



# Studi Keandalan Geolistrik Dalam Identifikasi Kebocoran Embung: Studi Kasus Embung Wolo, Sulawesi Tenggara

U. Mangidi<sup>a\*</sup>, A. Minmahddun<sup>a</sup>, E.N.P. Razak<sup>a</sup> dan Sulha<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Halu Oleo, Kendari, Indonesia 93232

\* Corresponding author's e-mail: [u.mangidi@uho.ac.id](mailto:u.mangidi@uho.ac.id)

Received: 30 November 2023; revised: 25 January 2024; accepted: 25 January 2024

**Abstract:** Small dams are vital for supporting water resource conservation. The reservoir stores water from several water sources, especially in the rainy season, so that it remains available in the dry season. Some reservoir infrastructures were built using earthen fill materials located around it. This condition is very vulnerable to disasters, ranging from seepage to collapse. It is important to evaluate the safety of all potential dangers to minimize the risk of disasters. One method that can be used is the geoelectric method, which allows us to analyze the resistivity properties of the soil, but the reliability of this method needs to be further evaluated. This research aims to determine the reliability of geoelectric in identifying potential leaks in reservoirs. Geoelectric measurements were carried out at Wolo Small Dam using the Wenner-Schlumberger configuration with 32 electrodes at 2.5 m. Data collection was carried out at the top of the small dam so that it could provide the condition of the soil layer of the embankment material in the longitudinal direction. Validate the measurement using the results of previous research. The results of the analysis show that there are differences in lithology in the body of the reservoir, which indicates differences in the quality of work during construction. The interface between these two surfaces can lead to leaks. Apart from that, the analysis results also show the potential for piping in the reservoir. The location of the potential piping area is not far from the results obtained in previous research at the same location. This shows that geoelectric is quite capable of being a tool that can be used to identify leaks in reservoirs or other water structures. Of course, the combination of geoelectric and other soil testing will provide better results in anticipating disasters caused by small dam leaks.

**Keywords:** *geoelectric, leakage, resistivity, Wenner-Schlumberger*

**Abstrak:** Embung merupakan infrastruktur bidang keairan yang sangat vital dalam mendukung upaya konservasi sumber daya air. Embung berfungsi menampung air dari beberapa sumber air, khususnya di musim hujan, agar dapat tetap tersedia dimusim kemarau. Beberapa infrastruktur embung dibangun dengan berbahan material urugan tanah yang berada disekitar lokasi embung. Kondisi ini sangat rentan terhadap bencana, mulai dari rembesan sampai pada keruntuhan embung. Evaluasi keamanan embung terhadap segala potensi bahaya penting untuk dilakukan guna meminimalkan resiko bencana. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah pendekatan dengan metode geolistrik. Geolistrik memungkinkan kita untuk menganalisis sifat-sifat resistivitas tanah di sekitar embung, namun keandalan metode ini perlu dievaluasi lebih lanjut. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui keandalan geolistrik dalam mengidentifikasi potensi kebocoran pada embung. Pengukuran geolistrik dilakukan pada Embung Wolo menggunakan konfigurasi *Wenner-Schlumberger* sebanyak 32 patok elektroda dengan jarak antara elektroda adalah 2,5 m. Pengambilan data dilakukan pada puncak embung sehingga dapat memberikan gambaran kondisi lapisan tanah material urugan pada arah memanjang. Validasi pengukuran menggunakan hasil penelitian terdahulu. Hasil analisis menunjukkan adanya perbedaan litologi ada tubuh embung yang mengindikasikan perbedaan kualitas pekerjaan disepanjang tubuh embung. *Interface* antara dua permukaan ini dapat menjadi titik lemah embung sehingga dapat terjadi kebocoran. Selain itu hasil analisis juga menunjukkan adanya potensi *piping* pada embung. Letak area yang berpotensi *piping* berada tidak jauh dari hasil yang diperoleh pada penelitian terdahulu pada lokasi yang sama. Hal ini menunjukkan geolistrik cukup mampu menjadi salah satu alat yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi kebocoran embung atau bangunan air lainnya. Tentunya kombinasi antara geolistrik dan pengujian tanah lainnya akan memberikan hasil yang lebih baik dalam mengantisipasi bencana yang diakibatkan kebocoran embung.

**Kata kunci:** *geolistrik, kebocoran, resistivitas, Wenner-Schlumberger*

## 1. Pendahuluan

Air adalah sumber daya alam yang kritis dan penting untuk kehidupan manusia serta kelangsungan ekosistem bumi. Keberlanjutan pengelolaan sumber daya air menjadi esensial dalam menghadapi tantangan global seperti pertumbuhan populasi, urbanisasi, perubahan iklim, dan peningkatan permintaan air di berbagai sektor. Embung memiliki beberapa fungsi kunci yang berperan penting dalam menjaga keberlanjutan pengelolaan sumber daya air seperti sebagai penyimpanan air yang dapat diandalkan, dapat membantu mengelola risiko banjir dengan menahan air selama periode curah hujan tinggi dan melepaskannya

secara terkontrol, sebagai sumber air irigasi dalam mendukung pertanian, membantu mengendalikan erosi tanah dan sedimentasi, berkontribusi pada pelestarian ekosistem air tawar, menjadi pusat pengelolaan sumber daya air yang berbasis masyarakat dan dapat menyediakan sumber air yang bersih dan aman untuk kebutuhan air minum masyarakat [1].

Pentingnya embung dalam menjaga keberlanjutan pengelolaan sumber daya air mengharuskan kita untuk menjaga integritas struktural dan fungsionalnya. Kebocoran pada embung dapat menjadi ancaman serius terhadap penyimpanan dan distribusi air, yang pada gilirannya dapat

berdampak pada ketersediaan air untuk kebutuhan masyarakat dan lingkungan [2], [3].

Embung Wolo merupakan embung yang berada di bawah pengawasan Balai Wilayah Sungai Sulawesi IV Kendari. Sumber air embung adalah mata air yang muncul di sekitar lereng gunung wolo. Material penyusun tubuh embung adalah tanah yang berasal dari penggalian di sekitar lokasi embung. Penelitian yang dilakukan oleh Mangidi [4] menemukan adanya rembesan yang terletak disekitar *spillway* embung dan menunjukkan adanya potensi keruntuhan yang disebabkan oleh rembesan tersebut.

Dalam upaya memitigasi risiko kebocoran embung, metode geolistrik telah muncul sebagai alat yang menjanjikan. Geolistrik memungkinkan kita untuk menganalisis sifat-sifat resistivitas tanah di sekitar embung, yang dapat mengindikasikan kelembaban tanah yang abnormal atau bahkan retakan struktural yang berpotensi menyebabkan kebocoran [5], [6], [7].

Meskipun geolistrik menawarkan potensi yang signifikan, keandalan metode ini perlu dievaluasi lebih lanjut. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mendalami studi keandalan geolistrik dalam identifikasi potensi kebocoran pada embung.

Dalam konteks ini, penelitian ini akan mengeksplorasi sejauh mana geolistrik dapat diandalkan dalam mendeteksi

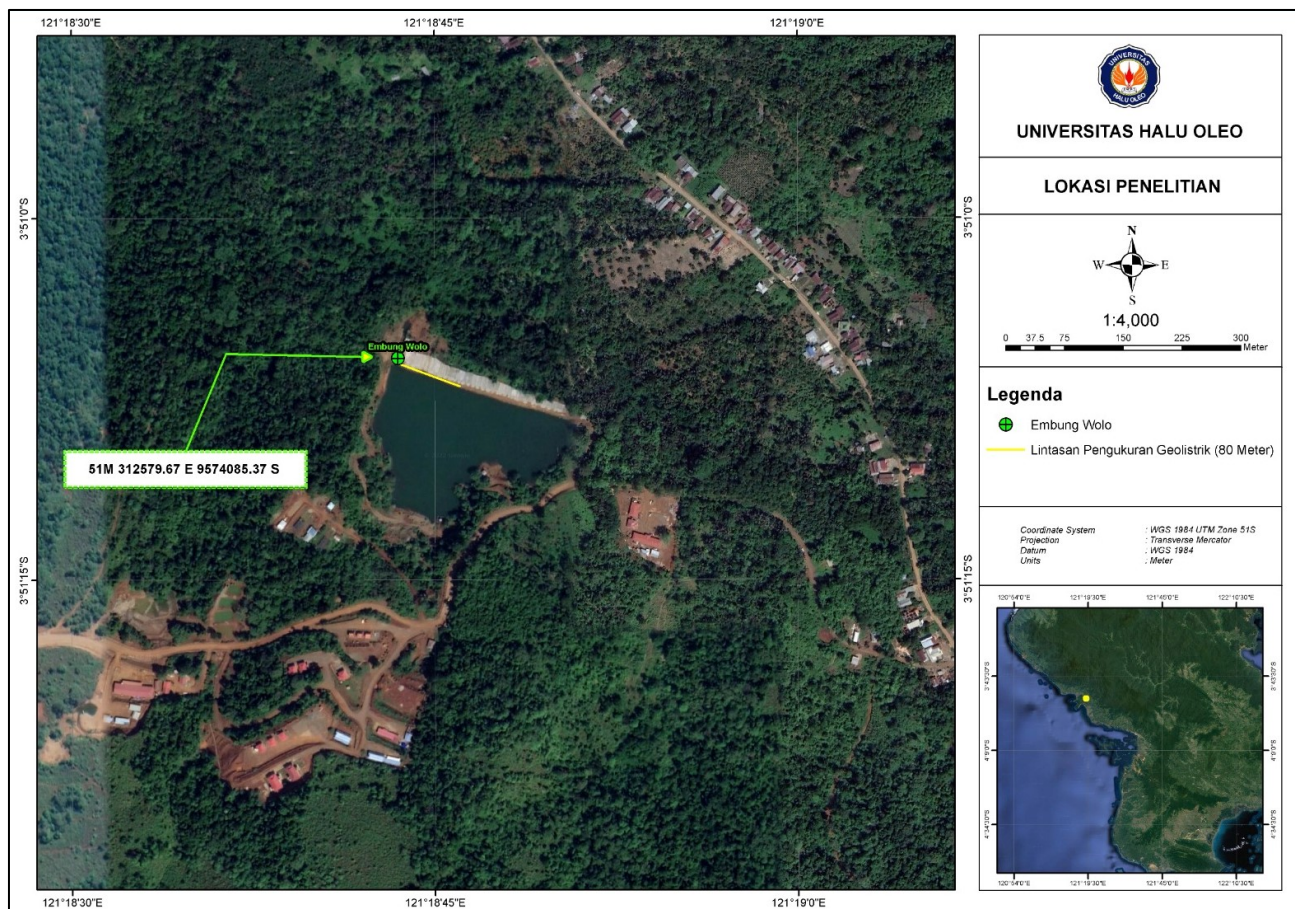
anomali resistivitas tanah yang mengindikasikan adanya potensi kebocoran. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang seberapa handal geolistrik sebagai alat identifikasi kebocoran pada embung. Temuan dari penelitian ini akan menjadi dasar untuk pengembangan pedoman dan praktik terbaik dalam penggunaan metode geolistrik untuk pengelolaan risiko kebocoran pada infrastruktur embung.

Dengan memahami dan meningkatkan keandalan geolistrik, kita dapat lebih efektif dalam merancang strategi pemeliharaan, memitigasi risiko, dan menjaga keberlanjutan pengelolaan embung untuk mendukung kebutuhan air yang berkelanjutan.

## 2. Metode Penelitian

### 2.1. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Embung Wolo (Gambar 1), yang terletak di Kecamatan Wolo, Kabupaten Kolaka, Provinsi Sulawesi Tenggara. Embung ini dipilih sebagai lokasi penelitian karena adanya bocoran yang telah teridentifikasi, sehingga dapat menjadi tolak ukur keandalan geolistrik dalam mengidentifikasi kebocoran.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian

### 2.2. Metode dan Tahapan Penelitian

Identifikasi kebocoran embung dilakukan menggunakan pengukuran geolistrik di lapangan. Metode ini

menggunakan nilai resistivitas untuk mengetahui sifat aliran listrik di dalam bumi, dengan cara menginjeksikan arus listrik ke dalam bumi [8], [9]. Penelitian ini menggunakan



metode resistivitas *mapping* sehingga dapat diketahui variasi resistivitas lapisan bawah permukaan pada setiap kedalaman [10].

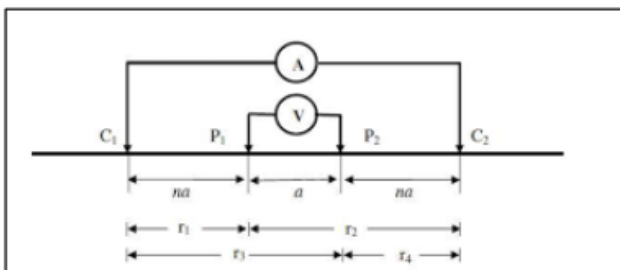
Langkah awal dalam survei geolistrik adalah penentuan lintasan meliputi arah dan jarak antar elektroda. Survei geolistrik dilakukan di puncak embung pada arah memanjang untuk memastikan rembesan yang telah teridentifikasi dapat masuk dalam jangkauan alat. Penelitian ini menggunakan 32 elektroda yang masing-masing ditancapkan setiap jarak 2,5 m, sehingga panjang lintasan pengukuran adalah 80 m. Jarak antar elektroda sangat mempengaruhi hasil penggambaran kondisi bawah permukaan tanah. Jarak elektroda yang semakin lebar akan memberikan hasil yang kurang baik untuk skala pengukuran yang kecil seperti kasus pada penelitian ini. Oleh karena itu, pada penelitian ini jarak elektroda 2,5 m dipilih agar diperoleh hasil yang lebih detail karena tinggi embung yang akan dievaluasi adalah 10 m. Panjang lintasan 80 m akan mampu menggambarkan kondisi bawah permukaan hingga kedalaman 16 m.

Konfigurasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah konfigurasi *Wenner-Schlumberger*. Konfigurasi ini sangat cocok pada pengukuran rembesan karena tidak merusak struktur embung, mengefisiensi bentang jarak pengukuran yang dilakukan, dapat memetakan kondisi bawah permukaan dengan sangat baik serta mudah untuk digunakan [11], [12]. Konfigurasi *Wenner-Schlumberger* dapat dilihat pada Gambar 2 [13].

Konfigurasi *Wenner-Schlumberger* dengan spasi yang konstan dengan perbandingan jarak antara  $C_1 - P_1 - P_2 - C_2$  di mana nilai  $C_1 - P_1$  maupun  $P_2 - C_2$  merupakan  $na$ , sedangkan jarak antara  $P_1 - P_2$  merupakan bernilai spasi  $a$ , sehingga pada saat  $n$  meningkat seiring lebih dalam di bawah permukaan tanah maka nilai menjadi  $2na$  dan seterusnya. Pada saat jumlah  $n$  bertambah maka nilai sensitivitas positif yang tinggi berada di antara  $P_1 - P_2$  menyebar mendekati  $C_1 - C_2$ . Konfigurasi ini memiliki sensitivitas yang baik untuk melihat penampang model bawah permukaan secara vertikal. Konfigurasi untuk survei kedalaman baik digunakan untuk survei geoteknik. Faktor geometri konfigurasi ini adalah:

$$k = \pi a(n + 1)a \tag{1}$$

$k$  = faktor geometri (m)



Gambar 2. Konfigurasi *Wenner-Schlumberger*

Faktor geometri digunakan sebagai pengali nilai resistivitas yang diperoleh dari hasil pengukuran arus dan tegangan di lapangan. Nilai ini yang kemudian digunakan

dalam analisis menggunakan program *res2dinv* untuk mendapatkan informasi kondisi bawah permukaan.

*Output* resistivitas digunakan untuk identifikasi litologi embung serta potensi kebocoran. Jenis tanah tubuh embung diketahui dari korelasi resistivitas terhadap jenis tanah yang diusulkan oleh [14] seperti yang terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Tipikal nilai resistivitas

Material	Resistivitas ( $\Omega.m$ )
Tanah lempung, basah lembek	1,5-3
Tanah lanau dan tanah lanau basah lembek	3-15
Tanah lanau pasiran	15-150
Batuan dasar berkekar terisi tanah lembab	150-300
Pasir kerikil terdapat lapisan lanau	$\pm 300$
Batuan dasar terisi tanah kering	300-2.400
Batuan dasar tak lapuk	>2400
Air Tawar	20-60
Air laut	0.18-0.24

Lokasi embung yang berpotensi mengalami kebocoran diidentifikasi berdasarkan nilai resistivitas air yang rendah (*low resistivity zone*) yaitu kisaran antara 0.5-60 [8], [14]. Letak area yang berpotensi mengalami kebocoran berdasarkan hasil metode geolistrik dibandingkan dengan hasil simulasi numeris dan divalidasi dengan titik rembesan aktual yang telah diukur pada penelitian sebelumnya [4].

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1. Pengukuran Resistivitas

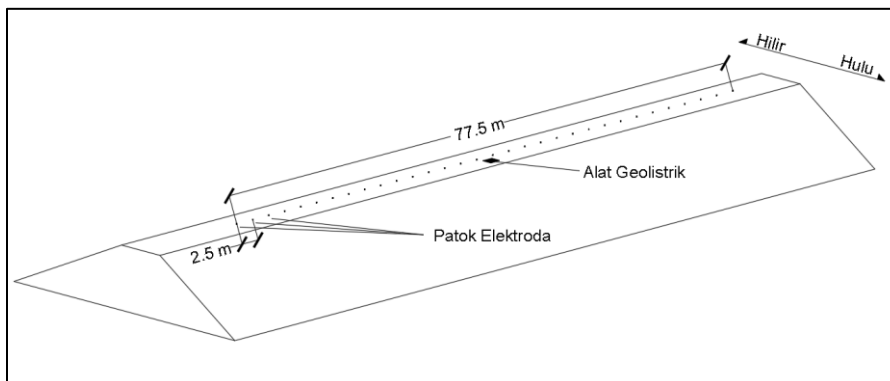
Pengukuran resistivitas dilakukan menggunakan alat geolistrik Geotitis GL-MD-300 32 channel (Gambar 3). Pengukuran menggunakan patok elektroda berjumlah 32 dengan jarak antar elektroda adalah 2.5 m sehingga panjang total lintasan pengukuran adalah 77.5 m, yang memungkinkan untuk memperoleh gambaran lapisan tanah sedalam 16 m, yang mana ini sudah cukup untuk memperoleh gambaran sekitar area rembesan. Ilustrasi skema pengukuran geolistrik pada embung dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 3. Alat geolistrik

Metode pengukuran dilakukan dengan cara mengalirkan arus listrik pada setiap empat patok elektroda dari patok pertama hingga patok ketiga puluh dua secara bergantian dengan konfigurasi *Wenner-Schlumberger* (Tabel 2). Hasil

pengukuran berupa nilai arus dan tegangan yang catat sebanyak 189 kali. Nilai ini digunakan untuk memperoleh nilai resistivitas semu.



Gambar 4. Skema pengujian geolistrik

Tabel 2. Konfigurasi *Wenner-Schlumberger* 32 Channel

NO	Channel				NO	Channel				NO	Channel				NO	Channel				NO	Channel								
	A	M	N	B		A	M	N	B		A	M	N	B		A	M	N	B		A	M	N	B					
1	15	16	17	18	33	7	13	14	20	65	7	9	10	12	97	2	3	4	5	129	17	20	21	24	161	15	23	24	32
2	14	16	17	19	34	6	13	14	21	66	6	9	10	13	98	1	3	4	6	130	16	20	21	25	162	23	24	25	26
3	13	16	17	20	35	5	13	14	22	67	5	9	10	14	99	1	2	3	4	131	15	20	21	26	163	22	24	25	27
4	12	16	17	21	36	4	13	14	23	68	4	9	10	15	100	16	17	18	19	132	14	20	21	27	164	21	24	25	28
5	11	16	17	22	37	11	12	13	14	69	3	9	10	16	101	15	17	18	20	133	13	20	21	28	165	20	24	25	29
6	10	16	17	23	38	10	12	13	15	70	2	9	10	17	102	14	17	18	21	134	12	20	21	29	166	19	24	25	30
7	9	16	17	24	39	9	12	13	16	71	1	9	10	18	103	13	17	18	22	135	11	20	21	30	167	18	24	25	31
8	8	16	17	25	40	8	12	13	17	72	7	8	9	10	104	12	17	18	23	136	20	21	22	23	168	17	24	25	32
9	7	16	17	26	41	7	12	13	18	73	6	8	9	11	105	11	17	18	24	137	19	21	22	24	169	24	25	26	27
10	14	15	16	17	42	6	12	13	19	74	5	8	9	12	106	10	17	18	25	138	18	21	22	25	170	23	25	26	28
11	13	15	16	18	43	5	12	13	20	75	4	8	9	13	107	9	17	18	26	139	17	21	22	26	171	22	25	26	29
12	12	15	16	19	44	4	12	13	21	76	3	8	9	14	108	8	17	18	27	140	16	21	22	27	172	21	25	26	30
13	11	15	16	20	45	3	12	13	22	77	2	8	9	15	109	17	18	19	20	141	15	21	22	28	173	20	25	26	31
14	10	15	16	21	46	10	11	12	13	78	1	8	9	16	110	16	18	19	21	142	14	21	22	29	174	19	25	26	32
15	9	15	16	22	47	9	11	12	14	79	6	7	8	9	111	15	18	19	22	143	13	21	22	30	175	25	26	27	28
16	8	15	16	23	48	8	11	12	15	80	5	7	8	10	112	14	18	19	23	144	12	21	22	31	176	24	26	27	29
17	7	15	16	24	49	7	11	12	16	81	4	7	8	11	113	13	18	19	24	145	21	22	23	24	177	23	26	27	30
18	6	15	16	25	50	6	11	12	17	82	3	7	8	12	114	12	18	19	25	146	20	22	23	25	178	22	26	27	31
19	13	14	15	16	51	5	11	12	18	83	2	7	8	13	115	11	18	19	26	147	19	22	23	26	179	21	26	27	32
20	12	14	15	17	52	4	11	12	19	84	1	7	8	14	116	10	18	19	27	148	18	22	23	27	180	26	27	28	29
21	11	14	15	18	53	3	11	12	20	85	5	6	7	8	117	9	18	19	28	149	17	22	23	28	181	25	27	28	30
22	10	14	15	19	54	2	11	12	21	86	4	6	7	9	118	18	19	20	21	150	16	22	23	29	182	24	27	28	31
23	9	14	15	20	55	9	10	11	12	87	3	6	7	10	119	17	19	20	22	151	15	22	23	30	183	23	27	28	32
24	8	14	15	21	56	8	10	11	13	88	2	6	7	11	120	16	19	20	23	152	14	22	23	31	184	27	28	29	30
25	7	14	15	22	57	7	10	11	14	89	1	6	7	12	121	15	19	20	24	153	13	22	23	32	185	26	28	29	31
26	6	14	15	23	58	6	10	11	15	90	4	5	6	7	122	14	19	20	25	154	22	23	24	25	186	25	28	29	32
27	5	14	15	24	59	5	10	11	16	91	3	5	6	8	123	13	19	20	26	155	21	23	24	26	187	28	29	30	31
28	12	13	14	15	60	4	10	11	17	92	2	5	6	9	124	12	19	20	27	156	20	23	24	27	188	27	29	30	32
29	11	13	14	16	61	3	10	11	18	93	1	5	6	10	125	11	19	20	28	157	19	23	24	28	189	29	30	31	32
30	10	13	14	17	62	2	10	11	19	94	3	4	5	6	126	10	19	20	29	158	18	23	24	29					
31	9	13	14	18	63	1	10	11	20	95	2	4	5	7	127	19	20	21	22	159	17	23	24	30					
32	8	13	14	19	64	8	9	10	11	96	1	4	5	8	128	18	20	21	23	160	16	23	24	31					

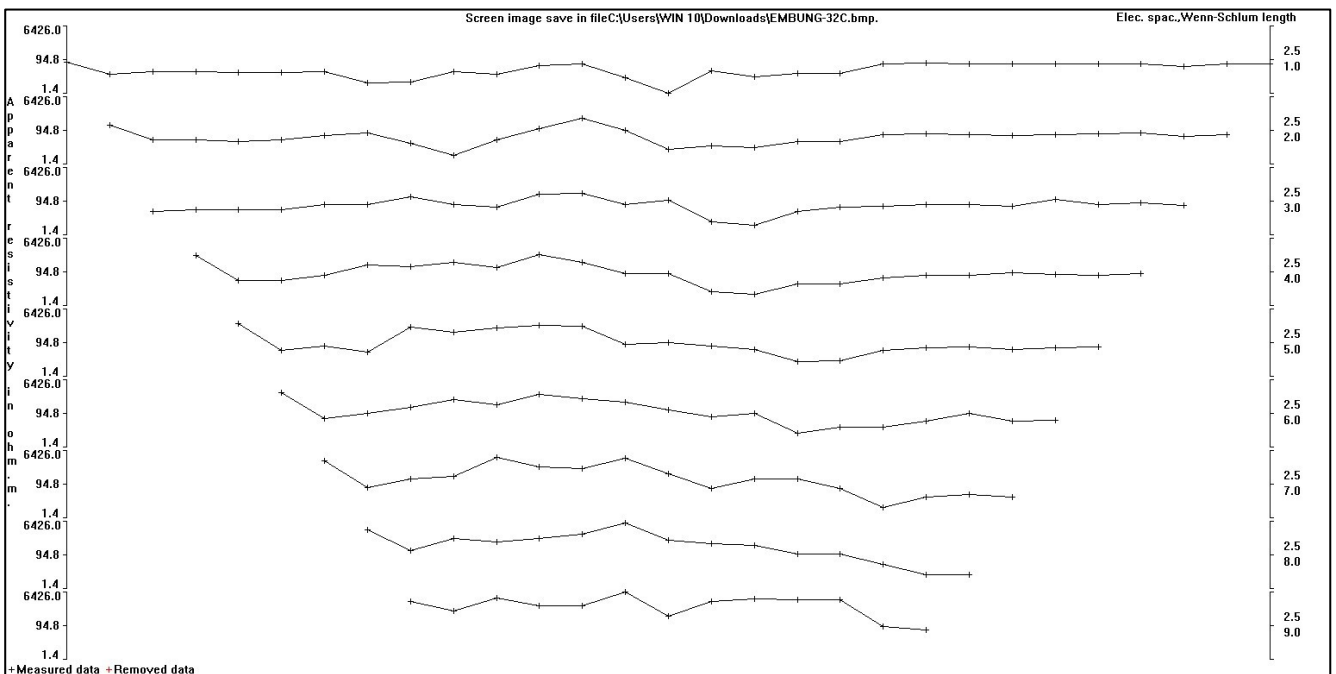
3.2. Interpretasi Hasil Analisis Data

Setelah dilakukan pengambilan data, hasil pengukuran selanjutnya dianalisis untuk mendapatkan nilai resistivitas semu. Nilai resistivitas semu diperoleh dari hasil bagi antara tegangan dan arus dikalikan dengan faktor geometri. Data resistivitas semu pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 5. Untuk memperoleh nilai resistivitas aktual, nilai resistivitas semua dianalisis menggunakan aplikasi *res2dinv* yang luarannya berupa pola warna batuan dengan nilai resistivitas tertentu yang dapat dilihat pada Gambar 6.

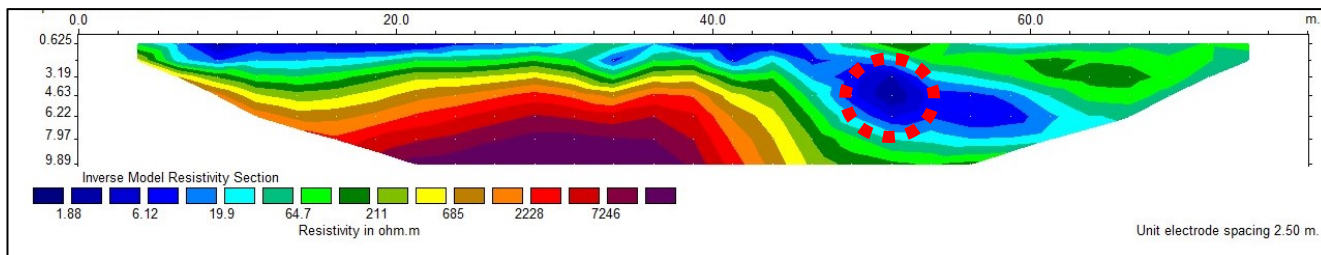
Gambar 6 menunjukkan penampang resistivitas dimana sumbu-x adalah arah lintasan pengukuran pada puncak embung dan sumbu-y adalah kedalaman embung. Hasil inversi menunjukkan resistivitas pada lokasi penelitian berada antara 1,8 - 7.246  $\Omega$ .m. Terdapat perbedaan litologi antara sisi kanan dan sisi kiri embung. Pada sisi kiri terlihat semakin dalam nilai resistivitasnya cenderung meningkat. Adapun pada sisi kanan terjadi ketidakaturan pola resistivitas. [15] dalam penelitiannya mendapati bahwa kepadatan resistivitas tanah juga dipengaruhi oleh kepadatan tanah. Semakin tinggi kepadatan tanah maka nilai resistivitasnya juga semakin tinggi. Hal ini berkaitan dengan pola resistivitas yang terbentuk pada tubuh embung. Embung wolo tidak menerima tambahan beban luar vertikal yang masif selama masa operasinya karena hampir tidak ada aktivitas diatas tubuh embung. Oleh karena itu, kepadatan material urugan dipengaruhi oleh berat tanah itu sendiri. Idealnya akibat beratnya sendiri (tekanan *overburden*) semakin dalam kepadatan tanah akan meningkat karena tambahan beban yang berasal dari tanah diatasnya seperti yang terlihat pada sisi kiri penampang resistivitas Embung

Wolo. Ketidakaturan pola resistivitas pada sisi kanan Embung Wolo mengindikasikan kurang bagus nya proses pemadatan saat proses konstruksi. Material urugan tidak dipadatkan lapis demi lapis menyebabkan tidak tercapainya kepadatan optimum. Tanah yang kurang padat bisa memperbesar potensi terjadinya rembesan yang dapat menyebabkan terjadinya kebocoran.

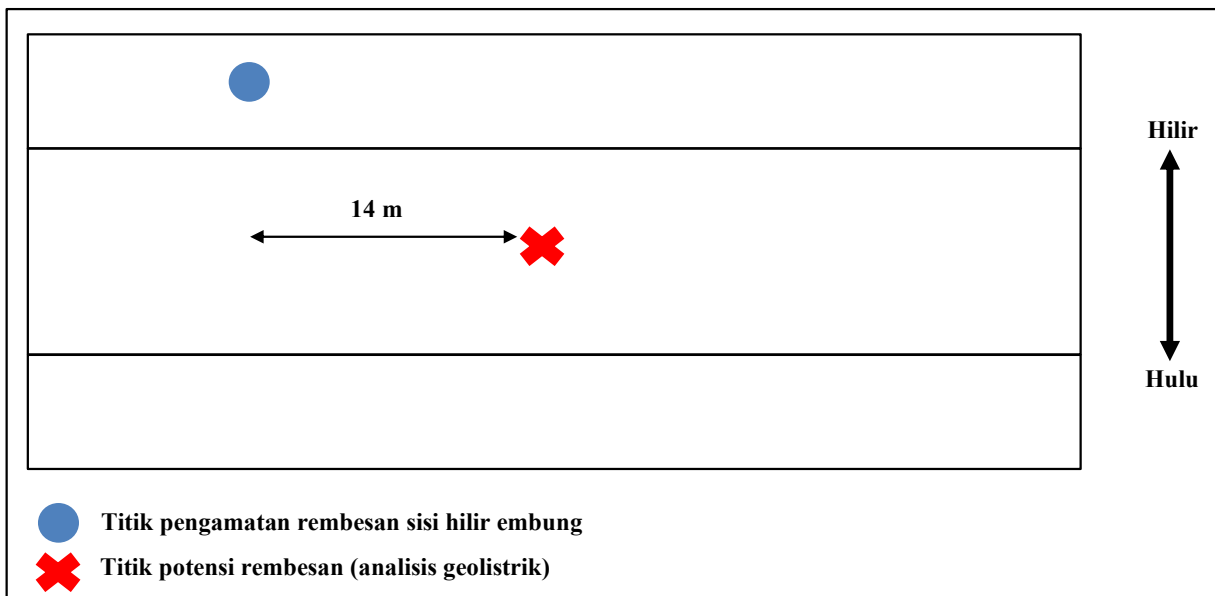
Berdasarkan pola dan nilai resistivitas yang terdapat pada Gambar 6, terdapat potensi rembesan pada jarak 50 m (dari sisi kiri) dan kedalaman 4 m dengan nilai resistivitas 6-10  $\Omega$ .m (nilai resistivitas untuk air [8], [14]). Terdapat perbedaan antara titik rembesan dari hasil analisis yang dilakukan oleh [4] dan hasil analisis data geolistrik. Perbedaan ini bisa disebabkan oleh parameter tanah yang digunakan oleh penelitian sebelumnya diasumsikan sebagai material yang homogen, sedangkan dalam kenyataannya kepadatan tanah tidak mungkin sama hingga kedalaman 10 m karena adanya tekanan *overburden*. Selain itu, arah rembesan tidak berbentuk lurus karena titik potensi rembesan yang diperoleh dari hasil geolistrik tidak berada dalam satu garis lurus dengan titik rembesan yang terjadi pada sisi hilir embung (Gambar 7). Hal ini mengindikasikan pola aliran rembesan dalam tubuh embung bergerak dalam arah yang dinamis, dan bisa jadi titik potensi rembesan yang didapatkan dari hasil analisis geolistrik tidak berhubungan dengan titik rembesan yang berada pada sisi hilir embung. Untuk mengetahui pola aliran rembesan pada tubuh embung diperlukan tambahan titik pengujian pada lereng embung sisi hilir. Meskipun demikian, dari bacaan nilai resistivitas dapat diketahui titik-titik yang berpotensi terdapat rembesan.



Gambar 5. Nilai resistivitas semu



Gambar 6. Hasil analisis data



Gambar 7. Letak titik potensi rembesan

#### 4. Kesimpulan

Survei geolistrik dapat menjadi salah satu data pendukung dalam mengidentifikasi kebocoran pada embung maupun bangunan air lainnya. Hal ini terlihat dari hasil analisis data yang menunjukkan geolistrik mampu memberikan gambaran kondisi bawah permukaan tanah yang berpotensi mengalami rembesan hampir mendekati kondisi aktualnya. Tentunya geolistrik tidak dapat berdiri sendiri dalam mengidentifikasi kebocoran bendungan. Diperlukan data tambahan sebagai alat kontrol hasil pengukuran geolistrik yang pada penelitian ini menggunakan penelitian terdahulu pada lokasi yang sama.

#### Daftar Pustaka

[1] F.D. Harahap, *Pengelolaan Sumber Daya Air yang Berkelanjutan*, Pangkalpinang: UBB, 2022.

[2] E. Sriyono, S. Sardi, and D.A. Trisnawati, "Analisis Kemanfaatan Embung Klampeyan Desa Tlogoadi Kecamatan Mlati Kabupaten Sleman," *JUTEKS Jurnal Teknik Sipil*, vol. 6, no. 2, p. 57, 2021.

[3] L.E. Fatmawati and A.C. Utomo, "Analisis Stabilitas Bendung Embung Made, Desa Made, Kecamatan Kudu, Kabupaten Jombang," *Axial Jurnal Rekayasa dan Manajemen Konstruksi*, vol. 7, no. 3, p. 241, 2019.

[4] U. Mangidi, A. Minmahddun, R. Sriyani, E. Ngii, A.S. Sukri, E.N.P. Razak, and R. Risaldi, *Analisis Potensi*

*Keruntuhan Embung Akibat Rembesan*, Jakarta: HATHI, 2021.

[5] D. Chandrasasi, R. Asmaranto, and N.M.R. Partarini, "Penerapan Metode Geolistrik Konfigurasi Wenner – Schlumberger untuk Analisis Rembesan Pada Maindam Waduk Greneng, Kabupaten Blora," *Jurnal Teknik Pengairan*, vol. 9, no. 2, p. 114, 2018.

[6] D.R. Amalia, A. Fuad, D.A. Suaidi, S. Zulaikah, and Y.A. Laksono, *Pemetaan Pola Rembesan Air Pada Bendungan Selorejo Menggunakan Metode Geolistrik*, Malang: UM, 2017.

[7] M.A.H. Pramudawati, M.I. Tanjung, and R. Ghafara, "Penilaian Risiko Keamanan Bendungan di Jawa Timur," *Jurnal Teknik Hidraulik*, vol. 11, no. 2, p. 93, 2020.

[8] W.M. Telford, L.P. Goldrat, and R. . Sheriff, *Applied Geophysics*, Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

[9] D. A. Gunn, J.E. Chambers, S. Uhlemann, P.B. Wilkinson, P.I. Meldrum, T.A. Dijkstra, E. Haslam, M. Kirkham, J. Wragg, S. Holyoake, P.N. Hughes, R. Hen-Jones, and S. Glendinning, "Moisture Monitoring in Clay Embankments using Electrical Resistivity Tomography," *Construction Building Material*, vol. 92, p. 82, 2015.

- [10] S. Maemuna, Darsono, and B. Legowo, "Identifikasi Akuifer di Sekitar Kawasan Karst Gombang Selatan Kecamatan Buayan Kabupaten Kebumen dengan Metode Geolistrik," *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, vol. 13, no. 2, p. 44, 2017.
- [11] Gumilar, *Metode Resistivitas Konfigurasi Wenner untuk Menganalisis Aliran Rembesan (Seepage) di Bendung Alam Wae Ela, Ambon*. Bandung: Univesitas Pendidikan Indonesia, 2014.
- [12] D. Darsono, B. Nurlaksito, and B. Legowo, "Identifikasi Bidang Gelincir Pemicu Bencana Tanah Longsor dengan Metode Resistivitas 2 Dimensi di Desa Pablengan Kecamatan Matesih Kabupaten Karanganyar," *Indonesian Journal of Applied Physics*, vol. 2, no. 1, p. 51, 2012.
- [13] J.M. Reynolds, *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Chichester: John Wiley and Sons, 2011.
- [14] R.E. Hunt, *Geotechnical Investigation Methods*, Florida: CRC Press, 2006..
- [15] E.A. Suryo, Suroso, Y. Zaika, and M. Ato'urrahman, "Pengaruh Kepadatan dan Kadar Air Tanah Pasir Terhadap Nilai Resistivitas pada Model Fisik dengan Metode Geolistrik", *Rekayasa Sipil*, vol. 10, no. 3, p. 178, 2016.

*This page is intentionally left blank*