

Permodelan hidrogeologi kondisi natural pada daerah luyo kabupaten polewali mandar provinsi sulawesi barat

Nur Aqsa Syahban Irwan^{*}, Shalaho Dina Devy², Albertus Juvensius Pontus³, Revia Oktaviani, Agus Winarno⁴.

^{1,2,3,4}Universitas Mulawarman

^{*}Corresponding Author e-mail: aksaaksa435@gmail.com

Abstract: *The Luyo area, Polewali Mandar Regency, West Sulawesi Province, has a high dependence on groundwater as the main source of water for domestic and community activities. Increasing groundwater utilization may potentially disturb the natural hydrogeological balance if it is not properly managed. Therefore, a comprehensive understanding of natural hydrogeological conditions is essential as a basis for sustainable groundwater management. This study aims to determine the hydrogeological conditions of the study area, the natural groundwater balance, and the groundwater flow pattern and hydraulic head distribution through natural-condition hydrogeological modeling. The research methods include hydrological analysis, groundwater level measurements, electrical resistivity surveys using the Schlumberger configuration, pumping tests, and steady-state numerical groundwater modeling based on conceptual and mathematical approaches. The results indicate that the hydrogeological system in the study area consists of unconfined and semi-confined aquifers controlled by local lithological and geomorphological conditions. The natural groundwater balance shows that the study area remains in a relatively balanced condition, with groundwater recharge primarily derived from rainfall infiltration. Groundwater flow generally follows the topography, moving from recharge areas toward discharge zones such as rivers and springs. Model calibration results show good agreement between simulated and observed hydraulic heads. The developed natural-condition hydrogeological model is expected to serve as a baseline reference for evaluating future changes in the groundwater system due to human activities and environmental changes.*

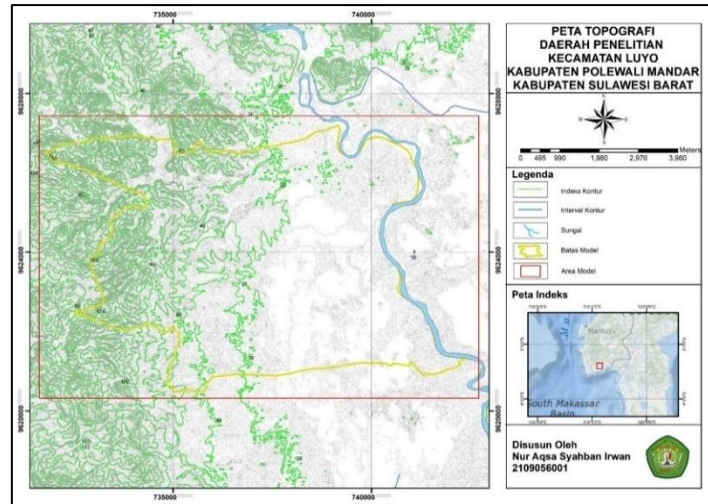
Keywords: *Hydrogeology, Groundwater, Numerical Modeling, Natural Condition, Groundwater balance.*

Abstract: Daerah Luyo, Kabupaten Polewali Mandar, Provinsi Sulawesi Barat, memiliki ketergantungan yang cukup tinggi terhadap airtanah sebagai sumber air utama bagi kebutuhan domestik dan aktivitas masyarakat. Pemanfaatan airtanah yang terus meningkat berpotensi menimbulkan gangguan terhadap keseimbangan sistem hidrogeologi apabila tidak dikelola secara berkelanjutan. Oleh karena itu, diperlukan pemahaman yang komprehensif mengenai kondisi hidrogeologi alami sebagai dasar pengelolaan sumber daya airtanah. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kondisi hidrogeologi daerah penelitian, neraca airtanah alami, serta pola aliran dan distribusi head airtanah melalui permodelan hidrogeologi kondisi natural. Metode penelitian meliputi analisis hidrologi, pengukuran muka airtanah, pengujian geolistrik tahanan jenis dengan konfigurasi Schlumberger, uji pemompaan, serta permodelan numerik airtanah kondisi steady-state menggunakan pendekatan konseptual dan matematis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem hidrogeologi daerah penelitian tersusun oleh akuifer bebas dan semi tertekan yang dikontrol oleh kondisi litologi dan geomorfologi setempat. Neraca airtanah pada kondisi alami menunjukkan bahwa daerah penelitian masih berada dalam kondisi seimbang, dengan imbuhan airtanah yang berasal dari curah hujan dan infiltrasi. Pola aliran airtanah secara umum mengikuti topografi, mengalir dari daerah imbuhan menuju daerah lepasan berupa sungai dan mata air. Hasil kalibrasi model menunjukkan kesesuaian yang baik antara head hasil permodelan dan data observasi. Model hidrogeologi kondisi natural yang dihasilkan diharapkan dapat menjadi acuan dasar dalam evaluasi perubahan sistem airtanah akibat aktivitas manusia maupun perubahan lingkungan di masa mendatang.

Kata Kunci: Hidrogeologi, Airtanah, Permodelan Numerik, Kondisi *Natural*, Neraca Airtanah

PENDAHULUAN

Hidrogeologi merupakan cabang ilmu geologi yang mempelajari hubungan antara kondisi geologi dengan keberadaan, penyebaran, dan aliran airtanah. Airtanah merupakan salah satu komponen penting dalam siklus hidrologi yang memiliki peranan strategis dalam memenuhi kebutuhan manusia, seperti air minum, kebutuhan rumah tangga, pertanian, dan kegiatan lainnya. Perkembangan teknologi pengeboran dan pompa, serta kemajuan dalam ilmu hidrogeologi, telah mendorong meningkatnya pemanfaatan airtanah di berbagai wilayah. Permodelan hidrogeologi dalam kondisi alami (*natural*) merupakan pendekatan yang penting untuk menggambarkan karakteristik dasar sistem akuifer, termasuk pola aliran, sifat hidraulik akuifer, neraca airtanah, dan kondisi hidrodinamika airtanah. Model hidrogeologi kondisi *natural* dapat digunakan sebagai acuan awal kondisi hidrogeologi di suatu wilayah, yang selanjutnya berfungsi sebagai dasar pembandingan apabila terjadi perubahan morfologi dan tata guna lahan yang berpengaruh terhadap sirkulasi, kuantitas, dan kualitas airtanah dalam suatu cekungan airtanah. Oleh karena itu, pemahaman mengenai sistem akuifer dalam kondisi alami (*natural*) menjadi fondasi utama bagi pengelolaan sumber daya airtanah yang berkelanjutan. Penelitian ini difokuskan pada permodelan hidrogeologi kondisi *natural* sebagai pendekatan untuk menggambarkan pola aliran, karakteristik akuifer, neraca airtanah, serta kondisi hidrodinamika di daerah Luyo.



Gambar. 2 Peta Topografi Daerah Penelitian

Metode neraca air digunakan untuk mengestimasi imbunan airtanah yang nantinya akan digunakan dalam data input pada *software* model numerik, analisis dalam perhitungan neraca air di pengaruhi oleh beberapa komponen yaitu:

I. Curah Hujan (Presipitasi)

Data curah hujan yang digunakan pada daerah penelitian bersumber dari Badan Pusat Statistik (BPS) Kabupaten Polewali Mandar. Data curah hujan tahunan periode 2015–2024 digunakan dalam perhitungan neraca air adapun data curah hujan tersebut dapat dilihat pada tabel.I:

Tabel. I Data Curah Hujan Bulanan Periode 10 Tahun

Bulan	Tahun									
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Januari (mm)	102,7	227,3	140,3	172,6	100,6	285	221,7	126,92	204,8	120,9
Februari (mm)	116	218,3	92,9	155,7	85,2	176	122,5	219,08	141,6	78,9
Maret (mm)	173,2	243,8	157,9	193,2	208,5	220	173	114,08	121,6	154,7
April (mm)	264,8	328,8	84,8	214,2	128,5	150	109,3	146,88	84	62,6
Mei (mm)	84,6	250,2	276,4	98	75,6	259	143,8	245,17	144,6	145,7
Juni (mm)	200,7	161	152,9	153,9	136,5	46	186,6	281,75	216,5	225,5
Juli (mm)	0,1	73,9	151,3	70,9	14,4	77	92,6	268,17	81,7	15,1
Agustus (mm)	23,8	87,6	33,5	48,9	72,3	20	306,4	100,75	1,5	8
September (mm)	0,5	127,3	82,9	55,2	30,7	232	222,4	219,58	8	79
Oktober (mm)	40,3	261,5	289,2	251,3	115,5	205	305,3	428,58	32,6	164,2
November (mm)	218,3	166,7	303,2	245,4	148,6	200	317,9	314,08	42,9	130,2
Desember (mm)	184,3	117	232,4	201,4	124,4	72	325,3	329,17	153,1	381,6
Total	1.409,3	2.263,4	1.997,7	1.860,7	1.240,8	1.942	2.526,8	2.794,21	1.232,9	1.566,4

(Sumber: Badan Pusat Statistik (BPS) Kabupaten Polewali Mandar)

Berdasarkan hasil pengolahan data, total curah hujan tahunan pada periode 2015–2024 menunjukkan variasi antar tahun, dengan nilai minimum sebesar 1.232,9 mm/tahun dan maksimum mencapai 2.794,21 mm/tahun. Rata-rata curah hujan tahunan selama periode 10 tahun adalah sebesar 1.883,4 mm/tahun.

2. Evapotraspirasi

Evapotranspirasi merupakan gabungan proses penguapan dari permukaan tanah dan badan air serta pelepasan uap air melalui tanaman pada suatu daerah aliran sungai (Devy, 2019).

Tabel. 2 Suhu Rata Rata Bulanan Periode 10 Tahun

Bulan	Tahun									
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Januari (°C)	24,1	24,2	24,3	24,5	24	24,5	24,7	24	24,3	24
Februari (°C)	23,7	24,8	24,6	25,2	24,1	24,6	24,7	24,2	24,1	23,6
Maret (°C)	24,9	24,9	25,5	25,1	25,5	25,1	25,3	24,9	24,9	21,2
April (°C)	25	25,2	25,3	24,7	24,6	24,9	24,9	24,7	24,8	24,8
Mei (°C)	24,5	24,6	24,6	24,6	24,5	24,6	24,6	24,6	24,8	25
Juni (°C)	24,4	24,7	23,9	24	24,1	23,9	24,3	24,3	24,3	21,2
Juli (°C)	23,8	23,7	23,6	23,9	23,8	23,6	23,9	24	24	20
Agustus (°C)	23,8	23,7	24,3	23,9	23,7	23,7	24	24	24,1	22,8
September (°C)	24,6	24	24,4	24,1	24	23,7	24,3	24,3	24,2	23,4
Oktober (°C)	24,8	24,7	24,9	24,9	24,5	24,7	24,8	24,8	24,4	23
November (°C)	25,8	25	24,7	24,6	24,7	24,8	24,8	24,5	24,4	23,8
Desember (°C)	25,2	24,7	24,5	24,4	24,6	24,3	24,4	24,5	24,3	23,4
Rata-rata	24,6	24,5	24,6	24,5	24,3	24,4	24,6	24,4	24,4	23

(Sumber: Climatecharts.net)

Dengan menggunakan suhu rata-rata bulanan selama 10 tahun didapatkan suhu rata-rata 24,32°C, pada perhitungan evapotranspirasi dengan menggunakan metode turc didapatkan hasil 1.210,35 mm/tahun.

3. Limpasan Air Permukaan

Hasil dari nilai curah hujan tahunan rata-rata sebesar 1.883,421 mm/tahun terlebih dahulu dikonversi menjadi 188,3421 cm/tahun, sedangkan nilai T_m diperoleh dari rata-rata data suhu bulanan selama 10 tahun terakhir yaitu 24,32°C, Luas daerah tangkapan hujan (A) yang digunakan yaitu luas batas model berdasarkan (Gambar. 2) dengan luasan area yaitu 43,30 km². Maka diperoleh nilai limpasan permukaan tahunan R_o sebesar 51,38 cm/tahun atau 513,85 mm/tahun.

4. Imbuan Airtanah merupakan masuknya air kedalam lapisan akuifer yang dimana imbuan airtanah berasal dari air limpasan permukaan, air hujan dan imbuan buatan. Adapun untuk perhitungan neraca air didapatkan dari nilai presipitasi/curah hujan tahunan 1.883,4 mm/thn, nilai limpasan air permukaan 513,85 mm/thn dan evapotranspirasi aktual yaitu 1.210,35 mm/thn sehingga didapatkan nilai dari imbuan airtanah yaitu 159,22 mm/tahun.

Kondisi Geologi

Berdasarkan peta geologi regional daerah penelitian yang bersumber dari Peta Geologi Regional Lembar Majene dan Bagian Barat Lembar Palopo Tahun 2012 skala 1:250.000. Hasil interpretasi menunjukkan bahwa area model penelitian berada pada Formasi Aluvium, yang secara umum tersusun atas material lepas berupa lempung, lanau, pasir, dan kerikil. Selanjutnya, data hasil pengukuran geolistrik dikorelasikan dengan geologi regional yang digunakan untuk menyusun dan mengelompokkan kondisi bawah permukaan.

Hasil pengukuran geolistrik di Kecamatan Luyo didapatkan nilai pada hasil pengukuran lapangan dengan jenis konfigurasi elektroda menggunakan metode *Schlumberger* dengan panjang bentangan elektroda arus AB maksimum 300 m ($AB/2 = 150$ m) setelah itu hasil pengukuran lapangan diolah menggunakan *Software IPI2win* untuk mempresentasikan nilai resistivitas pada lapangan. Adapun penafsiran dari nilai resistivitas dapat dilihat pada tabel berikut ini:

Tabel. 3 Hasil Pengukuran Geolistrik pada Lokasi I

No	Hasil Pengukuran Geolistrik				Lithostratigrafi			Satuan Hidrologi
	ρ (ohm.m)	h (m)	d (m)	Alt (m)	From (m)	To (m)	Litologi	
1	36,6	0,509	0,509	-0,5092	0	0,5	Top Soil	Akuifer 1
2	313	0,694	1,2	-1,203	0,5	1,2	Perselingan pasir dan lanau	
3	18,3	0,186	1,39	-1,39	1,2	30		
4	52,3	23	24,4	-24,42				
5	20,5	5,46	29,9	-29,88				
6	0,443	25,6	55,5	-55,5	30	55	Lempung	Akuitar 1
7	245				55	75	Batu Pasir	Akuifer 2

Hasil pengukuran geolistrik pada Lokasi I (Tabel.3), lapisan paling atas dengan nilai resistivitas 36,60 Ω .m pada kedalaman 0–0,5 m diinterpretasikan sebagai tanah penutup (*top soil*). Lapisan berikutnya memiliki nilai resistivitas 313–20,5 Ω .m pada kedalaman 1,2–30 m, diinterpretasikan sebagai perselingan pasir dan lanau yang dikategorikan sebagai Akuifer I. Selanjutnya, lapisan dengan nilai resistivitas 0,443 Ω .m pada kedalaman 30–55 m diinterpretasikan sebagai lempung yang berperan sebagai Akuitar I. Lapisan terdalam memiliki nilai resistivitas 245 Ω .m pada kedalaman 55–75 m, diinterpretasikan sebagai batupasir dan dikategorikan sebagai Akuifer 2.

Tabel. 4 Hasil Pengukuran Geolistrik pada Lokasi 2

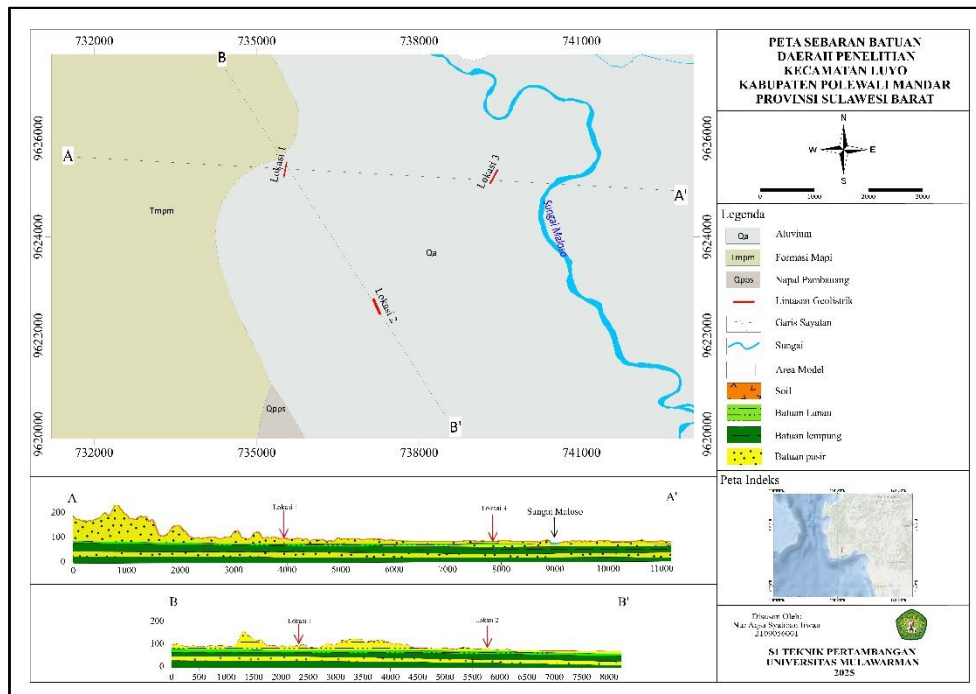
No	Hasil Pengukuran Geolistrik				Lithostratigrafi			Satuan Hidrologi
	ρ (ohm.m)	h (m)	d (m)	Alt (m)	From (m)	To (m)	Litologi	
1	375	0,373	0,373	-0,3732	0	0,8	Soil	Akuifer 1
2	11,1	0,515	0,888	-0,8879				
3	245	0,313	1,2	-1,201	0,8	24,3	Perselingan pasir dan lanau	
4	95,7	7,21	8,41	-8,41				
5	9,9	2,65	11,1	-11,06				
6	28,2	13,2	24,3	-24,3				
7	0,563	18,5	42,8	-42,83	24,3	43	Lempung	Akuitar 1
8	8,25	10,6	53,4	-53,4	43	53,4	Perselingan lempung dan pasir	Akuifer 2
9	336				53,4	75		

Hasil pengukuran geolistrik pada Lokasi 2 (Tabel.2), lapisan paling atas memiliki nilai resistivitas 20,9 Ω .m pada kedalaman 0–0,8 m yang diinterpretasikan sebagai tanah penutup (*top soil*). Lapisan di bawahnya menunjukkan nilai resistivitas 245–28,2 Ω .m pada kedalaman 0,8–24,3 m, diinterpretasikan sebagai perselingan pasir dan lanau yang dikategorikan sebagai Akuifer I. Selanjutnya, lapisan dengan nilai resistivitas 0,563 Ω .m pada kedalaman 24,3–43 m diinterpretasikan sebagai lempung yang berperan sebagai Akuitar I. Lapisan terdalam memiliki nilai resistivitas 8,25–336 Ω .m pada kedalaman 43–75 m, diinterpretasikan sebagai perselingan lempung dan pasir yang dikategorikan sebagai Akuifer 2.

Tabel. 5 Hasil Pengukuran Geolistrik pada Lokasi 3

Hasil Pengukuran Geolistrik					Lithostratigrafi			Satuan Hidrologi
No	ρ (ohm.m)	h (m)	d (m)	Alt (m)	From (m)	To (m)	Litologi	
1	20,9	1,67	1,67	-1,665	0	1,67	Top soil	Akuifer 1
2	7,7	0,915	2,58	-2,58	1,67	19,1	Perselingan pasir dan lanau	
3	92,7	1,79	4,37	-4,374				
4	10,4	3,98	8,35	-8,353				
5	123	10,8	19,1	-19,13				
6	8,31	8,37	27,5	-27,5	19,1	27,5	Lempung	Akuitar 1
7	12,6	31,4	58,9	-58,9	27,5	58,9	Perselingan pasir dan lempung	Akuifer 2
8	0,1				58,9	75		

Hasil pengukuran geolistrik pada Lokasi 3 (Tabel.5), lapisan paling atas memiliki nilai resistivitas 20,9 Ω .m pada kedalaman 0–1,67 m yang diinterpretasikan sebagai tanah penutup (*top soil*) dan dikategorikan sebagai Akuifer I. Lapisan berikutnya menunjukkan nilai resistivitas 7,7–123 Ω .m yang diinterpretasikan sebagai perselingan pasir dan lanau yang dikategorikan sebagai Akuifer I. Lapisan ketiga memiliki nilai resistivitas 8,31 Ω .m pada kedalaman 27,5–58,9 m, diinterpretasikan sebagai lempung yang berperan sebagai Akuitar I. Lapisan terdalam menunjukkan nilai resistivitas 12,6–0,1 Ω .m pada kedalaman 58,9–75 m, diinterpretasikan sebagai perselingan pasir dan lempung yang dikategorikan sebagai Akuifer 2. Hasil interpretasi tersebut selanjutnya dicocokkan dengan data litologi daerah penelitian, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar.3:



Gambar. 3 Peta sebaran batuan

Kondisi Hidrogeologi

Kondisi hidrogeologi di lokasi penelitian ditentukan oleh litologi, ketersediaan sumber air, serta karakteristik akuifer.

I. Karakteristik Akuifer

Hasil survei geolistrik menunjukkan bahwa satuan hidrostratigrafi daerah penelitian tersusun atas empat lapisan, yaitu akuifer atas, akuifer tengah, akuifer bawah, dan akuilud yang berfungsi sebagai base model. Susunan ini mencerminkan variasi sifat litologi dan karakteristik aliran airtanah pada bawah permukaan. Uji pemompaan pada akuifer atas menunjukkan muka airtanah statis berada pada kisaran 3,38–4,65 m, sedangkan penurunan muka airtanah akibat pemompaan berkisar 1,00–4,60 m. Hasil pengolahan data uji pemompaan menghasilkan nilai transmisivitas (T) sebesar 0,12–1,96 m^2/s dan konduktivitas hidrolika (K) antara $9,18 \times 10^{-3}$ – $1,96 \times 10^{-1}$ m/s , yang mengindikasikan akuifer atas memiliki potensi hidraulik yang cukup baik sebagai sumber airtanah.

2. Kedalaman Muka Airtanah

Pada daerah penelitian muka airtanah didapatkan dengan melakukan pengukuran langsung dilapangan pada beberapa sumur warga yang dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel. 6 Muka Airtanah Observasi

NO	Sumur	Elevasi (mdpl)	Kedalaman air (mbgs)	Elevasi muka air tanah (mdpl)
1	Sumur 1	33,48	6,9	26,57
2	Sumur 2	15,82	0,6	15,17
3	Sumur 3	14,04	4,8	9,19
4	Sumur 4	17,64	4,3	13,34
5	Sumur 5	28,28	3	25,28
6	Sumur 6	30,82	4,4	26,42
7	Sumur 7	15,91	2	13,91
8	Sumur 8	13,87	3,2	10,67

Dari hasil pengukuran tersebut didapatkan kedalaman muka airtanah yang kemudian elevasi tanah dikurangi dengan kedalaman muka airtanah memberikan elevasi muka airtanah dalam satuan mdpl, dari data diperoleh elevasi muka airtanah berkisar 9,19 - 26,57 mdpl.

Permodelan Airtanah

Permodelan airtanah merupakan suatu pendekatan untuk menirukan keadaan pergerakan airtanah baik secara vertikal maupun horizontal.

I. Kondisi Batas

Menurut (Devy, 2018) pada batas Cekungan Airtanah terdapat beberapa batas utama yang terdiri dari beberapa variabel yaitu *constant head*, *river*, *stream*, *general head*, *drain*, *wall recharge* dan *evapotraspiration*. Batas hidrogeologi di bagian barat merupakan *groundwater divide* yang mengikuti punggung topografi pada elevasi tertinggi (bukit di sisi barat). Sementara itu, batas di bagian timur ditentukan oleh unsur hidrografi berupa aliran sungai utama dengan nilai yang dapat dilihat pada Tabel.7.

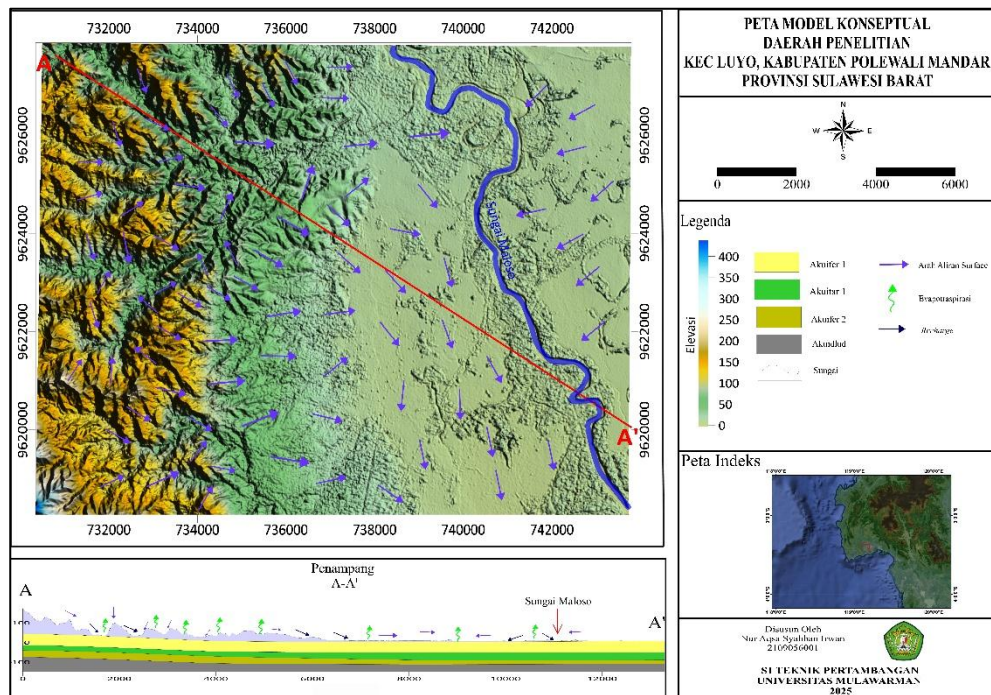
Tabel. 7 Kondisi Batas

Data	Unit	Nilai	Lokasi
Constad Head	m	190-110	Elevasi Tertinggi model
River	m	8-6	Sungai Maloso
	m	49-16	Sungai Tenggelang

Dari Tabel.7 dapat dilihat elevasi yang menjadi batas model pada kawasan bukit yang berada di arah barat dan elevasi rendah di bagian timur yang merupakan aliran sungai.

2. Model Konseptual

Konseptual model adalah gambaran sederhana dari kondisi sistem hidrogeologi yang utama dan perilaku sistem airtanah di daerah model yang dapat dilihat pada Gambar.4. Model ini dapat memberikan gambaran yang meliputi kondisi alami hidrologi dimana arah aliran air *surface* yang mengalir dari barat ke timur mengikuti kontur topografi area imbuhan dan evapotranspirasi pada daerah penelitian.



Gambar. 4 Peta model konseptual

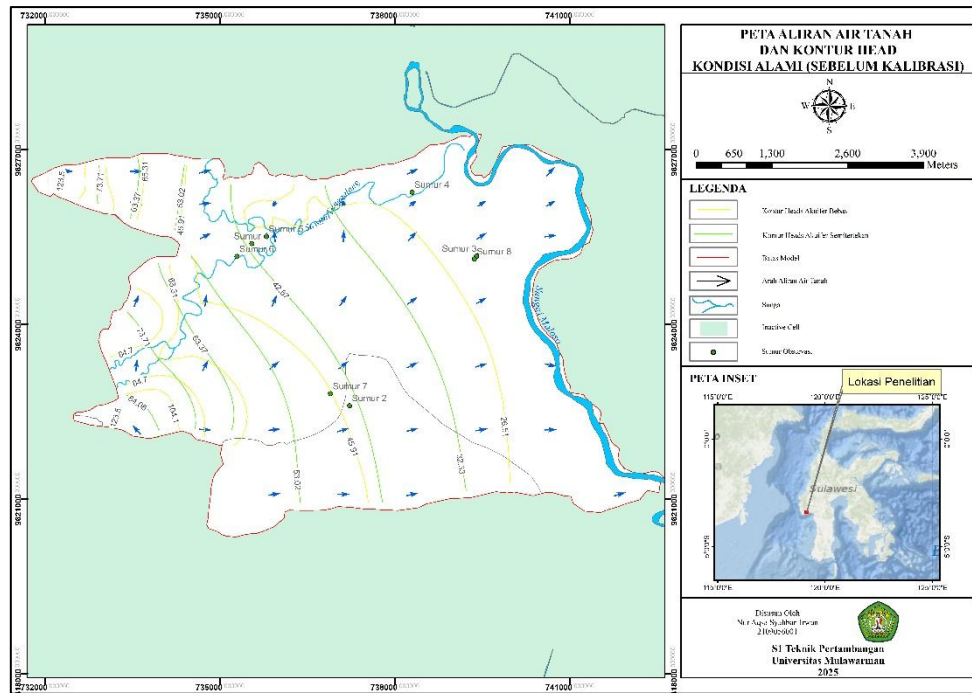
3. Pola Aliran dan Head Hidrolika Uncalibrated

Setelah ditentukan kondisi batas-batas hidrolika yang telah didapatkan, kemudian ditentukan nilai-nilai dari data yang diperlukan untuk permodelan, seperti batas daerah imbuhan, data sifat lapisan batuan/akuifer, data konduktivitas hidrolika (K) dan ketinggian head hidrolika. Adapun nilainya dapat dilihat pada tabel.8.

Tabel. 8 Data Properties Model Uncalibrated

Data	Satuan	Nilai	Lokasi	
K (Konduktivitas Hidrolika)	m det-1	K2	$3,91 \times 10^{-3}$	Akuifer Atas
		K3	$4,63 \times 10^{-7}$	Akuitar
		K4	$2,89 \times 10^{-7}$	Akuifer Tengah
		K5	$5,79 \times 10^{-7}$	Akuiklud
Kondisi Batas				
Constand Head	m	190-110	Area Perbukitan Barat	
River	m	8-6	Sungai Maloso	
		49-16	Sungai Tenggelang	
Imbuhan airtanah	mm th ¹	159,22		
Evapotranspirasi	mm th ¹	1.210,35		

Hasil permodelan numerik pada kondisi alami akan menghasilkan model pada akuifer bebas dan semi tertekan yang dapat dilihat pada gambar.5, menunjukkan bahwa nilai head hidraulik pada akuifer bebas antara 123,5-26,25 mdpl, sedangkan pada akuifer semi-tertekan antara 84,71-26,5 mdpl. Perbedaan rentang head tersebut mencerminkan perbedaan kondisi tekanan dan karakteristik hidraulik masing-masing akuifer.



Gambar. 5 Peta aliran airtanah dan kontur head kondisi alami sebelum kalibrasi

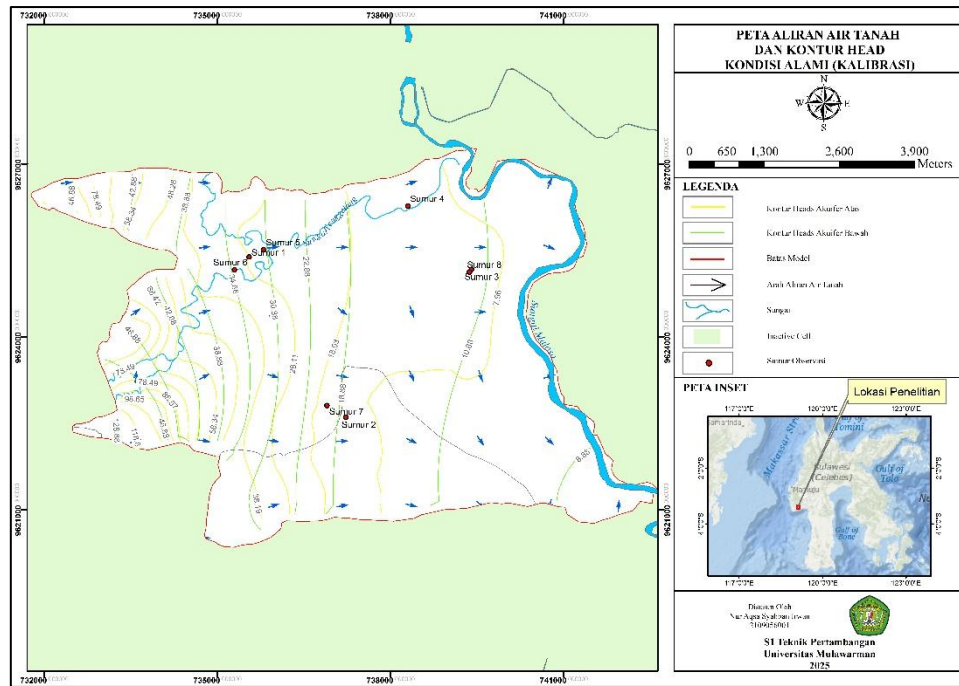
4. Verifikasi dan Kalibrasi Permodelan Airtanah Alami

Kalibrasi model bertujuan untuk menghasilkan model yang mendekati kondisi asli alaminya, verifikasi dilakukan pada lapisan akuifer dan konduktivitas hidroliknya. Kalibrasi berasal dari perbandingan antara ketinggian head hidrolika observasi dan perhitungan pada model numerik. Head hidrolika observasi berasal dari pengukuran langsung di lapangan dari ketinggian muka airtanah terukur, pada penelitian ini terdapat beberapa perubahan konduktivitas hidrolika yang dapat dilihat pada Tabel. 9.

Tabel. 9 Data Properties Model Kalibrasi

Data	Satuan	Nilai	Lokasi	
K (Konduktivitas Hidrolika)	m det-1	K2	$2,20 \times 10^{-5}$	Akuifer Atas
		K3	$6,00 \times 10^{-7}$	Akuitar
		K4	$4,20 \times 10^{-5}$	Akuifer Tengah
		K5	$4,50 \times 10^{-7}$	Akuiklud
Kondisi Batas				
Constand Head	m	180-110	Area Perbukitan Barat	
River	m	8-4,5	Sungai Maloso	
		49-16	Sungai Tenggelang	
Imbuhan Airtanah	mm th ¹	159,22		
Evapotranspirasi	mm th ¹	1.416,13		

Hasil dari permodelan numerik yang telah dikalibrasi dapat dilihat pada gambar.6.



Gambar. 6 Peta Aliran Airtanah dan Kontur *Head* Kondisi Alami Kalibrasi

- Akuifer bebas

Kontur *head* hasil permodelan terkalibrasi pada akuifer bebas Gambar.6 menunjukkan nilai maksimum 128,88 mdpl dan minimum 7,96 mdpl. Kerapatan kontur yang tinggi di perbukitan bagian barat mengindikasikan gradien hidraulik besar yang berkaitan dengan topografi lebih tinggi, sehingga wilayah ini berperan sebagai daerah imbuhan airtanah.

Sebaliknya, pada bagian timur daerah penelitian yang bertopografi lebih rendah dan relatif datar, khususnya di sekitar Sungai Maloso, kontur *head* semakin renggang yang mencerminkan gradien hidraulik kecil dan berfungsi sebagai zona pelepasan airtanah. Secara umum, arah aliran airtanah mengikuti gradien hidraulik alami dari barat ke timur. Interaksi airtanah–air permukaan ditunjukkan oleh Sungai Tenggelang, di mana pola kontur *head* yang melengkung mengikuti alur sungai mengindikasikan bahwa sungai tersebut berperan sebagai *gaining stream*.

- Akuifer semi tertekan

Hasil permodelan terkalibrasi pada akuifer semi tertekan Gambar.6 menunjukkan nilai *head* hidrolika maksimum 48,88 mdpl dan minimum 8 mdpl. Nilai *head* yang lebih tinggi umumnya berkembang di bagian barat–barat laut daerah penelitian dan menurun ke arah timur–tenggara, yang mencerminkan arah aliran airtanah regional dari zona hidrolis tinggi menuju zona lebih rendah.

Kontur *head* pada akuifer semi tertekan tampak lebih renggang dibandingkan akuifer bebas, yang mengindikasikan gradien hidraulik relatif kecil. Kondisi ini berkaitan dengan keberadaan lapisan semi kedap yang membatasi akuifer, sehingga pengaruh topografi dan imbuhan permukaan terhadap fluktuasi muka airtanah menjadi lebih teredam, meskipun pola aliran regional masih terkontrol oleh topografi. Interaksi airtanah–air permukaan pada akuifer semi tertekan relatif lemah, ditunjukkan oleh kontur *head* yang lurus dan tidak mengalami pembelokan saat melintasi sungai. Hal ini mengindikasikan bahwa aliran sungai lebih dipengaruhi oleh akuifer bebas, sementara kontribusi dari akuifer semi tertekan bersifat minimal.

- Neraca airtanah

Kuantitas airtanah pada area studi dievaluasi melalui zona neraca airtanah (*groundwater budget*). Zona ini merepresentasikan kapasitas/kuantitas air yang tersimpan atau mengalir dalam akuifer pada suatu wilayah tertentu, yang dihitung dari komponen neraca (*in-out*) termasuk pertukaran aliran dengan zona bersebelahan serta kontribusi antar-lapisan akuifer. Dari hasil permodelan airtanah alami hasil kalibrasi dapat diketahui jumlah neraca airtanah pada daerah penelitian yaitu 38,553 m³ hari⁻¹ dengan rincian dapat dilihat pada Tabel.10.

Tabel. 10 Jumlah Debit *in* dan *Out* Airtanah

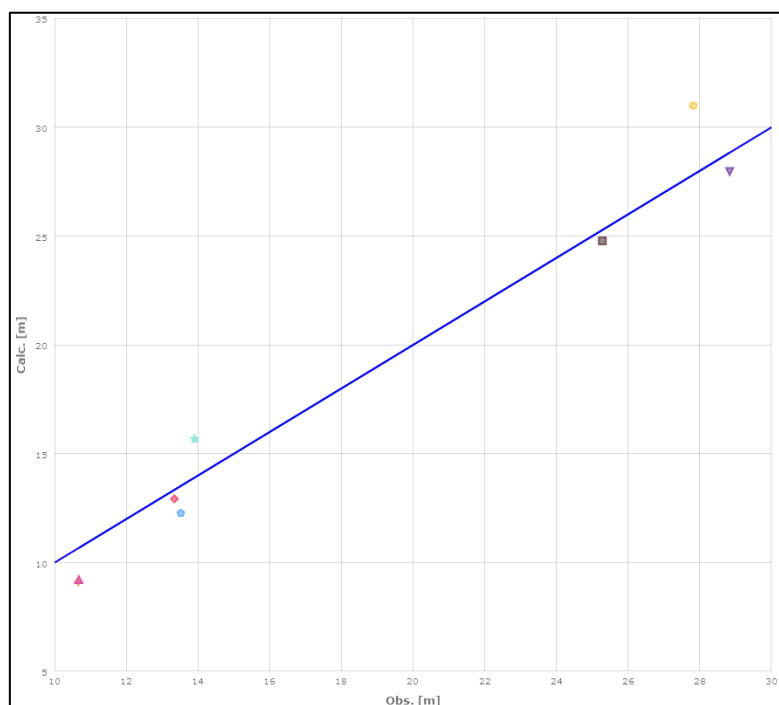
Neraca Airtanah		
In		
Constan Head	20.604	
Recharge	17.709	
River leakage	240,83	
Total Debit	38.554	m ³ /hari
Out		
Constan Head	793.09	
River leakage	16.438	
Evapotraspirasi	21.322	
Total Debit	38.553	m ³ /hari

Berdasarkan Tabel.10, komponen *constant head* merupakan sumber masukan airtanah paling dominan ke dalam area model sebesar 20.604 m³/hari, yang menunjukkan pengaruh signifikan batas tersebut terhadap keseimbangan airtanah. Komponen *river leakage* menunjukkan pelepasan airtanah ke Sungai Tenggelang sebesar 16.438 m³/hari, mengindikasikan bahwa sungai berperilaku sebagai *gaining stream*, sejalan dengan arah aliran airtanah berdasarkan kontur *head*. Selain itu, evapotranspirasi melepaskan airtanah ke atmosfer sebesar 21.322 m³/hari, sementara *recharge* menyumbang masukan sebesar 17.709 m³/hari, yang mencerminkan interaksi dinamis antara sistem airtanah dan permukaan tanah.

Tabel. II Nilai Head Observasi dan Head Permodelan Kalibrasi

NO	Sumur	Elevasi	Head Observasi (mdpl)	Head Permodelan (mdpl)
1	Sumur 1	33,48	26,57	27,97
2	Sumur 2	15,82	15,17	12,27
3	Sumur 3	14,04	10,66	9,12
4	Sumur 4	17,64	13,34	12,93
5	Sumur 5	28,28	25,28	24,78
6	Sumur 6	30,82	26,42	30,99
7	Sumur 7	15,91	13,91	15,68
8	Sumur 8	13,87	10,67	9,22

Dari hasil kalibrasi *head* hidrolika observasi dan permodelan yang kemudian diplot pada diagram scatter menggunakan software model numerik untuk melihat parameter error dari hasil observasi dan hasil permodelan.



Gambar. 7 Diagram Scatter Head Observasi dan Permodelan Alami

Menurut Devy (2019), nilai *Root Mean Square* (RMS) yang dapat diterima adalah kurang dari 10%, yang menunjukkan bahwa deviasi antara hasil model dan kondisi alami masih berada dalam batas kewajaran. Berdasarkan hasil permodelan, diperoleh nilai RMS sebesar 8,79% Gambar.8, sehingga model dinyatakan layak dan dapat diterima.

KESIMPULAN

Hasil kajian hidrogeologi menunjukkan bahwa daerah penelitian didominasi oleh sistem akuifer bebas dengan susunan lapisan berupa akuifer bebas ($K = 2,20 \times 10^{-5}$ m/s), akuitar ($K = 6,00 \times 10^{-7}$ m/s), akuifer semi-tertekan ($K = 4,20 \times 10^{-5}$ m/s), dan akuiklud sebagai lapisan dasar ($K = 4,50 \times 10^{-7}$ m/s). Analisis neraca airtanah menunjukkan bahwa masukan airtanah berasal dari *constant head* sebesar 20.604 m³/hari dan *recharge* sebesar 17.709 m³/hari, sedangkan pelepasan airtanah didominasi oleh *river leakage* sebesar 16.438 m³/hari dan evapotranspirasi sebesar 21.322 m³/hari. Hasil permodelan numerik memperlihatkan bahwa arah aliran airtanah umumnya mengalir dari barat ke timur mengikuti gradien topografi dan distribusi *head* hidraulik, dengan nilai *head* lebih tinggi di bagian barat dan menurun ke arah timur, sehingga Sungai Tenggelang dan Maloso berperan sebagai *gaining stream* atau zona lepasan airtanah.

REKOMENDASI

Dari hasil neraca airtanah yang menunjukkan besarnya komponen pelepasan melalui sungai dan evapotranspirasi, diperlukan adanya kajian pengelolaan sumber daya airtanah yang mempertimbangkan keseimbangan antara imbuhan dan pelepasan, serta evaluasi perubahan neraca airtanah akibat variasi iklim dan peningkatan kebutuhan air di masa mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

1. Anderson, M. P., & Woessner, W. W. (1992). Applied groundwater modeling: Simulation of flow and advective transport. *Water Resources Research*, 28(1), 231–233. <https://doi.org/10.1029/91WR02041>
2. Bear, J. (1979). Hydraulics of groundwater. *McGraw-Hill Series in Water Resources*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-7675-1>
3. Chen, J., Wu, H., Qian, H., & Li, X. (2019). Challenges and prospects of sustainable groundwater management. *Water*, 11(6), 1233. <https://doi.org/10.3390/w11061233>
4. Cuthbert, M. O., & Gleeson, T. (2017). Climate-driven recharge trends. *Nature Geoscience*, 10(6), 425–429. <https://doi.org/10.1038/ngeo2964>
5. De Graaf, I. E. M., et al. (2019). Global-scale modeling of groundwater depletion. *Nature*, 574, 90–94. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1594-4>
6. Famiglietti, J. S. (2014). The global groundwater crisis. *Nature Climate Change*, 4, 945–948. <https://doi.org/10.1038/nclimate2425>
7. Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M. F. P., & van Beek, L. P. H. (2012). Water balance of global aquifers. *Nature*, 488, 197–200. <https://doi.org/10.1038/nature11295>
8. Healy, R. W. (2010). Estimating groundwater recharge. *Cambridge University Press*. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511780745>
9. Hutasoit, L. M., & Ramadhan, M. (2020). Groundwater potential mapping using GIS. *Journal of Geoscience Engineering*, 5(2), 101–110. <https://doi.org/10.30556/jge.v5i2.2120>
10. Kresic, N. (2007). Hydrogeology and groundwater modeling. *CRC Press*. <https://doi.org/10.1201/9781420004991>
11. Li, P., Wu, J., & Qian, H. (2016). Groundwater quality assessment. *Environmental Earth Sciences*, 75(12), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5530-2>
12. Mahmoud, S. H. (2014). Investigation of groundwater flow modeling. *Arabian Journal of Geosciences*, 7, 251–262. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0720-3>
13. Margat, J., & van der Gun, J. (2013). Groundwater around the world. *CRC Press*. <https://doi.org/10.1201/b13977>
14. McDonald, M. G., & Harbaugh, A. W. (1988). A modular three-dimensional groundwater flow model. *USGS*. <https://doi.org/10.3133/twri06A1>
15. Mulyadi, D., & Santoso, B. (2019). Analisis potensi airtanah menggunakan metode geolistrik. *Jurnal Geologi Indonesia*, 14(3), 145–156. <https://doi.org/10.17014/ijog.14.3.145-156>
16. Neuman, S. P. (2005). Trends in groundwater modeling. *Hydrogeology Journal*, 13, 124–135. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0393-4>
17. Putranto, T. T., & Rde, T. R. (2016). Hydrogeological modeling of groundwater flow. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1–12. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5547-6>
18. Scanlon, B. R., et al. (2006). Global synthesis of groundwater recharge. *Hydrological Processes*, 20(15), 3335–3370. <https://doi.org/10.1002/hyp.6335>
19. Sophocleous, M. (2002). Interactions between groundwater and surface water. *Hydrogeology Journal*, 10, 52–67. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0170-8>

20. Sudaryanto, & Widodo, S. (2018). Evaluasi sumber daya airtanah. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 24(1), 45–56. <https://doi.org/10.5614/jtl.2018.24.1.5>
21. Sun, A. Y. (2013). Predictive modeling of groundwater flow. *Water Resources Research*, 49, 1–12. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20067>
22. Todd, D. K., & Mays, L. W. (2005). Groundwater hydrology (3rd ed.). *John Wiley & Sons*. <https://doi.org/10.1002/0471724241>
23. Uddameri, V., et al. (2014). Groundwater sustainability assessment. *Journal of Hydrology*, 519, 150–160. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.07.042>
24. Wada, Y., et al. (2010). Global depletion of groundwater resources. *Geophysical Research Letters*, 37, L20402. <https://doi.org/10.1029/2010GL044571>
25. Wang, G., & Solomatine, D. (2019). Machine learning in hydrology. *Water*, 11(8), 1760. <https://doi.org/10.3390/w11081760>
26. Winter, T. C., Harvey, J. W., Franke, O. L., & Alley, W. M. (1998). Ground water and surface water interaction. *USGS*. <https://doi.org/10.3133/cir1139>
27. Zhou, Y. (2009). A critical review of groundwater budget myth. *Hydrogeology Journal*, 17, 763–768. <https://doi.org/10.1007/s10040-008-0393-2>