSS, kekeruhan, dan pH. Suhu memiliki peranan penting dalam mengendalikan ekosistem perairan, perubahan suhu dapat berpengaruh pada proses fisika, kimia dan biologi dalam badan air (Effendi 2003). Suhu air tanah sangat dipengaruhi oleh suhu udara (Sunarwan *et al.* 2015) sedangkan suhu udara dipengaruhi oleh elevasi suatu wilayah. Semakin tinggi suatu wilayah maka semakin rendah suhu udara, sebaliknya semakin rendah suatu wilayah maka semakin tinggi suhu udara. Kota Kendari didominasi topografi datar dengan kisaran elevasi sebesar 3-30 mdpl dan kisaran suhu udara yaitu 21-35°C (BPS Kota Kendari 2020a). Suhu udara yang tinggi berdampak juga pada suhu air tanah dangkal menjadi tinggi. Rerata nilai suhu air tanah dangkal di Kota Kendari sebesar 29.28 °C dengan nilai terendah 26°C dan tertinggi sebesar 35°C serta memiliki standar deviasi sebesar 1.21 (Tabel 8).

Tabel 8 Statistik deskriptif parameter fisik air tanah

Parameter	Min	Max	Mean	Std.Dev
Suhu	26	35	29.28	1.21
pH	4.7	7.8	6.31	0.66
DHL	64	1452	393.52	265.64
TDS	32	726	196.98	132.66
TSS	0.5	89.7	7.9075	14.97
Kekeruhan	0.6	48.2	6.7925	9.50

Sumber: Data Primer, 2019

DHL adalah gambaran numerik dari kemampuan air untuk menghantarkan aliran listrik (Effendi 2003). Nilai DHL air tanah dangkal di Kota Kendari berada pada kisaran 64 hingga 1 452  $\mu\text{mhos}$  dengan rata-rata 393.52  $\mu\text{mhos}$  dan standar deviasi sebesar 265.64  $\mu\text{mhos}$  (Tabel 9). Air tanah dangkal di Kota Kendari menunjukkan bahwa terdapat 18 sampel tergolong dalam air tanah sedikit asin dan 82 sampel masih tergolong air tawar dari 100 sampel (Tabel 9).

Tabel 9 Klasifikasi parameter fisik air tanah dangkal untuk air bersih

DHL	Klasifikasi	No Sampel	Jumlah Sampel
< 700	Air Tawar	1-24, 27, 29-32, 39-41, 43-45, 48-56, 58-59, 61, 63-81, 83, 85-100	82
700- 2000	Air tanah sedikit asin	25-26, 28, 33-38, 42, 46-47, 57, 60, 62, 82,84	18
2 000-10 000	Air tanah asin tingkat sedang	-	-
10 000-45 000	Air tanah asin tingkat Tinggi	-	-
> 4 5000	Air laut	-	-
TDS	Klasifikasi	No Sampel	Jumlah Sampel
< 500	Aman dikonsumsi sebagai Air minum	1-35, 37-41, 43-100	88
500-1 000	Diizinkan untuk dikonsumsi sebagai Air minum	36, 42	2
1 000-3 000	Penggunaan untuk irigasi	-	-
>3 000	Tidak layak untuk air minum dan irigasi	-	-
pH	Klasifikasi	No Sampel	Jumlah Sampel
< 6.5	Tidak Layak dikonsumsi (asam)	8-9, 11-12, 15-16, 21-23, 48-52, 55-56, 59, 61, 63-66, 68, 70, 72-78, 80, 87-91, 93-100	48
6.5-8.5	Layak dikonsumsi	1-7, 10, 13-14, 17-20, 24-47, 53-54, 57-58, 60, 62, 67, 69, 71, 79, 81-86, 92	52
> 8.5	Tidak Layak dikonsumsi (alkalis/basa)	-	-
Total			100

Sumber: Data Primer, 2019

Nilai TDS dalam air sangat dipengaruhi oleh kondisi geologi, limpasan dari tanah dan aktivitas antropogenik yang menghasilkan limbah baik domestik maupun industri (Effendi 2003). Nilai TDS air tanah dangkal di Kota Kendari termasuk ke dalam kategori fresh water 0-1 000 ppm (R Allan Freez; John A Cherry 1979). Nilai TDS terendah sebesar 32 ppm dan tertinggi 726 ppm. Nilai rerata dari TDS adalah 196.98 dengan standar deviasi sebesar 132.66 (Tabel 9). Berdasarkan (DeWiest 1964), air tanah dangkal di Kota Kendari terbagi ke dalam dua kelas yaitu kelas penggunaan air yang aman untuk dikonsumsi sebagai air minum (<500 ppm) yaitu sampel 88 sampel dan 2 sampel telah melebihi namun masih diizinkan untuk dikonsumsi sebagai air bersih (Tabel 9).

pH merupakan salah satu indikator penting dalam mengidentifikasi kualitas air (Sadat-Noori *et al.* 2014). Nilai pH dalam air secara tidak langsung berkaitan dengan nilai DHL dan TDS (Putri *et al.*, 2016). Nilai pH air tanah dangkal di Kota Kendari rata-rata sebesar 6.31 dengan nilai terendah sebesar 4.7 dan tertinggi 7.8 serta memiliki standar deviasi sebesar 0.66 (Gambar 9). Hal ini menunjukkan bahwa air tanah dangkal di Kota Kendari terdapat 48 sampel yang tidak memenuhi syarat atau tidak layak untuk dikonsumsi sebagai air minum berdasarkan (Permenkes No 32 Tahun 2017) yakni 6.5-8.5 dan 52 sampel berada pada kisaran baku mutu (Tabel 9).

Nilai *Total suspended solids* (TSS) berkorelasi positif dengan kekeruhan, semakin tinggi nilai TSS maka nilai kekeruhan juga tinggi (Effendi 2003). Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai TSS berkisar 0.5 hingga 89.7 mg/l dengan rerata 7,9 mg/l dan memiliki standar deviasi sebesar 15,0 mg/l, sedangkan nilai kekeruhan berkisar 0.6 hingga 48.2 dengan rerata 6.79 dan standar deviasi 9.50 (Tabel 9). Sesuai (PP 82/2001) standar, terdapat satu stasiun (S2) yang melebihi baku mutu (89.7 mg/l) berdasarkan parameter TSS dan dua stasiun (S2 dan S5) yang melebihi baku mutu (Permenkes 32/2017) berdasarkan parameter kekeruhan untuk dikonsumsi sebagai air bersih masyarakat. Lokasi station tersebut diperoleh di pusat kota tidak jauh dari badan sungai Wanggu yang telah mengalami sedimentasi, sehingga dimungkinkan dipengaruhi oleh erosi tanah yang masuk ke badan air (Effendi 2003), akibat rendahnya tutupan hutan di wilayah studi sebaliknya laju perkembangan permukiman terus meningkat.

### b) Parameter Kimia

*Dissolved Oxygen* (DO) merupakan konsentrasi oksigen terlarut dalam air (Effendi *et al.* 2015) dan dampak pembuangan limbah ke badan air sangat ditentukan oleh keseimbangan sistem oksigen (Saksena *et al.* 2008). Polutan berupa bahan organik dapat menurunkan kadar oksigen terlarut dalam air hingga mencapai nol (*anaerob*), selain itu, berkurangnya kelarutan oksigen juga dipengaruhi dengan meningkatnya nilai salinitas dalam air (Effendi 2003). Lokasi penelitian ini, sebagian besar wilayahnya berada di pesisir. Kondisi ini dimungkinkan terjadi intrusi air laut ke dalam air tanah sehingga menyebabkan menurunnya kandungan oksigen dalam air tanah. Hal ini, dapat ditunjukkan dengan nilai DO yang tidak memenuhi baku mutu sesuai PP 82/2001 sebanyak 4 stasiun yang jaraknya tidak jauh dari pesisir. Nilai DO terendah sebesar 4.8 mg/l dan tertinggi 7.8 mg/l serta rerata 6.6 mg/l (Tabel 10).

*Biochemical Oxygen Demand* (BOD) merupakan ukuran jumlah oksigen yang digunakan oleh mikroorganisme untuk mengurai bahan organik dalam air



selama periode lima hari (APHA 2005). Nilai BOD yang tinggi dapat mengurangi kandungan DO dalam air (Fatoki *et al.* 2001). Nilai BOD di kota Kendari berkisar antara 0.5-3.4 mg/l dengan rerata 3.4 mg/l dan standar deviasi mencapai 5.7 mg/l. Kandungan BOD yang tinggi mengindikasikan bahwa air tanah di kota Kendari telah terkontaminasi oleh bahan pencemar organik. Berdasarkan PP 82/2001 menunjukkan bahwa dari 40 sampel terdapat 14 sampel telah melebihi baku mutu air untuk kebutuhan air bersih. Selaras dengan BOD, air tanah yang mengandung nilai *Chemical Oxygen Demand* (COD) tinggi dapat meningkatkan polutan dalam air. Nilai COD dalam air tanah yang dapat dikonsumsi untuk air bersih bagi masyarakat harus berada di bawah 10 mg/l sesuai PP 82/2001. Nilai COD rerata sebesar 10 mg/l dan terendah sebesar 2.1 mg/l serta tertinggi 54.2 mg/l, dengan standar deviasi sebesar 11.5 mg/l (Tabel 10). Dalam penelitian ini dijumpai stasiun yang telah melebihi baku mutu sebanyak 13 stasiun yang berada di pusat kota dengan kepadatan penduduk dan permukiman yang tinggi.

Konsentrasi *Potassium manganate* ( $KM_nO_4$ ) dalam air tanah dapat bersumber baik secara alamiah maupun akibat aktivitas manusia membuang limbah baik limbah domestik, pertanian/kehutanan, industri dan transportasi (Soesanto 1996; Ningrum 2018). Kadar  $KM_nO$  dalam air dapat mempengaruhi kualitas air tanah secara fisik (warna, bau, rasa dan kekeruhan) yang tidak diinginkan serta berdampak pula pada kesehatan masyarakat seperti penyakit diare (Soesanto 1996). Standar kandungan  $KM_nO_4$  menurut Permenkes 32/2017 kadar maksimal yang diperbolehkan adalah 10 mg/l. Kadar  $KM_nO_4$  air tanah di kota Kendari rerata sebesar 2.6 mg/l dengan standar deviasi sebesar 2.2 mg/l. Nilai  $KM_nO_4$  terendah sebesar 0.4 mg/l dan tertinggi sebesar 8.9 mg/l (Tabel 10). Hal ini menunjukkan semua sampel masih di bawah baku mutu untuk air bersih masyarakat.

Polutan nitrit bersumber dari limbah domestik dan industri. Kadar nitrit dalam air relatif kecil karena segera dioksidasi menjadi nitrat (Effendi 2003). Bagi manusia kandungan nitrit lebih toksik dari pada nitrat karena dapat mengakibatkan terganggunya proses pengikatan oksigen hemoglobin apabila melebihi baku mutu air untuk kebutuhan air bersih. Sesuai Permenkes 32/2017, kadar nitrat yang diperbolehkan adalah 1 mg/l dan 10 mg/l untuk nitrat. Kadar nitrit terendah adalah 0 mg/l dan tertinggi 1.03 mg/l, sedangkan kadar nitrat terendah 0 mg/l dan tertinggi 25 mg/l, masing-masing memiliki kadar rerata 0.1 mg/l dan 3.1 mg/l (Tabel 10). Hal ini menunjukkan bahwa terdapat stasiun yang melebihi baku mutu yaitu dua stasiun untuk nitrit dan satu stasiun untuk nitrat. Lokasi yang mengandung nilai nitrit dan nitrat dijumpai pada kawasan permukiman padat dengan kondisi sanitasi yang buruk (saluran drainase dan sumur gali mengalami kebocoran), sehingga dimungkinkan polutan masuk ke dalam air tanah.

Ion Fe dalam air tanah terlarut dalam bentuk kation feron dan ferri. Air yang diperlukan untuk kebutuhan domestik, pengendapan ion ferri dapat mengakibatkan warna kemerahan pada bak mandi, pipa air, pakaian dan mengakibatkan karat pada peralatan rumah yang terbuat dari logam (Effendi 2003). Hasil analisis menunjukkan bahwa kadar Fe dalam air tanah bervariasi dari 0.003 hingga 0.387 mg/l dengan rerata 0.056 mg/l dan standar deviasi 0.09 mg/l (Tabel 10). Air tanah yang mendapatkan cukup aerasi (aerob)  $< 0.3$  mg/l (Wiemer 1990). Hal ini menunjukkan bahwa air tanah di kota Kendari mendapatkan cukup aerasi dan masih di bawah baku mutu air berdasarkan PP 82/2001; Permenkes 32/2017; dan WHO, 2012.

Tabel 10 Statistik Deskriptif Parameter kimia dan mikrobiologi air tanah dalam standar baku mutu untuk kebutuhan air bersih

Parameter	Min	Max	Mean	Std.Dev	PP 82/2001 Kelas I	Permenkes 32/2017	WHO
DO (mg/l)	4.8	7.8	6.6	0.7	≥ 6	-	-
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	2.1	54.2	10	11.5	10	-	-
BOD (mg/l)	0.5	29.5	3.4	5.7	2	-	-
KM <sub>n</sub> O <sub>4</sub> (mg/l)	0.4	8.9	2.6	2.2	-	10	-
Ca (mg/l)	2.01	44.33	5.59	7.06	-	-	200
Mg (mg/l)	1.01	22.17	2.79	3.53	-	-	150
Na (mg/l)	5.3	23.5	13.76	5.67	-	-	200
K (mg/l)	0.04	0.35	0.08	0.05	-	-	12
Cl (mg/l)	4.7	28.9	14.48	6.64	1	-	600
HCO <sub>3</sub> (mg/l)	24.6	280.6	74.11	54.9	-	-	500
CO <sub>3</sub> (mg/l)	30.6	420.4	97.19	79.64	-	-	200
SO <sub>4</sub> (mg/l)	10.6	37.2	19.96	6.55	-	400	250
F (mg/l)	0.003	0.98	0.17	0.28	0,5	1,5	1,5
Nitrate (mg/l)	0	25	3.1	5	10	10	-
Nitrite (mg/l)	0	1.03	0.1	0.2	0,06	1	-
Fe (mg/l)	0.003	0.39	0.06	0.09	-	1	-
As (mg/l)	0.001	0.08	0.01	0.02	-	0,05	0,01
E.Coli	0	12	0.29	1.87	100	0	-
MPN/100ml							
Total Coliform	0	620	15.12	96.82	1000	50	-
MPN/100ml							

Sumber: Data primer, 2019

Arsen merupakan salah satu unsur yang bersifat akut dan kronis terhadap manusia karena dapat mengakibatkan keracunan jika dikonsumsi untuk kebutuhan air bersih, kadar arsen < 0.01 mg/l berdasarkan standar WHO. Kadar arsen dalam air tanah berkisar dari 0.001 hingga 0.079 mg/l dengan rerata sebesar 0.014 mg/l dan standar deviasi 0.02 mg/l (Tabel 10). Hal ini menunjukkan bahwa terdapat 14 sampel yang melebihi baku mutu berdasarkan kadar arsen yaitu terletak di kecamatan Mandonga, Kecamatan Kendari Barat, Kecamatan Kadia, Kecamatan Poasia, Kecamatan Andonohu dan Kecamatan Abeli (Pulau Bungkutoko). Kandungan kadar arsen dalam air tanah di daerah tersebut dipengaruhi oleh pelapukan batuan (Effendi 2003).

Ion utama (*major ion*) banyak dijumpai dalam air tanah baik berupa ion positif (kation) maupun ion negatif (anion). Rerata kemelimpahan kation utama dalam air tanah di kota Kendari didominasi oleh Na > Ca > Mg > K, sedangkan anion adalah CO<sub>3</sub> > HCO<sub>3</sub> > SO<sub>4</sub> > Cl > F. Unsur kation dalam air tanah, Na merupakan salah satu unsur alkali utama yang ditemukan di perairan dan mempengaruhi kesetimbangan keseluruhan kation di perairan (Effendi 2003). Konsentrasi Na dalam air tanah di kota Kendari bervariasi dari 5.3 hingga 23.5 mg/l dengan nilai rerata sebesar 13.76 mg/l dan standar deviasi sebesar 5.67 mg/l (Tabel 11). Keberadaan Ca dalam air tanah merupakan unsur penyusun penting dalam mineral batuan, pada batuan sedimen Ca sangat dipengaruhi oleh senyawa karbonat

dalam bentuk kalsit dan aragonite ( $\text{CaCO}_3$ ), dolomite ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) dan Flourit ( $\text{CaF}_2$ ) (Irawan *et al.* 2009). Rerata kosentrasi Ca dalam air tanah adalah 5.58 mg/l, dengan kisaran 2.01 hingga 44.33 mg/l dan standar deviasi 7.06 mg/l (Tabel 10).

Mg adalah logam alkali tanah yang merupakan penyusun utama mineral ferromagnesian (Irawan *et al.* 2009) dan magnesium karbonat dalam batuan (Effendi 2003). Mg lebih mudah terlarut dibandingkan dengan Ca sehingga jarang mengalami presipitasi dan kedua senyawa tersebut merupakan penyusun utama kesadahan. Kosentrasi Mg dalam air tanah bervariasi dari 1.006 hingga 22.167 mg/l dengan nilai rerata sebesar 2.794 mg/l dan standar deviasi sebesar 3.53 mg/l (Tabel 11). Kosentrasi K dalam air tanah pada batuan beku lebih sedikit dibandingkan dengan Na, namun lebih tinggi pada batuan sedimen dan lebih sulit dipisahkan dari ikatan silikat dibandingkan dengan Na (Irawan *et al.* 2009). Selain itu, pada batuan lempung, K cenderung berikatan dengan produk pelapukan (Hem 1985). Hal ini dapat disimpulkan bahwa tidak ada sampel melebihi baku mutu standar WHO untuk kebutuhan air bersih berdasarkan parameter unsur kation.

Unsur anion dalam air tanah, Ion Cl merupakan salah satu anion anorganik utama yang paling banyak keterdapatannya di alam dibandingkan anion halogen lainnya dan kosentrasinya lebih rendah dibandingkan sulfat dan/atau bikarbonat. Unsur ini mudah berikatan dengan unsur golongan logam, alkali, dan alkali tanah. Unsur yang paling mudah berpasangan adalah natrium klorida ( $\text{NaCl}$ ), kalium klorida ( $\text{KCl}$ ), dan Kalsium klorida ( $\text{CaCl}_2$ ) (Effendi 2003). Kadar Cl dengan konsentrasi tinggi tidak bersifat toksik bagi manusia. Hasil analisis menunjukkan bahwa konsentrasi Cl dalam air tanah bervariasi dari 4.7 hingga 28.9 mg/l dengan rerata 14.483 mg/l dan standar deviasi 6.64 mg/l (Tabel 10). Nilai ion Cl rendah mengindikasikan rendahnya kandungan garam dalam air tanah. Ion  $\text{SO}_4^{2-}$  dihasilkan dari batuan beku dalam bentuk mineral feldspathoid, dan batuan sedimen dalam bentuk evaporit (gyps,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  dan anhidrit) (Hem 1985). Selain itu, juga bersumber dari oksidasi mineral sulfida (Purnama 2004). Konsentrasi  $\text{SO}_4^{2-}$  dengan kadar tinggi dalam air tanah dapat menghasilkan bau dan korosi pada saluran air akibat reduksi  $\text{SO}_4^{2-}$  menjadi hydrogen sulfida dalam kondisi anaerobik (Sawyer dan McCarty 1978) dan mengganggu sistem pencernaan manusia (Effendi 2003). Kadar  $\text{SO}_4^{2-}$  pada air tawar berkisar 2-80 mg/l. Hasil analisis menunjukkan bahwa rerata nilai  $\text{SO}_4^{2-}$  sebesar 19.963 mg/l dan standar deviasi sebesar 6.55 mg/l dengan kisaran 10.6 hingga 37.2 mg/l (Tabel 10). Rendahnya kandungan ion  $\text{SO}_4^{2-}$  dalam air tanah mengindikasinya bahwa tidak dipengaruhi oleh limbah yang dihasilkan aktivitas manusia dan industri.

Ion F merupakan salah satu unsur utama pada kerak bumi dan bersumber dari *fluorspar*, *cryolite*, dan *fluorapatite* (Effendi 2003). Kadar ion F rendah dapat membantu dalam pencegahan gigi, namun apabila diatas 1.7 mg/l maka dapat mengakibatkan pewarnaan pada elemen gigi atau *mottling* (Sawyer dan McCarty 1978) dan kerusakan pada tulang atau keropos (Effendi 2003). Kadar ion F dalam air tanah berkisar dari 0.003 hingga 0.977 mg/l dengan rerata 0.174 mg/l dan standar deviasi 0.28 mg/l (Tabel 10).

Ion  $\text{HCO}_3^-$  bersifat alkalis, bersumber dari batuan gamping dan dolomit (D K Todd 1981) dan keberadaannya tidak stabil. Jika dipanaskan akan terurai membentuk ion  $\text{CO}_3^{2-}$ . Kebaradaan  $\text{CO}_3^{2-}$  sangat berlimpah dalam air tanah dibandingkan  $\text{HCO}_3^-$ . Hasil analisis menunjukkan kisaran konsentrasi  $\text{CO}_3^{2-}$



bervariasi dari 30.6 hingga 420.4 mg/l dengan rerata sebesar 97.190 mg/l dan standar deviasi 79.64 mg/l, sedangkan konsentrasi HCO<sub>3</sub> berkisar 24.6 hingga 280.6 mg/l dengan nilai rerata sebesar 74.113 mg/l dan standar deviasi sebesar 54.90 mg/l (Tabel 10). Hal ini dapat disimpulkan bahwa konsentrasi unsur anion (Cl, SO<sub>4</sub>, F, HCO<sub>3</sub>) masih berada di bawah baku mutu lingkungan berdasarkan standar Permenkes 32/2017 dan WHO. Sedangkan pada ion CO<sub>3</sub> terdapat dua sampel yang melebihi baku mutu yaitu terletak pada kecamatan Mandonga. Kondisi ini dimungkinkan dipengaruhi oleh kondisi batuan berupa batuan karbonat, selain itu, saluran irigasi dan infiltrasi curah hujan yang masuk ke dalam air tanah melalui perkolasi menyebabkan tingginya konsentrasi CO<sub>3</sub> dalam air tanah di wilayah tersebut.

#### (c) Mikrobiologi

Indikator utama dalam menentukan kualitas air tanah berdasarkan parameter mikrobiologi adalah bakteri *Escherichia coli* (E.Coli) dan Coliform total guna untuk menilai keberadaan bakteri patogen dalam air tanah (Vander Zaag *et al.* 2010). Sumber utama pollutant *E.Coli* dan Coliform total dalam air tanah di wilayah perkotaan berasal dari feses manusia. Sesuai (Permenkes 32/2017), kualitas air tanah untuk kebutuhan air bersih maksimal memiliki nilai 0 c/100 ml (*E.Coli*) dan 50 c/100 ml (coliform total). Hasil analisis menunjukkan bahwa kandungan bakteri baik E.Coli dan Coliform total dalam air tanah di wilayah studi masih tergolong aman untuk dikonsumsi sebagai air bersih bagi masyarakat namun terdapat satu stasiun yang memiliki baku mutu yaitu stasiun 40 yang terletak di Kawasan Rusunawa Asrama Mahasiswa Universitas Halu Oleo dengan nilai *E.Coli* dan Coliform total masing-masing sebesar 12 MPN/100ml dan 620 MPN/100ml.

#### d) Indeks Pencemaran Air Tanah

Indeks pencemaran memiliki peranan penting dalam penilaian kualitas air tanah di kota Kendari (Kete *et al.* 2020). Hasil analisis menunjukkan bahwa kota Kendari terbagi ke dalam 3 (tiga) klasifikasi Indeks Pencemaran (IP) yaitu klasifikasi memenuhi baku mutu sebanyak 23 stasiun (56%), kelas cemar ringan sebanyak 15 stasiun atau 37% dan kelas cemar sedang sebanyak 3 stasiun atau 7% (Tabel 11). Nilai IP terendah adalah 0.72 dan tertinggi 8.25 dengan rerata 1.72. Indeks CCME WQI yang memiliki rentan nilai 0-100 (terburuk-terbaik) dan terbagi ke dalam 5 (lima) kelas yaitu buruk (0-44), kurang (45-65), cukup (65-79), baik (80-94), dan sangat baik (95-100). Hasil analisis menunjukkan bahwa kota Kendari memiliki Indeks CCME WQI sebesar 59.76 atau termasuk dalam kategori kurang baik (Tabel 12). Hal ini menunjukkan bahwa kualitas air tanah di kota Kendari sering mengalami gangguan/terancam baik dipengaruhi oleh faktor alamiah yang bersumber dari proses pelapukan batuan maupun aktivitas manusia.

### 3.4 Simpulan

Proses geomorfologi di wilayah ini mempengaruhi karakteristik akuifer baik dari segi hidrogeokimia dan potensi air tanah. Dari segi, karakteristik hidrogeokimia air tanah didominasi oleh *mixed CaNaHCO<sub>3</sub>* (47.5%) > NaCl (30%) > CaHCO<sub>3</sub> (22.5%) dengan proses mekanisme pembentukannya dipengaruhi oleh faktor pelapukan mineral batuan, penguanan dan presipitasi atau curah hujan pada setiap satuan geomorfologi. Tipe *mixed CaNaHCO<sub>3</sub>* banyak dijumpai di pusat

pertumbuhan kota dengan karakteristik batuan metamorf, batupasir dan batugamping. Tipe NaCl dijumpai di sekitar teluk Kendari, sedangkan CaHCO<sub>3</sub> dijumpai pada bagian hulu dominasi tutupan lahan bervegetasi.

Dari segi, potensi air tanah, secara kuantitatif/ketersediaan air tanah, wilayah yang memiliki ketersediaan air tanah total dan *safety Yield* masing-masing sebesar 40 426 945 m<sup>3</sup>/tahun dan 20 213 472 m<sup>3</sup>/tahun. Segi kualitas, Indeks pencemaran air tanah berdasarkan IP terbagi ke dalam 3 (tiga) kategori yaitu kategori memenuhi baku mutu (23 stasiun atau 56%), cemar ringan (15 stasiun atau 37%), dan cemar sedang (3 stasiun atau 7%) dengan nilai indeks terendah 0.72 dan tertinggi 8.25 dengan rerata sebesar 1.72, sedangkan Indeks CCME WQI sebesar 59.76 atau terkategori kurang baik digunakan untuk air bersih secara langung atau perlu dilakukan pengolahan sebelum dikonsumsi. Wilayah yang memiliki tingkat pencemaran sedang dijumpai pada Kawasan permukiman padat dengan kondisi sanitasi buruk. Selain itu, Eksplorasi air tanah yang berlebihan rentan dan berisiko terhadap eksistensi air tanah di masa mendatang. Oleh karena itu, diperlukan studi lanjut tentang penilaian risiko dan kerentanan air tanah di kota Kendari sebagai upaya pengelolaan sumberdaya air tanah berkelanjutan

Tabel 11 Indeks Pencemaran Air Tanah Metode IP di Kota Kendari

Stasiun	Indeks Pencemaran		Stasiun	Indeks Pencemaran	
	Nilai	Klasifikasi		Nilai	Klasifikasi
1	4.21	Cemar ringan	22	1.47	Cemar ringan
2	4.96	Cemar ringan	23	0.97	Memenuhi BM
3	0.94	Memenuhi BM	24	1.26	Cemar ringan
4	0.85	Memenuhi BM	25	1.01	Cemar ringan
5	4.07	Cemar ringan	26	0.85	Memenuhi BM
6	0.99	Memenuhi BM	27	0.78	Memenuhi BM
7	0.98	Memenuhi BM	28	0.72	Memenuhi BM
8	5.16	Cemar sedang	29	0.81	Memenuhi BM
9	0.97	Memenuhi BM	30	0.88	Memenuhi BM
10	0.96	Memenuhi BM	31	0.84	Memenuhi BM
11	1.07	Cemar ringan	32	0.94	Memenuhi BM
12	0.98	Memenuhi BM	33	3.20	Cemar ringan
13	0.96	Memenuhi BM	34	0.91	Memenuhi BM
14	5.11	Cemar sedang	35	0.93	Memenuhi BM
15	0.94	Memenuhi BM	36	1.06	Cemar ringan
16	1.17	Cemar ringan	37	1.13	Cemar ringan
17	0.97	Memenuhi BM	38	0.95	Memenuhi BM
18	1.29	Cemar ringan	39	1.34	Cemar ringan
19	1.02	Cemar ringan	40	0.97	Memenuhi BM
20	0.98	Memenuhi BM	41	8.25	Cemar sedang
21	2.78	Cemar ringan			
			Min: 0.72		Max: 8.25
			Mean: 1.72		

Sumber: Hasil perhitungan, 2019



Tabel 12 Indeks CCME WQI Air Tanah di Kota Kendari

Mutu Air	Stasiun memenuhi Mutu Air		Indeks Pencemaran	
	Jumlah	%	Bobot	Nilai
Memenuhi	23	56%	70	39.3
Cemar Ringan	15	37%	50	18.29
Cemar Sedang	3	7%	30	2.20
Cemar Berat	0	0%	10	0.00
Total	41	100%		59.76

Sumber: Hasil perhitungan, 2019

## IV PENILAIAN RISIKO DAN KERENTANAN AIR TANAH DI KOTA KENDARI

### 4.1 Pendahuluan

Dekade terakhir ini, ketersediaan sumber daya air tanah untuk kebutuhan air baku sangat terbatas disebabkan oleh kondisi hidrologi, ekologi (Arkoprovo *et al.* 2012), perubahan iklim dan aktivitas antropogenik (Psarropoulou ET dan Karatzas GP 2014) dan distribusinya tidak merata karena dipengaruhi oleh faktor geologi suatu wilayah (Santosa dan Adji 2014). Wilayah tropis, umumnya mengandalkan air tanah sebagai sumber air baku masyarakat (Aris *et al.* 2007). Sama halnya dengan masyarakat dan industri di kota Kendari, karena peranan Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) sebagai penyedia air baku tidak bekerja optimal akibat keterbatasan volume air dan jaringan perpipaan. Sebaliknya permintaan akan kebutuhan air baku terus meningkat seiring dengan peningkatan jumlah penduduk setiap tahunnya sebesar 3.16% (BPS Kota Kendari 2020a)

Pertumbuhan penduduk dan perkembangan sektor industri di wilayah ini menyebabkan bertambahnya kebutuhan akan air tanah yang secara langsung berdampak negatif terhadap ketersediaan dan kualitas air tanah seperti penurunan mu~~ka~~ air tanah (MAT), *land subsidence*, intrusi air laut khusus di wilayah pesisir, dan pencemaran air tanah. Penurunan MAT terjadi karena eksplorasi air tanah secara berlebihan hingga melebihi *safety yield*. Selain itu, juga mengakibatkan intrusi air laut ke dalam air tanah dan *land subsidence*, sedangkan pencemaran air tanah timbul dari pembuangan limbah baik limbah domestik maupun industri yang mengabaikan aspek lingkungan. Adapun dampak negatif dari aktivitas tersebut dalam penilitian ini hanya difokuskan pada penilaian intrusi air laut dan risiko pencemaran air tanah.

Penilaian intrusi air laut dan risiko pencemaran air tanah dilakukan dengan berbagai metode terdiri dari metode berbasis indeks/overlay, metode statistik, dan metode berbasis proses atau numerik (NRC 1993). Ketiga metode tersebut yang sering digunakan adalah metode berbasis piksel atau overlay karena sangat sederhana (Beaujean *et al.* 2014), seperti DRASTIC (Aller *et al.* 1987), GOD (Foster 1987), AVI (Van Stempvoort *et al.* 1993), SINTACS (Civita dan De Maio 2004). Dari berbagai metode piksel/ overlay tersebut yang sering digunakan adalah model DRASTIC (Wang 2012; Shekhar 2015) karena parameter yang diperlukan

untuk menghitung model tersedia atau mudah diperoleh dan mudah diaplikasikannya serta memiliki hasil yang baik (Shekhar 2015).

Metode DRASTIC didesain berdasarkan asumsi bahwa bahan pencemar masuk pada permukaan tanah dan menyusup ke dalam air tanah melalui pengendapan (Kura *et al.* 2014b). Aplikasi model DRASTIC untuk penilaian kerentanan air tanah hanya valid pada cakupan wilayah seluas ( $> 0.4 \text{ km}^2$ ) (Aller *et al.* 1987). Kota Kendari memiliki luas wilayah sebesar  $271.76 \text{ km}^2$  (BPS Kota Kendari 2020a) sehingga penerapan metode DRASTIC dapat dilakukan di wilayah ini. Selain itu, karakteristik topografi kota Kendari yang sebagian besar wilayahnya datar, terletak di pesisir dan mengalami bencana banjir rob maka polutan tidak hanya berasal dari permukaan, namun juga berasal dari intrusi air laut.

Model DRASTIC tidak didesain untuk menilai kerentanan air tanah akibat intrusi air laut, untuk itu dalam penelitian ini menggabungkan model DRASTIC dengan model lainnya yang mampu menilai kerentanan air tanah akibat intrusi air laut seperti model GALDIT. Sama seperti model DRASTIC, model ini menggunakan metode piksel/ overlay. Penelitian tentang model DRASTIC dan GALDIT telah diteliti di dunia, seperti di Tunisia (Saidi *et al.* 2013), India (Santha Sophiya dan Syed 2013; Kumar dan Pramod Krishna 2020), Finlandia (Luoma *et al.* 2017), Jordan (Al-Adamat *et al.* 2003), Polandia (Kozłowski dan Sojka 2019), China (Wang 2012), Argentina (Lima *et al.* 2011), sedangkan di Indonesia juga telah digunakan di beberapa kota seperti di Aceh (Machdar *et al.* 2018), Yogyakarta (Wicaksono *et al.* 2013) dan Madura (Gemilang *et al.* 2017). Namun, perbedaan variasi ruang setiap wilayah maka diperlukan beberapa penyesuaian model guna menghasilkan model terbaik sesuai karakteristik wilayah studi.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan penilaian risiko dan kerentanan air tanah di kota Kendari.

## 4.2 Metode Penelitian

### 4.2.1 Jenis dan Sumber Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data primer hasil pengukuran lapangan, dan data sekunder berupa data Citra SRTM, peta geologi, peta geohidrologi dan data bor yang diperoleh dari Dinas Energi dan Sumberdaya Mineral Provinsi Sulawesi Tenggara, data geolistrik yang diperoleh dari laporan penelitian BAPPEDA Kota Kendari tahun 2019, Data Curah Hujan dari BMKG Kendari dan Balai Wilayah Sungai Sulawesi IV, peta jenis tanah dan dari hasil penelitian terdahulu. Alat yang digunakan adalah seperangkat komputer dilengkapi dengan software analisis spasial.

### 4.2.2 Analisis Data

Analisis data dalam penelitian ini terdiri dari kerentanan air tanah terhadap intrusi air laut menggunakan model GALDIT dan risiko air tanah terhadap polutan menggunakan model DRASTIC.

#### a) Kerentanan Air Tanah terhadap Intrusi Air Laut

Model GALDIT digunakan untuk monitoring kerentanan air tanah terhadap intrusi air laut di kota Kendari. Model ini menggunakan enam parameter yaitu keterdapatatan air tanah (G), konduktivitas hidraulik (A), elevasi muka air tanah

diantar air laut (L), jarak dari pantai (D), pengaruh keberadaan intrusi air laut (I), tebal akuifer (T), dengan skala bobot 1 hingga 4 (indeks w) dan skala rating 1 hingga 10 (indeks r) (Chachadi dan Ferreira 2007). Indeks kerentanan GALDIT dihitung dengan menggunakan persamaan berikut.

$$\text{GALDIT Indeks} = \text{GwGr} + \text{AwAr} + \text{LwLr} + \text{DwDr} + \text{IwIr} + \text{TwTr} \dots \dots \dots \quad (3)$$

b) Kerentanan Air Tanah terhadap Polutan

Model DRASTIC digunakan untuk monitoring kerentanan air tanah terhadap polutan di kota Kendari dengan menggunakan tujuh parameter yaitu kedalaman muka air tanah (D), curah hujan (R), media akuifer (A), tekstur tanah (S), lereng (T), pengarus zona tak jenuh (I), dan konduktivitas hidraulik (C) dengan skala bobot hingga 5 (indeks w) dan skala *rating* 1 hingga 10 (indeks r) (Aller *et al.* 1987). Parameter bobot menentukan kontribusi setiap parameter, besarnya bobot yang diberikan menunjukkan besarnya kontribusi dari setiap parameter, sedangkan *rating* setiap kelas parameter menujukan hirarki aspek penyusun setiap parameter terhadap polutan. Indeks kerentanan DRASTIC dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\text{DRASTIC Indeks} = D_w D_r + R_w R_r + A_w A_r + S_w S_r + T_w T_r + I_w I_r + C_w C_r \dots (4)$$

c) Risiko Pencemaran Air Tanah

Risiko pencemaran air tanah diasumsikan bersumber dari pencemaran permukaan oleh aktivitas antropogenik (Kura et al. 2014; Safa et al. 2020; Kumar and Pramod Krishna 2020). Monitoring dan evaluasi risiko pencemaran air tanah menggunakan hasil indeks kerentanan DRASTIC dan aktivitas antropogenik yang divisualisasikan menggunakan data penggunaan lahan (H) dengan skala bobot 5 dan skala rating 1 hingga 9 (Singh et al. 2015) (Tabel 13) yang telah dimodifikasi. Perhitungan Risiko air tanah terhadap pencemaran dihitung dengan persamaan berikut.

$$R_i = \frac{1}{H_i} V_i \dots \quad (5)$$

Keterangan:  $R_i$  : Risiko Pencemaran Air Tanah

Vi : Indeks kerentanan DRASTIC

Hi : Indeks Bahaya

Tabel 13 Nilai dan Bobot Penggunaan Lahan

No	Jenis Penggunaan Lahan	Nilai	Bobot
1	Lahan terbuka	1	5
2	Badan air	1	
3	Semak belukar	2	
4	Hutan	2	
5	Mangrove	2	
6	Pertanian (Perkebunan dan Sawah)	5	
7	Permukiman dengan Kepadatan Rendah	7	
8	Permukiman dengan Kepadatan Sedang	8	
9	Permukiman dengan Kepadatan Tinggi	9	

Sumber: (Singh *et al.* 2015) modifikasi

Analisis sensitivitas digunakan untuk mengevaluasi bobot dan nilai setiap parameter guna mengurangi subjektivitas dalam melakukan prediksi yang menyebabkan kesalahan dalam penarikan kesimpulan (Rosen 1994; Napolitano dan Fabbri 1996; Gogu 2000). Penelitian ini menggunakan teknik sensitivitas penghapusan peta dan sensitivitas parameter tunggal (Napolitano dan Fabbri 1996; Gogu 2000; Kura *et al.* 2014b). Pengaruh parameter yang dihapus terlihat dari variasi spasial model kerentanan (Majandang dan Sarapirome 2013; Kura *et al.* 2014b; Singh *et al.* 2015; Kumar dan Pramod Krishna 2020). Nilai variasi (VI) dapat ber nilai positif mengindikasikan bahwa penghapusan salah satu parameter mengurangi hasil prediksi indeks kerentanan, sehingga meningkatkan kerentanan yang dihitung dan bernilai negatif menunjukkan bahwa penghapusan salah satu parameter meningkatkan indeks kerentanan sehingga menurunkan prediksi kerentanan (Kura *et al.* 2014b; Singh *et al.* 2015). Indeks variasi (VI) dihitung menggunakan persamaan berikut.

## Keterangan: VI : Indeks Variasi

$V_i$  : Indeks kerentanan air tanah

$V_{xi}$  : Indeks kerentanan ketika salah satu parameter dihapus

Sistem pembobotan dan *rating* dalam penilaian indeks kerentanan dapat berbeda setiap daerah (Babiker *et al.* 2005; Kura *et al.* 2014b). Oleh karena itu, dilakukan analisis sistem sensitivitas parameter tunggal melalui penentuan bobot efektif setiap parameter (Napolitano dan Fabbri 1996), dengan menggunakan persamaan berikut.

Keterangan:  $W_{ef}$  : Bobot efektif setiap parameter

$P_r$  : Nilai rating setiap parameter

$P_w$  : Nilai Bobot setiap parameter

V : Nilai indeks kerentanan

e) Modifikasi Model GALDIT dan DRASTICR

Modifikasi model DRASTICR dilakukan guna mendapatkan informasi risiko dan kerentanan air tanah terhadap polutan secara aktual di kota Kendari. Perhitungan indeks risiko dan kerentanan menggunakan parameter dan bobot efektif yang diperoleh dari hasil perhitungan analisis sensitif.

#### f) Validasi Model

Validasai data digunakan untuk menghindari kekeliruan (Saidi *et al.* 2011; Saidi *et al.* 2013) dan/atau kesalahan penarikan kesimpulan dalam sistem penilaian lingkungan (Kura *et al.* 2014b). Validasi data dilakukan dengan menggunakan korelasi person untuk mengevaluasi hubungan antar semua parameter dan model dalam memprediksi kerentanan dan risiko pencemaran air tanah di suatu wilayah (Prasad *et al.* 2011). Validasi model DRASTICR dilakukan dengan

menghubungkannya dengan data nitrat, sedangkan model GALDIT menggunakan data Daya Hantar Listrik (DHL) yang diperoleh dari hasil sampling lapangan.

### 4.3 Hasil dan Pembahasan

#### 4.3.1 Kerentanan Air Tanah terhadap Intrusi Air Laut

##### a) Keterdapatian Air Tanah (G)

Karakteristik akuifer air tanah dibagi ke dalam air tanah tidak tertekan (bebas/dangkal), air tanah tertekan (dalam) dan air tanah semi tertekan (bocor) (Chachadi dan Ferreira 2007). Karakteristik aquifer tersebut memiliki pengaruh yang berbeda terhadap intrusi air laut (Saidi *et al.* 2013). Secara alamiah, air tanah bebas lebih rentan terintrusi dibandingkan air tanah dalam (Lenin Kalyana Sundaram *et al.* 2008; Lappas *et al.* 2017) karena tekanan air tanah bebas lebih rendah dari tekanan atmosfer (Saidi *et al.* 2013; Kura *et al.* 2014a). Namun, air tanah dalam lebih sensitif karena tingkat penurunan muka air tanah lebih tinggi selama pemompaan air sumur (Lappas *et al.* 2017), sehingga membentuk suatu cekungan. Sedangkan aquifer bocor dapat mempertahankan tekanan hidraulik minimum dengan cara mengalirkan air pada aquifer disekitarnya, sehingga kerentanan air tanah terhadap intrusi air laut lebih rendah (Chachadi dan Ferreira 2007). Data keterdapatan air tanah dari penelitian ini diperoleh dari hasil laporan penelitian yang dilakukan oleh BAPPEDA kota Kendari tahun 2012. Kota Kendari memiliki karakteristik air tanah bebas dan dalam. Pada wilayah pesisir lebih didominasi oleh air tanah bebas (Gambar 18).

##### b) Konduktifitas Hidraulik (A)

Konduktifitas hidraulik memiliki peranan penting dalam mengidentifikasi kerentanan air tanah terhadap intrusi air laut (Lappas *et al.* 2017). Semakin tinggi nilai konduktifitas aquifer maka semakin tinggi pula kecenderungan air laut menyusup masuk ke dalam aquifer (Santha Sophiya dan Syed 2013). Data konduktifitas hidraulik diperoleh dari perhitungan karakteristik aquifer pada bab sebelumnya dengan rerata sebesar 10.2 m/hari dan nilai tertinggi dan terendah masing-masing sebesar 21.6 m/hari dan 3.9 m/hari (Gambar 18).

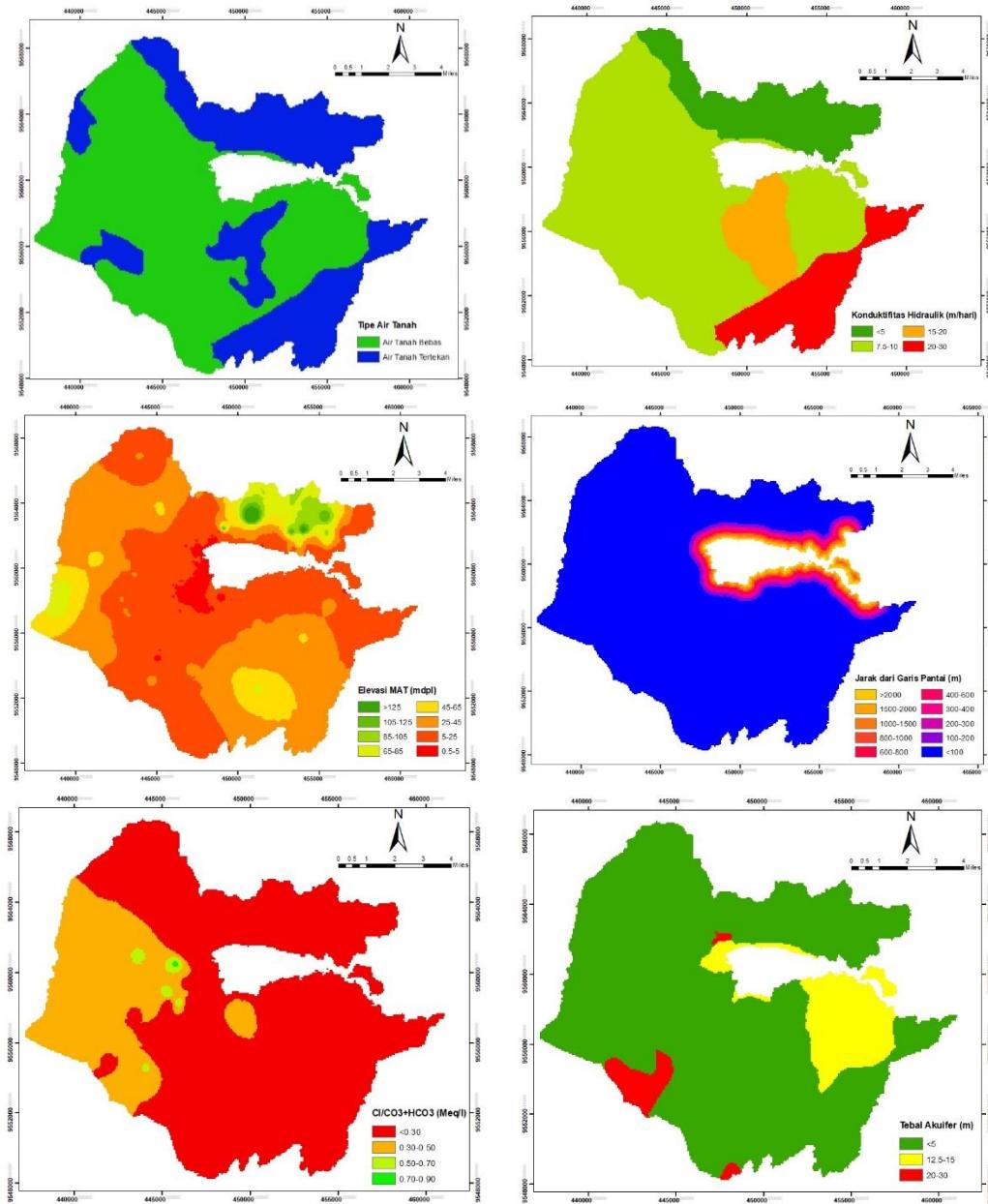
##### c) Elevasi Muka Air Tanah (L)

Elevasi muka air tanah merupakan salah satu parameter yang sangat penting dalam mengevaluasi kerentanan aquifer terhadap intrusi air laut karena dapat berfungsi mengontrol ketersediaan tekanan hidraulik dalam aquifer guna mendorong air laut menjauh dari aquifer (Saidi *et al.* 2014). Semakin tinggi muka air tanah di atas permukaan laut maka tingkat kerentanan air tanah terhadap intrusi air laut semakin rendah, sebaliknya muka air tanah yang terletak di bawah permukaan air laut akan sangat mudah terintrusi (Fetter 2001) (Gambar 18). Wilayah ini memiliki rerata elevasi muka air tanah sebesar 19.21 mdpl dengan elevasi terendah sebesar 0.43 mdpl dan tertinggi sebesar 201 mdpl.

##### d) Jarak dari Pantai (D)

Jarak dari pantai mengacu pada kedekatan suatu daerah dengan garis pantai dimana daerah yang lebih dekat dari pantai umumnya mendapatkan pengaruh intrusi air lebih besar dibandingkan daerah yang jauh dari pantai (Saidi *et al.* 2014)

karena air laut memiliki massa jenis dan tekanan hidraulik lebih tinggi dibandingkan air tanah. Data jarak dari pantai diperoleh dengan menggunakan analisis kedekatan dari garis pantai dengan menggunakan metode *Buffer* skala 100m (Gambar 18).



Gambar 17 Input Model GALDIT

#### e) Pengaruh Intrusi Air Laut (I)

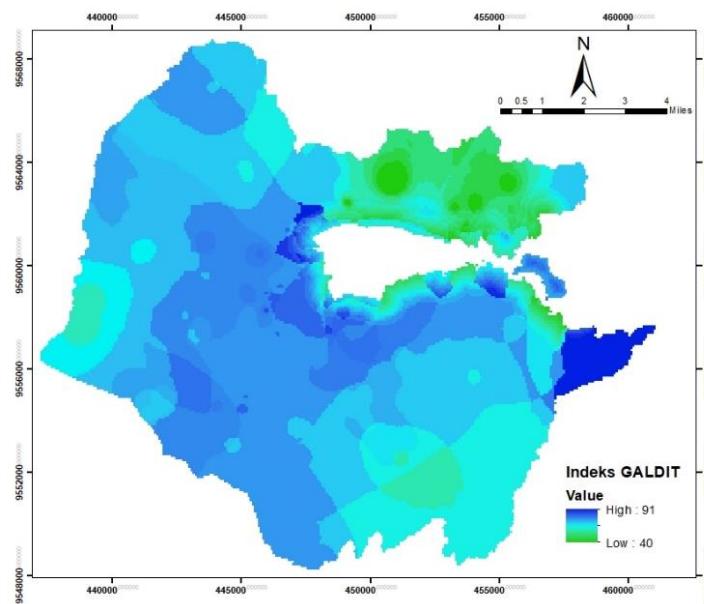
Eksplorasi air tanah pada akuifer pantai secara berlebihan dapat mengganggu keseimbangan gradient hidraulik antara air tanah dan air laut sehingga air tanah rentan terintrusi air laut. Oleh karena itu, parameter ini sangat penting dipertimbangkan dalam memetakan kerentanan air tanah terhadap intrusi air laut. Penentuan pengaruh intrusi air laut didasarkan pada data sifat kimia air tanah berupa rasio klorida-bikarbonat ( $\text{Cl}/\text{CO}_3 + \text{HCO}_3$ ). Jika nilai rasio  $> 1 \text{ meq/l}$  maka air tanah

terintrusi oleh air laut, sedangkan jika  $< 1 \text{ meq/l}$  maka keasinan air tanah lebih disebabkan oleh pelarutan mineral garam pada akuifer (Nurwidiyanto, et al 2006) (Gambar 18).

Data karakteristik kimia air tanah diperoleh dari hasil pengambilan sampel air tanah pada juni 2019 dengan menggunakan teknik *stratified random sampling* berdasarkan Daya Hantar Listrik selanjutnya diambil 40 sampel untuk dianalisis di Laboratorium Kesehatan Provinsi Sulawesi Tenggara. Hasil analisis menunjukkan bahwa rasio  $\text{Cl}/\text{CO}_3 + \text{HCO}_3$  berkisar antara  $0.05-0.76 \text{ meq/l}$  atau  $< 1 \text{ meq/l}$ . Hal ini menunjukkan bahwa berdasarkan parameter ini keasinan air tanah tidak disebabkan oleh proses intrusi air laut. Selanjutnya data tersebut di petakan dengan menggunakan metode *Inverse distance weighted* (IDW) (Gambar 18).

### Tebal Akuife (T)

Ketebalan akuifer memiliki peranan penting dalam menentukan tingkat dan besaran intrusi air ke dalam akuifer di wilayah pesisir (Chachadi dan Ferreira 2007; Kura et al. 2014a; Tasnim dan Tahsin 2016). Semakin tebal akuifer maka semakin besar tingkat intrusi air laut terhadap air tanah, sebaliknya semakin tipis akuifer maka semakin rendah air tanah terintrusi (Tasnim dan Tahsin 2016). Data ketebalan akuifer diperoleh dari hasil uji bor dan studi geofisika masing-masing diperoleh dari Dinas Energi Sumber Daya Mineral (DESDM) Provinsi Sulawesi Tenggara dan laporan penelitian BAPPEDA kota Kendari Tahun 2019. Hasil analisis menunjukkan bahwa ketebalan akuifer air tanah di daerah ini berkisar antara 2-28 m dan nilai rerata sebesar 10.7 m. Hal ini menunjukkan bahwa daerah ini memiliki tingkat kerentanan sangat rendah hingga sangat tinggi terhadap kontaminasi oleh intrusi air laut (Gambar 18).



Gambar 18 Kerentanan Air Tanah model GALDIT

Kerentanan air tanah terhadap intrusi air laut dilakukan dengan teknik *overlay* berdasarkan parameter GALDIT. Hasil analisis indeks GALDIT menunjukkan bahwa kerentanan air tanah terhadap intrusi air laut berkisar antara 21 hingga 102. Hasil analisis menunjukkan bahwa daerah ini didominasi oleh zona tidak rentan



terhadap intrusi air laut sebesar 86.92%, selanjutnya zona kerentanan rendah sebesar 10.16%, zona kerentanan sedang 2.13% dan zona kerentanan tinggi sebesar 0.78%. Zona kerentanan sedang tersebar kecamatan Mandonga, kecamatan Kendari Barat, kecamatan Kendari, dan Kecamatan Abeli, sedangkan zona kerentanan tinggi ditemukan di sekitar muara Daerah Aliran Sungai (DAS) Wanggu yaitu Kecamatan Mandonga dan Kecamatan Kendari Barat (Gambar 19).

Hal ini dipengaruhi oleh faktor geohidrologi berupa tipe dan tebal akuifer serta kedalaman muka air tanah di atas permukaan laut. Wilayah yang memiliki kerentanan air tanah terhadap intrusi memiliki tipe akuifer bebas dengan tebal  $> 14$  m dengan rerata ke elevasi muka air tanah  $< 1$  m. Hal ini sesuai dengan teori yang ada sebelumnya bahwa air tanah bebas memiliki kerentanan terhadap intrusi air laut (Lenin Kalyana Sundaram *et al.* 2008; Lappas *et al.* 2017), sedangkan semakin tebal akuifer (Tasnim dan Tahsin 2016) dan semakin rendah muka air tanah di bawah permukaan air laut (Fetter 2001) maka semakin mudah air laut menyusup ke dalam akuifer, karena air laut memiliki kadar mineral lebih tinggi dibandingkan air tanah. Selain itu, perkembangan fisik kota yang terus berkembang ke arah pesisir teluk Kendari dengan cara reklamasi menyebabkan terjadinya jebakan-jebakan air laut dalam akuifer, kontaminasi air laut dengan batuan dalam kurun waktu yang lama dapat berubah sifat fisik air tanah menjadi asin (Purnama 2004).

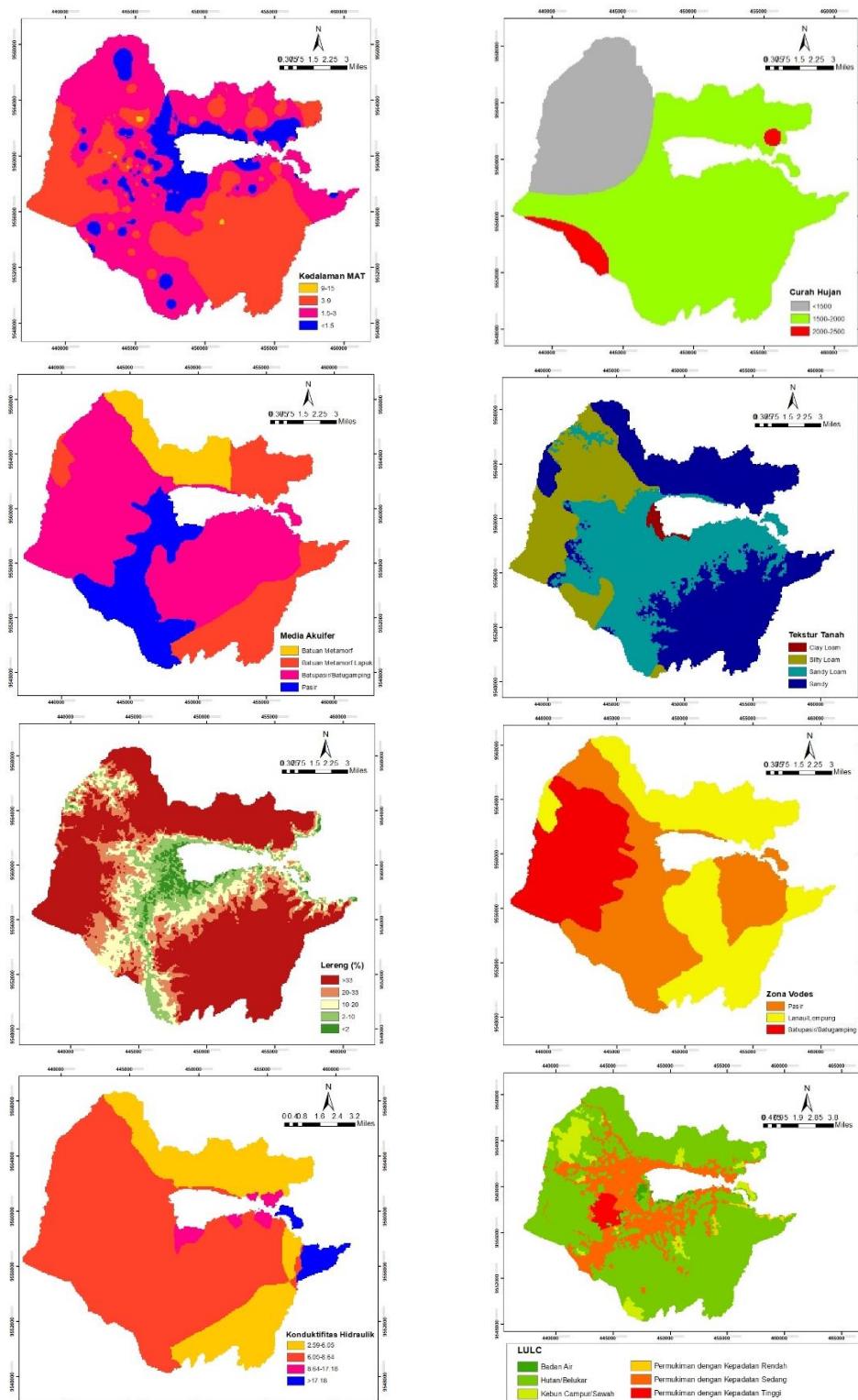
#### 4.3.2 Kerentanan Air Tanah terhadap Polutan

##### a) Kedalaman Muka Air Tanah (D)

Kedalaman muka air tanah adalah media yang memiliki peranan penting dalam mengontrol waktu masuknya polutan ke dalam akuifer setelah melewati zona vodes atau zona tak jenuh air. Daerah yang memiliki kedalaman muka air rendah lebih mudah terkontaminasi oleh zat pencemar dibandingkan muka air tanah dalam (Saidi *et al.* 2013; Garewal *et al.* 2017; Sener *et al.* 2017; Garewal *et al.* 2019). Data kedalaman air tanah diperoleh dari hasil survei lapangan terhadap 250 titik sumur yang tersebar di Kota Kendari, selanjutnya dilakukan interpolasi menggunakan metode *Inverse distance weighted* (IDW). Daerah ini memiliki kedalaman muka air tanah berkisar 0.15 m hingga 5.73 m. Hal ini mengindikasikan bahwa daerah ini memiliki tingkat kerentanan tinggi hingga sangat tinggi terhadap kontaminasi oleh polutan karena memiliki kedalaman muka air dangkal (Gambar 20).

##### b) Curah Hujan (R)

Jumlah curah hujan mewakili jumlah air yang jatuh ke permukaan tanah, selanjutnya terjadi infiltrasi ke tanah hingga mencapai akuifer (Sener dan Davraz 2013). Semakin tinggi jumlah pengisian air maka semakin tinggi pula potensi kerentanan air tanah terhadap polutan, begitupula sebaliknya. Data curah hujan tahunan diperoleh dari Badan Meteorologi dan Geofisika (BMKG) Kendari, Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT) Kendari, dan Balai Wilayah Sungai (BWs) Sulawesi IV. Metode interpolasi menggunakan *Inverse distance weighted* (IDW). Hasil analisis menunjukkan bahwa jumlah curah hujan tahunan di daerah ini tahun 2018  $< 2.500$  mm/tahun. Hal ini mengindikasikan bahwa daerah ini memiliki tingkat kerentanan sedang terhadap kontaminasi oleh polutan (Gambar 20).



Gambar 19 Input Model DRASTIC+Ri

### Media Akuifer (A)

Media akuifer merupakan material batuan yang dapat menyimpan air dengan jumlah banyak. Media akuifer dapat mengendalikan polutan tergantung pada jenis material batuannya. Batuan yang memiliki permeabilitas tinggi maka kerentanan terhadap pencemaran juga tinggi, sebaliknya semakin rendah permeabilitas

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang  
 1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :  
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.  
 b. Pengutipan tidak mengurangi kepentingan yang wajar IPB University.  
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

maka kerentanan air tanah juga rendah (Kumar *et al.* 2015). Data media akuifer diperoleh dari interpretasi peta geologi, peta hidrogeologi, data bor dan data geolistrik yang diperoleh dari Dinas Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Sulawesi Tenggara dan Laporan Penelitian Badan Perencanaan dan Pembangunan Daerah (BAPPEDA) Kota Kendari tahun 2019. Data tersebut juga digunakan untuk mengidentifikasi zona tak jenuh air. Hasil analisis menunjukkan bahwa kota Kendari memiliki media akuifer berupa sedimen terkonsolidasi yaitu batuan metamorf beku hingga lapuk, batu pasir dan batu gamping dengan kandungan fosil bersumber dari batusabak, dan batuan konglomerat berumur Jura-Miosen-Plistosen pada zaman Mesozoikum-tersier-kuarter dan sedimen tidak terkonsolidasi yaitu pasir geluh yang bersumber dari hasil endapan sungai, rawa, dan endapan pantai, berumur holosen pada zaman kuarter. Hal ini mengindikasikan bahwa daerah ini memiliki tingkat kerentanan sedang hingga tinggi terhadap kontaminasi oleh polutan (Gambar 20).

#### d) Tanah (S)

Tanah merupakan lapisan atas yang berfungsi untuk menyaring dan/atau mencegah polutan masuk ke dalam akuifer tergantung pada ukuran partikel, tekstur, bahan organik, dan lain sebagainya (Kura *et al.* 2014b). Semakin kasar tekstur tanah maka semakin tinggi infiltrasi sehingga kerentanan air tanah juga semakin tinggi, begitupula sebaliknya. Penelitian ini menggunakan data tekstur tanah yang diperoleh dari BAPPEDA Kota Kendari tahun 2012 dan (Alwi 2012). Hasil analisis menunjukkan bahwa daerah ini memiliki tektur tanah berupa pasir, lempung, lempung berpasir, lempung liat berpasir. Hal ini mengindikasikan bahwa daerah ini tingkat kerentanan rendah hingga tinggi terhadap kontaminasi oleh polutan (Gambar 20).

#### e) Lereng (T)

Lereng memiliki peranan penting untuk mengontrol waktu tinggal air di permukaan tanah, sehingga mempengaruhi laju infiltrasi (Singh *et al.* 2015), selain itu, dapat memberikan indikasi dimana kosentrasi polutan berada. Lereng dengan klasifikasi tinggi menyebabkan aliran permukaan besar, sehingga air kekurangan waktu untuk mengalami proses infiltrasi dan kerentanan air tanah terhadap polutan rendah. Sebaliknya lereng dengan kelas rendah dapat menampung air dalam waktu lama, sehingga polutan tertahan di tanah dan ikut mengalami infiltrasi dan meningkatkan kerentanan air tanah. Data lereng diperoleh dari data SRTM. Nilai klasifikasi lereng dibagi ke dalam 5 kelas (Aller *et al.* 1987). Hasil analisis menunjukkan bahwa kota Kendari didominasi oleh kelas lereng 12-18%, >18%, 6-12%, 2-6%, dan < 2%. Hal ini mengindikasikan bahwa daerah ini memiliki tingkat kerentanan rendah hingga sangat tinggi terhadap polutan (Gambar 20).

#### f) Zona Tak Jenuh (I)

Zona Tak jenuh berada diantara lapisan *top soil* dan akuifer. Jenis zona tak jenuh memiliki peranan penting dalam menurunkan polutan sebelum masuk ke dalam akuifer melalui filtrasi, reaksi kimia dan dispersi (Shirazi *et al.* 2012). Pada umumnya, semakin besar ukuran butir, maka semakin tinggi permeabilitas dan semakin rendah kemampuan zona tak jenuh untuk menyaring zat pencemar, begitupula sebaliknya. Kota Kendari memiliki karakteristik zona tak jenuh berupa



pasir, batupasir, batugamping, batu metamorf, lanau/lempung dan kerikil dengan lanau dan lempung cukup. Hal ini mengindikasikan bahwa daerah ini memiliki tingkat kerentanan sedang hingga tinggi terhadap kontaminasi oleh polutan (Gambar 20).

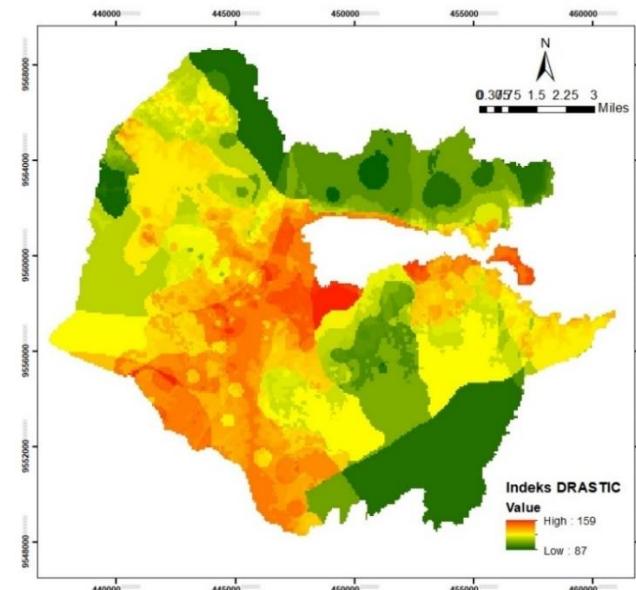
#### **(g) Konduktivitas Hidraulik (C)**

Konduktivitas hidraulik adalah kemampuan material batuan dalam meloloskan air di dalam rongga-rongga batuan tanpa mengubah sifat aslinya (D K Todd 1981) dan mengontrol laju aliran air tanah yang mengalir di bawah gradien hidraulik (Saidi *et al.* 2011). Laju aliran tanah juga dapat mengontrol laju zat pencemar yang masuk ke dalam akuifer (Aller *et al.* 1987), tergantung pada jenis batuan. Nilai konduktivitas hidraulik diperoleh dari hasil perhitungan karakteristik akuifer pada bab sebelumnya berkisar 3.9-21.6 m/hari dan rerata sebesar 10.2 m/hari. Hal ini menunjukkan bahwa daerah ini memiliki tingkat kerentanan rendah hingga sangat tinggi terhadap kontaminasi oleh polutan (Gambar 20).

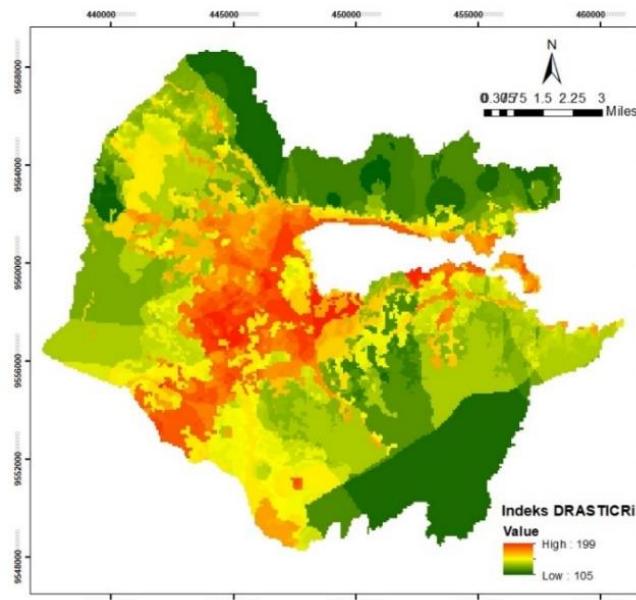
Kerentanan pencemaran air tanah didasarkan pada parameter hidrogeologi dengan menggunakan teknik *overlay*. Hasil analisis indeks DRASTIC menunjukkan bahwa kota Kendari memiliki tingkat kerentanan yang bervariasi berkisar 81 hingga 177. Hasil analisis menunjukkan bahwa sebagian besar daerah merupakan zona kerentanan sedang (54.36%) dan sebarannya dapat dijumpai diseluruh kecamatan, zona kerentanan rendah (45.43%) dan sebarannya sebagian besar di kecamatan Puuwatu, kecamatan Poasia, sebagian kecamatan Kadia, sebagian kecamatan abeli dan sebagian kecamatan Mandonga bagian hulu, dan sebagian kecil di kecamatan Kambu, kecamatan Wua-Wua dan kecamatan Baruga, sedangkan zona kerentanan tinggi (0.21%) dan hanya terdapat di kecamatan Kendari Barat (Gambar 21). Hal ini dipengaruhi oleh kedalaman muka air tanah dan material penyusun batuan daerah tersebut. Semakin dangkal muka air tanah maka semakin mudah dan cepat polutan masuk ke dalam akuifer sehingga semakin rentan air tanah terkontaminasi (Sudarmadji 1991). Sedangkan media akuifer yang memiliki pori-pori besar seperti kerikil dan pasir memiliki potensi resapan tinggi. Oleh karena itu infiltrasi dapat dengan mudah membawa polutan dari permukaan hingga mencapai akuifer dalam waktu singkat (Aller *et al.* 1987).

Risiko dan kerentanan air tanah terhadap polutan dilakukan dengan cara menambahkan parameter DRASTIC dengan parameter penggunaan lahan sebagai bentuk visualisasi aktivitas manusia dengan teknik overlay, selanjutnya disebut DRASTICri. Hasil analisis DRASTICri menunjukkan bahwa kerentanan air bervariasi dari 86 hingga 215. Hasil analisis menunjukkan bahwa risiko dan kerentanan air tanah didominasi oleh zona risiko dan kerentanan sedang (74.69%) yang tersebar diseluruh kecamatan, zona risiko dan kerentanan rendah (18.95%) sebarannya terdapat di kecamatan Puuwatu, sebagian Kecamatan Poasia, sebagian kecamatan Kadia, kecamatan Mandonga bagian hulu, sebagian kecamatan Kadia, dan sebagian kecil terdapat di kecamatan Kambu dan Kecamatan Abeli (Gambar 22). Hal ini menunjukkan bahwa penambahan parameter penggunaan lahan dapat meningkatkan risiko dan kerentanan air tanah terhadap polutan. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa secara hidrogeologi, kota Kendari sudah memiliki sensitivitas kerentanan terhadap polutan, namun dengan adanya variasi penggunaan lahan dapat meningkatkan risiko dan kerentanan lebih tinggi lagi. Untuk itu diperlukan perencanaan penggunaan lahan yang berwawasan lingkungan dengan

mempertimbangkan kondisi air tanah sebagai sumber air bersih kota Kendari agar berkelanjutan.



Gambar 20 Kerentanan Air Tanah Model DRASTIC



Gambar 21 Risiko dan kerentanan Air Tanah Model DRASTICRi

#### 4.3.3 Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas digunakan untuk mengevaluasi konsistensi hasil analisis kerentanan dalam hal ini menganalisis sensitivitas indeks GALDIT dan DRASTICRi. Penelitian ini menggunakan analisis sensitivitas parameter penghapusan salah satu parameter (*map removal*) dan parameter tunggal.

Hasil analisis sensitivitas indeks GALDIT menggunakan *map removal* menunjukkan bahwa indeks variasi tertinggi adalah parameter elevasi MAT (L) dengan variasi spasial sebesar 38.89%. Hal ini menunjukkan bahwa parameter L



memiliki variasi spasial yang tinggi dalam model kerentanan air tanah terhadap intrusi air laut yang dihasilkan. Selanjutnya indeks variasi parameter G, A, D, T, masing-masing memiliki indeks variasi sebesar 13.85%, 11.70%, 11.44%, 3.81% dan 1.97% (Tabel 14).

**Tabel 14 Statistik Indeks Variasi *Map Removal* model GALDIT**

Parameter	Min	Max	(VI %)	SD
G	10.00	25.00	13.85	2.66
A	4.69	26.87	11.70	4.27
L	10.00	66.67	38.89	5.25
D	-36.36	31.25	11.44	11.35
I	1.10	5.63	1.97	0.68
T	2.63	19.18	3.81	2.73

Hasil analisis sensitivitas *map removal* indeks DRASTICRi menunjukkan bahwa indeks variasi paling tinggi adalah parameter kedalaman muka air tanah (D) dengan VI sebesar 30.03%. Hal ini menunjukkan bahwa parameter D memiliki variasi spasial yang tinggi dalam model risiko dan kerentanan yang dihasilkan. Selanjutnya indeks variasi parameter C (12.11%), Ri (12.01%), A (12%), I (11.46%), R (10.30%), S (10.24%) dan T (1.87) (Tabel 15).

**Tabel 15 Statistik Indeks Variasi *Map Removal* model DRASTICRi**

Parameter	Min	Max	(VI %)	SD
D	15.24	44.25	30.03	4.88
R	-21.50	37.34	10.30	3.65
A	5.66	17.65	12.00	2.34
S	3.11	16.98	10.24	4.21
T	0.53	8.85	1.87	1.62
I	2.70	25.42	11.46	6.52
C	6.98	23.62	12.11	2.27
Ri	3.05	31.50	12.01	6.79

Analisis sensitivitas dengan menggunakan parameter tunggal mampu menjelaskan kerentanan aktual suatu wilayah dengan membandingkan bobot teoritis dengan bobot efektif setiap parameter kerentanan. Hasil analisis sensitivitas indeks GALDIT menggunakan parameter tunggal menunjukkan bahwa parameter pada parameter kedalaman MAT (L), ketebalan akuifer (T) dan tipe akuifer (G) masing-masing mengalami peningkatan bobot secara signifikan yaitu masing-masing sebesar 30.77%, 15.38% dan 7.69% dari bobot teoritis menjadi 46.8%, 22% dan 17.3%, sedangkan parameter lainnya mengalami penurunan yaitu parameter A sebesar 16.8% dari 23.08% menjadi 6.3%, D sebesar 10.1% dari 15.38% menjadi 5.2%, dan I sebesar 2.4% dari 7,69% menjadi 5.2% (Tabel 16).

Hasil analisis sensitivitas parameter tunggal dengan indeks DRASTICRi menunjukkan bahwa pada parameter kedalaman muka air tanah (D) mengalami peningkatan bobot secara dramatis sebesar 8.3% dari bobot teoritis 21,7% menjadi 30% bobot efektif dan parameter tekstur tanah (S) mengalami sedikit peningkatan sebesar 1.5% dari 8.7% menjadi 10.2%, sedangkan parameter lainnya mengalami penurunan yaitu R sebesar 7.1% dari 17.4% menjadi 10.3%, A sebesar 1% dari 13% menjadi 12%, T sebesar 2.4% dari 4.35% menjadi 1.9%, C sebesar 0.9% dari 13% menjadi 12.1%, dan Ri sebesar 8.5% dari 20.5% menjadi 12% (Tabel 17).

Tabel 16 Analisis sensitivitas parameter tunggal dan komparasi antara bobot teoritis dan bobot efektif model GALDIT

<b>Parameter</b>	<b>Teoritis</b>				<b>Bobot Efektif</b>		
	<b>Bobot</b>	<b>%</b>	<b>Bobot</b>	<b>%</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>SD</b>
G	1	7.69	2.0	17.3	10.00	25.00	2.66
A	3	23.08	1.0	6.3	4.69	26.87	4.27
L	4	30.77	6.0	46.8	10.00	66.67	5.25
D	2	15.38	0.5	5.2	2.74	50.00	6.07
I	1	7.69	0.5	5.2	1.10	5.63	0.68
T	2	15.38	3.0	22.0	2.63	19.18	2.73

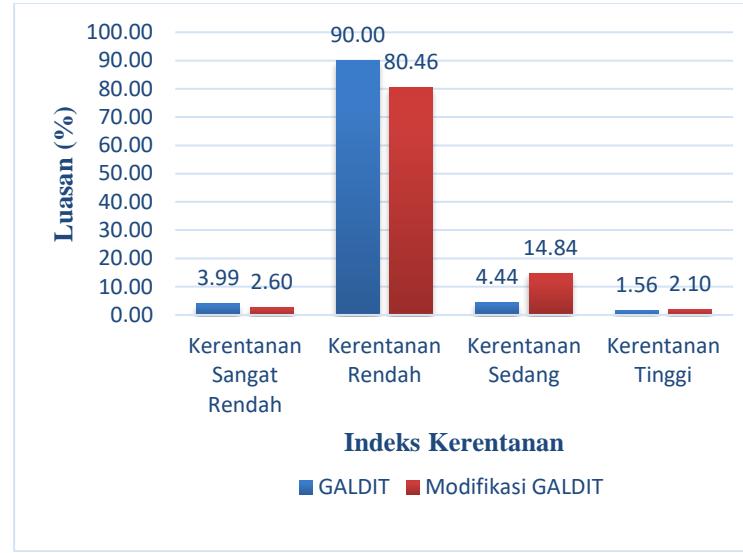
Tabel 17 Analisis sensitivitas parameter tunggal dan komparasi antara bobot teoritis dan bobot efektif model DRASTICRi

<b>Parameter</b>	<b>Teoritis</b>				<b>Bobot Efektif</b>		
	<b>Bobot</b>	<b>%</b>	<b>Bobot</b>	<b>%</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>SD</b>
D	5	21.7	8.4	30.0	15.24	44.25	4.88
R	4	17.4	2.9	10.3	4.21	18.60	3.27
A	3	13	3.4	12.0	5.66	17.65	2.34
S	2	8.7	2.9	10.2	3.11	16.98	4.21
T	1	4.3	0.5	1.9	0.53	8.85	1.62
I	5	21.7	3.2	11.5	2.70	25.42	6.52
C	3	13	3.4	12.1	6.98	23.62	2.27
Ri	5	20.5	3.4	12.0	3.05	31.50	6.79

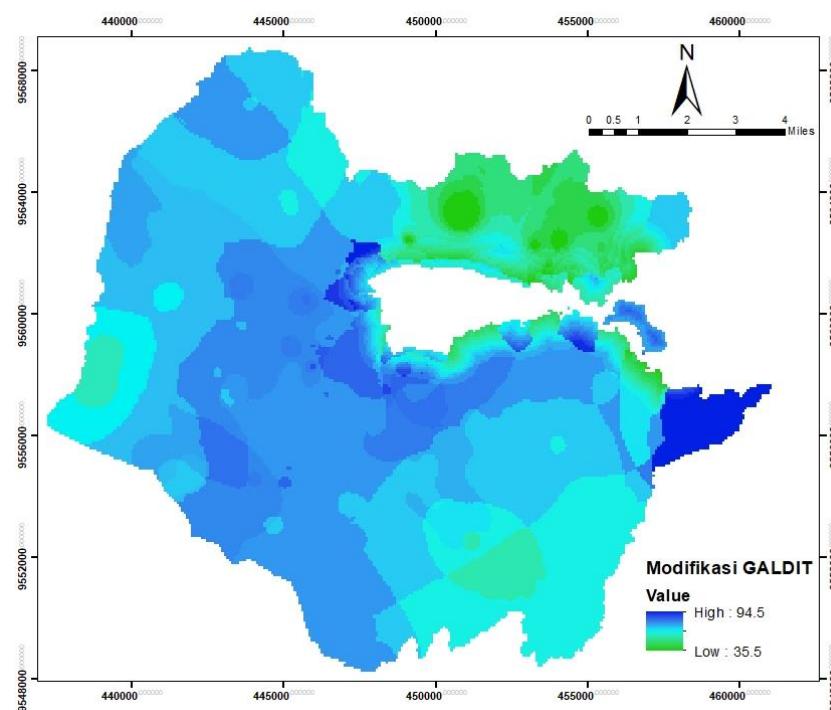
#### 4.3.4 Modifikasi Model

Modifikasi model GALDIT dan DRASTICRi menggunakan bobot efektif (Tabel 16 dan 17) dengan pembagian kelas kerentanan tetap sama sehingga memberikan model kerentanan air tanah lebih objektif di daerah penelitian. Peta kerentanan pencemaran air tanah memberikan gambaran berbeda dari peta kerentanan dengan bobot teoritis sebelumnya. Modifikasi model GALDIT menunjukkan bahwa luasan zona kerentanan sangat rendah dan kerentanan rendah mengalami penurunan luasan masing-masing sebesar 1.4% dari 3.99% menjadi 2.60% dan sebesar 9.54% dari 90% menjadi 80.46%. Sedangkan zona kerentanan

sedang dan tinggi mengalami peningkatan luasan masing-masing sebesar 10.40% dari 4.44% menjadi 14.84% dan sebesar 0.54% dari 1.56% menjadi 2.10% (Gambar 23 dan 24). Hal ini disebabkan oleh intervensi bobot pada masing-masing parameter dengan menggunakan bobot efektif yang disesuaikan dengan karakteristik wilayah studi.



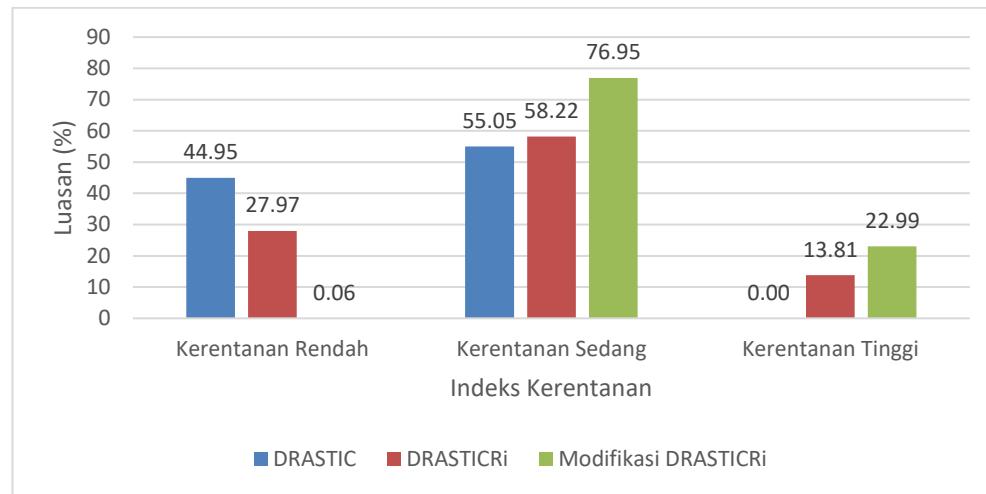
Gambar 22 Perbandingan Hasil Kelas kerentanan Metode GALDI  
dan Modifikasi GALDIT



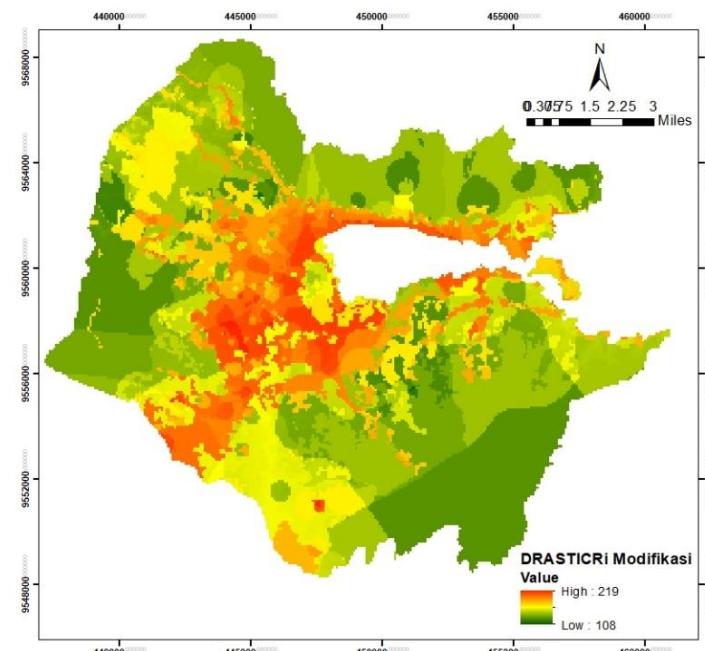
Gambar 23 Peta Kerentanan Metode Modifikasi GALDIT

Modifikasi model DRASTICRi menunjukkan bahwa luasan zona kerentanan rendah pada model DRASTIC, DRASTICRi dan modifikasi DRASTICRi mengalami penurunan luasan yaitu 44.95%, 27.97% dan 0.06%, sedangkan pada

zona kerentanan sedang dan tinggi mengalami peningkatan luasan masing-masing sebesar 55.05%, 58.22% dan 76.95%, dan 0%, 13.81% dan 22.99% (Gambar 25 dan 26). Hal ini disebabkan oleh intervensi bobot pada masing-masing parameter dengan menggunakan bobot efektif yang disesuaikan dengan karakteristik wilayah studi.



Gambar 24 Perbandingan Hasil Kelas kerentanan Metode DRASTICRI dan Modifikasi DRASTICRI



Gambar 25 Risiko dan kerentanan Metode Modifikasi DRASTICRI

#### 4.3.5 Validasi Model

Validasi kerentanan air tanah dilakukan pada masing-masing model. Data DHL dalam air tanah yang diperoleh secara *in situ* sebanyak 85 sampel dan dianalisis, selanjutnya dihubungkan dengan peta indeks kerentanan GALDIT dan



GALDIT modifikasi. Sedangkan data nitrat dalam air tanah dangkal diuji di Laboratorium Kesehatan Provinsi Sulawesi Tenggara dan dianalisis sebanyak 40 sampel, selanjutnya dihubungkan dengan peta indeks kerentanan DRASTIC, DRASTICRi, dan DRASTICRi modifikasi. Data tersebut diuji dengan menggunakan uji statistik korelasi pearson. Hal ini dilakukan untuk menghindari kekeliruan dalam penarikan kesimpulan.

Hasil analisis kerentanan air tanah terhadap intrusi laut menunjukkan bahwa terdapat hubungan signifikan antara data DHL dengan peta indeks kerentanan GALDIT modifikasi (0.66). Hal ini dipengaruhi oleh proses geomorfologi masa lalu atau genesis bentuklahan. Daerah yang memiliki kerentanan sedang hingga tinggi memiliki satuan bentuklahan terumbu koral kuarter dengan kandungan fosil berupa ganggang dan cangkang moluska hasil pengendapan laut dangkal berumur plistosen-holosen dan batuan alluvial hasil endapan sungai, rawa dan endapan pantai berumur holosen. Hal ini dimungkinkan terjadinya jebakan air tanah asin. Selain itu, perkembangan fisik kota Kendari dengan cara reklamasi juga dapat membuat jebakan air tanah asin. Jebakan air tanah asin juga ditemukan disekitar muara sungai DAS Wanggu. Hal ini dibuktikan dengan pengambilan data DHL sungai dengan mempertimbangkan kedudukan air tanah dangkal menunjukkan konsentrasi DHL pada sungai mencapai  $5.368 \mu\text{S}$ . Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa keasinan air tanah dapat disebabkan oleh adanya intrusi air laut melalui aliran sungai yang merembes secara influen ke dalam akuifer air tanah akibat penurunan MAT.

Hasil analisis kerentanan air tanah terhadap polutan menunjukkan bahwa hubungan konsentrasi nitrat dan indeks kerentanan DRASTIC (0.53), DRASTICRi (0.62), dan DRASTICRi modifikasi (0.63). Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa peta indeks kerentanan DRASTICRi modifikasi lebih akurat dibandingkan dengan peta indeks kerentanan DRASTIC dan DRASTICRi dan aktivitas manusia memiliki peranan penting dalam indeks kerentanan air tanah oleh polutan dan dinamika perubahan penggunaan lahan memberikan kontribusi terhadap polutan. Oleh karena itu, diperlukan perencanaan pembangunan wilayah berwawasan lingkungan dengan memprioritaskan keberlanjutan sumber daya air tanah sebagai sumber air bersih baik untuk kebutuhan domestik maupun non domestik.

#### 4.4 Simpulan

Indeks GALDIT menunjukkan bahwa indeks kerentanan Intrusi air laut dipengaruhi faktor geohidrologi dan jebakan air asin masa lampau akibat reklamasi lahan dan perembesan *influence* yang masuk akibat banjir rob, sedangkan indeks DRASTICRi menunjukkan bahwa kerentanan dan risiko pencemaran oleh polutan, selain dipengaruhi kedalaman MAT dan geohidrologi, penggunaan lahan berkontribusi terhadap peningkatan indeks kerentanan dan risiko air tanah terhadap polutan tinggi. Oleh karena itu, guna mendukung ketersediaan air bersih yang layak maka pembangunan wilayah harus menitikberatkan dan berorientasi pada pemeliharaan fungsi lingkungan yang serasi, seimbang dan berkeadilan antar generasi demi terwujudnya tujuan pembangunan berkelanjutan atau *Sustainable Development Goals* (SDGs) khususnya pada bidang air bersih dan sanitasi, maka penelitian ini dilanjutkan pada studi tingkat keberlanjutan pengelolaan air tanah di kota Kendari.

## V TINGKAT KEBERLANJUTAN PENGELOLAAN AIR TANAH DI KOTA KENDARI

### 5.1 Pendahuluan

Air bersih/baku merupakan hak dasar bagi warga negara demi keberlangsungan hidupnya. Oleh karena itu, negara bertanggungjawab atas penyediaan sumber air bersih yang layak sesuai amanat konstitusi UUD 1945 pasal 28 A, 28 C ayat 1-4 dan pasal 33 ayat 3. Pasal ini bermakna negara menjamin setiap warga negara untuk mendapatkan hak atas air, selanjutnya pasca dicabutnya UU No. 7 tahun 2014 tentang Sumber Daya Air oleh Mahkama Agung, pemerintah mengeluarkan Peraturan Pemerintah (PP) No 122 tahun 2015 tentang Sistem Penyediaan Air Minum guna mengisi kekosongan pengaturan tentang pemanfaatan sumber daya air.

Hak atas air juga ditetapkan dalam kesepakatan *Sustainable Development Goals* (SDGs) yaitu pada tujuan keenam tentang memastikan ketersediaan air bersih dan sanitasi yang berkelanjutan dengan target capaian universal akses pada tahun 2030. Air bersih dan sanitasi adalah dua hal ini tidak dapat dipisahkan karena setiap individu yang mengkonsumsi air bersih maka ±85% akan menjadi air limbah sehingga pengelolaan air bersih erat kaitannya dengan pengelolaan sanitasi. Di Indonesia, target dan sasaran tertuang dalam RPJMN 2015-2019, melalui peningkatan layanan air minum atau air bersih layak pada tahun 2019, Selain itu, pemerintah melalui Direktorat Jenderal Cipta Karya Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) merancang sebuah kebijakan strategis yaitu program Kota Tanpa Kumuh (KOTAKU) dengan “Gerakan 100-0-100” yaitu 100% akses universal air minum, 0% permukiman kumuh dan 100% akses sanitasi layak. Oleh karena itu, ketersediaan air bersih telah menjadi program prioritas.

Ketersediaan air bersih memiliki keterikatan dengan dinamika penduduk (Alihar 2018) seiring dengan pembangunan dan perkembangan wilayah. Jumlah dan laju pertumbuhan penduduk dan industri yang tinggi berdampak terhadap tidak semua komponen masyarakat bebas mengakses air bersih, bahkan sering kali cenderung kesulitan mengakses air bersih. Sampai saat ini, penyediaan air bersih di Indonesia oleh Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) masih dihadapkan berbagai permasalahan yang cukup kompleks diantaranya tingkat pelayanan air bersih yang rendah, masalah kualitas air baku, kuantitas yang sangat fluktuatif pada musim kemarau dan musim hujan, dan teknologi yang digunakan dalam proses pengolahan kurang sesuai dengan kondisi air baku yang turus mengalami penurunan kualitas (Said dan Yudo 2008) akibatnya tidak sedikit masyarakat dan industri memanfaatkan air tanah untuk kebutuhan sehari-hari Hal ini juga terjadi di kota Kendari.

Suplai air bersih di wilayah ini umumnya bersumber dari air tanah baik untuk kebutuhan domestik maupun non domestik. Namun eksistensi air tanah sebagai air bersih dari waktu ke waktu mengalami penurunan baik segi kuantitas yang tidak merata dan terus menerus dipompa hingga melebihi *safety yield* maupun dari segi kualitas yang secara alamiah telah tercemar karena dipengaruhi oleh media pembawahnya dalam hal ini kondisi geohidrologi. Selain itu, pembangunan wilayah berisiko terhadap pencemaran air tanah. Dengan demikian air tanah tidak dapat lagi digunakan secara bebas. Oleh karena itu, dalam penelitian ini bertujuan untuk



menganalisis tingkat keberlanjutan sumber air tanah sebagai penyedia air bersih di kota Kendari.

## 5.2 Metode Penelitian

### 5.2.1 Jenis dan Sumber Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh dari *grey literature* dan hasil wawancara dengan responden yang memiliki pemahaman dan menguasai informasi terkait sumber air bersih baik dari akademik maupun birokrasi. Data sekunder diperoleh dari instansi terkait, studi pustaka baik buku teks maupun jurnal dari penelitian sebelumnya di lokasi penelitian.

### 5.2.2 Teknik Pengumpulan Data dan Skoring

Teknik pengumpulan data dan skoring dilakukan dengan metode *peer-review Scoring, grey literature, dan expert judgement* (Akhmad Fauzi 2019). *Peer-review Scoring* yaitu didasarkan pada literatur review yaitu dokumentasi ilmiah, *Grey literature* didasarkan pada hasil analisis bab sebelumnya, dan *expert judgement* didasarkan pada kesepakatan para pakar. Dalam penelitian ini menggunakan metode survei berupa wawancara terhadap responden dengan menggunakan kuesioner. Responden yang menjadi target adalah *stakeholder* yang berperan dalam pengelolaan sumber air bersih di kota Kendari. Penentuan responden didasarkan pada *stakeholder* kunci dan pakar. *Stakeholder* kunci merupakan responden yang memiliki peran sebagai *decision maker*, sedangkan responden pakar adalah seseorang yang memiliki kajian keilmuan dibidang lingkungan hidup dan sumberdaya alam (Yusuf 2016). Jumlah informan adalah 7 orang terdiri dari; 2 orang pengambil kebijakan tingkat provinsi (BAPPEDA dan DESDM), 3 orang pengambil kebijakan tingkat Kota (BAPPEDA, Dinas PU dan DLHK), dan 2 orang Pakar.

### 5.2.3 Analisis Data

Analisis data dalam penelitian menggunakan RAPFISH-MDS versi R. Adapun tahapan analisis yaitu; (1) identifikasi isu keberlanjutan yang akan dianalisis; (2) penentuan unit analisis dan atribut berdasarkan literatur, data primer dan data sekunder mencakup 5 dimensi yaitu ekologi, ekonomi, social, teknologi dan kelembagaan; (3) entri data dengan excel dalam format csv dengan memperhatikan konsistensi jumlah unit dan atribut dan *upper bound* dan *lower bound*; (4) run Rapfish melalui R; (5) analisis ordinasi untuk menentukan posisi status keberlanjutan pada setiap dimensi dalam skala keberlanjutan *bad* sampai *good*; (6) analisis *leveraging* untuk mengetahui atribut dominan, nilai *leverage* berkisar 2%-6%, yang diukur berdasarkan perubahan *Root Mean Square* (RMS); (7) analisis *Monte-Carlo* dilakukan untuk mendeteksi sumber kesalahan (*error*) dari keragaman akibat kesalahan dalam penentuan skor atribut, konvergensi yang tidak sempurna dari MDS yang ditujukan oleh nilai *stress* yang tinggi dan atribut yang digunakan mungkin tidak tepat bagi unit yang dianalisis (Akhmad Fauzi 2019).

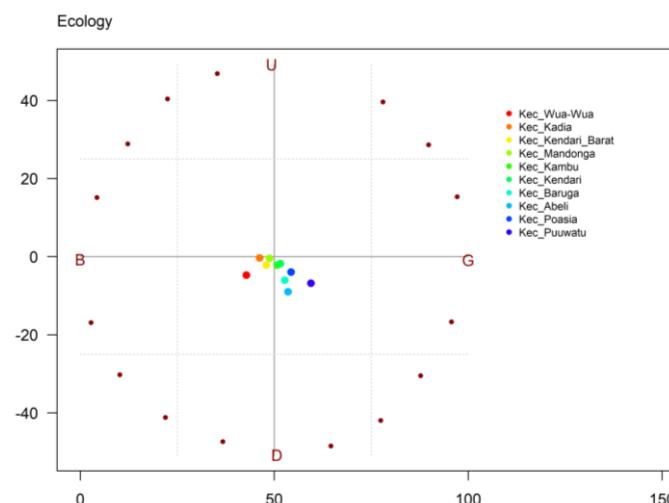
### 5.3 Hasil dan Pembahasan

Tingkat keberlanjutan sumber daya air tanah sebagai sumber air bersih dilakukan guna mengidentifikasi posisi atau status keberlanjutan dari unit analisis dalam skala *bad* sampai *good*. Unit analisis dalam penelitian ini terdiri atas 10 unit analisis didasarkan pada batas kecamatan dengan 5 dimensi yaitu ekologi, ekonomi, social, teknologi dan kelembagaan.

#### 5.3.1 Dimensi Keberlanjutan Ekologi

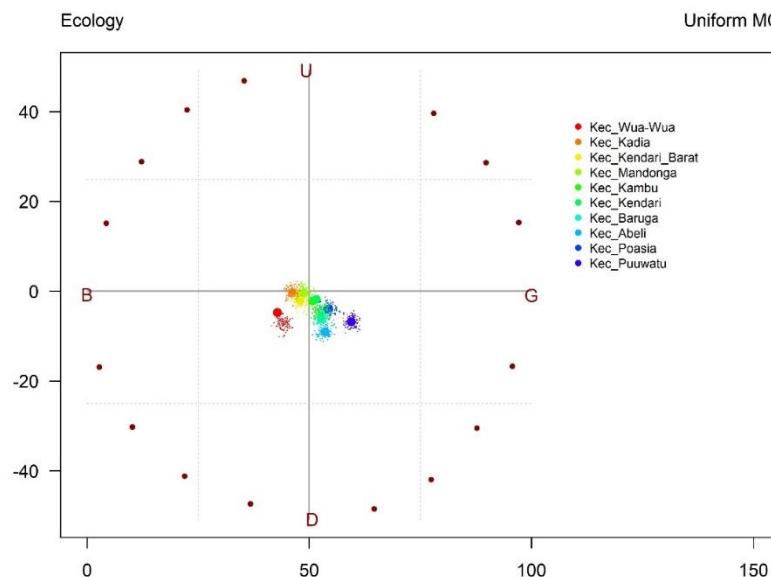
Dimensi ekologi menjelaskan status keberlanjutan fungsi-fungsi lingkungan guna mendukung penyediaan air bersih dimasa mendatang yang bersumber dari air tanah, dengan cara mentransformasi *multidimensional statistic* ke dalam dimensi yang lebih rendah dengan tetap mempertahankan sifat-sifat jarak antar unit analisis (Akhmad Fauzi 2019). Keberlanjutan dimensi ekologi digambarkan dalam 10 atribut yaitu ketersediaan air tanah, daerah imbuhan air tanah, indeks tutupan lahan, laju konversi lahan, penurunan MAT, intrusi air laut, permukiman kumuh, beban pencemaran, indeks pencemaran dan risiko pencemaran.

Hasil analisis keberlanjutan dimensi ekologi, disajikan pada Gambar 27 berikut. Berdasarkan Gambar 27 Kecamatan Puuwatu (59.46%), Kecamatan Poasia (54.34%), Kecamatan Abeli (53.53%), Kecamatan Baruga (52.72%), Kecamatan Kendari (51.59%) dan Kecamatan Kambu (50.78%) berada dalam keberlanjutan baik (*good*) dari dimensi ekologi. Wilayah ini umumnya berada di pinggiran kota. Sedangkan wilayah yang terletak di pusat kota seperti Kecamatan Mandonga (48.77%), Kecamatan Kendari Barat (47.93%), Kecamatan Kadia (46.22%) dan Kecamatan Wua-Wua (42.79%) berada dalam kondisi *bad*. Hal ini menunjukkan bahwa berdasarkan dimensi ekologi terjadi tekanan yang tinggi pada kecamatan yang terletak di pusat kota.



Gambar 26 Ordinasi Dimensi Keberlanjutan Ekologi

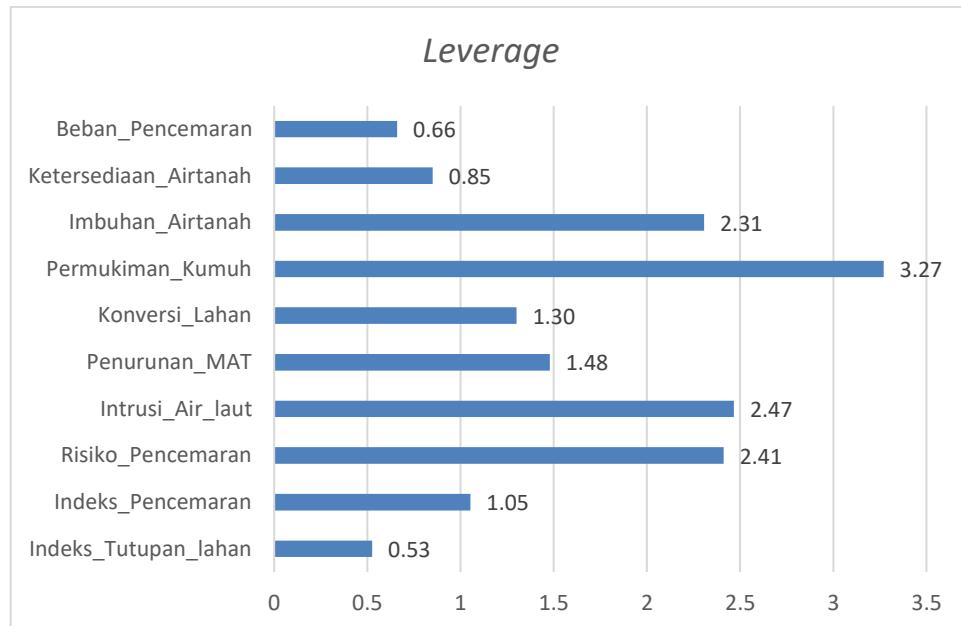
Hasil analisis *Monte Carlo* menunjukkan bahwa sebaran unit cenderung padat dan tersebar pada skor awal (Gambar 28). Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh galat (*error*) atau dampak dari kesalahan pemberian skor relatif kecil pada masing-masing unit. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa model untuk dimensi ekologi memadai sebagai penduga nilai indeks keberlanjutan.



Gambar 27 Analisis Monte Carlo untuk dimensi ekologi

Selain diperoleh indeks keberlanjutan melalui ordinasi, analisis Rapfish juga menghasilkan *leverage* guna mendeteksi atribut dominan. *Leverage* menunjukkan perubahan ordinasi akibat penghilangan atribut satu demi satu atau sensitivitas, nilai *leverage* berkisar antara 2% sampai 6%, yang diukur dengan perubahan *Root Mean Square* (Akhmad Fauzi 2019). Hasil analisis *leverage* untuk dimensi ekologi (Gambar 29) menunjukkan bahwa atribut permukiman kumuh merupakan atribut yang paling berpengaruh pada ordinasi keberlanjutan unit kecamatan. Sementara besaran nilai menunjukkan persentase perbedaan jika atribut tersebut dihilangkan terhadap posisi ordinasi. Jika atribut permukiman kumuh dihilangkan, perbedaan posisi ordinasi keberlanjutan akan berubah sebesar 3.27%. Selain itu, atribut sensitivitas lainnya yaitu intrus air laut (2.47%), risiko pencemaran (2.41%) dan daerah imbuhan air tanah (2.31%).

Laporan Penilaian Ketangguhan Kota Kendari tahun 2017 menunjukkan bahwa penduduk kota Kendari yang bertempat tinggal di Kawasan kumuh masih sangat besar ( $> 60\%$ ) dengan luasan Kawasan kumuh sebesar 497.27 Ha. Kecamatan yang memiliki Kawasan kumuh tertinggi terletak di Kecamatan Kendari Barat sebesar 6.89% dan terendah di Kecamatan Poasia sebesar 0.11%. Kondisi ini menyebabkan permasalahan penyediaan air bersih sangat rendah, karena ketidakseimbangan antara jumlah penduduk dengan ketersediaan sumber air bersih, Selain itu, jarak antar rumah yang sangat padat menyebabkan tidak tersedianya lahan untuk area resapan air hujan ke dalam tanah sehingga terjadi penurunan MAT bahkan berisiko mengalami kekeringan di musim kemarau. Selain permasalahan kuantitas, secara kualitas air tanah di wilayah ini sangat berisiko terjadi penurunan kualitas (pencemaran) akibat perkembangan wilayah. Hal ini akan berdampak pada kesehatan masyarakat seperti penyakit diare akibat mengkonsumsi air yang tidak layak. Jumlah penderita penyakit diare berdasarkan laporan dari Dinas Kesehatan Kota Kendari pada tahun 2017 mencapai 6 430 jiwa.



Gambar 28 Leverage dari Dimensi Ekologi

Intrusi air laut merupakan permasalahan yang dihadapi di wilayah ini selain permukiman kumuh dan risiko pencemaran yang telah dijelaskan sebelumnya, karena secara topografi, wilayah ini didominasi daratan ( $> 50\%$ ) dan pertumbuhan penduduk dan ekonomi terpusat di wilayah pesisir sekitar teluk Kendari. Dalam mendukung aktivitasnya, penggunaan air bersih bersumber dari air tanah yang diperoleh dari sumur bor. Pemompaan air yang terus menerus dengan tidak memperhatikan *safety yield* maka berdampak pada penurunan MAT sehingga air laut yang memiliki berat jenis air lebih tinggi dibandingkan air tanah dengan mudah masuk/meresap ke dalam akuifer sehingga air menjadi asin. Selain itu, perkembangan wilayah ini dilakukan dengan cara reklamasi yang dulunya daerah rawah sehingga dimungkinkan terjadi jebakan-jebakan air asin ke dalam air tanah. Adapun wilayah yang jauh dari pantai namun memiliki kualitas air tanah asin lebih disebabkan oleh faktor hidrogeologi atau alamiah.

Imbuhan air tanah merupakan daerah resapan air baik bersumber dari air hujan yang masuk melalui proses infiltrasi secara gravitasi maupun air permukaan yang masuk melalui aliran *influen* sehingga mampu meningkatkan volume air tanah. Daerah imbuhan air tanah di wilayah ini terletak di daerah hulu yang masih alamiah didominasi tutupan lahan hutan. Namun, seiring pertumbuhan jumlah penduduk dan perkembangan wilayah maka daerah imbuhan air tanah sangat rentan terkonversi. Jika kondisi ini terjadi maka wilayah ini akan mengalami krisis air bersih di masa mendatang. Oleh karena itu, pembangunan dan perkembangan wilayah di masa mendatang harus memperhatikan fungsi-fungsi lingkungan diantaranya kawasan permukiman kumuh, risiko pencemaran, intrusi air laut dan daerah imbuhan air tanah guna menjaga keberlanjutan sumber air tanah sebagai sumber air bersih di wilayah ini.

Untuk lebih meningkatkan status keberlanjutan di wilayah ini, maka upaya perbaikan tidak hanya dilakukan terhadap atribut yang sensitive terhadap nilai indeks keberlanjutan dimensi ekologi, namun atribut-atribut lain yang tidak sensitif perlu dipertimbangkan untuk ditangani dengan cara meningkatkan atribut-atribut

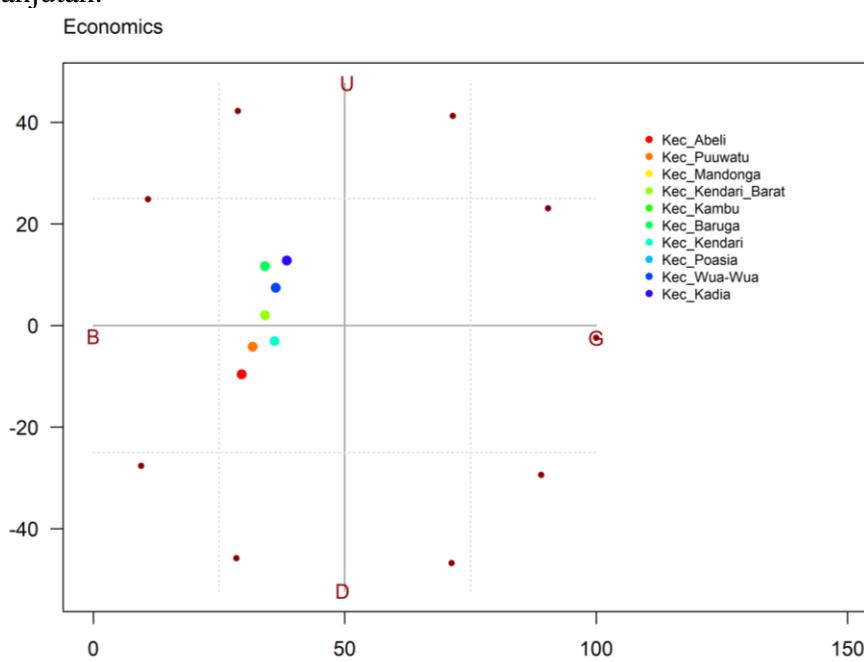
yang berdampak positif, seperti MAT (1.48%), ketersediaan air tanah (0.85%) dan indeks tutupan lahan (0.53%), dan menurunkan atau menekan sekecil mungkin atribut yang memberikan dampak negatif terhadap keberlanjutan sumberdaya air tanah sebagai sumber air bersih, seperti konversi lahan (0.66%), indeks pencemaran (1.05%), dan beban pencemaran (0.66%).

### 5.3.2 Dimensi Keberlanjutan Ekonomi

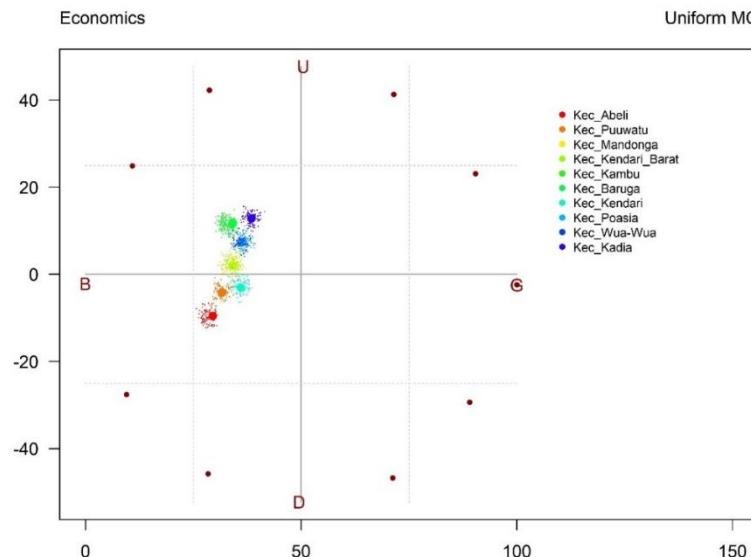
Dimensi ekonomi menjelaskan kondisi ekonomi wilayah dan pengaruhnya terhadap keberlanjutan penyediaan air bersih di kota Kendari. Dimensi ekonomi digambarkan dalam 6 atribut yaitu penduduk miskin, ketersediaan dana sektor PDAM sebagai Lembaga BUMN yang bertanggungjawab menyediakan air bersih, keuntungan PDAM, kontribusi sektor air terhadap PDRB, peran swasta/BUMN dalam penyediaan air bersih, dan pendayagunaan ZISWAF (Zakat Infaq, Shadaghah, Wakaf). Hasil analisis keberlanjutan ekonomi disajikan pada Gambar 30 berikut.

Dari Gambar 30, diperoleh nilai ordinasi pada 10 unit Kecamatan yaitu Kecamatan Puuwatu (31.67%), Kecamatan Poasia (36.29%), Kecamatan Mandonga (34.11%), Kecamatan Kendari Barat (34.11%), Kecamatan Wua-Wua (36.29%), Kecamatan Kendari (36.01%), Kecamatan Kambu (34.13%), Kecamatan Kadia (38.47), Kecamatan Baruga (34.13%) dan Kecamatan Abeli (29.49%). Hal ini menunjukkan bahwa kesepuluh unit analisis berada dalam kondisi keberlanjutan baik atau nilai tersebut menggambarkan bahwa dalam penyediaan air bersih di wilayah ini mengalami tekanan dari aspek ekonomi, namun Kecamatan Abeli memiliki nilai indeks lebih baik dibandingkan unit kecamatan lainnya.

Hasil analisis Monte Carlo menunjukkan bahwa sebaran unit analisis cenderung padat dan tersebar pada skor awal yang menunjukkan sedikit gangguan (error) pada setiap unit analisis (Gambar 31). Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa model untuk dimensi ekonomi memadai sebagai penduga nilai indeks keberlanjutan.



Gambar 29 Ordinasi Dimensi Keberlanjutan Ekonomi



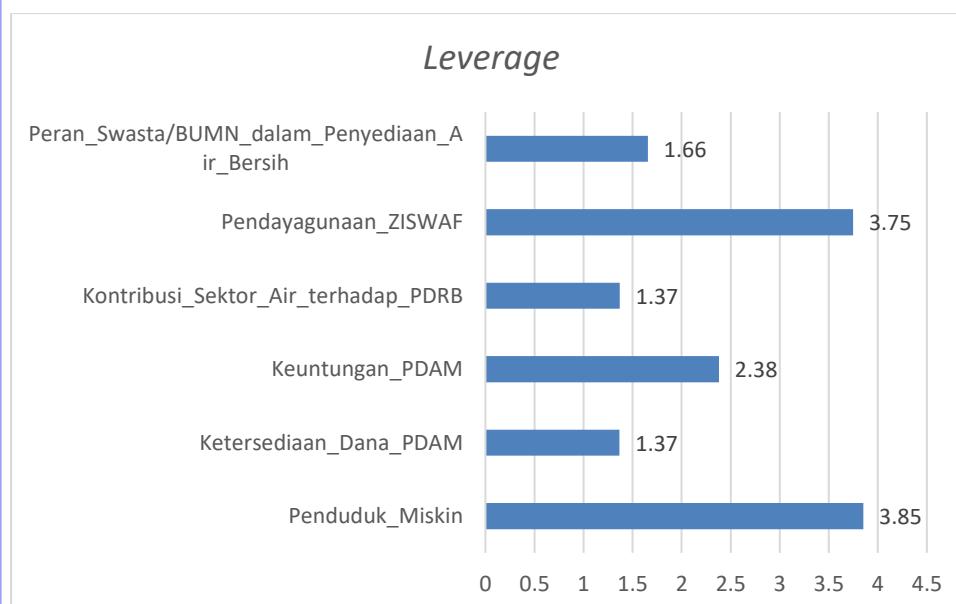
Gambar 30 Analisis Monte Carlo untuk dimensi ekonomi

Berdasarkan hasil analisis *leverage* diperoleh tiga atribut pengungkit terhadap nilai indeks keberlanjutan dimensi ekonomi yaitu penduduk miskin (3.85%), pendayagunaan ZISWAF (3.75%) dan keuntungan PDAM (2,38%) (Gambar 32). Penduduk miskin merupakan penduduk yang memiliki rerata pengeluaran per kapita per bulan di bawah garis kemiskinan, diukur dari kemampuan memenuhi kebutuhan dasar. Air bersih merupakan kebutuhan dasar yang sangat vital bagi setiap manusia. Persentase penduduk miskin di wilayah ini dari waktu ke waktu terus mengalami penurunan yaitu pada tahun 2010 sebesar 8.02% dengan garis kemiskinan sebesar Rp 225 955/kapita/bulan, sedangkan pada tahun 2018 mencapai 4.69% dan Rp 327 509/kapita/bulan, dengan penduduk miskin tertinggi terletak di Kecamaan Abeli sebesar 13 636 jiwa dan terendah di Kecamatan Kambu 3 073 jiwa (BPS, 2019). Tingginya perentase penduduk miskin menjadi kendala bagi keberlanjutan sistem penyediaan air bersih.

PDAM Tirta Anoa Kota Kendari dalam menyalurkan volume air bersih dari tahun ke tahun terus mengalami kerugian. Periode 2001 sampai 2018, produksi air bersih mengalami penurunan yang sangat signifikan yaitu dari 3 563 575 m<sup>3</sup> menjadi 2 569 768 m<sup>3</sup> atau turun 6.23% dari tahun sebelumnya dengan nilai penjualan sebesar 29.31 miliar rupiah (BPS, 2019). Hal ini sejalan dengan penurunan jumlah pelanggan, pada tahun 2017 jumlah pelanggan sebesar 16 148 pelanggan menjadi 15 885 pelanggan. Selain itu, sistem jaringan perpipaan yang dibangun sejak tahun 1978 dan berhenti tahun 1998 hingga saat ini belum adanya perbaikan menyebabkan sistem jaringan perpipaan banyak ditemui dilapangan telah mengalami kebocoran atau kehilangan air ± 54% dan kapasitas mesin pompa air tidak peroperasi dengan maksimal.

Fatwa Majelis Ulama Indonesia (MUI) No. 001/MUNAS-IX/MUI/2015 tentang pendayagunaan Harta Zakat, Infak, Sedekah dan Wakaf untuk pembangunan sarana air bersih dan sanitas bagi penduduk. Pendayagunaan ZISWAF diharapkan dapat berdampak positif terhadap upaya stakeholder dalam penyediaan air bersih ditengah besarnya biaya operasional produksi, perbaikan fasilitas sistem jaringan perpipan dan mesin pompa ditengah keterbatasan dana akibat kerugian PDAM yang terus menerus terjadi. Namun, hingga kini ZISWAF

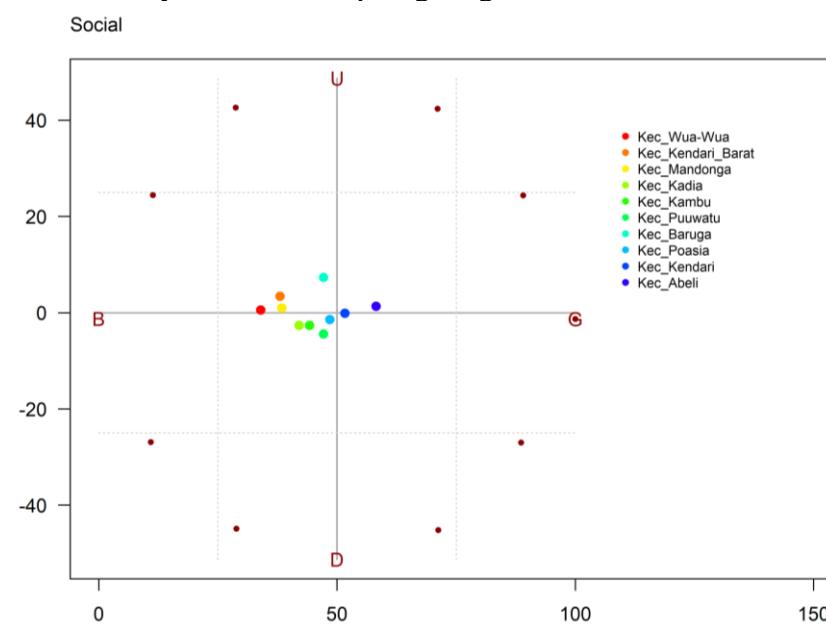
belum didayagunakan oleh pemerintah setempat. Oleh karena itu, pemerintah dituntut untuk optimalisasikan dana tersebut guna mengembangkan distribusi air bersih secara merata.



Gambar 31 Leverage dari Dimensi Ekonomi

### 5.3.3 Dimensi keberlanjutan Sosial

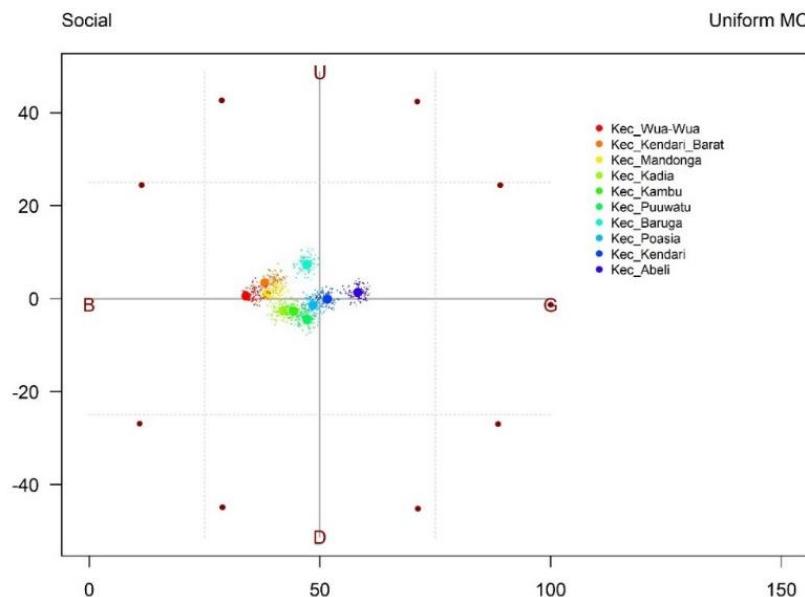
Dimensi sosial menjelaskan bahwa bagaimana aspek social dalam penyediaan air bersih berpengaruh terhadap sumber daya alam khususnya air tanah di masa mendatang. Dimensi sosial terdiri dari enam atribut yaitu jumlah dan/atau kepadatan penduduk, fasilitas Pendidikan, kepuasan pelanggan, ketergantungan terhadap air tanah sebagai sumber air bersih, *local wisdom* masyarakat dan motivasi dan kedulian masyarakat terhadap lingkungan.



Gambar 32 Ordinasi Dimensi Keberlanjutan Sosial

Hasil analisis ordinasi keberlanjutan sosial disajikan pada Gambar 33. Dari Gambar 33, Kecamatan Abeli dan Kecamatan Kendari berada dalam keberlanjutan baik (*good*) dari dimensi sosial, dengan nilai keberlanjutan masing-masing sebesar 58.20% dan 51.62%, sementara unit kecamatan lainnya berada pada kondisi *bad*, dengan nilai tertinggi dan terendah masing-masing terletak di Kecamatan Poasia (48.49%) dan Kecamatan Wua-Wua (33.97%). Hal ini menunjukkan bahwa berdasarkan dimensi social tidak terjadi tekanan yang tinggi atau rendah terhadap status keberlanjutan pada unit Kecamatan Abeli dan Kecamatan Kendari, sementara pada unit kecamatan lainnya telah terjadi tekanan yang tinggi terhadap status keberlanjutan.

Dari Gambar 34, Hasil analisis *Monte Carlo* menunjukkan bahwa sebaran unit cenderung padat dan tersebar pada skor awal. Hal ini menunjukkan dampak dari kesalahan pemberian skor relatif kecil pada masing-masing unit. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa model untuk dimensi sosial memadai sebagai penduga nilai indeks keberlanjutan.

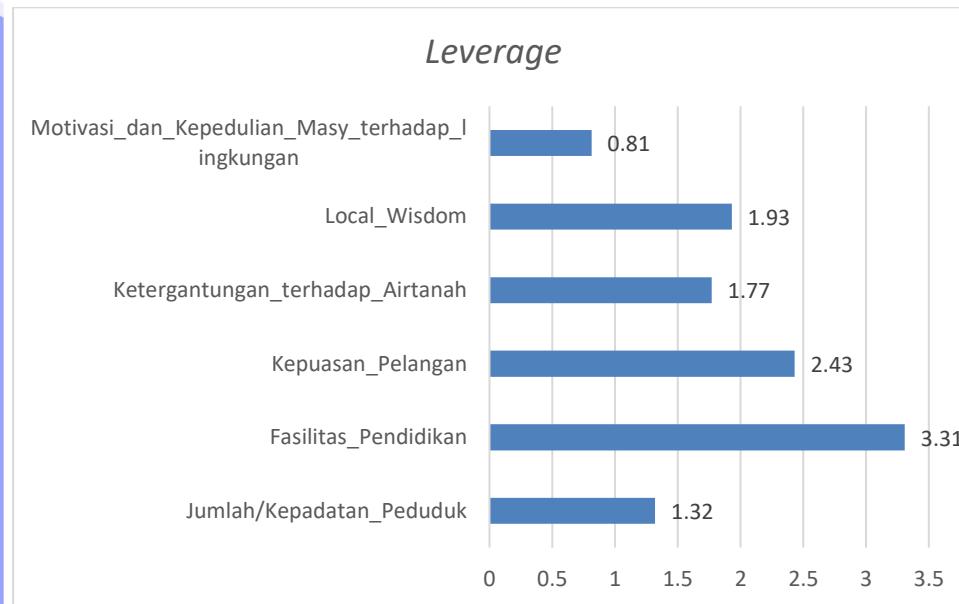


Gambar 33 Analisis *Monte Carlo* untuk dimensi sosial

Hasil analisis leverage diperoleh dua atribut yang sensitif atau *driving factor* terhadap nilai keberlanjutan dari dimensi sosial yaitu Pendidikan formal (3.31%) dan kepuasan pelanggan (2.43%) (Gambar 35). Atribut tersebut memiliki hubungan yang erat dalam rangka perlindungan dan pengelolaan lingkungan, dan pemenuhan kebutuhan air bersih.

Upaya mewujudkan pembangunan berkelanjutan aspek penyiapan sumber daya manusia (SDM) memiliki peranan yang sangat penting, salah satunya melalui Pendidikan formal. Sekolah merupakan sarana belajar guna membentuk karakter dan perilaku anak agar lebih baik dari waktu ke waktu. Oleh karena itu, dalam rangka mendukung perlindungan dan pengelolaan lingkungan sekaligus meningkatkan pengetahuan dan pemahaman akan lingkungan hidup maka diperlukan pengenalan sejak dini. Hal ini diharapkan akan muncul kepedulian terhadap lingkungan khususnya sumber daya air yang terbatas yang diwujudkan dalam bentuk sikap dan perilaku yang selalu berupaya mencegah kerusakan

lingkungan dan mengembangkan upaya-upaya untuk memperbaiki kerusakan yang telah terjadi.



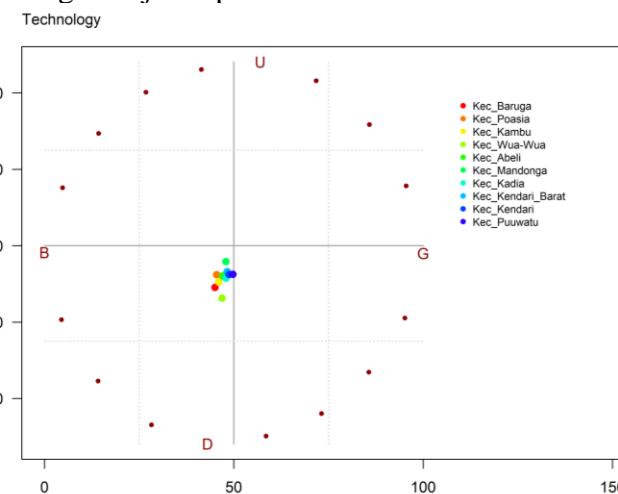
Gambar 34 Leverage dari Dimensi Sosial

Percepatan pengembangan Pendidikan lingkungan pada Pendidikan formal melalui program Adiwiyata Kerjasama antara Kementerian Lingkungan Hidup (KLHK) dengan Kementerian Pendidikan dan kebudayaan (Kemendikbud) sejak tahun 2006. Program ini dilakukan secara berjenjang dari tingkat kabupaten/kota, provinsi dan nasional, serta terdapat juga Adiwiyata Mandiri. Program ini telah berhasil meningkatkan upaya perlindungan dan pengelolaan lingkungan di sekolah. Periode 2006 sampai 2019, sekolah Adiwiyata telah berkontribusi mengurangi timbunan sampah sebesar 38 745 ton per tahun, penghijauan sebesar 322 875 pohon/tanaman, pembuatan lubang biopori sebesar 64 575 lubang, sumur resapan sebesar 12 915 sumur, dan penghematan penggunaan listrik dan air berkisar 10-40% persekolah. Dengan demikian tingkat Pendidikan formal melalui program adiwiyata sangat menentukan keberlanjutan penyediaan air bersih di masa mendatang.

Kepuasan pelanggan sangat ditentukan oleh kualitas pelayanan dalam memahami kebutuhan, keinginan dan harapan pelanggan. Semakin tinggi kualitas pelayanan yang dirasakan pelanggan maka tingkat kepuasan semakin tinggi, sebaliknya semakin rendah kualitas pelayanan maka semakin rendah pula kepuasan pelanggan. Kualitas pelayanan PDAM Tirta Anoa Kota Kendari kepada pelanggan air bersih memiliki tingkat kepuasan yang rendah. Hal ini menunjukkan bahwa penilaian pelanggan terhadap perbandingan kinerja dengan harapan pelanggan tergolong tidak puas dalam menyediakan sumber air bersih. Kondisi ini akan berdampak pada retensi dan kesetiaan pelanggan berupa pengurangan jumlah pelanggan yang telah terjadi dari waktu ke waktu. Oleh karena itu, PDAM dituntut memperbaiki kualitas pelayanan guna memberikan kualitas pelayanan yang tinggi sesuai harapan dan kebutuhan pelanggan guna meningkatkan kepuasan pelanggan agar terciptanya kesetiaan pelanggan kepada PDAM.

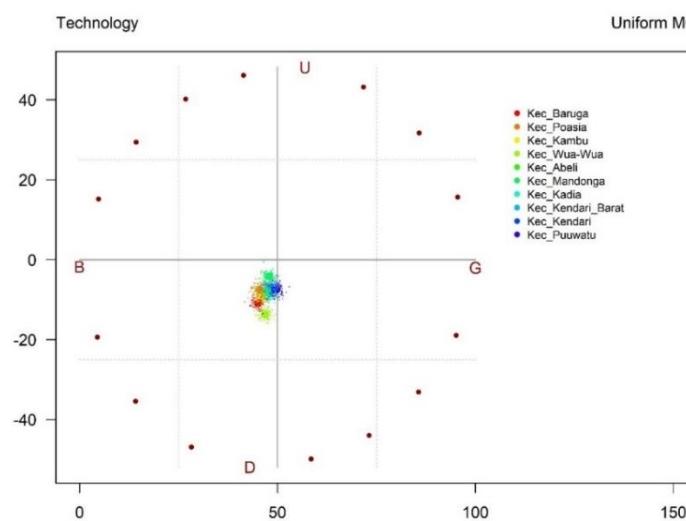
### 5.3.4 Dimensi Keberlanjutan Teknologi

Dimensi teknologi menunjukkan pengaruh teknologi terhadap keberlanjutan sumberdaya air tanah sebagai sumber air bersih di wilayah ini. Dimensi teknologi terdiri dari 9 atribut yaitu saranaan dan prasarana PDAM, kapasitas produksi PDAM, Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM), sarana dan askes air bersih berkualitas, sumur resapan, sistem *data based* sumber daya air (SDA), sarana sanitasi, Sistem Pengolahan Air Limbah (SPAL) dan drainase lingkungan. Hasil analisis ordinasi keberlanjutan teknologi disajikan pada Gambar 36.



Gambar 35 Ordinasi Dimensi Keberlanjutan Teknologi

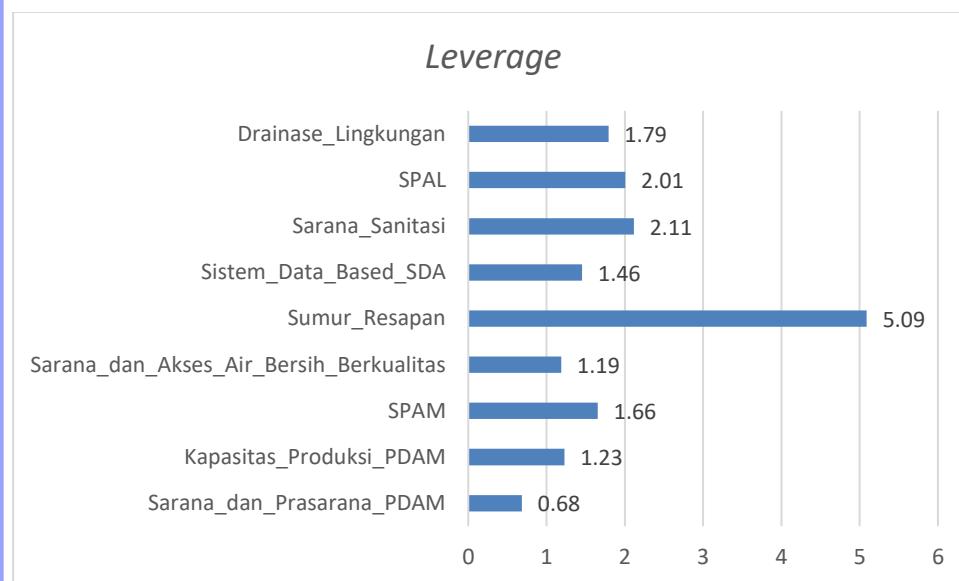
Dari Gambar 36, diperoleh nilai ordinasi pada 10 unit kecamatan yaitu Kecamatan Puuwatu (49.73%), Kecamatan Kendari (48.69%), Kecamatan Kendari Barat (48.24%), Kecamatan Kadia (47.95%), Kecamatan Mandonga (47.87%), Kecamatan Abeli (47.01%), Kecamatan Wua-Wua (46.86%), Kecamatan Kambu (45.98%), Kecamatan Poasia (45.45%), dan Kecamatan Baruga (45.02%). Hal ini menunjukkan bahwa kesepuluh unit analisis tersebut berada dalam kondisi keberlanjutan *bad* atau nilai tersebut menggambarkan bahwa di wilayah ini mengalami tekanan dari aspek teknologi terhadap indeks keberlanjutan.



Gambar 36 Analisis *Monte Carlo* untuk dimensi teknologi

Hasil analisis *Monte Carlo* menunjukkan bahwa distribusi unit cenderung padat dan terdistribusi pada skor awal (Gambar 37). Hal ini menunjukkan bahwa kesalahan dalam penentuan skoring relatif kecil pada masing-masing unit analisis, oleh sebab itu model pada dimensi teknologi memadai sebagai penduga nilai indeks keberlanjutan.

Hasil analisis leverage diperoleh tiga atribut pengungkit terhadap nilai indeks keberlanjutan dimensi teknologi yakni atribut sumur resapan (5.09%), sarana sanitasi (2.11%) dan SPAL (2.01%) (Gambar 38). Teknik konservasi dengan pembuatan sumur resapan di wilayah ini memiliki peranan sangat penting dalam menjaga tata air. Sumur resapan berfungsi mengendalikan besaran koefisien *run off* sehingga air hujan yang jatuh ke permukaan lebih banyak meresap ke dalam tanah menjadi cadangan air tanah, selain itu, penggunaan sumur resapan dapat mengurangi bencana banjir yang sering terjadi di wilayah ini dan mengurangi kekeringan yang akhir-akhir ini mulai di rasakan oleh masyarakat. Jumlah sumur resapan di wilayah ini masih sangat terbatas dan hanya tersedia pada area pertanian hortikultura dan perkebunan masing-masing berjumlah 10 unit, sedangkan permintaan air bersih oleh masyarakat yang bersumber dari air tanah sangat tinggi. Oleh karena itu, untuk meningkatkan keberlanjutan sumber air bersih pembuatan sumur resapan sebagai salah satu solusi terbaik dan sangat menentukan keberlanjutan penyediaan air bersih di masa mendatang dilihat dari segi kuantitas.



Gambar 37 Leverage dari Dimensi Teknologi

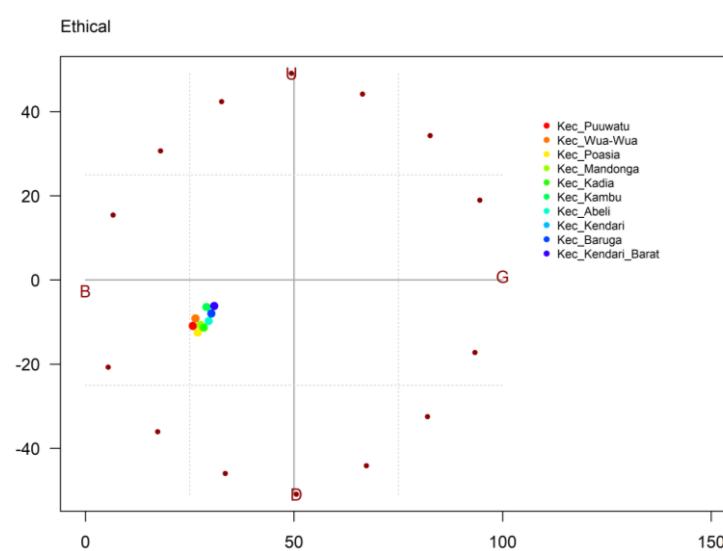
Sarana sanitasi merupakan salah satu sarana penting dalam pengelolaan air bersih, karena ke dua hal ini saling berkaitan dan tidak dapat dipisahkan dalam pengelolaannya. Definisi sangat beragam, namun dalam penelitian ini menggunakan konsep MDGs bahwa sanitasi sebagai akses terhadap jamban. Berdasarkan data dari Dinas Kesehatan Kota Kendari tahun 2016, rerata persentase penduduk dengan akses sanitasi sebesar 76.33%, dengan sebaran sarana sanitasi tertinggi dan terendah masing-masing terletak di Kecamatan Wua-Wua (92%) dan Kecamatan Puuwatu (61%). Sedangkan berdasarkan standar kelayakan hanya 48.14% kondisi jamban di wilayah ini memenuhi syarat, sisanya kondisinya tidak memenuhi syarat (51.86%), dengan cara mengalirkannya langsung ke sungai atau

drainase (Pertiwi 2019). Hal ini rentan dan berisiko terkena diare pada masyarakat setempat (Semba *et al.* 2011), selain sarana sanitasi jamban, sarana pengolahan air limbah juga harus dikelola dengan baik agar tidak berdampak pada lingkungan.

Air limbah merupakan air sisa buangan yang bersumber dari aktivitas domestik dan industri baik skala kecil maupun sedang/besar yang mengandung bahan kimia yang sulit dihilangkan, sehingga air limbah tersebut perlu diolah agar tidak mencemari lingkungan khususnya sumber daya air dan tidak mengganggu kesehatan manusia. Berdasarkan Undang-Undaang 32 tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup Pasal 20 Ayat 3a menyatakan bahwa setiap orang diperbolehkan untuk membuang limbah ke media lingkungan hidup dengan syarat memenuhi baku mutu lingkungan hidup. Oleh karena itu, sebelum air limbah dibuang ke lingkungan diperlukan pengolahan terlebih dahulu dengan penggunaan SPAL. Berdasarkan data dari Dinas Kesehatan Kota Kendari pada tahun 2016, Sebaran SPAL di wilayah ini telah terdistribusi di seluruh kecamatan dengan SPAL tertinggi dan terendah masing-masing terletak di Kecamatan Abeli (84%) dan Kecamatan Poasia (65%) dengan rerata 77.15%. Kondisi SPAL di wilayah ini umumnya telah memenuhi syarat (50.93%), sisanya 49.07% tidak memenuhi syarat karena proses aliran akhir langsung dibuang ke tanah pada bagian belakang rumah sehingga menimbulkan bau yang kurang sedap dan kotor (Pertiwi 2019). Jika kondisi ini terus berlanjut maka dapat mencemari air tanah di sekitar wilayah tersebut. Dengan demikian sarana sanitasi dan SPAL dari segi kualitas air sangat menentukan keberlanjutan penyediaan air bersih di masa mendatang.

### 5.3.5 Dimensi Keberlanjutan Kelembagaan

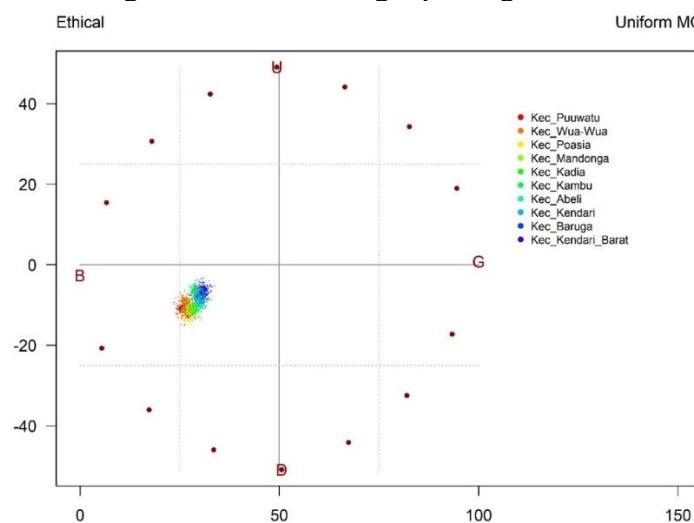
Dimensi kelembagaan menjelaskan pengaruh/peranan kelembagaan dalam penyediaan air bersih di wilayah ini. Dimensi kelembagaan terdiri dari 8 atribut yaitu kelengkapan aturan, kapasitas SDM, kerjasama antar sektor, kinerja PDAM, *E\_Goverment*, pemberian sanksi bagi yang melanggar dan insentif bagi yang patuh menjalankannya, keberadaan LSM dan Kelompok Peduli Lingkungan, dan realisasi pajak air tanah. Hasil analisis ordinasi keberlanjutan kelembagaan disajikan pada Gambar 39.



Gambar 38 Ordinasi Dimensi Keberlanjutan Kelembagaan

Berdasarkan Gambar diperoleh rerata nilai ordinasi keberlanjutan sebesar 28.47% dengan nilai tertinggi terletak di Kecamatan Kendari Barat (30.84%) dan terendah di Kecamatan Puuwatu (25.72%). Hal ini menunjukkan bahwa kesepuluh unit analisis tersebut berada dalam kondisi keberlanjutan *bad* atau nilai tersebut menggambarkan bahwa di wilayah ini mengalami tekanan dari aspek kelembagaan terhadap indeks keberlanjutan.

Hasil analisis *Monte Carlo* menunjukkan bahwa kesepuluh unit analisis terdistribusi pada skor awal dan kecenderungannya padat, artinya penentuan skoring distribusi cenderung padat dan terdistribusi pada skor awal (Gambar 40). Hal ini menunjukkan bahwa kesalahan dalam penentuan skoring pada masing-masing unit analisis relatif kecil. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa model pada dimensi kelembagaan memadai sebagai penduga nilai indeks keberlanjutan.

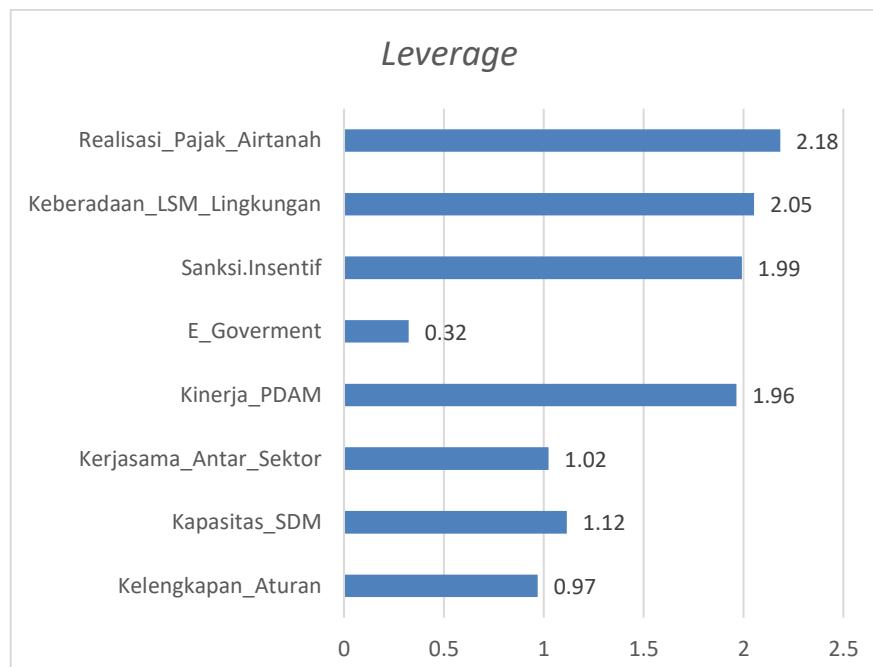


Gambar 39 Analisis *Monte Carlo* untuk dimensi kelembagaan

Hasil analisis *leverage* menunjukkan terdapat dua atribut sensitive terhadap keberlanjutan sumberdaya air tanah sebagai sumber air bersih yaitu realisasi pajak air tanah (2.18%) dan keberadaan LSM dan Kelompok Peduli Lingkungan (Gambar 41). Berdasarkan Peraturan Walikota Kota Kendari No 11 tahun 2015 tentang Nilai Perolehan Air Tanah sebagai Dasar Pengenaan Pajak Pengambilan dan Pemanfaatan Air Bawah Tanah yang dinyatakan dengan rupiah dengan mempertimbangkan jenis air, lokasi sumber air, tujuan pengambilan dan/atau pemanfaatan air, volume air yang diambil dan/atau dimanfaatkan, kualitas air, dan tingkat kerusakan lingkungan yang diakibatkan oleh pengambilan dan pemanfaatan air. Sejak tahun 2014-2018 realisasi pajak air tanah sangat baik dengan rerata pendapatan Rp 320 030 000 per tahun, pada tahun 2014 dan 2015-2016 realisasi pajak air tanah >100% dengan nilai target Rp 200 000 000 per tahun dan Rp 300 000 000 per tahun, sedangkan pada tahun 2017 dengan target Rp 850 000 000 per tahun hanya terealisasi sebesar 42.14%, dan pada tahun 2018 terjadi penurunan target sebesar Rp 550 000 000 dan terealisasi 70.85%. Penerapan pajak air tanah di wilayah ini hanya diperuntukkan bagi industri, sedangkan berdasarkan perhitungan kebutuhan air tanah pada bab sebelumnya selain industri, aktivitas domestik memiliki kontribusi besar terhadap penggunaan air tanah. Oleh karena itu, penerapan wajib pajak bagi domestik juga dipertimbangkan untuk dikenakan wajib pajak khususnya pemanfaatan air tanah menggunakan sumur bor guna mengurangi

tingkat kerusakan lingkungan seperti penurunan MAT dan meningkatkan PAD untuk perbaikan fasilitas dan kapasitas PDAM sehingga masyarakat beralih menggunakan air yang bersumber dari PDAM.

Lembaga Swadaya Masyarakat (LSM) dan Kelompok Peduli Lingkungan (KPL) merupakan sebuah organisasi sekaligus aktor yang memiliki peranan vital dalam keberlanjutan lingkungan baik sebagai pencetus ide atau gagasan, monitoring, pelaksanaan dan evaluasi kegiatan pemerintah dalam bidang pengelolaan lingkungan di wilayah ini. Keberadaan LSM dan KPL di wilayah ini telah terdistribusi merata. Hal ini menunjukkan bahwa tingkat kedulian masyarakat terhadap pentingnya pelestarian fungsi-fungsi lingkungan hidup.



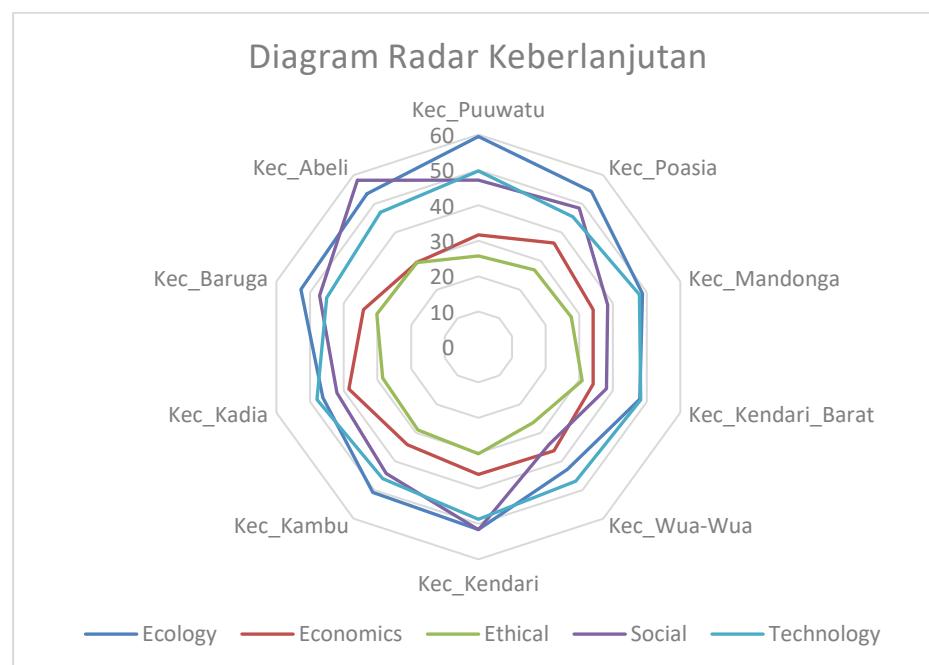
Gambar 40 Leverage dari Dimensi Kelembagaan

### 5.3.6 Diagram Radar Keberlanjutan

Tingkat keberlanjutan sumberdaya air tanah sebagai sumber air bersih di kota Kendari dapat dievaluasi dengan menganalisis multidimensi dengan diagram radar keberlanjutan. Hasil analisis diagram radar keberlanjutan disajikan pada Gambar 42.

Berdasarkan Gambar 42 menunjukkan perbedaan yang tidak terlalu besar antara kelima dimensi tersebut. Namun dilihat dari diagram radar, Kecamatan Wua-Wua memiliki skor yang rendah pada dimensi ekologi sebesar 42.79% dengan skor tertinggi terletak di Kecamatan Puuwatu 59.46% dengan nilai rerata indeks keberlanjutan sebesar 50.81%. Dimensi ekonomi, Kecamatan Kadia memiliki skor tertinggi sebesar 38.47% dan terendah di Kecamatan Abeli sebesar 29.49% dengan nilai rerata sebesar 34.47%. Dimensi social, memiliki rerata nilai keberlanjutan sebesar 44.93%, wilayah yang memiliki skor tertinggi dan terendah masing-masing terletak di Kecamatan Abeli sebesar 58.20% dan Kecamatan Wua-Wua sebesar 33.97%. Kecamatan Puuwatu, selain mendapatkan skor tertinggi pada dimensi ekologi, pada dimensi teknologi juga mendapatkan skor tinggi, tetapi mendapatkan

skor rendah pada dimensi kelembagaan, masing-masing sebesar 49.73% dan 25.72%. Sedangkan skor terendah pada dimensi teknologi terletak di Kecamatan Baruga (45.02%), sedangkan untuk dimensi kelembagaan wilayah yang mendapatkan skor tertinggi terletak di Kecamatan Kendari Barat (30.84%) dengan nilai rerata sebesar 28.47%.



Gambar 41 Diagram Radar keberlanjutan

#### 5.4 Simpulan

Tingkat keberlanjutan sumberdaya air tanah sebagai sumber air bersih di kota Kendari saat ini terbagi ke dalam dua kategori yaitu kategori *good* dan *bad*. Pada dimensi ekologi, memiliki rerata nilai indeks keberlanjutan 50.81% ( $>50\%$ ) atau terkategori *good* atau baik. Sedangkan pada dimensi lainnya tergolong dalam kategori *bad* karena memiliki rerata nilai keberlanjutan  $<50\%$  yaitu dimensi ekonomi (34.47%), dimensi social (44.93%), dimensi teknologi (47.28%) dan dimensi kelembagaan (28.47%). Unit analisis yang memiliki status keberlanjutan *good* yaitu Kecamatan Puuwatu, Kecamatan Poasia, Kecamatan Abeli, Kecamatan Baruga, Kecamatan Kendari dan Kecamatan Kambu pada dimensi ekologi dan pada dimensi sosial terdiri dari Kecamatan Abeli dan Kecamatan Kendari. Adapun atribut yang menjadi atribut pengungkit (*leverage attribute*) keberlanjutan terdiri atas sembilan belas atribut; dimensi ekologi empat atribut (permukiman kumuh, intrusi air laut, risiko pencemaran, daerah imbuhan air tanah), dimensi ekonomi tiga atribut (penduduk miskin, pendayagunaan ZISWAF dan keuntungan PDAM) dimensi sosial sebanyak dua atribut (Pendidikan formal dan kepuasan pelanggan PDAM), dimensi teknologi sebanyak tiga atribut (sumur resapan, sarana sanitasi dan SPAL), dan dimensi kelembagaan sebanyak dua atribut (realisasi pajak air tanah, dan LSM dan KPL).

## **VI IDENTIFIKASI SUMBERDAYA AIR ALTERNATIF UNTUK MENDUKUNG KEBERLANJUTAN AIR TANAH**

## 6.1 Pendahuluan

Air tanah merupakan sumber daya air utama masyarakat dan berbagai sektor lainnya di kota Kendari untuk pemenuhan kebutuhan sehari-hari. Potensi air tanah yang tersedia di wilayah ini sebesar  $1.28 \text{ m}^3/\text{d}$  atau  $40\,426\,945 \text{ m}^3/\text{tahun}$ , dan pada masa mendatang diproyeksi kebutuhan air baku terus mengalami *tren* peningkatan sesuai dengan pertumbuhan penduduk dan perkembangan fisik kota. Kondisi ini apabila diasumsikan pasokan air tanah tetap bahkan berkurang, dikarenakan semakin sempitnya daerah resapan, eksplorasi air tanah yang tidak memperhatikan *safety yield* dan aspek pembangunan yang tidak berorientasi pada pelestarian lingkungan maka terjadi defisit air akibatnya tarif air baku menjadi mahal.

Untuk mencapai keseimbangan dari aspek pemanfaatan dan kebutuhan air yang menghasilkan nilai ekonomi dan ekologi yang seimbang (*economics and ecologics balance*) maka diperlukan sumberdaya air alternatif guna menjamin keberlanjutan air tanah. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi sumberdaya air alternatif di kota Kendari.

## 6.2 Metode Penelitian

### 6.2.1 Jenis dan Sumber Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini berupa data sekunder berupa data curah hujan dari BMKG Kendari dan BWS Sulawesi IV Kendari dan studi Pustaka dari penelitian sebelumnya di lokasi penelitian

### 6.2.2 Analisis Data

Analisis data curah hujan harian maskimal 24 jam (mm/jam) menggunakan metode frekuensi dengan persamaan distribusi probabilitas Gumbel sebagai berikut.

Keterangan:  $R_{24}$  = Besarnya curah hujan harian maksimal 24 jam (mm/24jam)

X = Rerata curah hujan (mm)

$S_x$  = Standar deviasi

$S_y$  = Reduce standar deviasi

$\gamma_t$  = Standar deviasi sebagai periode ulang 10 tahun

$y_n$  = Reduce mean

Estimasi potensi *reservoir* menggunakan metode rasional dengan persamaan 8 sebagai berikut.

Keterangan:  $Q_p = \text{puncak limpasan (m}^3/\text{detik)}$

C = Koefisien limpasan

I = Intensitas hujan (mm/jam)

A = Luas Reservoir (ha)



### 6.3 Hasil dan Pembahasan

#### 6.3.1 Karakteristik Reservoir DAM

Infrastruktur reservoir DAM dapat digunakan untuk menampung air, mengurangi terjadinya banjir (Ashley *et al.* 2005), dan mengurangi laju sedimen. Pada Desember 2019, Data Sistem Layanan Pengadaan Secara Elektroik (LPSE) Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan (PUPR) menunjukkan bahwa pembangunan Check DAM Sungai Wanggu wilayah ini telah melakukan lelang pembuatan infrastrukut tersebut di DAS Wanggu dengan luas lahan 2 ha menggunakan konsep natural berbasis ramah lingkungan pada bagian hulu tepatnya di Kecamatan Konda Kabupaten Konawe Selatan, sedangkan bagian hilir tepatnya di Kecamatan Baruga Kota Kendari seluas 5.9 ha dengan konsep Kawasan Wisata. Pembangunan Infrastruktur tersebut dibebankan pada dan APBN tahun 2020 dengan nilai pagu dan HPS sebesar Rp 44 696 000 000.

#### 6.3.2 Curah Hujan Harian Maksimum

Curah hujan harian maksimal digunakan untuk analisis curah hujan rencana menggunakan metode frekuensi. Analisis sebaran frekunesi curah hujan di DAS Wanggu pada periode ulang tertentu menggunakan persamaan distribusi probability Gumbel. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai curah hujan maksimal periode 10 tahun sebesar 438.54 mm.

Tabel 18Nilai curah hujan harian maksimal

No	Periode (tahun)	Curah Hujan Rencana (Gumbel)
1	2	247.32
2	4	336.58
3	6	382.88
4	8	414.49
5	10	438.54

#### 6.3.3 Estimasi Volume Reservoir

Estimasi volume air masuk (*inflow*) *reservoir* berdasarkan perhitungan metode rasional. Perhitungan debit *inflow* adalah perkalian curah hujan efektif dan luas *reservoir* selama satu bulan. Data koefisiensi *run off* sebesar 0.75 (BWs Sulawesi IV Kendari, 2014). Hasil analisis menunjukkan bahwa potensi *reservoir* untuk menyediakan air baku secara keseluruhan sebesar 26 005 m<sup>3</sup>/hari dan selama satu tahun dapat mencapai 9 491 684 m<sup>3</sup>/tahun. Hal ini dapat disimpulkan bahwa dengan dibangunnya *reservoir* yang rencana akan mulai beroperasi pada tahun 2023 dapat menjadi salah satu solusi apabila terjadi defisit air dimasa mendatang. selain itu, dengan terbangunnya *reservoir* dapat mendukung pasokan air dari PDAM yang selama ini terus mengalami penurunan produksi selama periode 2001-2018 sebesar 3 563 575 m<sup>3</sup> menjadi 2 569 768 m<sup>3</sup> atau 6.23% (BPS Kota Kendari 2020b) dan ketergantungan masyarakat terhadap air tanah diharapkan dapat menurun sehingga berkelanjutan.

Tabel 19 Estimasi Volume Reservoir

No	Reservoir DAM		Potensi	
	Lokasi	Luas (ha)	m <sup>3</sup> /hari	m <sup>3</sup> /tahun
1	Hulu	2	6 583	2 402 958
2	Hilir	5.9	19 421	7 088 726
Total		7.9	26 005	9 491 684

#### 6.4 Simpulan

Potensi pemanfaatan Reservoir DAM dari DAS Wanggu pada bagian hulu sebesar 2 402 958 m<sup>3</sup>/tahun dan pada bagian hilir sebesar 7 088 726 m<sup>3</sup>/tahun dengan total sebesar 9 491 684 m<sup>3</sup>/tahun. Hal ini dapat mendukung pasokan air di kota Kendari yang saat ini masih memiliki ketergantungan terhadap air tanah dan menurunnya cakupan pelayanan air PDAM.

## VII MODEL PENGELOLAAN AIR TANAH BERKELANJUTAN DI KOTA KENDARI

### 7.1 Pendahuluan

Air tanah merupakan subsistem dari siklus hidrologis yang unik karena keberadaanya terdapat di antara pori-pori batuan. Jumlah air tanah di bumi sebesar 8.1 juta km<sup>3</sup> di antara es atau salju dan air permukaan, masing-masing sebesar 33 juta km<sup>3</sup> dan 220 km<sup>3</sup> dari total air tawar sekitar 43 juta km<sup>2</sup> (Silva 2018). Dengan demikian pada wilayah tropis seperti Indonesia, air tanah memiliki sumber daya air potensial sebagai sumber air bersih karena umumnya tidak terdapat es atau salju dan proporsi air tanah lebih besar dibandingkan air permukaan. Namun, pada kenyataannya distribusi air tanah di suatu tempat tidak merata berdasarkan ruang dan waktu, terdapat daerah yang memiliki potensi sumber air tanah melimpah dan tidak jarang ditemui daerah yang memiliki potensi air tanah yang kecil bahkan pada waktu-waktu tertentu mengalami kelangkaan air (Pramanda dan Purnama 2013). Hal ini dipengaruhi oleh batuan penyusunnya, perubahan iklim, perubahan penggunaan lahan dan degradasi lingkungan suatu daerah.

Akhir-akhir ini, ekstraksi sumberdaya air tanah sebagai sumber air bersih di suatu daerah terus mengalami peningkatan seiring dengan laju pertumbuhan penduduk, dan perkembangan dan pembangunan wilayah baik fisik maupun ekonomi. Jika kondisi ini terus berlanjut tanpa memperhatikan daya dukung air tanah, maka akan berdampak pada penurunan potensi air tanah baik kuantitas maupun kualitas sehingga mengakibatkan ketidakcukupan bahkan kekritisannya di masa mendatang. Kondisi ini sejak tahun 2015 mulai dirasakan di kota Kendari yang umumnya menggunakan air tanah untuk berbagai keperluan. Oleh karena itu, langkah pengelolaan air tanah untuk menjaga keberlanjutan air tanah sebagai sumber air bersih perlu dilakukan.

Pengelolaan air tanah merupakan suatu upaya perlindungan dan pelestarian baik segi kuantitas maupun kualitasnya guna menjaga keseimbangan antara supply dan demand sehingga keberadaannya masih dapat dinikmati baik generasi sekarang



maupun generasi mendatang sebagai sumber air bersih yang layak. Namun dalam upaya pengelolaan, air tanah memiliki sistem yang sangat kompleks dan dinamis karena memiliki keterkaitan dan ketergantungan dengan beberapa komponen lainnya sebagai bagian dari siklus hidrologis atau bersifat holistik. Oleh karena itu, diperlukan suatu pendekatan sistem guna mempelajari hubungan yang kompleks dan dinamis tersebut. Salah satu pendekatan yang dapat digunakan dan *powerfull* adalah sistem dinamik (SD). SD telah banyak diterapkan pada studi sumber daya air, namun khusus pada studi air tanah masih jarang/sedikit digunakan sehingga peneliti tertarik untuk melakukan studi ini.

SD adalah suatu sistem berfikir dengan cara memahami interaksi antar subsistem yang berbeda namun saling berhubungan yang mendorong perilaku dinamis (Mirchi *et al.* 2012). SD didasarkan pada teori sistem struktural untuk mewakili sistem alamiah yang kompleks (Simonovic dan Fahmy 1999). Perilaku perubahan sistem yang kompleks tersebut dianalisis secara temporal (McKnight dan Finkel 2013) guna memudahkan dalam pengambilan keputusan. Penelitian ini mengadopsi konsep SDGs sebagai *goal oriented* dan SD sebagai dasar teoritis untuk simulasi dinamis kondisi eksisiting dan *tren* masa depan dalam pemanfaatan air tanah dan upaya pengelolaan yang dilakukan guna meminimalisir dampak negatif yang akan terjadi demi kemakmuran dan kualitas hidup masyarakat yang lebih baik.

Penelitian ini bertujuan mendesain model pengelolaan air tanah berkelanjutan di kota Kendari.

## 7.2 Metode penelitian

### 7.2.1 Jenis dan Sumber Data

Jenis dan sumber data yang perlukan dalam penelitian terdiri dari data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh dari *grey literature* dan *Expert Judgement*, sedangkan data sekunder diperoleh dari studi literatur terkait topik penelitian baik di lokasi penelitian yang sama maupun di lokasi penelitian lainnya.

### 7.2.2 Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data dalam penyusunan model pengelolaan air tanah berkelanjutan di kota Kendari dilakukan melalui *grey literature* didasarkan pada hasil analisis pada bab sebelumnya dan hasil wawancara terhadap responden pakar/stakeholder. Selain itu, juga dilakukan studi literatur review dokumentasi ilmiah dan dokumen dari instansi terkait terkait topik penelitian.

### 7.2.3 Analisis Data

Analisis data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas beberapa tahapan meliputi analisis kebutuhan, formulasi masalah, identifikasi sistem, simulasi model dan validasi model. Penelitian ini terbagi ke dalam tiga sub model yaitu sub model kebutuhan air baku (*Demand*), sub model kualitas air tanah (*Quality*), dan sub model ketersediaan air baku (*Supply*). Adapun tahapan analisis disajikan secara rinci sebagai berikut.

a) Analisis kebutuhan

Analisis kebutuhan bertujuan untuk mengidentifikasi kebutuhan setiap pelaku yang terlibat dalam upaya pengelolaan air tanah secara berkelanjutan di kota Kendari. Berdasarkan studi literatur dan *expert judgement* diperoleh actor/stakeholder yang terlibat dalam upaya pengelolaan air tanah di wilayah ini (Tabel 20).

Tabel 20 Analisis Kebutuhan actor dalam konservasi air tanah sebagai air baku

No	Aktor/stakeholder	Kebutuhan
1	Masyarakat	1 Memperoleh sumber air baku yang layak baik segi kuantitas maupun kualitas 2 Tarif air yang terjangkau 3 Peningkatan kesehatan masyarakat
2	Instansi Pemerintah	1 Target SDGs terpenuhi 2 Kebijakan dalam konservasi air tanah 3 Kebijakan dalam penyediaan dan perlindungan sumber daya air 4 Kebijakan gerakan hemat air 5 Penerapan WSC 6 PDRB Meningkat
3	PDAM Tirta Anoa Kendari	1 Terpenuhinya kebutuhan air baku masyarakat 2 Memberikan pelayanan Prima terhadap masyarakat 3 Dapat Mencapai keuntungan yang layak bagi perusahaan 4 Status Kinerja Perusahaan menjadi sehat 5 Terjaminnya air baku baik secara kuantitas maupun kualitas 6 Peningkatan kapasitas pengolahan air

b) Formulasi Masalah

Berdasarkan analisis kebutuhan dan kondisi eksisting air bersih di kota kendari maka permasalahan dapat diformulasikan sebagai berikut.

- 1) Jumlah pertumbuhan penduduk dan industri yang terus meningkat dari waktu ke waktu.
- 2) Laju konversi lahan vegetasi menjadi non vegetasi sangat tinggi.
- 3) Masih terdapat Kawasan permukiman kumuh yang terdistribusi di setiap kecamatan.
- 4) Fasilitas dan pelayanan air bersih oleh PDAM masih rendah dan tidak terdistribusi merata serta tingginya kebocoran PDAM.
- 5) Kapasitas produksi air baku oleh PDAM terus menurun sedangkan permintaan terus meningkat.
- 6) Besarnya biaya operasional produksi akibat dari beban biaya operasional listrik (belum *full cost recovery*)



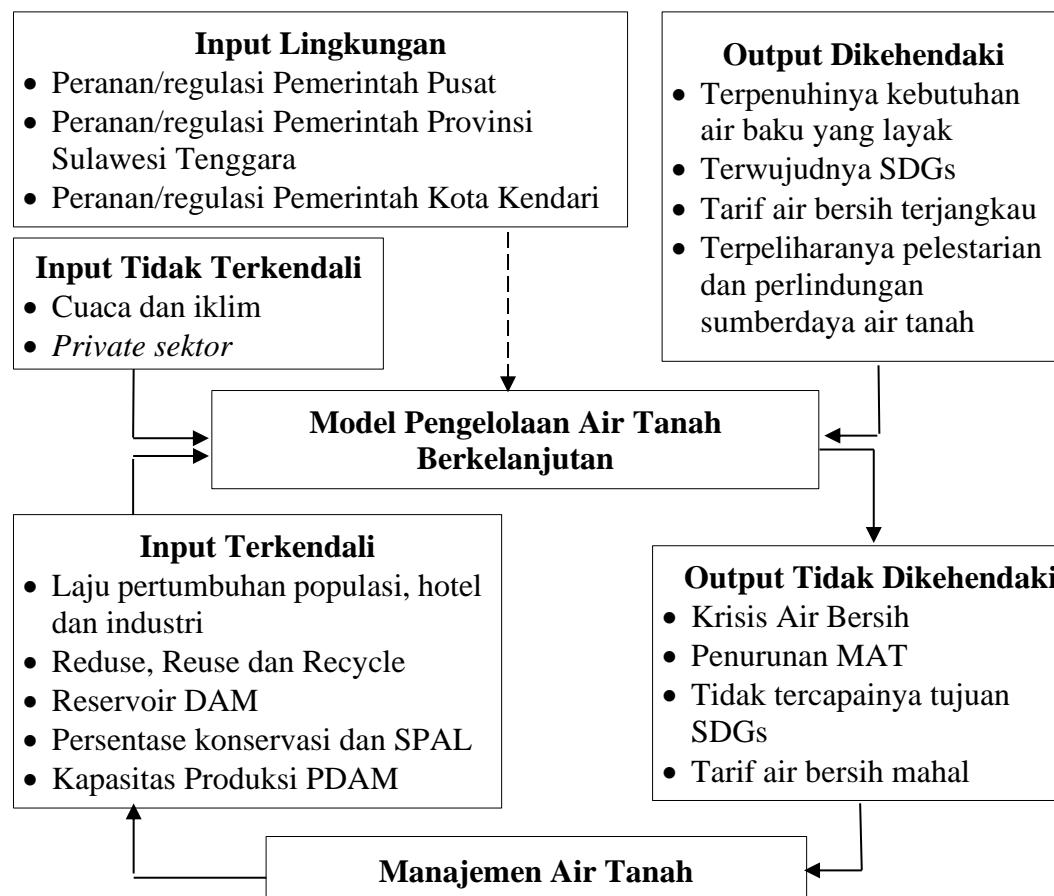
- 7) Kapasitas SDM tidak memadai/ tidak sesuai kebutuhan dikarenakan rekrutmen Direksi dan karyawan tidak akuntabel, tidak tersedia tenaga dengan kualifikasi yang dibutuhkan serta kurang penguasaan teknologi.
- 8) Pemompaan air tanah yang tidak memperhatikan kaidah konservasi.
- 9) Belum ada upaya pembatasan eksplorasi air tanah dengan cara pemboran.
- 10) Penurunan MAT khususnya pada pusat-pusat pertumbuhan kota.
- 11) Terjadi intrusi air tanah di sepanjang pesisir teluk Kendari.
- 12) Risiko pencemaran air tanah akibat air limbah yang dihasilkan baik bersumber dari rumah tangga maupun industri.
- 13) Belum ada sistem pengolahan air limbah rumah tangga, hotel non berbintang dan industri kecil sesuai standar IPAL.
- 14) Belum ada upaya penghematan penggunaan air.
- 15) Motivasi dan kepedulian masyarakat terhadap lingkungan masih rendah.
- 16) Belum ada Kerjasama pemerintah daerah secara terpadu dalam penyediaan air bersih atau bersifat parsial.

c) Identifikasi Sistem

Identifikasi sistem berfungsi untuk memahami interaksi antar faktor yang saling berhubungan dalam pembentukan suatu sistem yaitu dengan cara membuat diagram *causal loop*, selanjutnya diinterpretasi ke dalam diagram *black box*. Penyusunan diagram *black box* terdiri dari peubah input, peubah output dan beberapa parameter yang membatasi struktur sistem (Gambar 43). Proses diagram *black box* dimulai dari peubah input berupa *input* tidak terkendali dan input terkendali selanjutnya menjadi output berupa *output* yang diinginkan dan output yang tidak diinginkan. Output yang tidak diinginkan akan ditindaklanjuti dengan umpan balik yang berhubungan dengan input terkendali sesuai dengan kebutuhan dan output yang diinginkan, serta berpengaruh langsung terhadap proses. Input tidak terkendali adalah input yang tidak dapat disesuaikan, tetapi tetap berpengaruh terhadap proses dalam hal ini keberadaannya terdapat di luar sistem.

d) Simulasi Model

Simulasi model yang dilakukan dalam penelitian ini terbagi ke dalam tiga model yaitu kondisi eksisting, yakni simulasi data sesuai dengan kondisi eksisting atau tanpa melakukaaan intervensi/ perubahan data. Skenario-1, yakni penerapan RTRW Kota Kendari tahun 2010-2030, dan Skenario-2 yakni penerapan WSC (*Water Sensitive City*) di kota Kendari (Tabel 21). Konsep WSC menekankan pada pengelolaan keberlanjutan siklus air dengan mengintegrasikan siklus air hujan, air tanah, pengelolaan air limbah dan air bersih secara terpadu guna meminimalisir kerusakan sumber daya air dan menjaga kelestarian lingkungan.



Gambar 42 Diagram Black Box Sistem Pengelolaan Air Tanah

Tabel 21 Skenario Pengelolaan Air Tanah Berkelaanjutan

Variabel Peubah	K. Eksisting	Skenario-1	Skenario-2
Kebijakan Gerakan Hemat Air	0%	5%	10%
Kebijakan Peningkatan IPAL	0%	5%	10%
Kebijakan Pemanfaatan Reservoir DAM	0%	5%	10%
Kebijakan Peningkatan Produksi PDAM	Eksisting	60%	80%
Kebijakan Pembuatan Sumur Resapan	Eksisting	5%	10%
Kebijakan RHL	Eksisting	5%	10%

### e) Validasi Model

Validasi model dilakukan guna melihat besaran kesalahan (error) dalam mendesain suatu model. Model yang baik dan benar adalah model yang memiliki kemiripan dengan kondisi aktual. Kesalahan dalam mendesain model berdampak pada kesalahan dalam pengambilan keputusan, oleh karena itu, ketepatan model sangat penting dilakukan. Ketepatan model dapat dilakukan dengan uji validasi baik validasi struktur maupun validasi kinerja.

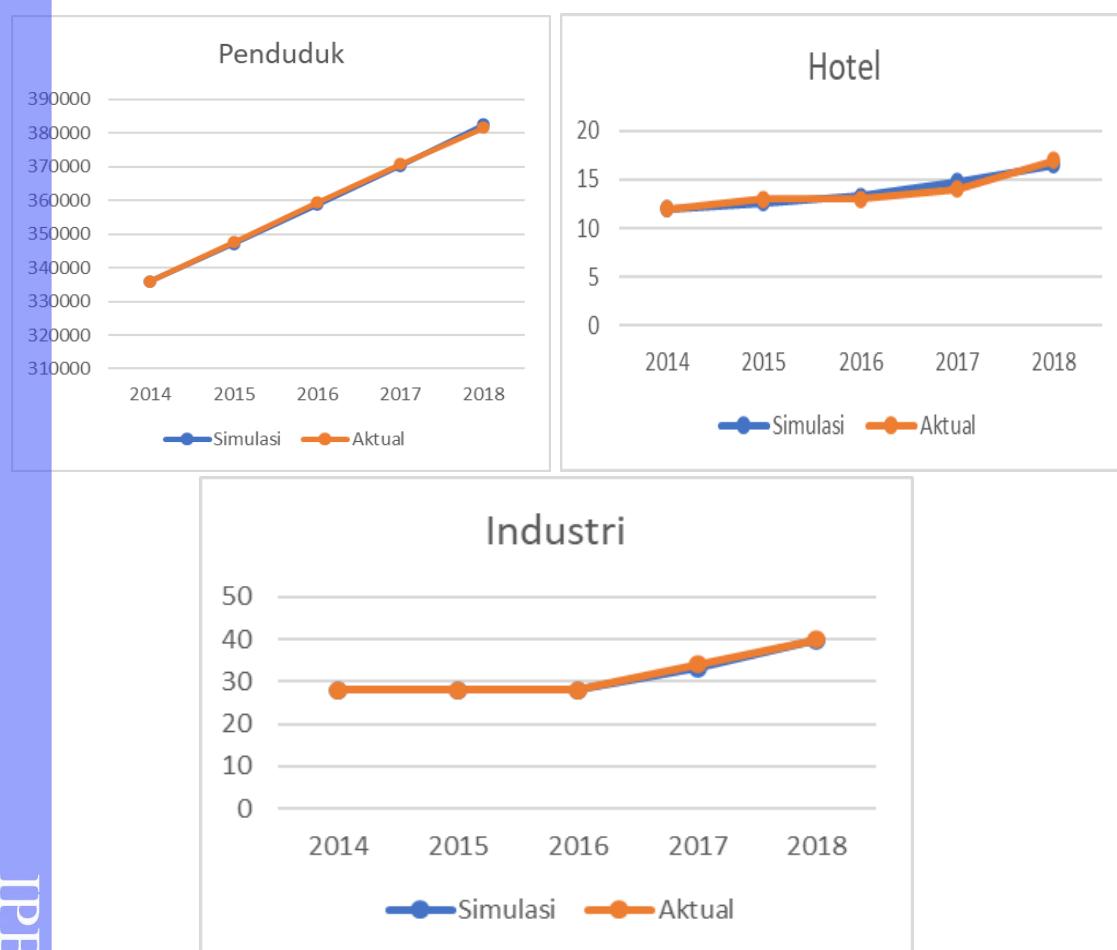
Validasi struktur bertujuan untuk mengetahui sejauh mana struktur model menyerupai struktur sistem nyata. Keberhasilan validasi struktur dilihat dari jumlah penduduk, hotel dan industri hasil simulasi pada tahun 2014-2018 dibandingkan dengan kondisi actual (penduduk, hotel dan industri) pada periode waktu yang

sama. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seiring dengan peningkatan waktu maka terjadi peningkatan jumlah penduduk dan diikuti oleh sektor lainnya, seperti hotel dan industri. Dengan demikian model yang didesain valid secara empiris atau logis.

Validasi kinerja bertujuan untuk mengetahui apakah kinerja model *compatible* dengan kinerja sistem nyata. Sistem kerja ini dengan membandingkan output model dengan data empirik (Azmanajaya 2012; Yusuf 2016). Penyimpangan output model terhadap data empiris dapat diketahui dengan uji statistik berupa MAPE (*Mean Absolut Percetage Error*), dengan presentasi error sebesar 5%. Adapaun persamaan MAPE sebagai berikut.

Keterangan:  $A_t$ : nilai aktual  
 $S_t$ : nilai hasil simulasi  
 $n$  : jumlah data (waku/data)

Hasil analisis menunjukkan bahwa model yang dibangun memiliki nilai  $R^2$  mendekati 1 dan nilai MAPE <5%. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa model ini valid atau sangat tepat.



Gambar 43 Uji validasi kinerja model

Tabel 22 Validasi kinerja model

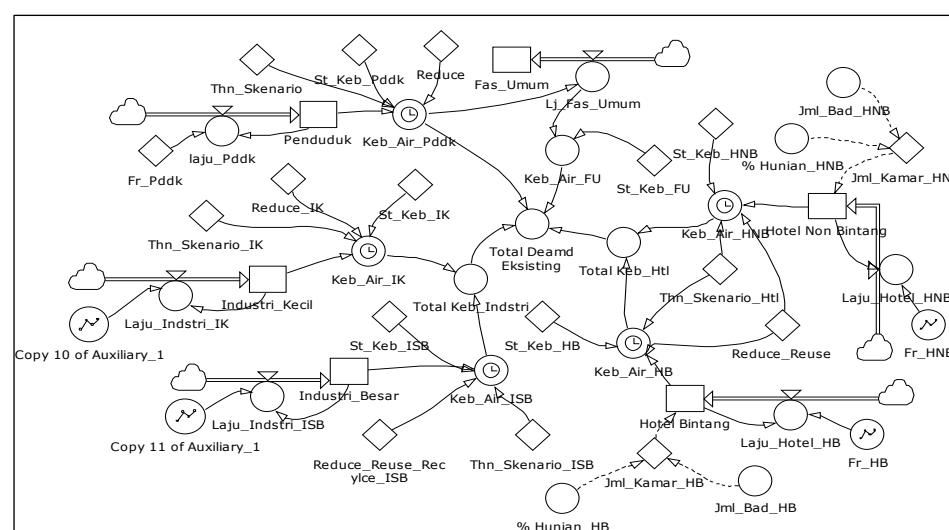
Tahun	Penduduk		Hotel		Industri	
	Aktual	Simulasi	Aktual	Simulasi	Aktual	Simulasi
2014	335 889	335 889	12	12	28	28
2015	347 496	347 004	13	13	28	28
2016	359 371	358 486	13	13	28	28
2017	370 728	370 348	14	15	34	33
2018	381 628	382 603	17	17	40	40
r	0.99954		0.96185		0.99794	
MAPE	0.37		2.87		2.45	

### 7.3 Hasil dan Pembahasan

Model pengelolaan air tanah berkelanjutan di kota Kendari terdiri dari kebutuhan (*Demand*), kualitas (*Quality*), dan ketersediaan (*supply*) air. Simulasi model dilakukan pada periode 2018-2049. Periode tersebut diharapkan dapat menggambarkan kondisi air tanah sehingga memudahkan dalam upaya pengelolaan air tanah sebagai sumber air baku di masa mendatang dan terwujudnya *universal akses* sektor air bersih yang layak sesuai tujuan SDGs.

### 7.3.1 Sub Model *Demand Air Baku*

Sub model kebutuhan air ini menjelaskan kebutuhan air dari berbagai sektor yang terdapat di wilayah penelitian yakni kebutuhan domestik, fasilitas umum, industri dan hotel. Jumlah dan laju pertumbuhan penduduk sangat mempengaruhi kebutuhan air domestik, sedangkan kebutuhan air sektor fasilitas umum dipengaruhi oleh variable kebutuhan domestik yaitu 12.5% dari kebutuhan domestik (Direktorat Jenderal Cipta Karya PUPR 2007). Kebutuhan air sektor industri dipengaruhi oleh jenis, jumlah dan laju pertumbuhan, sedangkan sektor hotel dipengaruhi oleh jumlah, laju pertumbuhan dan tingkat hunian.



Gambar 44 Struktur sub model *demand* air baku

Proyeksi jumlah penduduk, industri (Kecil dan Besar) dan hotel (berbintang dan non berbintang) di kota Kendari selama periode 2014-2049 cenderung mengalami peningkatan setiap tahunnya. Pada awal tahun proyeksi yaitu periode 2014-2017 masing-masing sektor berjumlah 335 889 jiwa, (28unit dan 358unit), dan (12unit dan 126 unit), sedangkan ditahun akhir proyeksi yaitu periode 2046-2049 berjumlah 951 956 jiwa, (44 unit dan 150 245 unit), dan (21unit dan 136 unit).

Dilihat dari jumlah penduduk wilayah ini hingga periode 2026-2029 tergolong dalam kelas kota sedang (100 000-500 000 jiwa), sedangkan pada periode selanjutnya tergolong ke dalam kelas kota besar (500 000-1 000 000) (Direktorat Jenderal Cipta Karya PUPR 2007). Perubahan klasifikasi tersebut juga berpengaruh terhadap standar kebutuhan air yaitu pada kelas kota sedang standar kebutuhan air sebesar 130 l/jiwa/hari menjadi 150 l/jiwa/hari (Direktorat Jenderal Cipta Karya PUPR 2007). Pada sektor industri, klasifikasi industri didasarkan pada jumlah karyawan. Jumlah karyawan pada sektor industri besar sebanyak >100 karyawan, sedangkan untuk industri kecil sebanyak 5-19 karyawan atau rerata 12 karyawan (BPS Kota Kendari 2020a). Klasifikasi jenis industri tersebut juga berpengaruh terhadap standar keperluan air yaitu 200 l/unit untuk industri besar dan 30 l/unit untuk industri kecil (BPS Provinsi Sulawesi Tenggara 2019).

Tabel 23 Proyeksi Jumlah Penduduk, Industri dan Hotel di kota Kendari

Time	Pddk	IB	IK	HB	HNB
2014-2017	335.889	28	358	12	126
2018-2021	382.603	38	979	16	132
2022-2025	435.814	39	2.009	17	133
2026-2029	496.425	40	4.124	17	134
2030-2033	565.466	40	8.464	18	134
2034-2037	644.108	41	17.373	19	135
2038-2041	733.688	42	35.661	20	135
2042-2045	835.727	43	73.197	20	136
2046-2049	951.956	44	150.245	21	136

Keterangan: Pddk = Penduduk, IB = Industri Besar, IK = Industri Kecil, HB= Hotel berbintang, dan HNB = Hotel Non Berbintang

Hasil analisis proyeksi kebutuhan air penduduk menunjukkan bahwa kebutuhan air domestik menunjukkan *tren* kecenderungan meningkat setiap tahunnya seiring dengan peningkatan laju pertumbuhan penduduk, kondisi ini juga terjadi pada sektor lainnya (fasilitas umum, industri dan hotel). Jumlah kebutuhan air bersih pada masing-masing sektor pada periode awal proyeksi 2014-2017 yaitu penduduk (15 937 933 m<sup>3</sup>/tahun), fasilitas umum (1 992 242 m<sup>3</sup>/tahun), total kebutuhan air sektor industri sebesar 5 964 m<sup>3</sup>/tahun terdiri dari industri besar (2 044 m<sup>3</sup>/tahun) dan industri kecil (3 920 m<sup>3</sup>/tahun), total kebutuhan air sektor hotel sebesar 84 680 m<sup>3</sup>/tahun terdiri dari hotel berbintang dan hotel non berbintang masing-masing sebesar 38 886 m<sup>3</sup>/tahun dan 45 794 m<sup>3</sup>/tahun. Sedangkan pada proyeksi tahun akhir yaitu 2046-2049 menjadi penduduk (45 170 307 m<sup>3</sup>/tahun), fasilitas umum 5 646 288 m<sup>3</sup>/tahun), total kebutuhan air sektor industri sebesar 1



648 380 m<sup>3</sup>/tahun terdiri dari industri besar (3 200 m<sup>3</sup>/tahun) dan industri kecil (1 645 180 m<sup>3</sup>/tahun), total kebutuhan air sektor hotel sebesar 118 573 m<sup>3</sup>/tahun terdiri dari hotel berbintang dan hotel non berbintang masing-masing sebesar 69 070 m<sup>3</sup>/tahun dan 49 503 m<sup>3</sup>/tahun.

Total kebutuhan air dari berbagai sektor pada periode 2014-2017 diperoleh sebesar 18 105 499 m<sup>3</sup>/tahun menjadi 52 702 122 m<sup>3</sup>/tahun di akhir tahun proyeksi 2046-2049 (Tabel 22). Hal ini menunjukkan bahwa sektor domestik memiliki kebutuhan air lebih banyak dibandingkan sektor lainnya, selanjutnya diikuti oleh sektor fasilitas umum, industri dan hotel. Pada sektor industri kebutuhan air industri kecil mengalami peningkatan secara signifikan seiring dengan laju pertumbuhannya, sedangkan kebutuhan air industri besar mengalami peningkatan namun tidak signifikan, tren ini juga terjadi pada sektor hotel baik hotel berbintang maupun non berbintang. Pemanfaatan sumber daya air dengan tidak memperhatikan daya dukung dan daya tampung maka dapat menyebabkan krisis air baku dimasa mendatang. Oleh karena itu diperlukan intervensi terhadap model.

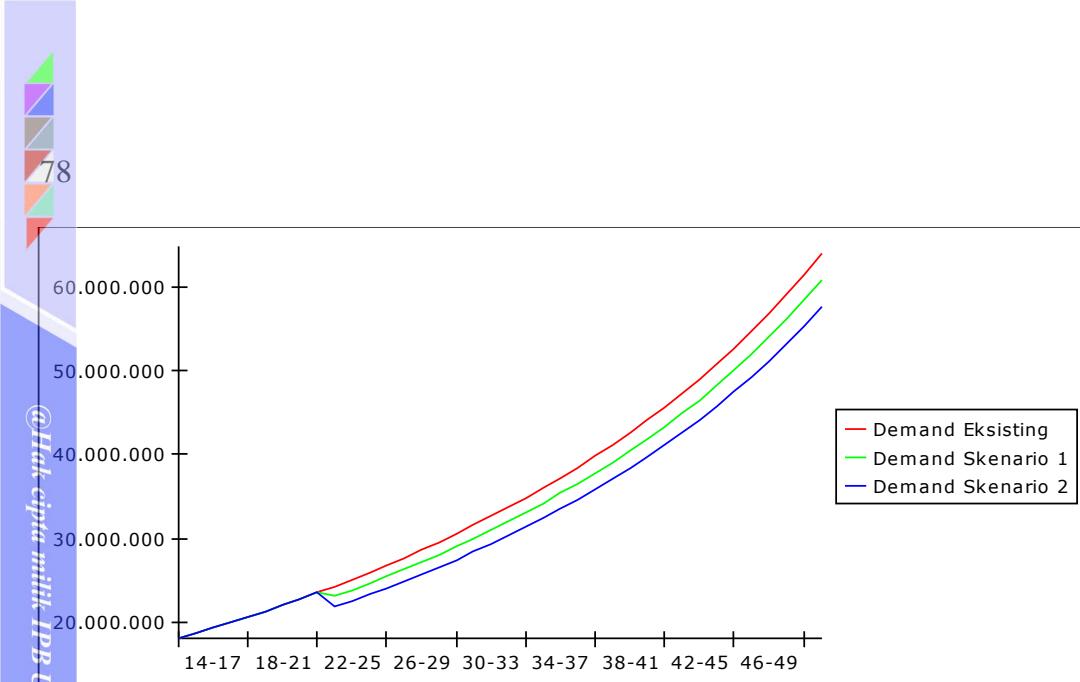
Skenario yang digunakan dalam pengelolaan air tanah agar berkelanjutan di kota Kendari dilakukan dengan menekankan pada perilaku konsumsi air masing-masing sektor dengan menggunakan skenario kebijakan gerakan hemat air. Kebijakan gerakan hemat air terdiri dari variable *reduce* untuk kebutuhan air sektor domestik dan sektor fasilitas umum, variable *reduce* dan *reuse* untuk sektor perhotelan, Variable *reduce*, *reuse*, dan *recycle* untuk sektor industri khususnya industri sedang/besar, sedangkan pada industri rumah tangga/kecil hanya variable *reduce*. Hal ini dilakukan guna meningkatkan efisiensi air baku.

Tabel 24 Proyeksi Kebutuhan Air Sektor Penduduk, Fasilitas Umum, Industri dan Hotel di kota Kendari periode 2014-2049

Time	Pddk	FU	IB	IK	TI	HB	HNB	TH	Demand
2014-2017	15.937.933	1.992.242	2.044	3.920	5.964	38.886	45.794	84.680	18.105.499
2018-2021	18.154.514	2.269.314	2.783	10.717	13.500	52.275	48.137	100.412	20.638.152
2022-2025	20.679.368	2.584.921	2.839	21.998	24.837	54.397	48.330	102.727	23.494.580
2026-2029	23.555.368	2.944.421	2.896	45.154	48.050	56.606	48.523	105.129	26.758.097
2030-2033	26.831.350	3.353.919	2.955	92.682	95.637	58.904	48.718	107.622	30.496.150
2034-2037	30.562.942	3.820.368	3.014	190.240	193.254	61.296	48.913	110.209	34.796.981
2038-2041	34.813.508	4.351.688	3.075	390.486	393.561	63.785	49.109	112.894	39.784.544
2042-2045	39.655.225	4.956.903	3.137	801.511	804.648	66.375	49.306	115.680	45.648.136
2046-2049	45.170.307	5.646.288	3.200	1.645.180	1.648.380	69.070	49.503	118.573	52.702.122

Keterangan: Pddk= Penduduk, FU= Fasilitas Umum, IB= Industri Besar, IK= Industri Kecil, TI= Total Industri, HB= Hotel berbintang, HNB= Hotel Non Berbintang, dan TH= Total Hotel

Hasil simulasi menunjukkan bahwa kebutuhan air baku berdasarkan kondisi eksisting cenderung mengalami peningkatan setiap tahunnya yaitu pada awal periode 2014-2017 sebesar 18 105 499 m<sup>3</sup>/tahun dan periode 2046-2049 sebesar 52 702 122 m<sup>3</sup>/tahun. Dengan berlakunya kebijakan Gerakan hemat air tahun 2022 maka kebutuhan air baku pada masing-masing sektor mengalami pengurangan sebesar 5% dan 10% pada skenario-1 dan skenario-2, sehingga pada periode 2026-2029 kebutuhan air baku masing-masing skenario menjadi 25 420 192 m<sup>3</sup>/tahun dan 24 082 288 m<sup>3</sup>/tahun dan diakhir periode menjadi 50 067 016 m<sup>3</sup>/tahun dan 47 431 910 m<sup>3</sup>/tahun (Gambar 44).

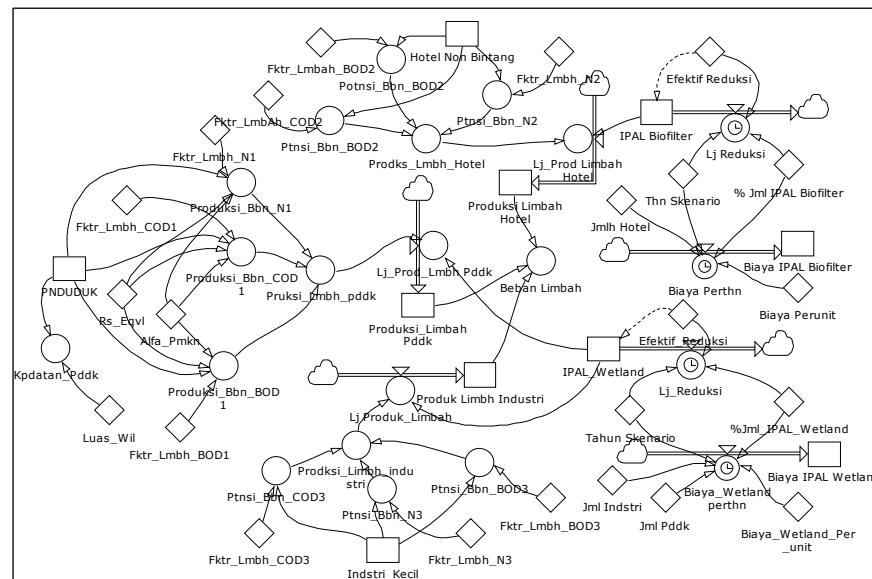


Gambar 45 Proyeksi Kebutuhan air baku pada berbagai skenario di kota Kendari

### 7.3.2 Sub Model Kualitas Air Tanah

Sub model kualitas air tanah dibangun berdasarkan sumber pencemar yang terdapat di wilayah penelitian terdiri dari limbah domestik, limbah fasilitas umum, limbah perhotelan dan limbah industri. Namun dalam penelitian ini sumber pencemar hanya difokuskan pada limbah domestik, limbah hotel non berbintang dan limbah industri kecil karena 60-70% air limbah yang dihasilkan dibuang langsung ke lingkungan tanpa adanya pengolahan terlebih dahulu (Supradata 2005). Sedangkan pertumbuhan ke dua sektor tersebut terus mengalami peningkatan signifikan dari waktu ke waktu. Kondisi tersebut juga terjadi di wilayah penelitian ini sehingga dapat mengakibatkan penurunan kualitas air tanah. Selain itu, berdasarkan hasil observasi di wilayah ini penelitian ini dijumpai jenis usaha akomodasi (hotel non berbintang) yang tidak memiliki sistem pengolahan limbah sesuai standar teknis. Adapun parameter yang digunakan sebagai potensi pencemaran yaitu COD, BOD, total nitrogen karena telah diketahui bahwa parameter tersebut rata-rata telah melebihi baku mutu untuk air bersih sehingga mempengaruhi indeks pencegaran air tanah di wilayah penelitian.

Kualitas air tanah sangat dipengaruhi oleh variable pertumbuhan penduduk, industri, hotel, faktor emisi, rasio ekivalen dan alpha. Faktor emisi limbah BOD, COD dan Total N masing-masing sebesar 0.04 kg/orang/hari, 0.055 kg/orang/hari, dan 0.00195 kg/orang/hari sedangkan rasio ekivalensi kota dan alpha masing-masing sebesar 1 dan 1 (Komarudin *et al.* 2015). Produksi limbah domestik diperoleh dengan menghitung jumlah penduduk dikalikan dengan faktor emisi, rasio ekivalen dan alpha. Limbah sektor industri diperoleh dengan mengalikan jumlah unit usaha dengan rerata jumlah pegawai, sedangkan sektor hotel dihitung berdasarkan tingkat hunian dan tiap kamar memiliki dua *bed*. Emisi yang dihasilkan baik sektor industri maupun hotel dihitung berdasarkan faktor emisi perorangan setiap harinya.



Gambar 46 Struktur sub model kualitas air tanah

Hasil analisis menunjukkan bahwa penduduk mampu memproduksi limbah lebih tinggi dibandingkan sektor lainnya yaitu pada periode 2014-2017 sebesar 99 851 429 ton/tahun dan terus meningkat setiap tahunnya seiring dengan laju pertumbuhan penduduk, sedangkan pada sektor industri dan hotel masing-masing sebesar 417 ton/tahun dan 32 ton/tahun. Pada akhir tahun periode masing-masing sektor mampu memproduksi limbah yaitu penduduk (100 717 832 ton/tahun), industri (6 814 ton/tahun) dan hotel (1 001 ton/tahun). Total produksi limbah diawal tahun proyeksi dan diakhir tahun proyeksi masing-masing sebesar 99 851 878 ton/tahun dan 100 725 647 ton/tahun (Tabel 25). Pertumbuhan ketiga sektor tersebut dengan kemampuan memproduksi limbah memberikan tekanan secara langsung terhadap lingkungan. Air limbah yang tidak diolah dengan baik menyebabkan pencemaran pada badan air baik air tanah maupun air permukaan, selain berdampak negetatif terhadap kesehatan masyarakat, pencemaran air juga menyebabkan berkurangnya sumber air baku. Oleh karena itu, untuk mengantisipasi dampak tersebut, maka perlu upaya meminimalisir limbah tersebut melalui berbagai intervensi skenario terhadap desain model berupa teknologi pengolahan limbah (IPAL) yang efektif dan efisien.

Skenario dalam pengelolaan limbah untuk menjaga eksistensi kualitas air tanah dalam model ini bersifat *preventif* yaitu dengan pemanfaatan IPAL. Alternatif IPAL yang digunakan dalam penelitian ini mempertimbangkan biaya murah, lahan terbatas dan ramah lingkungan. Salah satu teknologi yang dapat digunakan adalah Teknologi *constructed wetland* (TCW) untuk sektor domestik dan industri kecil, dan *biofilter anaerob-aerob* (BA) untuk hotel. TCW dan BA merupakan suatu sistem pengelolaan air limbah yang sangat efektif dalam menurunkan pencemaran air. Penerapan TCW mampu mereduksi polutan BOD, COD dan N masing-masing sebesar 57%, 59% dan 28% (Balitbang SDA PU, 2004), sedangkan BA mampu mereduksi hingga polutan BOD sebesar 99.84% dan COD sebesar 99.34% (Praptiwi, 2017). Selain itu, hasil pengolahan air limbah dapat dimanfaatkan kembali sebagai penyiraman tanaman dan lain sejenisnya.

Tabel 25 Produksi Limbah sektor penduduk, hotel dan industri periode 2014-2049

Time	Penduduk	Industri	Hotel	Total Limbah
2014-2017	99.851.429	417	32	99.851.878
2018-2021	99.917.125	1.216	147	99.918.488
2022-2025	99.991.958	2.016	268	99.994.241
2026-2029	100.077.198	2.816	389	100.080.402
2030-2033	100.174.293	3.615	510	100.178.418
2034-2037	100.284.892	4.415	632	100.289.939
2038-2041	100.410.872	5.215	755	100.416.841
2042-2045	100.554.373	6.014	878	100.561.265
2046-2049	100.717.832	6.814	1.001	100.725.647

Hasil analisis simulasi menunjukkan bahwa penerapan IPAL TCW dan BA mulai tahun 2022 cukup efektif menurunkan beban limbah yang dihasilkan oleh ketiga sektor tersebut yaitu pada awal periode simulasi yaitu 2022 menunjukkan bahwa pada kondisi eksisting jumlah limbah periode 2022-2025 sebesar 99.994.241 ton/tahun, sedangkan pada skenario 1 dan skenario 2 sebesar 99.994.235 ton/tahun, selanjutnya terus mengalami penurunan hingga akhir periode 2046-2049 masing-masing skenario 1 dan skenario 2 sebesar 100.723.942 ton/tahun dan 100.722.289 ton/tahun. TWC mampu mereduksi beban limbah domestik hingga mencapai 1.314 ton/tahun dan 2.629 ton/tahun pada akhir skenario 1 dan skenario 2, dan limbah industri kecil masing-masing sebesar 8 ton/tahun dan 15 ton/tahun, sedangkan BA mampu mereduksi limbah hotel sebesar 47.36 ton/tahun dan 47.42 ton/tahun.

Tabel 26 Efektifitas Pengolahan Limbah dengan TWC dan BA di kota Kendari

Time	Kondisi Eksisiting	Skenario 1	Skenario 2
2014-2017	99.851.878	99.851.878	99.851.878
2018-2021	99.918.488	99.918.488	99.918.488
2022-2025	99.994.241	99.994.235	99.994.235
2026-2029	100.080.402	100.080.377	100.080.364
2030-2033	100.178.418	100.178.303	100.178.207
2034-2037	100.289.939	100.289.637	100.289.363
2038-2041	100.416.841	100.416.234	100.415.661
2042-2045	100.561.265	100.560.202	100.559.182
2046-2049	100.725.647	100.723.942	100.722.289

Pengelolaan air limbah ini membutuhkan sejumlah biaya mulai dari kebutuhan lahan, tahapan kontruksi, dan biaya operasional dan perawatan, guna meminimalisir biaya, dilakukan optimalisasi kebutuhan lahan dengan memanfaatkan lahan pekarangan sehingga lahan pengolahan limbah juga dapat digunakan sebagai taman. Biaya TWC untuk komponen kontruksi, operasional dan perawatan per 3000 orang sebesar Rp 5.505.813.549 atau Rp 1.835.271 (Prakoso

dan Tangahu, 2016), sedangkan BA sebesar Rp 309 723 952 per unit hotel (Praptiwi, 2017). Pada kondisi eksisting, tidak dilakukan penerapan teknologi IPAL sehingga tidak ada biaya yang dikeluarkan, sedangkan pada skenario 1, IPAL telah terpasang dan mulai berfungsi untuk mereduksi beban limbah sebesar 5%, dibutuhkan biaya mulai periode 2026-2029 sebesar Rp 1 248 663 330 dan Rp 78 050 436 masing-masing TWC dan BA dan terus mengalami tren peningkatan hingga akhir periode 2046-2049 sebesar Rp 7 491 979 982 dan Rp 468 302 615. Tren peningkatan biaya juga terjadi pada skenario 2 dengan kemampuan mereduksi air limbah sebesar 10% dari total limbah yang dihasilkan oleh berbagai sektor di wilayah ini. Biaya yang dibutuhkan pada periode 2026-2029 sebesar Rp 2 497 326 661 dan Rp 156 100 872 masing-masing TWC dan BA dan di akhir periode 2046-2049 sebesar Rp 14 983 959 963 dan Rp 936 605 231

Hal ini dapat disimpulkan biaya yang dikeluarkan untuk IPAL limbah domestik lebih besar dibandingkan sektor industri dan hotel seiring dengan jumlah beban limbah yang dihasilkan. Oleh karena itu, guna mewujudkan kebijakan ini maka pemerintah harus memastikan pengembangan perumahan/permukiman sesuai dengan rencana tata ruang dan layak huni khususnya pada pengolahan air limbah sesuai dengan Permen PUPR No 04/PRT/M/2017 tentang penyelenggaraan sistem pengolahan air limbah domestik.

Tabel 27 Proyeksi Kebutuhan Biaya IPAL kota Kendari periode 2026-2049

Time	Skenario1_TWC	Skenario1_BA	Skenario2_TWC	Skenario2_BA
14-17	0	0	0	0
18-21	0	0	0	0
22-25	0	0	0	0
26-29	1.248.663.330	78.050.436	2.497.326.661	156.100.872
30-33	2.497.326.661	156.100.872	4.994.653.321	312.201.744
34-37	3.745.989.991	234.151.308	7.491.979.982	468.302.615
38-41	4.994.653.321	312.201.744	9.989.306.642	624.403.487
42-45	6.243.316.651	390.252.180	12.486.633.303	780.504.359
46-49	7.491.979.982	468.302.615	14.983.959.963	936.605.231

### 7.3.3 Sub Model Ketersediaan Air Tanah

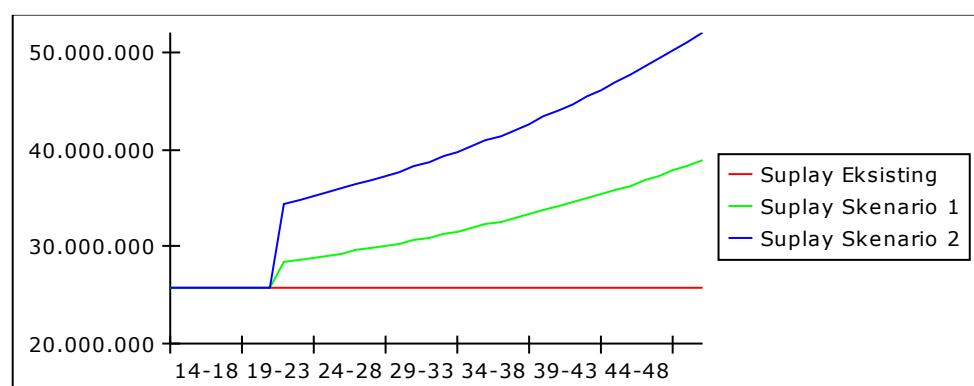
Ketersediaan air tanah secara konseptual ditentukan oleh *Supply-Demand* air. Ketersediaan air baku di wilayah ini diperoleh dari air tanah dan PDAM Tirta Anoa Kota Kendari. Ketersediaan air tanah diperoleh dari hasil perhitungan pada bab sebelumnya terdiri dari aliran air tanah menggunakan hukum Darcy dan imbuhan air tanah berdasarkan kondisi geologis wilayah. Selain dipengaruhi oleh kondisi geologi, ketersediaan air tanah sangat dipengaruhi oleh curah hujan wilayah. Kedua aspek tersebut saling mempengaruhi karena bagian dari subsistem siklus hidrologis. PDAM secara tidak langsung berperan dalam upaya konservasi air tanah di wilayah penelitian karena suplai air bersih yang bersumber dari PDAM dapat mengurangi eksploitasi air tanah oleh berbagai sektor baik domestik, fasilitas umum, industri dan hotel, namun cakupan pelayanan terus mengalami penurunan pada tahun 2012 sebesar 39.8% sedangkan pada tahun 2018 hanya sebesar 27.9% dengan rerata



Tabel 28 Proyeksi ketersediaan air di kota Kendari periode 2014-2049

Time	Air Tanah	PDAM	Suplay	Demand	Neraca	IKA
2014-2017	20.345.110	5.418.161	25.763.271	18.105.499	7.657.772	1,42
2018-2021	20.345.110	5.418.161	25.763.271	20.638.152	5.125.120	1,25
2022-2025	20.345.110	5.418.161	25.763.271	23.494.580	2.268.691	1,10
2026-2029	20.345.110	5.418.161	25.763.271	26.758.097	-994.826	0,96
2030-2033	20.345.110	5.418.161	25.763.271	30.496.150	-4.732.878	0,84
2034-2037	20.345.110	5.418.161	25.763.271	34.796.981	-9.033.710	0,74
2038-2041	20.345.110	5.418.161	25.763.271	39.784.544	-14.021.273	0,65
2042-2045	20.345.110	5.418.161	25.763.271	45.648.136	-19.884.865	0,56
2046-2049	20.345.110	5.418.161	25.763.271	52.702.122	-26.938.851	0,49

Upaya peningkatan ketersediaan air baku dengan tetap menjaga keberlanjutan air tanah di kota Kendari dilakukan dengan menggunakan dua skenario. Hasil simulasi menunjukkan bahwa apabila diterapkan variable skenario-1 dan skenario-2 dimulai tahun 2022 (Gambar 48), maka terlihat peningkatan ketersediaan air baku dari kondisi eksisting yaitu Pada skenario-1 mengalami surplus hingga periode 2030-2033 sebesar 1 428 306 m<sup>3</sup>/tahun dengan nilai IKA sebesar 1.05, selanjutnya kembali defisit hingga akhir periode 2046-2049 sebesar 13 781 860 m<sup>3</sup>/tahun dengan nilai IKA sebesar 0.72, sedangkan skenario-2 mengalami surplus hingga akhir periode 2046-2049 sebesar 185 964 m<sup>3</sup>/tahun dengan nilai IKA sebesar 1. Pada skenario-1, peningkatan ketersediaan air akibat adanya pembuatan sumur resapan (5%), RHL (5%), pemanfaatan hasil IPAL (5%), pemanfaatan reservoir DAM (5%), dan peningkatan layanan PDAM (60). Sedangkan pada skenario-2 menghasilkan ketersediaan air lebih tinggi karena skenario kebijakannya juga lebih tinggi dibandingkan skenario 1. Kedua skenario tersebut telah berhasil menerapkan kebijakan Gerakan hemat air dan memanfaatkan air limbah yang telah diolah.



Gambar 48 Proyeksi Ketersediaan air baku di kota Kendari

Peningkatan ketersediaan air baku di wilayah ini membutuhkan biaya konservasi, pengadaan infrastruktur reservoir DAM, dan peningkatan pelayanan PDAM. Sumur resapan adalah sarana menampung air hujan ke dalam akuifer dengan cara mengurangi laju *run off* sehingga menambah cadangan air tanah, mencegah penurunan muka air tanah, mencegah terjadinya banjir dan intrusi air laut di wilayah pesisir. Besarnya biaya yang diperlukan untuk membuat sebuah sumur

resapan sebesar Rp 735 000 (Bahunta, 2018). Hasil simulasi menunjukkan bahwa kebutuhan biaya pembuatan sumur resapan pada awal kebijakan konservasi yaitu periode 2026-2029 sebesar Rp 11 832 149 dan Rp 23 664 229 dan meningkat hingga akhir periode 2046-2049 sebesar Rp 93 489 940 dan Rp 186 979 880 pada skenario-1 dan skenario-2 (Tabel 28). Sumur resapan dalam penelitian ini memiliki peranan penting dalam menjaga ketersediaan air dan besaran biaya yang dikeluarkan relatif kecil, sehingga program ini sangat efektif dan sebaiknya menjadi program skala prioritas untuk dianggarkan dalam APBD tahun 2022.

Rehabilitasi Hutan dan Lahan (RHL) berdasarkan PP No 26 tahun 2020 merupakan upaya memulihkan, mempertahankan dan meningkatkan fungsi hutan dan lahan untuk meningkatkan daya dukung, produktivitas dan peranannya dalam menjaga sistem penyangga kehidupan, salah satunya adalah menjaga keberlanjutan sumber daya air. Adapun standar RHL sebesar Rp 1 500 000 per hektar (UNDP dan KLH, 1999). Pada skenario-1, kebutuhan biaya RHL untuk meningkatkan ketersediaan air baku di wilayah ini pada peiode 2026-2029 sebesar Rp 29 986 565 dan terus meningkat hingga akhir periode 2046-2049 sebesar Rp 156 985 484. Sedangkan pada skenario-2 masing-masing sebesar Rp 59 973 131 (2026-2029) dan Rp 313 970 967 di akhir periode (2046-2049) (Tabel 29). Tren ini juga terjadi pada skenario-2. Sama halnya dengan program sumur resapan, RHL juga dapat dijadikan program skala prioritas di tahun 2022 karena selain berfungsi menjaga ketersediaan air tanah, juga menjaga terjadinya fenomena *urban heat* di wilayah ini.

Tabel 29 Biaya Pembuatan Sumur Resapan di Kota Kendari

Time	Skenario 1	Skenario 2
2014-2017	0	0
2018-2021	0	0
2022-2025	0	0
2026-2029	11.832.149	23.664.299
2030-2033	24.959.013	49.918.025
2034-2037	39.522.262	79.044.523
2038-2041	55.679.071	111.358.141
2042-2045	73.603.812	147.207.625
2046-2049	93.489.940	186.979.880

Kebijakan peningkatan cakupan pelayanan PDAM dengan meningkatkan produksi air sangat penting guna memenuhi kebutuhan air dan mengurangi ketergantungan air tanah. Pada dasarnya sumber air baku oleh PDAM sangat besar namun belum dioptimalkan dengan baik. Sungai Pohara merupakan sumber utama air baku PDAM dengan potensi debit air sebesar 19.000 l/detik namun baru terpasang sebesar 400 l/detik dengan kapasitas produksi sebesar 350 l/detik. Oleh karena itu diperlukan suatu upaya peningkatan kapasitas produksi dengan cara pengembangan Instalasi Pengolahan Air (IPA) Sungai Pohara. Pengembangan IPA terdiri dari penambahan kapasitas produksi sebesar 127 l/detik dan penurunan tingkat kebocoran dengan biaya investasi total sebesar Rp 3 663 619 366.



Pengadaan IPA ini mampu menghasilkan air bersih sebesar 5 771 608 m<sup>3</sup>/tahun dengan biaya per m<sup>3</sup> sebesar Rp 1 587.

Tabel 30 Biaya kebutuhan RHL di Kota Kendari

Time	Skenario 1	Skenario 2
2014-2017	0	0
2018-2021	0	0
2022-2025	0	0
2026-2029	29.986.565	59.973.131
2030-2033	58.328.819	116.657.639
2034-2037	85.116.928	170.233.855
2038-2041	110.436.112	220.872.224
2042-2045	134.366.920	268.733.840
2046-2049	156.985.484	313.970.967

Pada skenario-1, kapasitas layanan PDAM ditingkatkan sehingga mampu menampung 60% kebutuhan air bersih penduduk, membutuhkan biaya mulai periode 2022-2025 sebesar Rp 1 936 006 407 dan akhir periode 2046-2049 sebesar Rp 14 412 352 199. Sedangkan pada skenario-2 untuk melayani 80% kebutuhan air bersih penduduk biaya yang harus dikeluarkan diawal periode 2022-2025 sebesar Rp 9 123 182 764 dan Rp 30 111 428 020 di akhir periode (2046-2049). Besaran biaya yang dibutuhkan untuk peningkatan cakupan pelayanan ini tidak dapat dibebankan pada dana APBD kota Kendari. Oleh karena itu, pemerintah daerah melalui PDAM Tirta Anoa kota Kendari bekerjsama dengan pihak swasta dan mengoptimalkan dana ZISWAF yang selama ini belum digunakan.

Tabel 31 Biaya Peningkatan Pelayanan PDAM Kota Kendari.

Time	Skenario 1	Skenario 2
2014-2017	0	0
2018-2021	0	0
2022-2025	1.936.006.407	9.123.182.764
2026-2029	3.401.118.430	11.587.857.195
2030-2033	5.069.992.101	14.395.308.231
2034-2037	6.970.965.739	17.593.207.807
2038-2041	9.136.318.833	21.235.857.873
2042-2045	11.602.820.174	25.385.112.465
2046-2049	14.412.352.199	30.111.428.020

#### 7.4 Simpulan

Model dinamik menunjukkan bahwa kurva pertumbuhan positif naik mengikuti kurva ekspondensial terlihat dari pertumbuhan penduduk, industri dan hotel. Semakin tinggi pertumbuhan tersebut maka semakin tinggi kebutuhan akan air baku, sebaliknya semakin rendah ketersediaan air dan semakin tinggi beban limbah yang dihasilkan pada masing-masing sektor. Upaya konservasi air tanah seperti pembuatan sumur resapan dan RHL mampu meningkatkan ketersediaan air



secara signifikan, begitu pula pada pemanfaatan IPAL, Reservoir DAM dan peningkatan pelayanan PDAM, namun tetap mempertimbangkan faktor biaya yang dibutuhkan. Semakin tinggi persentasi intervensi terhadap setiap variable peubah maka hasil yang diinginkan semakin baik dan semakin besar pula biaya yang dibutuhkan.

## VIII PEMBAHASAN UMUM

Air tanah merupakan sumber daya air yang unik dibandingkan sumber daya air lainnya, seperti air permukaan dan air hujan karena keberadaanya sangat dipengaruhi oleh batuan penyusunnya. Kondisi ini menyebabkan seringkali dijumpai wilayah yang memiliki kemelimpahan sumber daya air tanah, namun tidak sedikit dijumpai wilayah yang memiliki kelangkaan sumber daya air tanah baik secara spasial maupun temporal, sebaliknya permintaan pasokan air tanah untuk berbagai keperluan manusia semakin tinggi setiap tahunnya seiring dengan pertumbuhan dan aktivitas penduduk. Oleh karena itu, guna memanfaatkan sekaligus menjaga pelestarian sumber daya air tanah maka dilakukan suatu kajian yang komprehensif mulai mengidentifikasi asal usul air tanah hingga ke aspek pengelolaannya agar menghindari kesalahan dalam penarikan kesimpulan.

Karakteristik Hidrogeokimia dapat dijadikan sebagai geoindikator dalam mempelajari asal usul air tanah. Selain itu, juga dapat mengetahui evolusi air tanah dan proses geomorfologi masa lampau. Secara alamiah, air tanah umumnya didominasi oleh air tanah bikarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ), selanjutkan mengalami evolusi menjadi tipe lain seperti klorida ( $\text{Cl}^-$ ) atau sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) hingga mencapai kesetimbangan. Adapun waktu yang dibutuhkan dalam mencapai kesetimbangan mencapai ribuan tahun silam, namun dalam proses tersebut seringkali terjadi gangguan berupa penambahan dan/atau pengurangan unsur reaksi lain dan perubahan suhu. Proses evolusi air tanah di wilayah ini dan dimungkinkan juga terjadi di wilayah lain yaitu dari tipe  $\text{HCO}_3^-$  mengarah ke pembentukan tipe  $\text{Cl}^-$ . Tipe  $\text{Cl}^-$  dimungkinkan dapat dijumpai pada wilayah lain yang memiliki nilai DHL dan/atau TDS tinggi.

Faktor-faktor yang mempengaruhi proses evolusi air tanah terdiri dari proses penguapan air laut akibat perubahan garis pasang surut dan pelarutan kristal garam oleh air hujan ke dalam air tanah membentuk air evaporit dan pelarutan mineral pada bentuklahan alluvial sungai yang membentuk air bikarbonat. Proses evolusi tersebut sangat dikontrol oleh proses geomorfologi masa lampau dan umur batuan dapat mempengaruhi proses mineralisasi batuan dan/atau pertukaran ion terlarut ke dalam air tanah yang dapat merubah komposisi hidrogeokimia air tanah. Dengan demikian maka dapat disimpulkan bahwa proses geomorfologi memiliki kontribusi besar terhadap karakteristik akuifer dan hidrogeokimia air tanah.

Penilaian potensi air tanah dapat dijadikan dasar dalam pengembangan air tanah untuk berbagai keperluan suatu wilayah, penilaian ini didasarkan pada dua aspek yaitu ketersediaan dan kualitas air tanah. Berdasarkan penjelasan sebelumnya bahwa air tanah sangat dipengaruhi oleh proses geomorfologi maka dalam menilai potensi air tanah juga didasarkan pada satuan geomorfologi.

Ketersediaan air tanah bersifat dinamis mengikuti aliran fluida dalam akuifer. Oleh karena itu, untuk menghitung ketersediaan air tanah terlebih dahulu



- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang  
 1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :  
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah  
 b. Pengutipan tidak mengurangi kepentingan yang wajar IPB University.  
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

mengetahui pola aliran air tanah yang umumnya mengikuti pola topografi dan geomorfologi suatu wilayah. Arah aliran air tanah dapat diidentifikasi berdasarkan pola kontur air tanah dimana air tanah akan mengalir dari garis kontur tertinggi ke terendah, sedangkan kualitas air tanah sangat dipengaruhi oleh faktor alamiah (batuan, topografi, iklim dan waktu) dan faktor antropogenik. Namun, akhir-akhir ini sering dengan pertumbuhan penduduk dengan segala aktivitasnya maka faktor antropogenik merupakan faktor paling berpengaruh terhadap penurunan kualitas air tanah, sedangkan faktor alamiah pengaruhnya relatif stabil dan perubahan komposisi kandungan kimia dalam air tanah membutuhkan waktu lama.

Penilaian risiko dan kerentanan air tanah terhadap sumber pencemar sangat penting dilakukan guna memudahkan dalam pengambilan keputusan terkait pengelolaan air tanah. Model GALDIT (intrusi air laut) dan DRASTIC+Ri (*polutan*) dapat dijadikan metode alternatif dalam penilaian risiko dan kerentanan air tanah karena parameter yang diperlukan tersedia atau mudah diperoleh, mudah diaplikasikan, biaya rendah, dan memiliki akurasi hasil yang baik, namun dalam penerapannya diperlukan beberapa modifikasi bobot dan nilai sesuai karakteristik wilayah setempat berdasarkan hasil uji sensitivitas.

RAPFISH awalnya didesain untuk menilai status keberlanjutan sumberdaya perikanan, namun saat ini metode ini dapat diterapkan pada berbagai bidang lainnya, salah satunya dalam menentukan keberlanjutan pengelolaan air tanah. Metode ini mengandalkan pendekatan skoring dari atribut dengan prinsip multikriteria dengan algoritma MDS. Hasil analisis menunjukkan bahwa metode ini mampu memetakan tingkat keberlanjutan berdasarkan persepsi antar unit dari berbagai atribut terdiri dari ekologi, ekonomi, sosial teknologi dan kelembagaan dengan efektif dan efisien, sehingga metode ini sangat tepat diaplikasikan pada wilayah lain dan/atau bidang lainnya. Hal penting yang harus diperhatikan dalam penggunaan metode ini adalah penentuan unit, atribut dan skoring

*Reservoir* DAM merupakan solusi dalam pemenuhan sumber air baku ditengah menurunnya kinerja PDAM dan ketergantungan masyarakat terhadap air tanah terus meningkat, sekaligus pengendali banjir saat musim hujan dan menghindari kekeringan pada musim kemarau.

Interaksi antara sistem alamiah (air tanah) dan manusia memiliki keragaman, daya dukung dan daya tampung yang berbeda secara spasial dan temporal namun saling berhubungan dan bersifat dinamis. Oleh karena itu, untuk memahami interaksi tersebut maka diperlukan metode yang dapat komprehensif berupa sistem dinamik. Sistem dinamik mampu mempelajari sistem yang kompleks, namun dalam implementasinya metode ini sangat efektif dan efisien serta rendah biaya. Penggunaan metode ini dalam studi ini mampu mengintegrasikan air tanah dan sumber daya air lainnya dalam mendukung pasokan air baku berbagai sektor di wilayah ini dan mampu memprediksi ketersediaan air baku di masa mendatang.

## 8.1 Operasional Skenario

Untuk menuju Kota Kendari sebagai WSC, sebaiknya pengelolaan air baku menjadi tanggungjawab pihak pengelola. UU No 7 tahun 2004 tentang sumberdaya air menyatakan bahwa pengembangan sistem penyediaan air minum menjadi tanggungjawab pemerintah dan pemerintah daerah, sedangkan pada aspek penyelenggaraan dibebankan pada Badan Usaha Milik Negara (BUMN) dan/atau Badan Usaha Milik Daerah (BUMD). Di kota Kendari, pihak pengelola air minum



adalah PDAM Tirta Anoa. Selain itu, juga dapat membuka peluang dan berkoordinasi dengan Badan Usaha dan Perseorangan/kelompok di bawah pengawasan pemerintah atau pemerintah daerah (PEMDA) sesuai dengan kewenangannya.

Pengelolaan air tanah telah diatur dalam UU No 17 Tahun 2019 pasal 22 menyatakan bahwa pengelolaan sumber daya air didasarkan pada wilayah sungai dengan memperhatikan keterkaitan air permukaan dan air tanah dengan mengutamakan pendayagunaan air permukaan. Selanjutnya, dalam pemanfaatannya setiap orang atau kelompok masyarakat wajib memperoleh izin. Izin sebagaimana dimaksud diberikan oleh pemerintah pusat dan/atau PEMDA sesuai dengan kewenangannya dengan memperhatikan fungsi Kawasan dan Kelestarian lingkungan hidup.

## 8.2 Rekomendasi Kebijakan

Penelitian ini bertujuan membangun model pengelolaan air tanah secara berkelanjutan di kota Kendari, sehingga dapat menghasilkan rekomendasi kebijakan terhadap *stakeholder*, dalam hal ini PEMDA Kota Kendari dan PDAM Tirta Anoa Kota Kendari.

### 8.2.1 PEMDA

Dalam rangka menjaga keberlanjutan pengelolaan air tanah, maka beberapa rekomendasi kebijakan yang dapat diusulkan kepada PEMDA yaitu:

1. Menetapkan kebijakan Gerakan hemat air pada masyarakat, industri dan hotel sebesar 10% berdasarkan skenario-2 terbukti efektif mengurangi kebutuhan air baku berbagai sektor di wilayah ini.
2. Menetapkan kebijakan konservasi air tanah mulai tahun 2022 dengan cara pembuatan sumur resapan pada lahan permukiman dan reklamasi lahan dan hutan pada Kawasan hutan dan Ruang Terbuka Hijau (RTH) untuk mempertahankan siklus dan dinamika air secara alamiah.
3. Menetapkan kebijakan IPAL multisektor dengan mekanisme insentif-disinsentif. Insentif diberikan kepada masyarakat/*developer*/pengusaha yang memanfaatkan ruang sesuai dengan rencana tata ruang, sedangkan apabila melanggar dapat dikenakan sanksi baik berupa pengenaan *budget* yang tinggi, pencabutan ijin usaha dan lainnya.
4. Menetapkan kebijakan reservoir DAM, sejak tahun 2020 mulai dibangun menggunakan dana APBN dan diharapkan pada awal tahun 2023 mulai berfungsi sehingga dapat menambah suplai air baku berbagai sektor di wilayah ini dan ketergantungan air tanah rendah.
5. Membuka peluang kepada masyarakat dan swasta untuk dapat mengusulkan sendiri SPAL dan penyediaan air baku, namun tidak menggunakan air tanah dan terintegrasi dengan RTRW kota Kendari serta dalam pengawasan Dinas terkait.

### 8.2.2 PDAM Tirta Anoa

Rekomendasi kebijakan yang dapat diusulkan kepada PDAM Tirta Anoa Kota Kendari sebagai penyedia air baku di wilayah ini yaitu:

1. Kebijakan peningkatan pelayanan dengan cara mengurangi kebocoran dan meningkatkan kapasitas produksi IPA. Berdasarkan skenario-2, untuk memenuhi kebutuhan air baku bersumber dari PDAM dibutuhkan sejumlah biaya. Sistem pendanaan dapat dilakukan dengan menghadirkan investor dan memanfaatkan dana ZISWAF yang belum dimanfaatkan sampai saat ini.
2. Sumber Daya Manusia (SDM) memiliki peranan penting dalam status kinerja PDAM yang saat ini masih tergolong sakit. Oleh karena itu, mulai dari sistem rekrutmen karyawan hingga pimpinan redaksi memiliki kapasitas dan integritas tinggi yang berjiwa *leadership* dan akhlak yang baik dalam pengembangan PDAM dan potensi kebocoran finansial (korupsi) tidak terjadi.

## IX KESIMPULAN DAN SARAN

### 9.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian model pengelolaan air tanah secara berkelanjutan di kota Kendari, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Karakteristik hidrogeokimia air tanah di wilayah ini didominasi oleh *mixed* CaNaHCO<sub>3</sub> (47.5%) > Na-Cl (30%) > Ca-HCO<sub>3</sub> (22.5%) dengan proses mekanisme pembentukannya dipengaruhi oleh faktor pelapukan mineral batuan, penguapan dan presipitasi. Potensi air tanah, segi ketersediaan sebesar 40 426 945 m<sup>3</sup>/tahun, sedangkan segi kualitas berdasarkan indeks CCME WQI sebesar 59.76 (kurang baik) untuk kebutuhan air bersih.
2. Risiko dan kerentanan air tanah berdasarkan indeks GALDIT dan DRASTICRi yang telah dimodifikasi sesuai karakteristik wilayah kota Kendari menunjukkan wilayah ini didominasi kerentanan rendah (80.46%) terhadap intrusi air laut berdasarkan indeks GALDIT dan risiko dan kerentanan sedang (76.95%) terhadap sumber polutan.
3. Status keberlanjutan pengelolaan air tanah di kota Kendari pada dimensi ekologi tergolong berkelanjutan, sedangkan dimensi ekonomi, social, kelembagaan dan teknologi tidak berkelanjutan dengan 14 atribut sebagai faktor pengungkit.
4. Potensi pemanfaatan Reservoir DAM dari DAS Wanggu pada bagian hulu sebesar 2 402 958 m<sup>3</sup>/tahun dan pada bagian hilir sebesar 7 088 726 m<sup>3</sup>/tahun dengan total sebesar 9 491 684 m<sup>3</sup>/tahun.
5. Model pengelolaan air tanah dibangun dari sub model kebutuhan, sub model kualitas dan sub model ketersediaan. Model ini mengintegrasikan berbagai sumber daya air seperti air sungai, air limbah dan PDAM guna mengurangi ketergantungan terhadap air tanah. Ketersediaan (kondisi eksisting) dan kebutuhan air dapat mencukupi sampai periode 2026-2029, selanjutnya akan mengalami defisit apabila tidak ada pasokan air baku tambahan, seiring dengan peningkatan jumlah penduduk dan sektor lainnya. Untuk mencegah terjadinya defisit air maka menerapkan model berdasarkan skenario-2 dapat dilakukan terbukti dapat meningkatkan pasokan air menjadi surplus hingga periode 2046-2049.



## 9.2 Saran

Berdasarkan kesimpulan yang telah diuraikan, maka dirumuskan beberapa saran yaitu:

1. Faktor antropogenik sangat berpengaruh terhadap keberlanjutan sumber daya air tanah di wilayah ini baik segi kuantitas maupun kualitasnya. Oleh karena itu, diperlukan upaya konservasi air tanah dengan mengurangi eksplorasi air tanah. Upaya tersebut dapat dilakukan dengan pengelolaan air hujan menggunakan teknologi sederhana dan rendah biaya.
2. Risiko dan kerentanan air tanah terhadap polutan sangat dipengaruhi oleh penggunaan lahan di wilayah ini. Oleh karena itu, perlu upaya pengendalian perubahan lahan khususnya pada kawasan hutan, sedangkan pada kawasan permukiman diperlukan perbaikan dan/atau peningkatan sarana prasarana sanitasi yang layak sesuai standar teknis. Upaya-upaya tersebut dapat dilakukan dengan koordinasi dan pengawasan yang ketat terhadap eksplorasi hutan dan izin mendirikan bangunan (IMB) serta reorientasi prioritas pembangunan daerah.
3. Mengingat terbatasnya anggaran pembangunan daerah, maka sebaiknya biaya pengelolaan sumber daya air dibebankan kepada penggunaan air melalui peningkatan biaya retribusi air dan pendayagunaan dana ZISWAF. Berdasarkan hal ini maka diperlukan regulasi terkait dana ZISWAF.
4. Mengingat kebijakan pemanfaatan sumber daya air eksisting hanya dapat menjamin keberlanjutan hingga periode 2026-2029, maka seyogyanya diterapkan kebijakan WSC.
5. Model pengelolaan air tanah agar mendekati kondisi holistik dan nyata yang dinamis maka ketersediaan dan keterbukaan data dari pemerintah dan/atau swasta sangat penting, mengingat selama penelitian peneliti kesulitan mendapatkan data.

## DAFTAR PUSTAKA

- A**bbas Z, Su C, Tahira F, Mapoma HWT, Aziz SZ. 2015. Quality and hydrochemistry of groundwater used for drinking in Lahore, Pakistan: analysis of source and distributed groundwater. *Environ Earth Sci.*, siap terbit.
- A**garwal M, Singh M, Hussain J. 2019. Assessment of groundwater quality with special emphasis on nitrate contamination in parts of Gautam Budh Nagar district, Uttar Pradesh, India. *Acta Geochim.*, siap terbit.
- A**ghazadeh N, Chitsazan M, Golestan Y. 2017. Hydrochemistry and quality assessment of groundwater in the Ardabil area, Iran. *Appl Water Sci.*, siap terbit.
- A**ida AN. 2007. *Analisis Kebijakan Pemenuhan Air Bersih Bagi Masyarakat Miskin di Kabupaten Gunungkidul*. Depok: Pascasarjana Universitas Indonesia.
- A**khmad Fauzi. 2019. *Teknik Analisis Keberlanjutan*. PT Gramedia Pustaka Utama. [www.gpu.id](http://www.gpu.id).
- A**l-Adamat RAN, Foster IDL, Baban SMJ. 2003. Groundwater vulnerability and risk mapping for the Basaltic aquifer of the Azraq basin of Jordan using GIS, Remote sensing and DRASTIC. *Appl Geogr.* 23(4):303–324.



- doi:10.1016/j.apgeog.2003.08.007.
- Alihar F. 2018. Penduduk dan Akses Air Bersih di Kota Semarang (Population and Access to Clean Water in Semarang City). *J Kependid Indones.* 13 Juni:67–76.
- Aller L, Lehr JH, Petty R, Bennett T. 1987. DRASTIC: a standardized system to evaluate groundwater pollution potential using hydrogeologic setting. *J Geol Soc India.*, siap terbit.
- Alwi LAODE. 2012. Kajian dampak dinamika penggunaan lahan di das wanggu terhadap sedimentasi di teluk kendari sulawesi tenggara. *Disertasi Pascasarj IPB, Bogor.*, siap terbit.
- Anny F, Kabir M, Bodrud-Doza M. 2017. Assessment of surface water pollution in urban and industrial areas of Savar Upazila, Bangladesh. *Pollution.*, siap terbit.
- APHA. 2005. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21st ed.*; APHA:Washington, DC, USA, 2005.
- Aris AZ, Abdullah MH, Ahmed A, Woong KK. 2007. Controlling factors of groundwater hydrochemistry in a small island's aquifer. *Int J Environ Sci Technol.*, siap terbit.
- Arkoprovo B, Adarsa J, Prakash SS. 2012. Delineation of Groundwater Potential Zones using Satellite Remote Sensing and Geographic Information System Techniques: A Case study from Ganjam district, Orissa, India. *Res J Recent Sci.*, siap terbit.
- Asdak C. 2018. *Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Ashley RM, Balmfort DJ, Saul AJ, Blanskby JD. 2005. Flooding in the future - Predicting climate change, risks and responses in urban areas. *Water Sci Technol.*, siap terbit.
- Azmanajaya E. 2012. Model penyediaan air bersih berkelanjutan di pulau kecil: Studi kasus Pulau Tarakan, Kalimantan Timur. *Thesis.*, siap terbit.
- Babiker IS, Mohamed MAA, Hiyama T, Kato K. 2005. A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan. *Sci Total Environ.*, siap terbit.
- BAPPEDA. 2016. Analisis Kualitas Air Tanah Akibat Perubahan Penggunaan Lahan di Kota Kendari.
- Beaujean J, Lemieux JM, Dassargues A, Therrien R, Brouyère S. 2014. Physically Based Groundwater Vulnerability Assessment Using Sensitivity Analysis Methods. *Groundwater.*, siap terbit.
- Bodrud-Doza M, Islam ARMT, Ahmed F, Das S, Saha N, Rahman MS. 2016. Characterization of groundwater quality using water evaluation indices, multivariate statistics and geostatistics in central Bangladesh. *Water Sci.*, siap terbit.
- BPS Kota Kendari. 2020a. Kota Kendari dalam Angka.
- BPS Kota Kendari. 2020b. Kota Kendari dalam Angka.
- BPS Provinsi Sulawesi Tenggara. 2019. *Statistik Industri Provinsi Sulawesi Tenggara*. Kendari: BPS Sulawesi Tenggara.
- Brindha K, Elango L. 2011. Fluoride in groundwater: Causes, implications and mitigation measures. Di dalam: *Fluoride: Properties, Applications and Environmental Management*.
- Brindha K, Elango L. 2014. PAHs contamination in groundwater from a part of

metropolitan city, India: A study based on sampling over a 10-year period. *Environ Earth Sci.*, siap terbit.

Chachadi AG, Ferreira JPL. 2007. Assessing aquifer vulnerability to seawater intrusion using GALDIT method: Part 2 - GALDIT Indicators Description. *IAHS-AISH Publ.*, siap terbit.

Chow V Te, Maidment DR, Mays LW, Ven Te Chow, David R. Maidment LWM. 1998. *Applied Hydrology*. New York: McGraw-Hill, NY. [http://ponce.sdsu.edu/Applied\\_Hydrology\\_Chow\\_1988.pdf](http://ponce.sdsu.edu/Applied_Hydrology_Chow_1988.pdf).

Civita M, De Maio M. 2004. Assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination: The Italian “combined” approach. *Geofis Int.*, siap terbit.

D K Todd. 1981. *Groundwater Hydrology, 2nd edition*. New York: Toronto: John Wiley.

Daniele L, Vallejos ángela, Corbella M, Molina L, Pulido-Bosch A. 2013. Hydrogeochemistry and geochemical simulations to assess water-rock interactions in complex carbonate aquifers: The case of Aguadulce (SE Spain). *Appl Geochemistry*, siap terbit.

Das BK, Kaur P. 2001. Major ion chemistry of Renuka Lake and weathering processes, Sirmaur District, Himachal Pradesh, India. *Environ Geol.*, siap terbit.

DeWiest RJM. 1964. Dispersion and Salt Water Intrusion. *Groundwater*, siap terbit.

Direktorat Jenderal Cipta Karya PUPR. 2007. Buku Panduan Pengembangan Air Minum. *Program*.(20):1–47.

Effendi. 2003. Kualitas Air Bagi Pengelolaan Sumber Daya dan Lingkungan Perairan. *Kanisius*, siap terbit.

Effendi H, Romanto, Wardiatno Y. 2015. Water Quality Status of Ciambulawung River, Banten Province, Based on Pollution Index and NSF-WQI. *Procedia Environ Sci.*, siap terbit.

Fatoki OS, Muyima NYO, Lujiza N. 2001. Situation analysis of water quality in the Umtata River catchment. *Water SA*. 27(4):467–473. doi:10.4314/wsa.v27i4.4959.

Feth JH. 1971. Mechanisms controlling world water chemistry: Evaporation-crystallization process. *Science* (80- ), siap terbit.

Fetter C. 2001. Applied Hydrogeology (4th Edition). *Appl Hydrogeol.*, siap terbit.

Fisher RS, Mullican WF. 1997. Hydrochemical evolution of sodium-sulfate and sodium-chloride groundwater beneath the Northern Chihuahuan Desert, Trans-Pecos, Texas, USA. *Hydrogeol J.*, siap terbit.

Fitri A, Ulfa A. 2015. Perencanaan Penerapan Konsep Zero run-off dan Agroforestri Berdasarkan Kajian Debit Sungai di Sub DAS Belik, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta. *J Perenc Wil dan Kota*, siap terbit.

Foster S. 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. Di dalam: *Vulnerability of soil and groundwater to pollutants*.

Garewal SK, Vasudeo AD, Landge VS, Ghare AD. 2017. A GIS-based Modified DRASTIC (ANP) method for assessment of groundwater vulnerability: A case study of Nagpur city, India. *Water Qual Res J Canada*, siap terbit.

Garewal SK, Vasudeo AD, Landge VS, Ghare AD. 2019. Groundwater vulnerability mapping using modified DRASTIC ANP. *Gradjevinar*. 71(4):283–296. doi:10.14256/JCE.1951.2016.

- Gemilang WA, Kusumah G, Wisha UJ. 2017. Assessing Groundwater Vulnerability Using Galdit Method (Case Study: Pademawu Salt Pond Area, Madura-Indonesia). *J Kelaut Nas.* 12(3):117. doi:10.15578/jkn.v12i3.6358.
- Gogu R. 2000. Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods [Cited By (since 2000): 297]. *Environ Geol.* 39(6):549–559. doi:10.1007/s002540050466.
- Gunduz O, Simsek C, Hasozbek A. 2010. Arsenic pollution in the groundwater of Simav Plain, Turkey: Its impact on water quality and human health. *Water Air Soil Pollut.*, siap terbit.
- Hem JD. 1985. *Study and Interpretation of the chemical Characteristic if Natural Water*. Hem JD, editor. Washington D.C: United State Government Printing Office.
- Hem JD, Steele TD. 1975. Water quality. *Rev Geophys.*, siap terbit.
- Ielpo P, Cassano D, Lopez A, Pappagallo G, Uricchio VF, De Napoli PA. 2012. Source apportionment of groundwater pollutants in Apulian agricultural sites using multivariate statistical analyses: Case study of Foggia province. *Chem Cent J.*, siap terbit.
- Irawan DE, Puradimaja DJ, Notosiswoyo S, Soemintadiredja P. 2009. Hydrogeochemistry of volcanic hydrogeology based on cluster analysis of Mount Ciremai, West Java, Indonesia. *J Hydrol.*, siap terbit.
- Islam ARMT, Shen SH, Bodrud-Doza M. 2017. Assessment of arsenic health risk and source apportionment of groundwater pollutants using multivariate statistical techniques in Chapai-Nawabganj district, Bangladesh. *J Geol Soc India.*, siap terbit.
- Jain CK, Bandyopadhyay A, Bhadra A. 2010. Assessment of ground water quality for drinking purpose, District Nainital, Uttarakhand, India. *Environ Monit Assess.*, siap terbit.
- Kete SCR, Suprihatin, Tarigan SD, Effendi H. 2020. Assessment of land use land cover changes and their impact to groundwater quality index in Kendari city- Indonesia. *Int J Adv Sci Technol.*, siap terbit.
- Khashogji MS, El Maghraby MMS. 2013. Evaluation of groundwater resources for drinking and agricultural purposes, Abar Al Mash'i area, south Al Madinah Al Munawarah City, Saudi Arabia. *Arab J Geosci.*, siap terbit.
- Komarudin M, Hariyadi S, Kurniawan B. 2015. Analisis Daya Tampung Beban Pencemar Sungai Pesanggrahan (Segmen Kota Depok) dengan Menggunakan Model Numerik dan Spasial. *J Pengelolaan Sumberd Alam dan Lingkung (Journal Nat Resour Environ Manag.)*, siap terbit.
- Kozłowski M, Sojka M. 2019. Applying a modified DRASTIC model to assess groundwater vulnerability to pollution: A case study in central Poland. *Polish J Environ Stud.* 28(3):1223–1231. doi:10.15244/pjoes/84772.
- Kumar A, Pramod Krishna A. 2020. Groundwater vulnerability and contamination risk assessment using GIS-based modified DRASTIC-LU model in hard rock aquifer system in India. *Geocarto Int.*, siap terbit.
- Kumar M, Kumari K, Singh UK, Ramanathan A. 2009. Hydrogeochemical processes in the groundwater environment of Muktsar, Punjab: Conventional graphical and multivariate statistical approach. *Environ Geol.*, siap terbit.
- Kumar M, Ramanathan A, Rao MS, Kumar B. 2006. Identification and evaluation of hydrogeochemical processes in the groundwater environment of Delhi,



- India. *Environ Geol.* 50(7):1025–1039. doi:10.1007/s00254-006-0275-4.
- Kumar P, Bansod BKS, Debnath SK, Thakur PK, Ghanshyam C. 2015. Index-based groundwater vulnerability mapping models using hydrogeological settings: A critical evaluation. *Environ Impact Assess Rev.*, siap terbit.
- Kura NU, Ramli MF, Ibrahim S, Sulaiman WNA, Aris AZ. 2014a. An integrated assessment of seawater intrusion in a small tropical island using geophysical, geochemical, and geostatistical techniques. *Environ Sci Pollut Res.* 21(11):7047–7064. doi:10.1007/s11356-014-2598-0.
- Kura NU, Ramli MF, Ibrahim S, Sulaiman WNA, Aris AZ, Tando AI, Zaudi MA. 2014b. Assessment of groundwater vulnerability to anthropogenic pollution and seawater intrusion in a small tropical island using index-based methods. *Environ Sci Pollut Res.* 22(2):1512–1533. doi:10.1007/s11356-014-3444-0.
- Laesanpura A, Warsa, Hartay SR. 2017. Resistivity and gravity data for aquifer modeling in Kendari (South Sulawesi). Di dalam: *AIP Conference Proceedings*.
- Lappas I, Kallioras A, Pliakas F, Rondogianni T. 2017. Groundwater Vulnerability Assessment To Seawater Intrusion Through Gis - Based Galdit Method. Case Study: Atalanti Coastal Aquifer, Central Greece. *Bull Geol Soc Greece.* 50(2):798. doi:10.12681/bgsg.11786.
- Lenin Kalyana Sundaram V, Dinesh G, Ravikumar G, Govindarajalu D. 2008. Vulnerability assessment of seawater intrusion and effect of artificial recharge in Pondicherry coastal region using GIS. *Indian J Sci Technol.* 1(7):1–7. doi:10.17485/ijst/2008/v1i7/29593.
- Li P, Li X, Meng X, Li M, Zhang Y. 2016. Appraising Groundwater Quality and Health Risks from Contamination in a Semiarid Region of Northwest China. *Expo Heal.*, siap terbit.
- Li P, Wu J, Qian H. 2013. Assessment of groundwater quality for irrigation purposes and identification of hydrogeochemical evolution mechanisms in Pengyang County, China. *Environ Earth Sci.*, siap terbit.
- Lima ML, Zelaya K, Massone H. 2011. Groundwater vulnerability assessment combining the drastic and Dyna-CLUE model in the Argentine Pampas. *Environ Manage.*, siap terbit.
- Liu F, Song X, Yang L, Zhang Y, Han D, Ma Y, Bu H. 2015. Identifying the origin and geochemical evolution of groundwater using hydrochemistry and stable isotopes in the Subei Lake basin, Ordos energy base, Northwestern China. *Hydrol Earth Syst Sci.*, siap terbit.
- Lumb A, Sharma TC, Bibeault J-F. 2011. A Review of Genesis and Evolution of Water Quality Index (WQI) and Some Future Directions. *Water Qual Expo Heal.*, siap terbit.
- Luoma S, Okkonen J, Korkka-Niemi K. 2017. Comparison of the AVI, modified SINTACS and GALDIT vulnerability methods under future climate-change scenarios for a shallow low-lying coastal aquifer in southern FinlandComparaison des méthodes AVI, SINTACS modifiée et GALDIT d'évaluation de la vulnérabi. *Hydrogeol J.*, siap terbit.
- M. I. Nurwidianto, S. Widodo RTA. 2006. Pemetaan Sebaran Air Tanah Asin Pada Aquifer Dalam di Wilayah Semarang Bawah. *Berk Fis.* 9 (3):137–143.
- Machdar I, Zulfikar T, Rinaldi W, Alfiansyah Y. 2018. Assessment of groundwater vulnerability using DRASTIC Model and GIS : A case study of two sub-



- districts in Banda Aceh city, Indonesia. Di dalam: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.
- Majandang J, Sarapirome S. 2013. Groundwater vulnerability assessment and sensitivity analysis in Nong Rua, Khon Kaen, Thailand, using a GIS-based SINTACS model. *Environ Earth Sci.*, siap terbit.
- Marwah S. 2014. SUMBERDAYA AIR DI DAS KONAWEHA PROPINSI SULAWESI TENGGARA Analysis of Land Use Changes and Water Resource Availability in Konaweha Watershed Southeast Sulawesi Province. 4(3):208–218.
- Mayo AL, Loucks MD. 1995. Solute and isotopic geochemistry and ground water flow in the central Wasatch Range, Utah. *J Hydrol.*, siap terbit.
- McKnight US, Finkel M. 2013. A system dynamics model for the screening-level long-term assessment of human health risks at contaminated sites. *Environ Model Softw.*, siap terbit.
- Mirchi A, Madani K, Watkins D, Ahmad S. 2012. Synthesis of System Dynamics Tools for Holistic Conceptualization of Water Resources Problems. *Water Resour Manag.*, siap terbit.
- Murkute YA. 2014. Hydrogeochemical characterization and quality assessment of groundwater around Umrer coal mine area Nagpur District, Maharashtra, India. *Environ Earth Sci.*, siap terbit.
- Napolitano P, Fabbri AG. 1996. Single-parameter sensitivity analysis for aquifer vulnerability assessment using DRASTIC and SINTACS. *Appl Geogr Inf Syst Hydrol water Resour Manag Proc HydroGIS'96 Conf Vienna, 1996.*, siap terbit.
- Naseem S, Rafique T, Bashir E, Bhanger MI, Laghari A, Usmani TH. 2010. Lithological influences on occurrence of high-fluoride groundwater in Nagar Parkar area, Thar Desert, Pakistan. *Chemosphere.*, siap terbit.
- Nasrabadi T, Abbasi Maedeh P. 2014. Groundwater quality assessment in southern parts of Tehran plain, Iran. *Environ Earth Sci.*, siap terbit.
- National Research Council (NRC). 1993. *Groundwater vulnerability assessment, contamination potential under conditions of uncertainty*. Washington DC: National Academy Press.
- Ningrum SO. 2018. Analisis Kualitas Badan Air Dan Kualitas Air Sumur Di. *J Kesehat Lingkung.* VOL. 10 No januari:1–12.
- Nugroho Hadisusanto. 2011. *Aplikasi Hidrologi*. Malang: Jogja Mediautama. [https://books.google.co.id/books?id=D9\\_YDwAAQBAJ&pg=PA369&lpg=PA369&dq=Prawirohardjo,+Sarwono.+2010.+Buku+Acuan+Nasional+Pelayanan+Kesehatan++Maternal+dan+Neonatal.+Jakarta+:+PT+Bina+Pustaka+Sarwono+Prawirohardjo.&source=bl&ots=riWNmMFyEq&sig=ACfU3U0HyN3I](https://books.google.co.id/books?id=D9_YDwAAQBAJ&pg=PA369&lpg=PA369&dq=Prawirohardjo,+Sarwono.+2010.+Buku+Acuan+Nasional+Pelayanan+Kesehatan++Maternal+dan+Neonatal.+Jakarta+:+PT+Bina+Pustaka+Sarwono+Prawirohardjo.&source=bl&ots=riWNmMFyEq&sig=ACfU3U0HyN3I).
- Nur S, Arifin A. 2019. Analisis Kesediaan Masyarakat dalam Membayar (Willingness To Pay) Tarif PDAM Kota Kendari. *Mega Akt J Ekon dan Manaj.*, siap terbit.
- Permenkes No 32 Tahun 2017. 2017. Tentang Baku Mutu Kesehatan Lingkungan dan Persyaratan Kesehatan Air Untuk Keperluan Higiene Sanitasi, Kolam Renang, SPA dan Pemandian Umum Peraturan Menteri Kesehatan RI No. 32 Tahun 2017.
- Pertiwi TS. 2019. Penggunaan Sistem Informasi Geografis Untuk Pemetaan



- Sebaran Kejadian Diare Pada Balita Ditinjau Dari Faktor Lingkungan Rumah Keluarga di Kota Kendari. *Indones Heal Inf Manag J.* 7(1):8–15.
- Pramanda T, Purnama S. 2013. Kajian Potensi Airtanah Bebas untuk Kebutuhan Domestik di Kecamatan Bantul Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarya. *J Chem Inf Model.*, siap terbit.
- Prasad RK, Singh VS, Krishnamacharyulu SKG, Banerjee P. 2011. Application of drastic model and GIS: For assessing vulnerability in hard rock granitic aquifer. *Environ Monit Assess.*, siap terbit.
- Psarropoulou ET, Karatzas GP. 2014. Pollution of Nitrates -Contaminant Transport in Heterogeneous Porous Media: A Case Study of the Coastal Aquifer of Corinth, Greece. *Glob NEST J.* 16(1):9–23.
- Purnama S. 2004. *Distribusi Air Asin Dalam Tanah Dataran Pantai (Studi Kasus Di Kota Semarang)*. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Putri AW, Suharto B, Susanawati LD, Sumberdaya J. 2016. Identifikasi Pencemaran Air Tanah Akibat Intrusi Air Laut ( Studi Kasus Pesisir Pantai Ketah Kabupaten Situbondo ) Identification Of Groundwater Pollution Due Sea Water Intrusion ( Study Case Of Coastal Ketah Situbondo ). *J Sumberd Alam dan Lingkung.*, siap terbit.
- Qian C, Wu X, Mu WP, Fu RZ, Zhu G, Wang ZR, Wang D dan. 2016. Hydrogeochemical characterization and suitability assessment of groundwater in an agro-pastoral area, Ordos Basin, NW China. *Environ Earth Sci.*, siap terbit.
- R Allan Freez; John A Cherry. 1979. *Groundwater*. Volume ke-66. Prentice-Hall. Inc.
- Rajesh R, Brindha K, Murugan R, Elango L. 2012. Influence of hydrogeochemical processes on temporal changes in groundwater quality in a part of Nalgonda district, Andhra Pradesh, India. *Environ Earth Sci.*, siap terbit.
- Rajmohan N, Elango L. 2004. Identification and evolution of hydrogeochemical processes in the groundwater environment in an area of the Palar and Cheyyar River Basins, Southern India. *Environ Geol.*, siap terbit.
- Ravikumar P, Somashekar RK, Angami M. 2011. Hydrochemistry and evaluation of groundwater suitability for irrigation and drinking purposes in the Markandeya River basin, Belgaum District, Karnataka State, India. *Environ Monit Assess.*, siap terbit.
- Rengganis H, Kusumawati I. 2011. Penilaian dan Perhitungan Imbuhan Air Tanah Alami Pada Cekungan Air Tanah Umbulan. *J Sumber Daya Air.*, siap terbit.
- Rianda AAS, Putra DPE, Atmaja RRS. 2017. Hidrogeokimia lepasan airtanah bawah laut pantai gunungkidul, kabupaten gunungkidul, daerah istimewa yogyakarta. *Proceeding, Semin Nas Kebumian Ke-10 Peran Penelit Ilmu Kebumian Dalam Pembang Infrastruktur Di Indones Grha Sabha Pramana*. September:110–124.
- Rosen L. 1994. A Study of the DRASTIC Methodology with Emphasis on Swedish Conditions. *Groundwater.*, siap terbit.
- Sadat-Noori SM, Ebrahimi K, Liaghat AM. 2014. Groundwater quality assessment using the Water Quality Index and GIS in Saveh-Nobaran aquifer, Iran. *Environ Earth Sci.*, siap terbit.
- Safa G, Najiba C, El Houda BN, Monji H, Soumaya A, Kamel Z. 2020. Assessment of urban groundwater vulnerability in arid areas: Case of Sidi Bouzid aquifer

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang  
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

b. Pengutipan tidak mengurangi kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang  
 1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :  
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah  
 b. Pengutipan tidak mengurangi kepentingan yang wajar IPB University.  
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

- (central Tunisia). *J African Earth Sci.*, siap terbit.
- Sahu P, Sikdar PK, Chakraborty S. 2016. Geochemical evolution of groundwater in Southern Bengal Basin: The example of Rajarhat and adjoining areas, West Bengal, India. *J Earth Syst Sci.*, siap terbit.
- Said NI, Yudo S. 2008. Masalah dan strategi penyediaan air bersih di Indonesia. *Teknol pengelolaan air minum "teori dan pengalaman Prakt.*, siap terbit. <http://www.kelair.bpppt.go.id/Publikasi/BukuAirMinum/BAB3MASALAH.pdf>.
- Saidi S, Bouri S, Dhia H Ben. 2013. Groundwater management based on GIS techniques, chemical indicators and vulnerability to seawater intrusion modelling: Application to the Mahdia-Ksour Essaf aquifer, Tunisia. *Environ Earth Sci.* 70(4):1551–1568. doi:10.1007/s12665-013-2241-2.
- Saidi S, Bouri S, Ben Dhia H, Anselme B. 2011. Assessment of groundwater risk using intrinsic vulnerability and hazard mapping: Application to Souassi aquifer, Tunisian Sahel. *Agric Water Manag.* 98(10):1671–1682. doi:10.1016/j.agwat.2011.06.005.
- Saidi S, Bouri S, Hassine S, Ben Dhia H. 2014. Comparison of three applied methods of groundwater vulnerability mapping: Application to the coastal aquifer of Chebba-Mellouleche (Tunisia). *Desalin Water Treat.*, siap terbit.
- Saksena DN, Garg RK, Rao RJ. 2008. Water quality and pollution status of Chambal river in National Chambal sanctuary, Madhya Pradesh. *J Environ Biol.*, siap terbit.
- Salem ZE, Al Temamy AM, Salah MK, Kassab M. 2016. Origin and characteristics of brackish groundwater in Abu Madi coastal area, Northern Nile Delta, Egypt. *Estuar Coast Shelf Sci.*, siap terbit.
- Santha Sophiya M, Syed TH. 2013. Assessment of vulnerability to seawater intrusion and potential remediation measures for coastal aquifers: A case study from eastern India. *Environ Earth Sci.*, siap terbit.
- Santosa LW, Adji TN. 2014. *Karakteristik Akuifer dan Potensi Airtanah Graben Bantul*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Sawyer CN, McCarty PL. 1978. *Chemistry for Environmental Engineering*.
- Schoeller H. 1967. *Geochemistry of groundwater—an international guide for research and practice*. Volume ke-2.
- Selvakumar S, Chandrasekar N, Kumar G. 2017. Hydrogeochemical characteristics and groundwater contamination in the rapid urban development areas of Coimbatore, India. *Water Resour Ind.*, siap terbit.
- Semba RD, Kraemer K, Sun K, De Pee S, Akhter N, Moench-Pfanner R, Hyun Rah J, Campbell AA, Badham J, Bloem MW. 2011. Relationship of the presence of a household improved latrine with diarrhea and under-five child mortality in Indonesia. *Am J Trop Med Hyg.*, siap terbit.
- Sener E, Davraz A. 2013. Assessment of groundwater vulnerability based on a modified DRASTIC model, GIS and an analytic hierarchy process (AHP) method: The case of Egirdir Lake basin (Isparta, Turkey). *Hydrogeol J.*, siap terbit.
- Sener S, Sener E, Davraz A. 2017. Assessment of groundwater quality and health risk in drinking water basin using GIS. *J Water Health.*, siap terbit.
- Sharma S. 2009. Applications of parallel genetic algorithms in ground water contamination problems: An overview. Di dalam: *2009 World Congress on*

- Nature and Biologically Inspired Computing, NABIC 2009 - Proceedings.*
- Shekhar S. 2015. Delineation of groundwater potential zone in hard rock terrain of India using remote sensing, geographical information system (GIS) and analytic hierarchy process (AHP) techniques [Cited By (since 2015): 64]. *Geocarto Int.* 30(4):402–421. doi:10.1080/10106049.2014.894584.
- Shirazi SM, Imran HM, Akib S. 2012. GIS-based DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment: A review. *J Risk Res.*, siap terbit.
- Silva J da. 2018. *Caatinga: The largest tropical dry forest region in South America.* Ed ke-Cited By (since 2018): 40.
- Simonovic SP, Fahmy H. 1999. A new modeling approach for water resources policy analysis. *Water Resour Res.*, siap terbit.
- Singh A, Srivastav SK, Kumar S, Chakrapani GJ. 2015. A modified-DRASTIC model (DRASTICA) for assessment of groundwater vulnerability to pollution in an urbanized environment in Lucknow, India. *Environ Earth Sci.* 74(7):5475–5490. doi:10.1007/s12665-015-4558-5.
- Singh KP, Malik A, Sinha S. 2005. Water quality assessment and apportionment of pollution sources of Gomti river (India) using multivariate statistical techniques - A case study. *Anal Chim Acta.*, siap terbit.
- Singh UK. 2018. Groundwater chemistry and human health risk assessment in the mining region of East Singhbhum, Jharkhand, India [Cited By (since 2018): 37]. *Chemosphere.* 204:501–513. doi:10.1016/j.chemosphere.2018.04.060.
- Soesanto SS. 1996. Senyawa Organik dalam Air. *Media Litbangkes.* VI(01):3–4. <http://ejournal.litbang.kemkes.go.id/index.php/MPK/article/view/715/901>.
- Stallard RF, Edmond JM. 1983. Geochemistry of the Amazon 2. The influence of geology and weathering environment on the dissolved load. *J Geophys Res.*, siap terbit.
- Van Stempvoort D, Ewert L, Wassenaar L. 1993. Aquifer vulnerability index: A gis - compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Can Water Resour J.*, siap terbit.
- Stuyfzand P. 1989. A new hydrochemical classification of water types. *IAHS-AISH Publ.*, siap terbit.
- Sudarmadji. 1991. Agihan Geografi dan Kimia Air tanah Kotamadya Yogyakarta.
- Sunarwan B, Kamal N, Luthfi M. 2015. Identifikasi Parameter Fisika dan Kimia Airtanah Pada Akifer Endapan Produk Gunung Api (Studi kasus: Cekungan Airtanah Bandung). *J Teknol J Pakuan Bid Keteknikan.* 2(2):53–69.
- Supradata. 2005. Pengolahan Limbah Domestik Menggunakan Tanaman Hias (*Cyperus alternifolius*) dalam Sistem Lahan Basah Buatan Aliran Bawah Permukaan (SSF-Wetlands).
- Tasnim Z, Tahsin S. 2016. Application of the Method of Galdit for Groundwater Vulnerability Assessment : A Case of South Florida. *Asian J Appl Sci Eng.* 5(1):27–40.
- Tirumalesh K, Shivanna K, Sriraman AK, Tyagi AK. 2010. Assessment of quality and geochemical processes occurring in groundwaters near central air conditioning plant site in Trombay, Maharashtra, India. *Environ Monit Assess.*, siap terbit.
- Veizer J, Mackenzie FT. 2013. Evolution of Sedimentary Rocks. Di dalam: *Treatise on Geochemistry: Second Edition.*
- Wang J. 2012. Assessment of groundwater contamination risk using hazard



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang  
 1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :  
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah  
 b. Pengutipan tidak mengurangi kepentingan yang wajar IPB University.  
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

- quantification, a modified DRASTIC model and groundwater value, Beijing Plain, China [Cited By (since 2012): 110]. *Sci Total Environ.* 432:216–226. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.06.005.
- Wicaksono D, Yosilia MA, Nugroho GA. 2013. Modeling of groundwater vulnerability assessment using drastic methods (study case : Parangtritis coastal zone, Yogyakarta special region). Di dalam: *34th Asian Conference on Remote Sensing 2013, ACRS 2013*.
- Wiemer B. 1990. H. H. Rump and H. Krist: Laboratory Manual for the Examination of Water, Waste Water and Soil. Weinheim, Verlag Chemie, 1988, 198 pp., zahlr. Abb. u. Tab., DM 58,—, ISBN 3-527-26973-8. *Acta Hydrochim Hydrobiol.*, siap terbit.
- Xiao J, Jin ZD, Wang J, Zhang F. 2015. Hydrochemical characteristics, controlling factors and solute sources of groundwater within the Tarim River Basin in the extreme arid region, NW Tibetan Plateau. *Quat Int.*, siap terbit.
- Yusuf M. 2016. Model pengelolaan lingkungan estuaria sungai tallo kawasan perkotaan makassar. *Disertasi Pascasarj IPB, Bogor.*, siap terbit.
- Vander Zaag AC, Campbell KJ, Jamieson RC, Sinclair AC, Hynes LG. 2010. Survival of Escherichia coli in agricultural soil and presence in tile drainage and shallow groundwater. *Can J Soil Sci.* 90(3):495–505. doi:10.4141/CJSS09113.
- Zahid A, Hassan MQ, Balke KD, Flegr M, Clark DW. 2008. Groundwater chemistry and occurrence of arsenic in the Meghna floodplain aquifer, southeastern Bangladesh. *Environ Geol.*, siap terbit.
- Zeffitni. 2012. Spatial Ecological Distribution of Groundwater Potency to Domestic Availability at Palu Groundwater Basin Central Sulawesi Province. *J Mns dan Lingkung.* 19(2):105–117. doi:10.22146/jml.18527.



@Hak cipta milik IPB University

(FIS)

Universitas

Negeri

Manado

(UNIMA)

, tahun

2012

dan gelar

*Master of Scince*

(M.Sc)

pada Jurusan

Ilmu

Lingkungan

Universitas

Gadjah

Mada

(UGM)

, tahun

2014

. Tahun

2016

, penulis

mendapatkan

kesempatan

melanjutkan

Pendidikan

S3

(Doktor)

Pada

program

Studi

Ilmu

Pengelolaan

Sumberdaya

Alam

dan Lingkungan

(PSL)

Institut

Pertanian

Bogor

(IPB)

dengan

Beasiswa

BUDI

DN.

## RIWAYAT HIDUP

Surya Cipta Ramadhan Kete (Penulis), Lahir di Lowu-Lowu (Kota Baubau) Sulawesi Tenggara, 14 April 1991. Penulis merupakan anak terakhir dari sepuluh bersaudara pasangang Bapak Abdul La Kete (Alm) dan Ibu Siyfa. Penulis bekerja sebagai dosen pada Jurusan Ilmu Lingkungan Fakultas Kehutanan dan Ilmu Lingkungan (FHIL) Universitas Halu Oleo (UHO), Kendari dan juga mengajar di Jurusan Pendidikan Geografi FKIP UHO. Pendidikan Sarjana ditempuh di Jurusan Pendidikan Geografi Fakultas Ilmu Sosial (FIS) Universitas Negeri Manado (UNIMA), tahun 2012 dan gelar *Master of Scince* (M.Sc) pada Jurusan Ilmu Lingkungan Universitas Gadjah Mada (UGM), tahun 2014. Tahun 2016, penulis mendapatkan kesempatan melanjutkan Pendidikan S3 (Doktor) Pada program Studi Ilmu Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan (PSL) Institut Pertanian Bogor (IPB) dengan Beasiswa BUDI DN.

Sebagai tugas akhir dalam menyelesaikan studi doktor di PSL IPB, peneliti menulis disertasi berjudul “Model Pengelolaan Air Tanah Berkelanjutan di Kota Kendari”. Beberapa artikel yang merupakan bagian dari disertasi ini telah diterbitkan pada jurnal nasional dan internasional yaitu: 1) Artikel berjudul “Land use classification based on object and pixel using Landsat 8 OLI in Kendari City, Southeast Sulawesi Province, Indonesia”. Disampaikan pada “5<sup>th</sup> Lisat Symposium LAPAN IPB 2018” dan Diterbitkan pada: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 284, No 1 Tahun 2019 (*Scopus indexed proceeding*); 2) Artikel berjudul “Assessment of Land Use Land Cover Changes and their Impact to Groundwater Quality Index in Kendari City – Indonesia” Diterbitkan pada *International Journal of Advanced Science and Technology*, Vol 29, No 3, Hal 3441-3452 tahun 2020 (Indeks Scopus Q4); 3) Artikel berjudul “Identifikasi dan Sebaran Intrusi Air Laut terhadap Airtanah Dangkal di Kota Kendari Sulawesi Tenggara” Diterbitkan pada Jurnal Teknologi Lingkungan, Vol 21, No 2, Hal 174-182 (Indeks Sinta 2)

Penulis aktif dalam mengikuti kegiatan seminar/conference dan training dibidang sains dan teknologi khususnya geografi dan lingkungan. Berbagai karya telah dipublikasikan baik dalam bentuk buku, jurnal maupun *proceeding* baik nasional dan internasional. Pada September 2015, ia mendapatkan penghargaan sebagai *The Best Presenter* dalam *International Seminar Forest Rehabilitation of Post Mining Areas: Mitigating the Ecological and Socio-Economic Impacts of Mining* yang diselenggarakan oleh FHUT Universitas Lambung Mangkurat, Banjarbaru, Kalimantan Selatan.