

PENILAIAN KERENTANAN INTRINSIK AIRTANAH TERHADAP PENCEMARAN DENGAN METODE SINTACS DI KOTA MANADO

Oleh

Nur Fitri Ramadhani¹, Ficky Marcellino Oroh², Jessen granbey Potalangi³, Claudio Elroi Pandelaki⁴, Muhammad Dany Mufid Farera⁵, Laura Novena Pangalila⁶

^{1,4,5,6}Perencanaan Wilayah dan Kota, Fakultas Teknik, Universitas Sam Ratulangi

^{2,3}Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sam Ratulangi

E-mail: ¹nframadhani@unsrat.ac.id, ²fickyoroh19@unsrat.ac.id,

³jessenpotalangi@unsrat.ac.id, ⁴claudiopandelaki025@student.unsrat.ac.id,

⁵muhammadfarera025@student.unsrat.ac.id,

⁶laurapangalila025@student.unsrat.ac.id

Article History:

Received: 20-10-2025

Revised: 08-11-2025

Accepted: 23-11-2025

Keywords:

Air Tanah,
Pencemaran, Spasial,
SINTACS, Kerentanan

Abstract: Air tanah merupakan salah satu sumber air utama bagi masyarakat di Kota Manado, sehingga informasi mengenai tingkat kerentanannya terhadap pencemaran diperlukan untuk mendukung pengelolaan yang berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tingkat kerentanan airtanah di Kota Manado menggunakan metode SINTACS. Metode ini menerapkan tujuh parameter hidrogeologi yang kemudian diberikan nilai, bobot, dan skor dengan analisis spasial overlay untuk memperoleh indeks kerentanan. Hasil analisis menunjukkan bahwa wilayah Kota Manado didominasi oleh kelas kerentanan sedang (69,04%), kelas kerentanan rendah mencakup 27,62%, sedangkan kelas kerentanan tinggi hanya mencakup 3,34% dan umumnya berada di wilayah pesisir dan dataran rendah. Faktor yang paling berpengaruh adalah muka airtanah dangkal, laju infiltrasi tinggi, media akuifer permeabel, nilai konduktivitas hidrolik besar, serta topografi datar. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa beberapa area di Kota Manado berpotensi mengalami pencemaran airtanah sehingga memerlukan prioritas dalam perencanaan pengelolaan sumber daya air dan mitigasi lingkungan.

PENDAHULUAN

Sumber daya Airtanah merupakan komponen krusial dalam siklus hidrologi dan penyediaan air bagi kebutuhan domestik, pertanian, industri maupun ekosistem. Namun semakin banyak fenomena kerentanan Airtanah terhadap pencemaran, penurunan kuantitas, dan gangguan kualitas. Konsep kerentanan Airtanah mencerminkan kemudahan zat pencemar mencapai akuifer, atau sebaliknya ketidaksiapan sistem akuifer untuk meredam aliran masuknya zat-pencemar dari permukaan [1].

Seiring dengan perkembangan wilayah perkotaan dan pembangunan, tekanan terhadap Airtanah muncul karena pertumbuhan penduduk, urbanisasi cepat, perubahan tata guna lahan, peningkatan limbah domestik dan industri, serta perubahan iklim yang

memengaruhi pengisian ulang (*recharge*) dan elevasi muka Airtanah. Airtanah yang tercemar juga berdampak pada kualitas hidup masyarakat menurun dan dari sisi lingkungan, kerentanan akuifer dapat mengarah pada kerusakan ekologis dan degradasi jasa ekosistem.

Sebagai ibukota Provinsi Sulawesi Utara, Kota Manado mengalami perubahan penggunaan lahan dan urbanisasi yang cepat, pengembangan kawasan pantai dan reklamasi, pemukiman yang berkembang di lahan rendah maupun lereng, serta sebagian besar rumah tangga masih bergantung pada sumur dan airtanah lokal. Dalam RISPAM (Rencana Induk Sistem Penyediaan Air Minum) Kota Manado memuat cakupan layanan air bersih melalui jaringan perpipaan baru mencakup 48,81% sedangkan sekitar 51,19% rumah tangga menggunakan sumber Airtanah. Dalam pemetaan potensi dan kualitas Airtanah di wilayah Manado disebutkan bahwa kedalaman akuifer di Kota Manado berkisar antara 114 – 320 m bawah muka tanah dan rata-rata ketinggian muka Airtanah ditemukan sebesar 2 – 5 m bawah muka tanah [2] yang menandakan terdapat akuifer yang cukup dalam namun muka Airtanah relatif dangkal yang dapat memicu potensi kerentanan lebih tinggi.

Dalam penelitian Londa, et al juga disebutkan banyak limbah domestik yang dibuang tanpa sistem kanal tertutup-teratur [3]. Selain itu, penelitian subsiden di wilayah reklamasi Manado, ditemukan bahwa laju subsiden berada pada kategori “rendah hingga menengah”, yaitu 0,01 hingga 0,20 meter per tahun. Penelitian ini mengaitkan subsiden dengan pengurangan massa Airtanah akibat ekstraksi yang intensif [4].

Struktur perumahan yang padat, sistem pembuangan limbah yang belum optimal, termasuk limbah domestik meningkatkan potensi kontaminasi ke airtanah. Selain itu konversi lahan terbuka menjadi permukiman atau komersial mempercepat *runoff*, mengurangi infiltrasi, dan mengubah pola pengisian ulang akuifer. Hal ini menandakan bahwa kuantitas Airtanah dan integritas akuifer di wilayah Manado adalah isu nyata.

Karakter geologi dan hidrogeologi yang kompleks di Kota Manado yang terletak di daerah dengan banyak patahan dan batuan vulkanik serta topografi bergelombang. Kondisi ini mempengaruhi aliran airtanah, kedalaman akuifer, permeabilitas dan zona tak jenuh.

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini bertujuan untuk menilai kerentanan airtanah Kota Manado menggunakan metode indeks SINTACS yang disesuaikan dengan kondisi lokal, mengintegrasikan data hidrogeologi serta memetakan zona kerentanan yang dapat digunakan dalam pengelolaan Airtanah dan kebijakan kota. Hasil penelitian dapat menjadi dasar untuk penyusunan zonasi kerentanan airtanah, pengaturan ekstraksi airtanah, dan integrasi dengan rencana tata ruang kota yang berkelanjutan.

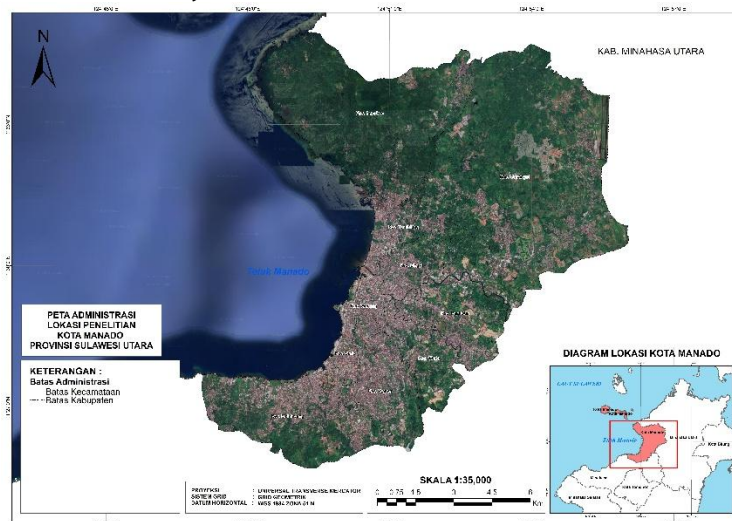
LANDASAN TEORI

Kerentanan intrinsik airtanah pada dasarnya menggambarkan seberapa mudah sebuah akuifer terpapar oleh bahan pencemar bila ditinjau dari kondisi fisik dan geologinya. Penilaian ini tidak bergantung pada jenis polutan, melainkan pada sifat lingkungan seperti kedalaman muka Airtanah, karakter tanah dan lapisan tak jenuh, tingkat permeabilitas batuan, serta kemampuan wilayah menerima imbuhan [5]. Kombinasi faktor-faktor tersebut menentukan seberapa cepat air dan potensi pencemaran di dalamnya dapat mencapai tubuh akuifer. Pemahaman tersebut kemudian melahirkan berbagai pendekatan penilaian kerentanan, termasuk metode SINTACS. Metode ini menggunakan tujuh parameter hidrogeologi dan menyusun bobot tertentu untuk masing-masing sehingga menghasilkan

indeks kerentanan [6]. Dibandingkan pendekatan sejenis seperti DRASTIC, SINTACS menawarkan fleksibilitas lebih besar karena bobotnya dapat disesuaikan dengan kondisi geologi lokal [7]. Hal ini membuatnya sering dipilih pada kawasan dengan karakter hidrogeologi yang bervariasi dan kompleks.

METODE PENELITIAN

Lokasi kajian zona kerentanan Airtanah terhadap pencemaran dilakukan di Kota Manado tepatnya beberapa Kecamatan daerah daratan Kota Manadi yaitu Kecamatan Bunaken, Malalayang, Paal Dua, Sario, Mapanget, Tuminting, Wanea, Tikala, Singkil, dan Wenang. Peta lokasi penelitian disajikan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Metode analisis yang digunakan yaitu metode SINTACS secara spasial menggunakan perangkat lunak ArcGIS yang memungkinkan penyajian informasi kerentanan Airtanah secara spasial dengan mengolah 7 (tujuh) parameter hidrogeologi yang terdiri dari Soggiacenza (Depth of phreatic) atau kedalaman muka Airtanah (S), Infiltrazione (Infiltration) atau kondisi Infiltrasi (I), Non Saturo (Aeration Condition) atau kondisi aerasi pada batuan atau zona tak jenuh (N), Tipologia Della Copertura (Soil Texture) atau Tektur tanah (T), Acquifero (Aquifer media) atau material akuifer (A), Conducibilita (hydraulic conductivity) atau Konduktifitas hidrolis (C), dan Superficie topografica (topography slope) atau kemiringan lereng (S) dalam satuan % [8]. Masing-masing parameter diberikan nilai dan bobot tertentu dengan teknik *overlay tools* sehingga menghasilkan peta tematik dari masing-masing parameter yang terkuantifikasi. Adapun klasifikasi kelas dan nilai parameter SINTACS berdasarkan Tabel 1.

Tabel 1. Kelas dan Nilai Parameter SINTACS

Kedalaman Muka Airtanah (m)		Infiltrasi (mm)		Kondisi Aerasi (Zona Tak Jenuh)		Tekstur Tanah		Media Akuifer		Konduktivitas Hidrolik (mm/detik)		Kemiringan Lereng (%)	
Kelas	Nilai	Kelas	Nilai	Kelas	Nilai	Kelas	Nilai	Kelas	Nilai	Kelas	Nilai	Kelas	Nilai
0-2	10	<1	1	Tanah liat, lumpur, gembur	1-2	Liat	1-1,5	Tanah liat, lumpur, gembur	1-3	$3,9 \times 10^{-6} - 5,5 \times 10^{-6}$	4,5	0-2	9,5
2-2,5	9	1-5	2	Marl, batu lempung	1-3	Liat berdebu	1,5-2	Marl, batu lempung	1-3	$5,5 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-5}$	5	2-4	8,5
2,5-3,5	8,5	5-20	3	Dolomit bercelah	2-5	Liat berlempung	2-3	Batuan metamorf bercelah	2-5	$1,0 \times 10^{-5} - 1,8 \times 10^{-5}$	5,5	4-6	7,5
3,5-4,5	8	20-65	4	Pengendapan sedimen	2-5	Lempung berdebu	3-4	Dolomit bercelah	4-7	$1,8 \times 10^{-5} - 3,0 \times 10^{-5}$	6	6-9	6,5
4,5-5	7,5	65-125	6	Batu piroklaastik	2-5	Liat berdebu	3,5-4	Batu piroklaastik	4-8	$3,0 \times 10^{-5} - 5,0 \times 10^{-5}$	6,5	9-12	5,5
5-6	7	>250	7	Batuan metamorf bercelah	2-6	Lempung	4-5	Batu pasir, konglomerat	4-9	$5,0 \times 10^{-5} - 9,0 \times 10^{-5}$	7	12-15	4,5
6-7	6,5			Endapan alluvial halus	3-6	Lempung berpasir	4,5-5	Pengendapan sedimen	5-8	$9,0 \times 10^{-5} - 1,5 \times 10^{-4}$	7,5	15-18	3,5
7-8	6			Pasiran	4-7	Lempung berpasir	5,5-6	Endapan alluvial halus	6-8	$1,5 \times 10^{-4} - 2,0 \times 10^{-4}$	7,75	18-21	2,5
8-9	5,5			Batu kapur bercelah	4-8	Lempung berpasir	6,3-7	Batu kapur bercelah	6-9	$2,0 \times 10^{-4} - 3,0 \times 10^{-4}$	8	21-25	1,5
9-10	5			Batu pasir, konglomerat	5-8	Gambut	7,5-8	Pasiran	7-9	$3,0 \times 10^{-4} - 4,5 \times 10^{-4}$	8,25	25-30	1
10-13	4,5			Vulkanik	5-10	Pasir berdebu	8-8,5	Sedimen Alluvial kasar	8-9	$4,5 \times 10^{-4} - 6,0 \times 10^{-4}$	8,5		
13-17	4			Sedimen Alluvial kasar	6-10	Pasir halus	9	Vulkanik	8-10	$6,0 \times 10^{-4} - 1,0 \times 10^{-3}$	8,75		
17-20	3,5			Batu kapur karst	8-10	Kerikil halus	9,5-10	Batu kapur karst	9-10	$1,0 \times 10^{-3} - 1,5 \times 10^{-3}$	9		
20-25	3					Tanah tipis	10			$1,5 \times 10^{-3} - 2,5 \times 10^{-3}$	9,25		
25-30	2,5									$2,5 \times 10^{-3} - 4,5 \times 10^{-3}$	9,5		
30-40	2									$4,5 \times 10^{-3} - 4,0 \times 10^{-2}$	9,75		
>40	1,5												

Sumber: [9], [10]

Selain klasifikasi kelas dan nilai, juga dilakukan pemberian bobot. Pada metode SINTACS pemberian bobot ini bertujuan menyesuaikan penilaian dengan kondisi praktis di lapangan. Bobot pada metode SINTACS ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Bobot Metode SINTACS

Bobot	S	I	N	T	A	C	S
Dampak Normal	5	4	5	3	3	3	3
Dampak Relevan	5	5	4	5	3	2	2
Drainase dari Jaringan Permukaan / Rembesan	4	4	4	2	5	5	2
Karst	2	5	1	3	5	5	5
Formasi Batuan Bercelah	4	4	4	4	4	5	4
Nitrat	5	5	4	5	2	2	3

Sumber: [10]

Setelah memberikan nilai dan bobot dilanjutkan dengan melakukan *overlay*. Tingkat kerentanan Airtanah terhadap pencemaran ditentukan berdasarkan hasil penjumlahan skor dari setiap parameter yang dihitung dengan indeks SINTACS (persamaan 1).

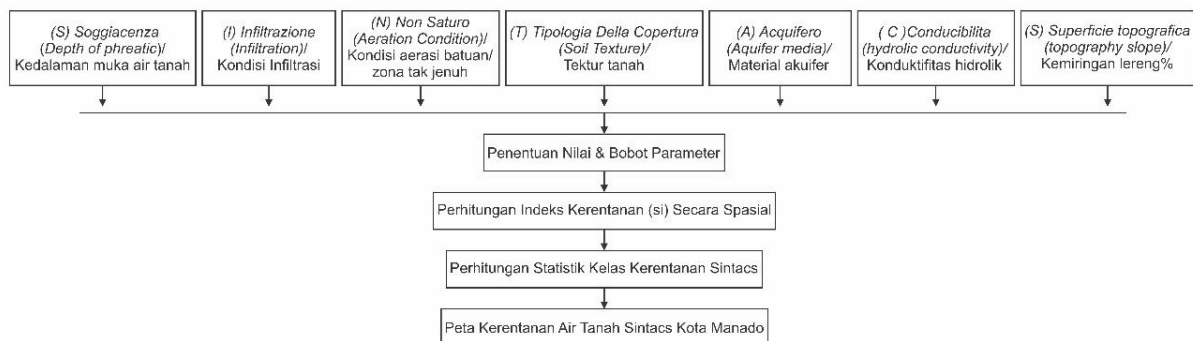
$$SI = Sr*Sw + Ir*Iw + Nr*Nw + Tr*Tw + Ar*Aw + Cr*Cw + Sr*Sw \quad (1)$$

Keterangan: r (Rating / Nilai), w (Weight / Bobot), SI (SINTACS Indeks)

Klasifikasi kerentanan Airtanah dilakukan dengan pendekatan statistik pada persamaan (2) dan persamaan (3) yang menghasilkan peta tingkat kerentanan Airtanah terhadap pencemaran.

$$\text{Rentang} = X_{\text{maximum}} - X_{\text{minimum}} \quad (2)$$

$$\text{Interval Kelas} = \frac{\text{Rentang}}{\text{Jumlah Kelas}} \quad (3)$$



Gambar 2. Diagram Alir Perhitungan Kerentanan SINTACS

HASIL DAN PEMBAHASAN

Metode SINTACS digunakan dalam penelitian ini untuk menilai tingkat kerentanan airtanah di Kota Manado melalui tujuh parameter hidrogeologi yang saling berkaitan. Berdasarkan data hidrogeologi wilayah penelitian, seluruh parameter SINTACS telah diolah untuk mendapatkan kelas, nilai, bobot, dan skor. Ringkasan hasil perhitungan tersebut disajikan pada Tabel 3 sebagai dasar interpretasi kerentanan airtanah di Kota Manado.

Tabel 3. Skor Parameter SINTACS

S - Soggiacenza (Depth of Phreatic) / Kedalaman Muka Airtanah (m)			
Kelas	Nilai	Bobot	Skor
4.5 – 9	7	5	35
9 – 15	5	5	25
15 – 22	3,5	5	17,5
I - Infiltrazione (Infiltration) / Kondisi Infiltrasi (mm/jam)			
Kelas	Nilai	Bobot	Skor

<1	1	4	4
5 – 20	3	4	12
20 – 65	4	4	16
65 - 125	6	4	24
N - Non Saturo (Aeration Condition) / Kondisi Aerasi Batuan (Zona Tak Jenuh)			
Kelas	Nilai	Bobot	Skor
Batuan metamorf bercelah	6	5	30
Lempung/lanauan	3	5	15
Pasir kerikil lanauan	5	5	25
T - Tipologia Della Copertura (Soil Texture) / Tektur tanah			
Kelas	Nilai	Bobot	Skor
Berbasir	8	3	24
Gambut	6	3	18
Lempung	5	3	15
A - Acquifero (Aquifer Media) / Media Litologi Akuifer			
Kelas	Nilai	Bobot	Skor
Basal, konglomerat	5	3	15
Metamorf	3	3	9
Pasiran	6	3	18
Batu gamping massif, pasir, kerikil	8	3	24
C - Conducibilita (Hydrolic Conductivity) / Konduktifitas Hidrolik			
Kelas	Nilai	Bobot	Skor
$4,63 \times 10^{-6}$	6	3	18
$1,16 \times 10^{-4}$	7	3	21
$6,71 \times 10^{-4}$	9	3	27
S - Superficie Topografica (Topography Slope) / Kemiringan Lereng			
Kelas	Nilai	Bobot	Skor
0 - 2 %	9,5	3	
2 - 6 %	7,5	3	
6 - 12 %	5,5	3	
12 - 18 %	3,5	3	
> 18 %	2,5	3	

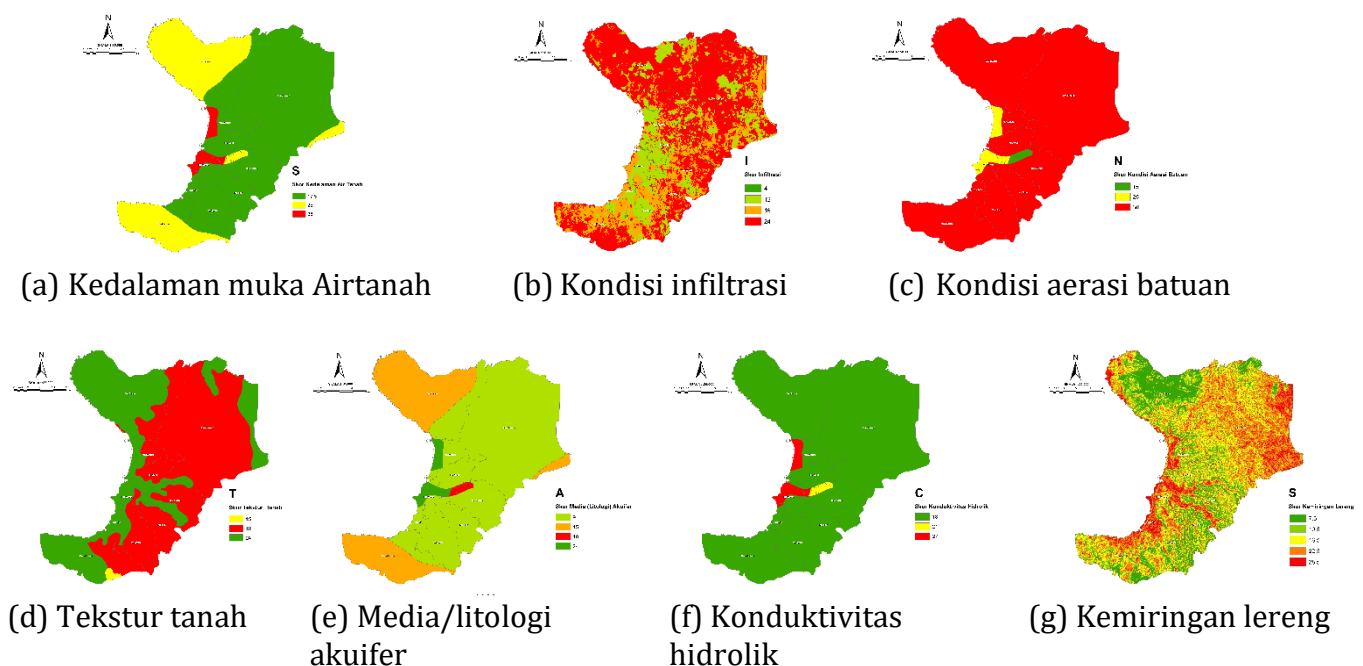
Sumber: Analisis 2025

Analisis kelas pada parameter SINTACS menunjukkan bahwa sebagian wilayah Manado memiliki kondisi hidrogeologi yang secara alami meningkatkan potensi kerentanan airtanah. Kedalaman muka Airtanah berada pada rentang 4,5–22 m, dengan zona terdangkal (4,5–9 m) menjadi area paling rentan karena jarak pergerakan kontaminan menuju akuifer lebih pendek. Hal ini sejalan dengan hasil perhitungan, di mana kelas terdangkal memperoleh skor tertinggi (35), jauh lebih besar dibanding kelas kedalaman yang lebih dalam. Parameter infiltrasi juga menunjukkan pola yang mendukung interpretasi tersebut. Berdasarkan data, infiltrasi di lokasi penelitian berada pada rentang <1 hingga 125 mm/jam, dengan kelas

infiltrasi tertinggi (65–125 mm/jam) menghasilkan skor terbesar (24). Kondisi ini mengindikasikan bahwa area dengan laju infiltrasi tinggi lebih memungkinkan transport pencemar dari permukaan menuju zona tak jenuh dan selanjutnya ke akuifer.

Karakteristik zona tak jenuh memperkuat kecenderungan tersebut. Keberadaan batuan metamorf bercelah serta campuran pasir, kerikil, lanauan menunjukkan media yang relatif permeabel, sedangkan lempung berperan sebagai penghambat alami. Hal ini tercermin dalam skor SINTACS, di mana batuan metamorf bercelah memperoleh skor tertinggi (30), sementara lempung hanya memiliki skor 15. Pada parameter tekstur tanah, kelas berpasir memberikan skor tertinggi (24), menunjukkan bahwa tanah berpori besar lebih mudah meloloskan air dan kontaminan dibandingkan gambut maupun lempung. Kategori ini selaras dengan parameter litologi akuifer, di mana media berporositas tinggi seperti pasir, kerikil, dan batu gamping massif menghasilkan skor maksimum (24), menandakan tingginya potensi penyebaran pencemar dalam akuifer yang sangat permeabel.

Pola tersebut semakin diperkuat oleh parameter konduktivitas hidrolis. Nilai K tertinggi yang mencerminkan kemampuan akuifer dalam meloloskan air maupun kontaminan pada tingkat yang lebih cepat dibanding kelas K yang lebih rendah. Dari aspek topografi, wilayah dengan kemiringan lereng datar (0–2%) memperoleh skor tertinggi karena memiliki potensi infiltrasi lebih besar dibandingkan daerah berlereng curam yang cenderung menghasilkan limpasan. Secara keseluruhan, kombinasi kelas dan skor menunjukkan bahwa wilayah dengan muka air dangkal, infiltrasi tinggi, tekstur tanah berpasir, litologi akuifer permeabel, nilai konduktivitas hidrolis besar, dan topografi datar merupakan zona dengan tingkat kerentanan airtanah tertinggi di Kota Manado.



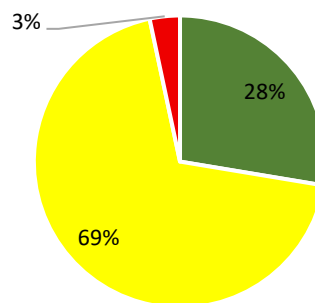
Gambar 3. Peta Parameter Kerentanan SINTACS

Adapun untuk hasil perhitungan dari *overlay* ketujuh parameter SINTACS maka didapatkan beberapa klasifikasi kelas kerentanan Airtanah terhadap pencemaran di Kota Manado yang diuraikan pada Tabel 4.

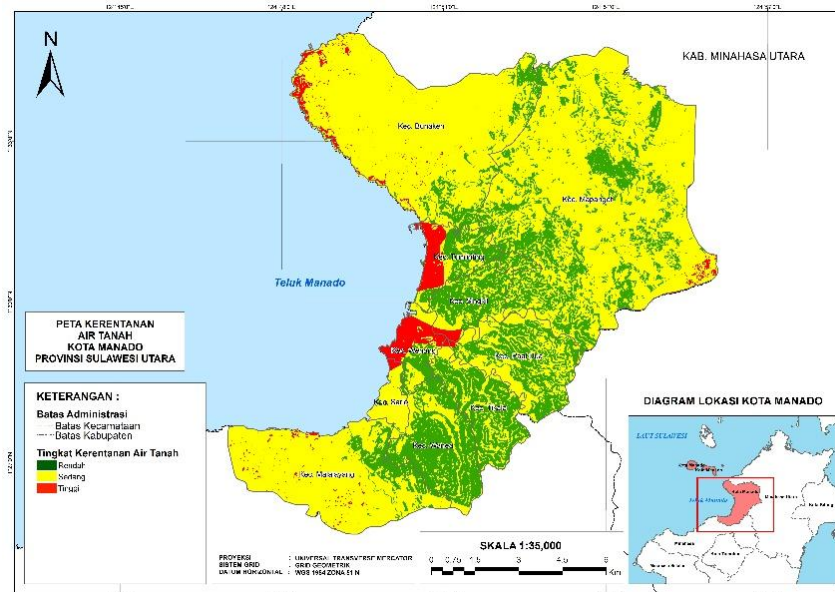
Tabel 4. Nilai Indeks Kerentanan Airtanah Kota Manado

Indeks SINTACS	Kelas Kerentanan	Luas (Km ²)	Persentase (%)
98,5 - 128,5	Rendah	39,66	27,62
128,6 - 158,5	Sedang	99,15	69,04
158,6 - 188,5	Tinggi	4,80	3,34

Sumber: Analisis 2025



Gambar 4. Diagram Persentase Kerentanan SINTACS



Gambar 5. Peta Kerentanan Airtanah Kota Manado

Hasil analisis kerentanan Airtanah menggunakan metode SINTACS menunjukkan bahwa Kota Manado didominasi oleh kelas kerentanan sedang dengan luas 99,15 km² atau 69,04% dari total area. Zona ini tersebar luas pada Kecamatan Bunaken, Mapanget, Sario dan Malalayang. Sebaran kerentanan sedang ini menunjukkan bahwa kondisi hidrogeologi dan karakteristik permukaan di wilayah tersebut memungkinkan infiltrasi dan pergerakan kontaminan dalam tingkat sedang. Dengan kata lain, meskipun tidak berada pada kategori

kritis, wilayah ini tetap memerlukan perhatian terutama pada area permukiman padat dan wilayah dengan aktivitas antropogenik yang tinggi.

Kerentanan rendah tercatat pada 39,66 km² atau 27,62% wilayah, zona ini umumnya terletak di sebagian Kecamatan Malalayang, Tuminting dan beberapa bagian kecil Wenang, Paal Dua, Singkil, Tikala, Wanea, dan bagian kecil Malalayang serta area bertopografi lebih tinggi. Kondisi ini mengindikasikan bahwa media geologi, struktur lapisan tanah, serta faktor topografi di wilayah tersebut berfungsi sebagai penghalang alami yang menurunkan potensi pergerakan pencemar menuju akuifer. Area dengan tingkat kerentanan rendah relatif lebih terlindungi dari pencemaran, namun tetap memerlukan pengawasan terutama pada perubahan penggunaan lahan maupun peningkatan densitas permukiman.

Sementara itu, kelas kerentanan tinggi memiliki luas paling kecil yaitu 4,80 km² atau 3,34% dari total wilayah. Zona ini terkonsentrasi pada area pesisir dan pusat kota seperti Kecamatan Wenang, Tuminting, bagian pesisir Bunaken, serta bagian kecil wilayah Malalayang. Area ini menunjukkan kondisi lingkungan yang relatif rentan terhadap pencemaran akibat kombinasi muka Airtanah dangkal, media tanah berpermeabilitas tinggi, topografi datar, serta intensitas aktivitas manusia yang tinggi. Faktor-faktor tersebut memungkinkan infiltrasi cepat dan penyebaran kontaminan menuju akuifer, sehingga wilayah ini menjadi prioritas dalam pengelolaan Airtanah. Hal tersebut sejalan dengan penelitian [11] dan [1] mengonfirmasi bahwa parameter kedalaman muka airtanah, infiltrasi, media akuifer dan kemiringan lereng secara konsisten ditemukan sebagai faktor dominan dalam menentukan kerentanan Airtanah.

Secara umum, hasil analisis spasial dengan metode SINTACS di Kota Manado menunjukkan adanya pola yang konsisten antara kondisi hidrogeologi dan perkembangan wilayah. Area pesisir dan pusat konsentrasi aktivitas manusia cenderung memiliki tingkat kerentanan lebih tinggi, sedangkan wilayah berbukit dengan material geologi lebih rapat menunjukkan tingkat kerentanan lebih rendah. Dengan demikian, distribusi kerentanan airtanah di Kota Manado tidak hanya dipengaruhi oleh faktor alamiah tetapi juga oleh dinamika penggunaan lahan dan tekanan lingkungan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis kerentanan airtanah menggunakan metode SINTACS, Kota Manado menunjukkan variasi tingkat kerentanan yang dipengaruhi oleh kondisi hidrogeologi wilayah. Nilai indeks SINTACS mengelompokkan wilayah penelitian ke dalam tiga kelas kerentanan, yaitu rendah, sedang, dan tinggi, dengan kelas kerentanan sedang menjadi dominan dan mencakup 69,04% (99,15 km²) dari luas wilayah. Hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah Kota Manado memiliki potensi moderat terhadap risiko masuknya kontaminan ke dalam sistem airtanah. Kelas kerentanan rendah menempati 27,62% (39,66 km²), terutama pada wilayah dengan kondisi geologi yang kurang permeabel dan topografi lebih tinggi, yang berfungsi sebagai zona perlindungan alami terhadap pencemaran. Sementara itu, kelas kerentanan tinggi hanya meliputi 3,34% (4,80 km²) dan tersebar terutama pada wilayah pesisir serta area dataran rendah yang memiliki muka airtanah dangkal, laju infiltrasi relatif tinggi, media akuifer permeabel, nilai konduktivitas hidrolik besar, dan topografi datar sehingga mendukung pergerakan kontaminan menuju akuifer.

Secara spasial, pola kerentanan airtanah menunjukkan kecenderungan meningkat menuju wilayah pesisir dan pusat aktivitas penduduk. Kondisi ini mengindikasikan perlunya prioritas pengelolaan, terutama pada wilayah berkerentanan tinggi, melalui pengendalian sumber pencemar, perbaikan sistem sanitasi, dan pemantauan kualitas airtanah secara berkala. Hasil penelitian ini dapat menjadi dasar dalam penyusunan strategi perlindungan airtanah, perencanaan tata ruang berbasis hidrogeologi, serta evaluasi keberlanjutan pemanfaatan airtanah di Kota Manado.

ACKNOWLEDGEMENTS

Penelitian ini dibiayai oleh Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) Universitas Sam Ratulangi dalam DIPA UNSRAT Tahun Anggaran 2025 melalui skema Penelitian Riset Dasar / Terapan Umum Unggulan UNSRAT (RDTU3). Kami mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang membantu jalannya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Anatoly, R. F. Lubis, H. Bakti, G. U. Nugraha, I. A. P. Paramitha And A. Ramdani, "A Comprehensive Review Of Current Studies On Groundwater Vulnerability In Indonesia," *PIT IAGI Balikpapan*, 2024.
- [2] M. Rabbi, F. Rohmat, F. Rohmat And D. Rohmat, "Mapping Potential And Groundwater Quality Using Geographical Information Systems Geographical (GIS) In Slum Areas In Manado City," In *The 5th IGEOS: International Geography Seminar 2021*, 2021.
- [3] T. K. Londa, F. F. Warouw And P. H. Pusung, "Mapping Of Waste Water Sources In The City Of Manado And Alternative Solutions," *International Journal Of Recent Technology And Engineering (IJRTE)*, Vol. 8, No. 2s9, 2019.
- [4] S. N. E. Wibowo, G. E. Mamuya And R. Djamaluddin, "Land Subsidence Analysis Of Reclaimed Land Using Time-Lapse Microgravity Anomaly In Manado, Indonesia," *Forum Geografi*, Vol. 32, No. 1, 2018.
- [5] N. D. Arianti, H. Siswoyo And M. Bisri, "Penilaian Tingkat Kerentanan Intrinsik Airtanah Terhadap Pencemaran Dengan Menggunakan Metode SINTACS Di Kecamatan Ngoro Kabupaten Jombang," *Jurnal Sains Dan Edukasi Sains*, Vol. 7, No. 2, 2024.
- [6] I. S. Ikenna, E. E. Chinedu And I. E. Chibuike, "A SINTACS GIS-Based Method For Assessing Groundwater Vulnerability In Sedimentary Aquifers, South-Eastern, Nigeria," *Arabian Journal Of Geosciences*, Vol. 14, No. 733, 2021.
- [7] I. Hamdan, A. Alshdaifat, M. Ibrahim, A. R. Al-Shabeeb, R. Al-Adamat And A. Al-Fugara, "A Dual-Method Assessment Of The Yarmouk Basin's Groundwater Vulnerability Using SINTACS And Random Forest," *Geosciences*, Vol. 15, No. 11, 2025.
- [8] R. S. Andini, H. Siswoyo And R. Asmaranto, "Pemetaan Tingkat Kerentanan Airtanah Terhadap Pencemaran Berdasarkan Metode SINTACS Di Kecamatan Gudo Kabupaten Jombang," *Jurnal Teslink : Teknik Sipil Dan Lingkungan*, Vol. 7, No. 1, 2025.
- [9] S. Purnama And A. Cahyadi, "Groundwater Vulnerability To Pollution In Kasihan District, Bantul Regency, Indonesia," *Forum Geografi*, Vol. 33, No. 2, P. 142, 2019.

- [10] M. Civita And M. Maio, "Assessing And Mapping Groundwater Vulnerability To Contamination: The Italian "Combined" Approach," *Geofísica Internacional Journal*, Vol. 43, No. 004, Pp. 513-532, 2004.
- [11] E. Febriarta And D. I. Shofarini, "Penilaian Zona Kerentanan Airtanah Terhadap Pencemaran Dengan Metode SINTACS Di Ranai (Pulau Bunguran)," *Jurnal Wilayah Dan Lingkungan*, Vol. 9, No. 1, 2021.

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN