

**Metode G-ALDIT dan G-ALDITLcR untuk Evaluasi Kerentanan Air Tanah Dangkal Akibat Pengaruh Intrusi Air Laut (Studi Kasus: Air Tanah Dangkal Kawasan Pesisir Bagian Utara dan Selatan Kota Makassar)*****G-ALDIT and G-ALDITLcR Method for Evaluation of Shallow Groundwater Vulnerability Due To The Effect of Seawater Intrusion In The Coastal Zone (Case Study: Shallow Groundwater of Northern and Southern Makassar Coastal Zone)***

Annisa Dwi Damayanti dan Suprihanto Notodarmodjo

Institut Teknologi Bandung  
Jalan Ganesha No 10, 40132 Bandung, Indonesia

e-mail: annisadwidam@gmail.com

naskah diterima 18 Februari 2021, selesai direvisi 23 Juli 2021, dan disetujui 5 Agustus 2021

**ABSTRAK**

Ketidakeimbangan lingkungan seperti kerentanan air tanah terhadap intrusi air laut dapat disebabkan karena eksploitasi air tanah yang berlebihan. Eksploitasi air tanah merupakan konsekuensi logis dari peningkatan jumlah penduduk, khususnya di daerah Pesisir Makassar yang merupakan pesisir yang terletak di kawasan berkembang. Metode GALDIT merupakan salah satu metode untuk mengukur tingkat kerentanan air tanah terhadap intrusi air laut. Modifikasi dan pengembangan GALDIT dilakukan dengan dua tipe yaitu G-ALDIT dan G-ALDITLcR. Modifikasi ini dibuat dengan penyesuaian kondisi lapangan dan pengembangan dilakukan dengan penambahan parameter di antaranya tutupan lahan dan jarak dari muara sungai. Penambahan parameter ini dianggap lebih efektif untuk mewakili kondisi kerentanan air tanah. Metode ini menggabungkan bobot dan rating tingkat kepentingan penilaian faktor untuk menilai zona rawan terhadap intrusi air laut. Penyesuaian bobot pada setiap faktor pengembangan dilakukan dengan metode Perbandingan Berpasangan-*Analysis Hierarchy Process* (AHP) menggunakan aplikasi *Expert Choice 11*. Pemetaan akhir kerentanan air tanah dangkal dipetakan dengan analisis *overlay* menggunakan *ArcGIS 10.3*. Hasil penilaian kerentanan menggunakan G-ALDIT menunjukkan bahwa zona kerentanan intrusi air laut hanya menunjukkan kerentanan sebesar 10,23%. Setelah menggunakan metode G-ALDITLcR, zona kerentanan tinggi terlihat meningkat menjadi 28,61% dengan menambahkan kriteria tutupan lahan dan jarak dari muara sungai. Dengan pengembangan metode G-ALDITLcR secara lebih jelas dapat menunjukkan daerah yang memiliki tingkat kerentanan yang tinggi sehingga dapat meningkatkan sensitivitas penilaian.

**Kata kunci:** intrusi air laut, kerentanan air tanah, *Analysis Hierarchy Process* (AHP), GALDIT**ABSTRACT**

*Environmental imbalances such as groundwater susceptibility to seawater intrusion can be caused by overexploitation of groundwater. The exploitation of groundwater is a logical consequence of the increasing population, especially in coastal areas of Makassar, which are located in developing areas. GALDIT method is one of the methods to measure the level of vulnerability of groundwater to seawater intrusion. Modification and development of GALDIT is called G-ALDIT and G-ALDITLcR. This modification was made by adjusting field conditions and the development was carried out by adding parameters including land cover and distance from estuary. The addition of this parameter is considered more effective to represent the condition of groundwater vulnerability. This method combines weight and rating of factor assessment importance to assess zones prone to seawater intrusion. Weight adjustment in each development factor is done by Paired Comparison-Analysis Hierarchy Process (AHP) method using Expert Choice 11 application. Final mapping of shallow groundwater vulnerabilities is mapped with overlay analysis using ArcGIS*

10.3. The results of vulnerability assessment using G-ALDIT method showed that the vulnerability zone of seawater intrusion shows a vulnerability of 10.23%. After using the G-ALDITLcR method, the high vulnerability zone was seen increasing to 28.61% by adding criteria for land cover and distance from the estuary. The development of the G-ALDITLcR method can more clearly show areas that have a high level of vulnerability that can increase the assessment sensitivity.

**Keywords:** seawater intrusion, groundwater vulnerability, Analysis Hierarchy Process (AHP), GALDIT

## PENDAHULUAN

Pertambahan jumlah penduduk di kawasan berkembang seperti kawasan pesisir Kota Makassar menimbulkan konsekuensi logis terjadinya kerentanan air tanah khususnya terhadap intrusi air laut. Berdasarkan berita dari Mongabay Indonesia (2017), penggunaan air tanah di Kota Makassar pada tahun 2016 mencapai lebih dari 23 %, yang artinya sebanyak 338.000 jiwa menggunakan air tanah untuk memenuhi kebutuhan sehari-hari.

Penurunan muka air tanah dapat menyebabkan terjadinya intrusi air laut ke dalam akuifer pesisir. Intrusi air laut terjadi sebagai akibat dari arus induksi air laut ke dalam akuifer air tawar yang awalnya disebabkan oleh pengambilan air tanah di sekitar pantai (Barwani & Helmi, 2006). Berdasarkan data dari Badan Lingkungan Hidup Daerah (BLHD) Kota Makassar 2014 (dalam Anggun, drr., 2016), terjadi penurunan muka air tanah sebanyak 0-3,25 m/tahun akibat penggunaan air tanah yang tidak terkontrol, sehingga air tanah di sekitar pesisir menjadi rentan terhadap intrusi air laut. Gemilang dan Gunardi (2016) menyatakan bahwa akuifer pesisir merupakan akuifer yang memiliki level tinggi terhadap kerentanan. Menurut Bachmat dan Collin (1983 dalam Zaarour, 2017), kerentanan adalah kepekaan kualitas air tanah terhadap aktivitas antropogenik yang mungkin terbukti merugikan sumber daya.

Salah satu metode yang digunakan untuk penilaian kerentanan air tanah adalah metode GALDIT. Metode dasar ini merupakan penilaian kerentanan air tanah dangkal terhadap intrusi air laut yang umumnya terdiri atas enam faktor hidrogeofisik yaitu tipe akuifer (G), konduktivitas hidraulik (A), elevasi muka air tanah (L), jarak dari laut (D), pengaruh intrusi

air laut sebelumnya (I) dan ketebalan akuifer (T) sebagai parameter kerentanan intrinsik (Tasnim dan Subrina, 2016; Lappas drr., 2016). Namun, menurut penelitian Mansour (2016) dan Supriatna (2017), metode GALDIT juga tidak mempertimbangkan faktor antropogenik yang merupakan konsekuensi meningkatnya penambahan penduduk yang semakin membutuhkan lahan dan air bersih. Selain itu, menurut Honnanogoudar drr. (2014) metode GALDIT juga tidak memperhitungkan adanya kemungkinan intrusi air laut melalui aliran sungai terutama pada sungai yang terpengaruh pasang surut air laut. Berdasarkan penelitian tersebut, dibutuhkan modifikasi dan pengembangan metode GALDIT sesuai dengan kondisi area penelitian.

Modifikasi dan pengembangan metode GALDIT adalah metode G-ALDIT dan G-ALDITLcR. Modifikasi yang dilakukan hanya mempertimbangkan satu tipe akuifer yakni akuifer dangkal. Sedangkan pengembangan yang dilakukan dengan menambahkan parameter tutupan lahan (Lc) dan jarak dari muara sungai (R). Metode evaluasi dilakukan dengan menggunakan perbandingan berpasangan-*Analysis Hierarchy Process* (AHP) pada setiap bobot kepentingan parameter (Gangadharan dan Nila, 2015; Gorgij dan Asghar, 2016). Setiap parameter penilaian dipetakan menggunakan *overlay* untuk menghasilkan peta kerentanan yang akan menunjukkan area yang rentan terhadap intrusi air laut. Peta kerentanan akan berguna dalam pengelolaan dan pengambilan keputusan terkait tentang pemanfaatan lahan, perlindungan air tanah, dan pemenuhan kebutuhan air bersih.

Penelitian dilaksanakan di daerah pesisir utara dan selatan Kota Makassar pada lima kecamatan yaitu Kecamatan Wajo, Kecamatan Ujung Ta-

nah, Kecamatan Bontoala, Kecamatan Tallo dan Kecamatan Tamalate (Gambar 1).

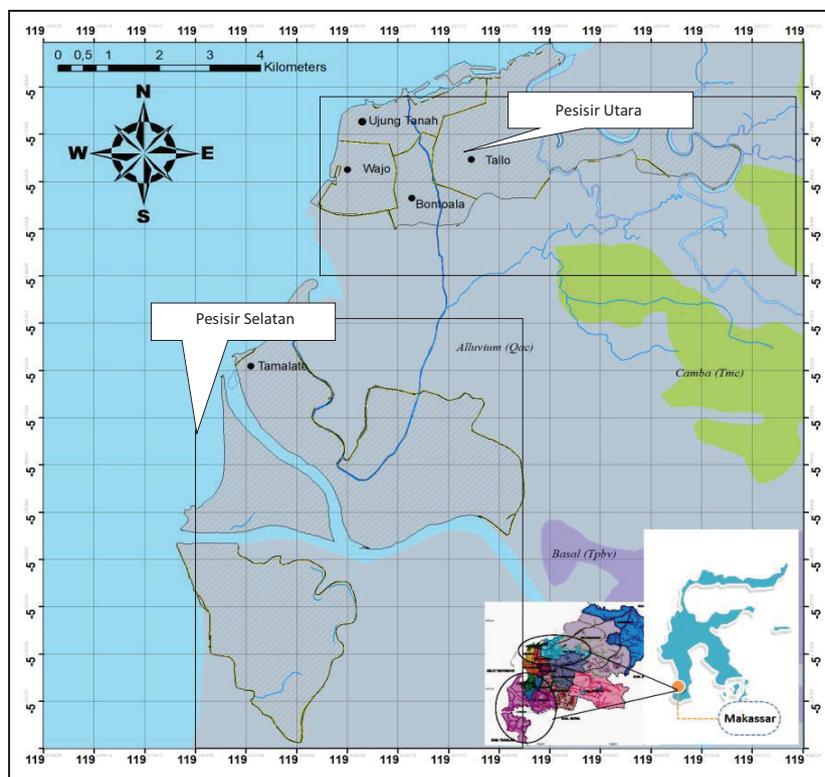
Data yang digunakan adalah data pada kriteria G-ALDIT dan G-ALDITLcR yang dapat dilihat pada Tabel 1. Data tersebut digunakan dalam penyusunan hierarki dalam *Analysis Hierarchy Process*.

Parameter intrusi yang telah terjadi sebelumnya (I) merupakan kualitas air tanah yang dipengaruhi oleh intrusi air laut, dengan mengkaji hasil uji rasio  $Cl^-/CO_3^{2-}+HCO_3^-$  sebagai kualitas air tanah dangkal (Gorgij dan Asghar, 2016; Lubis drr, 2018). Sampel air tanah dangkal diperoleh dengan metode *purposive sampling*, dengan jarak antar sampel adalah 1000 m sehingga diperoleh 34 sampel air tanah diambil di daerah pesisir utara dan selatan Kota Makassar.

Metode G-ALDIT dan G-ALDITLcR merupakan modifikasi dan pengembangan yang dilakukan dalam penilaian kerentanan air tanah dangkal akibat pengaruh intrusi air laut. Berdasarkan Tabel 1, metode G-ALDIT terdiri atas 5 kriteria, yakni konduktivitas hidraulik (A),

elevasi muka air tanah (L), jarak dari pantai (D), intrusi air laut sebelumnya (I), ketebalan akuifer (T). Sedangkan metode G-ALDITLcR terdiri atas 7 kriteria dengan 2 kriteria pengembangan yakni penutup lahan (Lc) dan jarak dari muara sungai (R). Modifikasi yang dilakukan dengan hanya mempertimbangkan satu tipe akuifer yakni akuifer dangkal, sehingga parameter tipe akuifer (G) tidak dimasukkan dalam penilaian kerentanan. Parameter tipe akuifer (G) dianggap telah direpresentasikan oleh sifat akuifer baik sifat hidraulik maupun sifat fisik, seperti konduktivitas hidraulik dan ketebalan akuifer. Diagram pemetaan metode G-ALDIT dan G-ALDITLcR dapat dilihat pada Gambar 2.

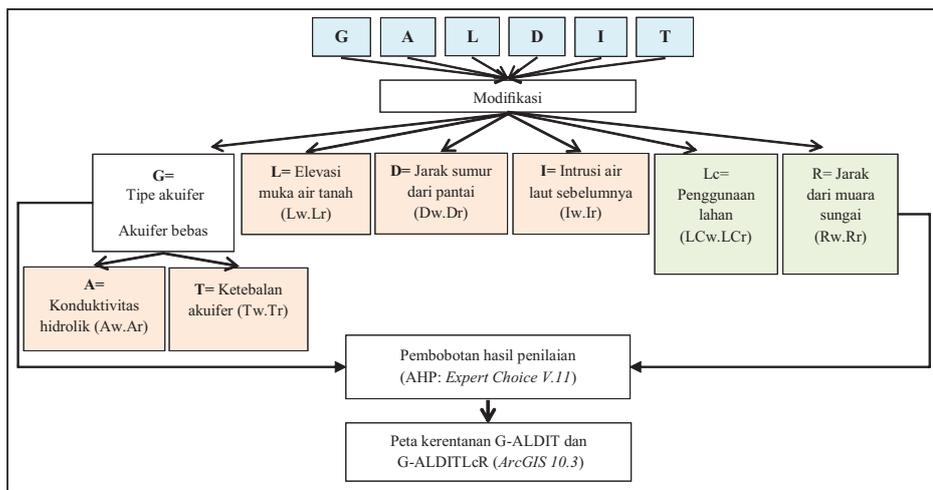
Setiap kriteria terdiri atas subkriteria yang dievaluasi berdasarkan data lapangan yang memiliki bobot (w) dan nilai (r) yang dievaluasi berdasarkan pada informasi atau persepsi yang diperoleh dari pakar yang dianggap ahli. Selanjutnya, dilakukan normalisasi bobot sesuai dengan standar dari metode *initial* GALDIT ber-



Gambar 1. Lokasi Penelitian.

Tabel 1. Sumber Data Metode G-ALDIT dan G-ALDITLcR

Kriteria	Sumber Data	Keterangan
A	Konduktivitas hidraulik	Uji Pemompaan
L	Elevasi muka air tanah	Uji Pemompaan
D	Jarak dari pantai	-
I	Intrusi air laut sebelumnya	Kualitas air tanah dangkal
T	Ketebalan akuifer	Data bor
Lc	Penutup lahan	Peta tutupan lahan
R	Jarak dari muara sungai	-



Gambar 2. Diagram pemetaan G-ALDIT dan G-ALDITLcR.

dasarkan penelitian Chachadi dan Lobo (2005), yang dapat dilihat pada (Persamaan 1).

$$\text{Normalisasi bobot} = \frac{\text{Bobot setiap parameter pengembangan}}{\text{Bobot tertinggi parameter pengembangan}} \times \text{Bobot tertinggi initial GALDIT} \dots (1)$$

Tingkat kerentanan dapat diketahui dengan menghitung indeks kerentanan metode G-ALDIT (Persamaan 2) dan metode G-ALDITLcR (Persamaan 3) di daerah pesisir bagian utara dan selatan Kota Makassar (Gemilang dr., 2017).

$$\text{G - ALDIT indeks} = \sum_{i=0}^5 w_i r_i / \sum_{i=0}^5 w_i \dots (2)$$

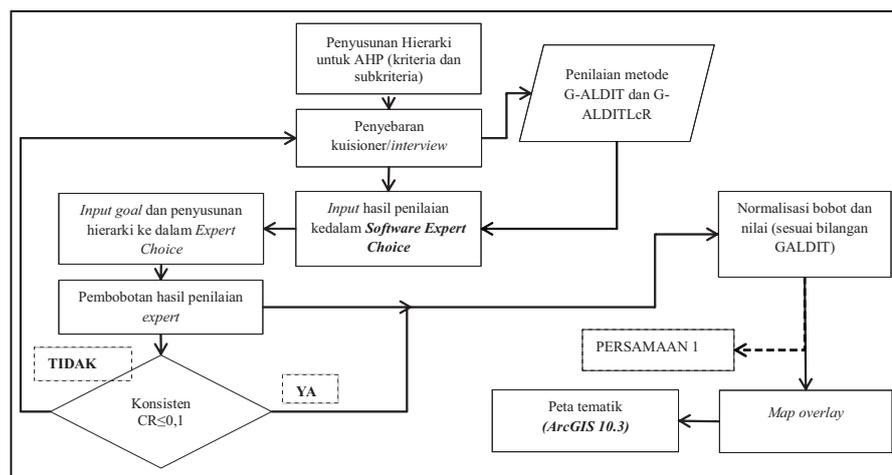
$$\text{G - ALDIT LcR} = \frac{\sum_{i=0}^7 w_i r_i}{\sum_{i=0}^7 w_i} \dots (3)$$

Di mana:  $w$  = weight atau bobot;  $r$  = rank atau peringkat. *G-ALDIT* merupakan metode tanpa penambahan parameter; *G-ALDITLcR* meru-

upakan metode dengan penambahan parameter tutupan lahan dan jarak dari muara sungai.

AHP digunakan untuk memberikan dan mengevaluasi bobot ( $w$ ) dan nilai ( $r$ ) terhadap masing-masing kriteria dan subkriteria menggunakan *non-probability sampling* dengan 30 jumlah responden yang terdiri atas akademisi dan pemerintahan. Responden yang dipilih berdasarkan pertimbangan bahwa kuisisioner penelitian bersifat spesifik terkait parameter hidrogeofisik air tanah.

Aplikasi (*software*) yang digunakan dalam penerapan metode AHP adalah *Expert Choice ver. 11* (Gambar 3). Aplikasi ini lebih memudahkan dalam menggabungkan hasil perbandingan dengan jumlah lebih dari satu partisipan. Menurut Gangadharan dan Nila (2015), Inkonsistensi dalam penilaian kemudian diuji tingkat konsistensinya dalam perbandingan berpasangan ( $CR < 0,1$ ).



Gambar 3. Proses Analisis menggunakan *Expert Choice V.11*.

Analisis *buffer* digunakan untuk mengidentifikasi kedekatan spasial suatu obyek peta terhadap obyek lain yang berada di sekitarnya (Aqli, 2010). Kriteria yang digambarkan dengan sistem *buffer* adalah kriteria jarak dari pantai (D) dan jarak dari sungai (R). Sedangkan kriteria lainnya dipetakan dalam bentuk raster dengan mengaplikasikan metode interpolasi IDW untuk mengestimasi nilai pada wilayah yang tidak diukur, sehingga dapat dibuat peta sebaran nilai pada seluruh wilayah penelitian. Menurut Pramono (2008), metode IDW memberikan hasil yang lebih akurat. Tahap akhir untuk menghasilkan peta kerentanan adalah dengan analisis *overlay*. Menurut Suryadi (2017), analisis *overlay* yang menjelaskan mengenai tumpang susun dalam menentukan peta kerentanan air tanah dangkal akibat pengaruh intrusi air laut yang dipetakan menggunakan *ArcGIS 10.3* yang dibagi menjadi empat rentang sesuai dengan tingkat indeks kerentanan yang telah seperti pada Tabel 3.

Tabel 3. Indeks GALDIT (Muthusankar, 2011)

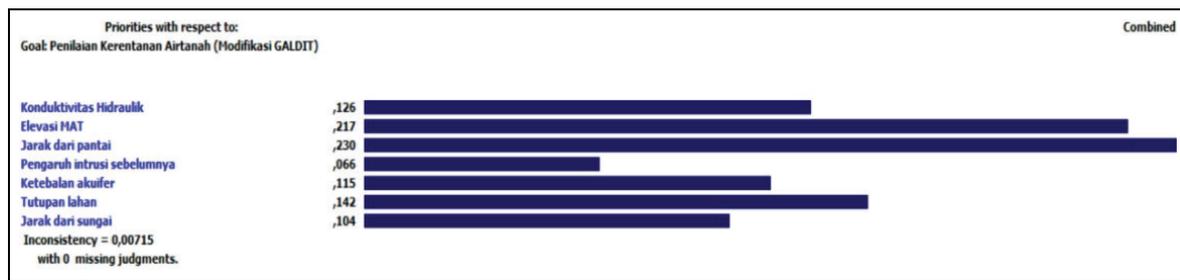
Rentang Indeks GALDIT	Kelas Kerentanan
<30	Tidak rentan
30-60	Kerentanan sedang
60-90	Kerentanan tinggi
>90	Kerentanan sangat tinggi

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Bobot kepentingan kriteria G-ALDIT dan G-ALDITLcR dalam penilaian kerentanan air tanah dangkal dapat dilihat pada Gambar 4. Bobot masing-masing kriteria menunjukkan tingkat konsistensi  $0,007 < 0,1$  yang menunjukkan bahwa setiap faktor memiliki pengaruh terhadap faktor yang lain dalam meningkatkan potensi terjadinya intrusi air laut.

Bobot masing-masing kriteria yang telah didapatkan pada Gambar 4, kemudian dinormalisasi sesuai dengan bobot *initial* GALDIT diperoleh dari penelitian Chachadi dan Lobo (2005). Matriks perbandingan setiap kriteria disertai dengan bobot prioritas yang dihasilkan dan bobot normalisasi pada masing-masing kriteria dapat dilihat pada Tabel 4. Adapun perbandingan bobot *initial* GALDIT dan modifikasinya dapat dilihat pada Tabel 5.

Hasil analisis dengan metode AHP menunjukkan bahwa faktor yang dapat meningkatkan risiko kerentanan air tanah dangkal terhadap intrusi air laut adalah kriteria jarak dari pantai (D) dan tinggi muka air tanah (L). Hal ini sesuai yang dipaparkan oleh Gangadharan dan Nila (2015) bahwa umumnya intrusi akan terjadi di daerah yang berbatasan dengan garis pantai. Selain itu, menurut Trabelsi dr. (2016), Hatori dr. (2008) serta Chachadi dan Lobo (2005), tinggi muka air tanah menjadi salah satu faktor



Gambar 4. Bobot kepentingan kriteria G-ALDIT dan G-ALDITLcR (*Expert Choice V.11*).

Tabel 4. Matriks Perbandingan Kriteria G-ALDIT dan G-ALDITLcR

Parameter/Kriteria		Konduktivitas Hidraulik	Elevasi MAT	Jarak dari Pantai	Intrusi Air Laut	Ketebalan Akuifer	Tutupan Lahan	Jarak dari Sungai	Bobot	Normalisasi Bobot*
		A	L	D	I	T	LC	R		
Konduktivitas Hidraulik	A	1	1,75776	2,00711	2,28513	1,18898	1,24305	1,18931	0,126	2
Elevasi MAT	L		1	1,08063	2,32252	2,13354	1,77348	2,18136	0,217	4
Jarak dari pantai	D			1	3,0116	2,12149	1,73363	2,05544	0,230	4
Pengaruh Intrusi Air Laut	I				1	1,95811	2,23504	2,04682	0,066	1
Ketebalan Akuifer	T					1	1,30746	1,40247	0,115	2
Tutupan Lahan	LC						1	1,45868	0,142	3
Jarak dari Sungai	R							1	0,104	2
Inkonsistensi									0,00715	

Tabel 5. Perbandingan Bobot Prioritas kriteria subskrip w (*weight*) initial GALDIT, G-ALDIT dan G-ALDITLcR

No	Faktor		Nilai Bobot Prioritas (w)		
			Initial GALDIT (Chachadi dan Lobo, 2005)	G-ALDIT*	G-ALDITLcR*
1.	Tipe akuifer	G	1	-	-
2.	Konduktivitas hidraulik akuifer, m/hari	A	3	2	2
3.	Tinggi muka air tanah di atas permukaan laut, mdp1	L	4	4	4
4.	Jarak dari pantai, m	D	4	4	4
5.	Dampak intrusi air laut sebelumnya, meq/l	I	1	1	1
6.	Tebal akuifer yang dipetakan, m	T	2	2	2
7.	Tutupan lahan	LC	-	-	3
8.	Jarak terhadap muara sungai, m	R	-	-	2

Ket: \*Bobot yang telah dinormalisasikan sesuai dengan bobot initial GALDIT (2018)

yang dapat meningkatkan risiko kerentanan akan kian meningkat bila muka air tanah kian dangkal. Hal ini disebabkan karena semakin intensif pemompaan yang dilakukan, terlebih lagi bila lokasi pemompaan dekat dengan pantai. Faktor yang memiliki bobot paling rendah adalah faktor intrusi air laut yang telah terjadi

sebelumnya (I). Hal ini sesuai dengan Kinimonth (2014), Indriatmoko (2016), dan Cahyadi dr. (2017) bahwa pengaruh intrusi air laut (rendahnya kadar garam) pada air tanah di titik yang sama kian lama akan kian menurun. Hal ini disebabkan karena aliran air tanah yang berlangsung secara terus-menerus dan akan

semakin berkurang apabila terdapat *recharge* yang dapat menekan konsentrasi kadar garam yang tinggi dalam air tanah. Menurut Trabelsi (2016), kedalaman muka air tanah menjadi faktor yang penting karena secara umum semakin dalam ketinggian muka air tanah maka potensi terjadinya penyusupan air asin akan semakin kecil, begitupun sebaliknya.

Berdasarkan Tabel 5, faktor yang mengalami perubahan bobot adalah konduktivitas hidraulik (A). Bobot yang diperoleh dari metode G-ALDITLcR untuk kriteria konduktivitas hidraulik lebih kecil dibandingkan dengan bobot standar dari metode *initial* GALDIT. Perbedaan ini disebabkan karena kriteria konduktivitas hidraulik tergantung beberapa faktor di antaranya adalah sifat dan kondisi batuan. Menurut Damayanti (2018) dan Suroyo (2019), konduktivitas hidraulik tergantung dari diameter butir dan ukuran pori dari lapisan batuan. Berdasarkan Gambar 3 dan data *boring log* Surwanda (2016), daerah penelitian merupakan daerah yang memiliki jenis tanah alluvial yang dominan terdiri atas susunan pasir yang memiliki diameter butir dan pori yang kecil. Namun, hal tersebut akan tergantung lagi pada kondisi tertentu seperti adanya gaya gesek yang akan ditimbulkan antara air dan permukaan padatan yang dapat menghambat pergerakan air dan menurunkan harga konduktivitas hidraulik dan atau penyerapan air pada partikel tanah (tanah dalam kondisi baru saja mengalami pembasahan), maka tanah (liat) akan mengembang sehingga akan memperkecil ruang pori dan menyebabkan penurunan nilai konduktivitas hidraulik (Notodamojo, 2005).

Bobot prioritas ( $w_i$ ) kriteria G-ALDIT dan G-ALDITLcR yang diperoleh sebelumnya akan dikalikan dengan nilai ( $r_i$ ) yang telah dinormalisasi untuk memperoleh skor masing-masing kriteria ( $w_i r_i$ ), yang dapat dilihat pada Tabel 6. Masing-masing kriteria menunjukkan tingkat konsistensi  $< 0,1$ . Skor yang ( $w_i r_i$ ) yang terdapat pada Tabel 6 akan digunakan untuk pemetaan masing-masing kriteria dalam G-ALDIT dan G-ALDITLcR dapat dilihat pada Gambar 5 - 11.

Dalam penelitian Satishkumar dr. (2016) ditunjukkan bahwa intrusi air laut tergantung dari tipe akuifer, yang mana secara alami intrusi air laut akan mudah terjadi pada air tanah dangkal atau bebas. Pada kondisi normal, air tanah dangkal atau bebas akan lebih rentan terhadap intrusi air laut. Hal ini dikarenakan air tanah dangkal memiliki tekanan hidrostatik yang sama dengan tekanan atmosfer. Oleh karena itu, ketika dilakukan pemompaan maka muka air tanah dangkal atau bebas sangat mudah menurun dan akan mudah terjadi penyusupan melalui ujung pemompaan.

Berdasarkan wawancara yang telah dilakukan dengan para akademisi, kriteria tipe akuifer (G) pada metode *initial* GALDIT dapat direpresentasikan dengan sifat-sifat akuifer baik sifat hidraulik dan sifat fisik, seperti kriteria konduktivitas hidraulik (A) dan ketebalan akuifer (T). Jadi kriteria tipe akuifer (G) tidak dimasukkan dalam penilaian kerentanan.

Kriteria konduktivitas hidraulik terdiri atas empat kelas seperti pada Gambar 5, di mana data yang diperoleh dari uji pemompaan sesuai pada Tabel 3. Skor tertinggi terdapat pada konduktivitas hidraulik  $> 22$  m/hari yakni sebesar 4. Sedangkan skor terendah terdapat pada konduktivitas hidraulik dengan nilai  $< 9$  m/hari sebesar 20. Hal ini menunjukkan bahwa kian tinggi konduktivitas hidraulik air tanah maka akan kian besar bobot kepentingan yang diperoleh, karena kian tinggi pergerakan air laut untuk masuk ke arah daratan yang dapat meningkatkan kerentanan air tanah dangkal terhadap intrusi air laut. Hal ini disebabkan konduktivitas hidraulik sangat menentukan jumlah *recharge* yang menggambarkan jumlah dari air yang meresap ke dalam tanah dan mencapai muka air tanah, yang mana *recharge* air mampu membantu transport kontaminasi (dalam hal ini adalah air laut) pada daerah tak jenuh dan jenuh air.

Berdasarkan *Laporan Akhir Kajian Pengelolaan dan Konservasi Air Tanah*, Dinas Energi dan Sumber Daya Mineral Kota Makassar, Sulawesi Selatan (2016), kondisi geologi pada

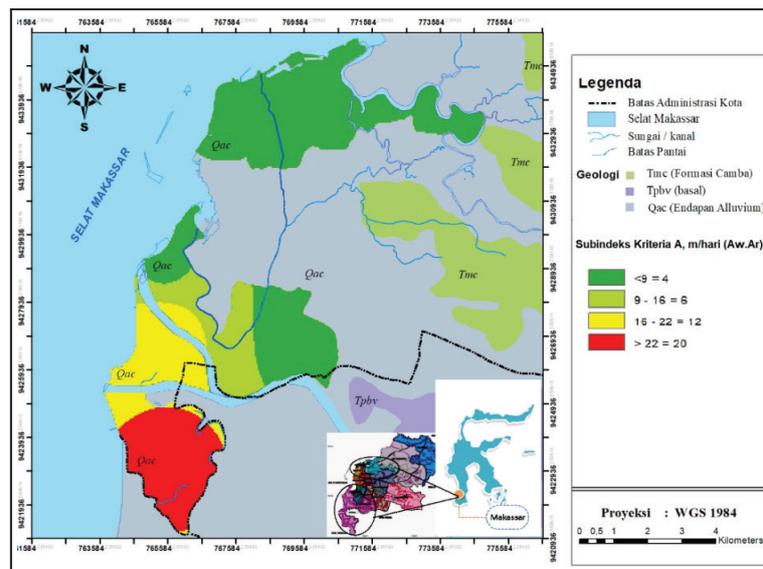
Tabel 6. Bobot Prioritas dan Skor Masing-Masing Kriteria Dan Subkriteria Metode G-ALDIT Dan G-ALDITLcR

Kriteria		Bobot normalisasi ( $w_j$ )	Sub kriteria	Ranking/ nilai AHP	Nilai Normalisasi ( $r_j$ )	$w_i^* r_i$	Tingkat konsistensi
Tipe akuifer	G						
Konduktivitas hidrolik akuifer, m/hari	A	2	>22 m/day	0,469	10	20	0,001
			16-22 m/day	0,279	6	12	
			9-16 m/day	0,155	3	6	
			<9 m/day	0,097	2	4	
			TOTAL			42	
Tinggi muka air tanah di atas permukaan laut, mdpl	L	4	<4 mdpl	0,459	10	40	0,002
			4-6 mdpl	0,255	6	24	
			6-8 mdpl	0,161	4	26	
			>8 mdpl	0,125	3	12	
			TOTAL			92	
Jarak dari pantai, m	D	4	<500 m	0,485	10	40	0,006
			500-750 m	0,263	5	20	
			750-1000 m	0,147	3	12	
			>1000 m	0,104	2	8	
			TOTAL			80	
Dampak intrusi air laut sebelumnya, meq/l	I	1	>1,3 meq/l	0,368	10	10	0,04
			0,8-1,3 meq/l	0,333	9	9	
			0,5-0,8 meq/l	0,201	5	5	
			<0,5 meq/l	0,098	2	2	
			TOTAL			26	
Tebal akuifer yang dipetakan, m	T	2	>18 m	0,292	10	20	0,002
			13-18 m	0,262	9	18	
			8-13 m	0,237	8	16	
			<8 m	0,209	7	14	
			TOTAL			68	
Tutupan lahan	LC	3	Perairan (kanal, sungai, rawa, tambak, irigasi)	0,249	8	24	0,006
			Lahan terbuka (lahan kosong)	0,125	4	12	
			Pemukiman dan lahan terkait (pemukiman, industry, pelabuhan, pertokoan, jaringan jalan)	0,300	10	30	
			Pertanian (sawah)	0,193	6	18	
			Non pertanian (kebun, semak)	0,132	4	12	
			TOTAL			96	
Jarak terhadap muara sungai, m	R	2	<150 m	0,465	10	20	0,01
			150-350 m	0,269	6	12	
			350-500 m	0,160	3	6	
			>500 m	0,107	2	4	
			TOTAL			42	

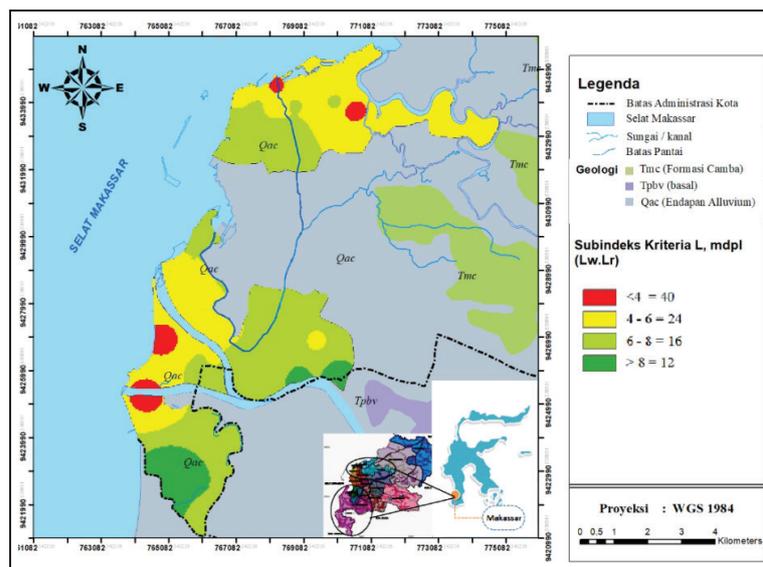
daerah penelitian berupa endapan aluvium. Endapan aluvium ini digolongkan pada endapan yang dapat meluluskan air tanah dengan baik. Elevasi muka air tanah di daerah penelitian terbagi menjadi empat kelas yaitu < 4 mdpl, 4-6 mdpl, 6-8 mdpl, dan >8 mdpl. Skor yang diperoleh untuk elevasi muka air tanah yang rendah <4 mdpl adalah 40. Sedangkan skor untuk elevasi muka air tanah yang tinggi >8 mdpl adalah 12. Nilai yang diperoleh menunjukkan bahwa kian dangkal muka air tanah maka kian kecil tekanan hidrolik air tanah yang dihasilkan, sehingga keseimbangan hidrostatik antara air tanah dan air laut akan

terganggu, aliran air tanah tawar ke air laut akan melambat, dan akan memudahkan air laut bergerak ke arah daratan.

Menurut Damayanti (2018), hasil analisis elevasi tempat ketinggian muka air tanah menunjukkan hasil tinggi muka air tanah yang relatif bervariasi, yang masing-masing berkisar antara 3-11 mdpl dan 2,5 – 10,15 mdpl. Pada beberapa tempat ditemukan tinggi elevasi dan muka air tanah yang cukup rendah, yaitu pada daerah yang berdekatan dengan muara Sungai Tallo pada pesisir utara (2,5 mdpl) dan muara Sungai Jeneberang pada pesisir selatan (3,22 mdpl). Kian rendah muka tanah maka akan kian dangkal muka air tanah.



Gambar 5. Peta Sebaran Skor ( $w_A, r_A$ ) Konduktivitas Hidraulik, m/hari.

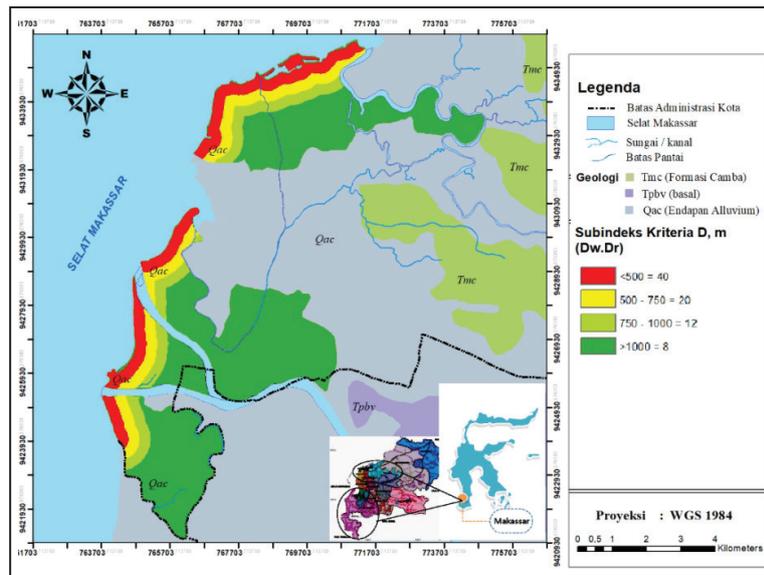


Gambar 6. Peta Sebaran Skor ( $w_L, r_L$ ) Elevasi Muka Air Tanah (mdpl).

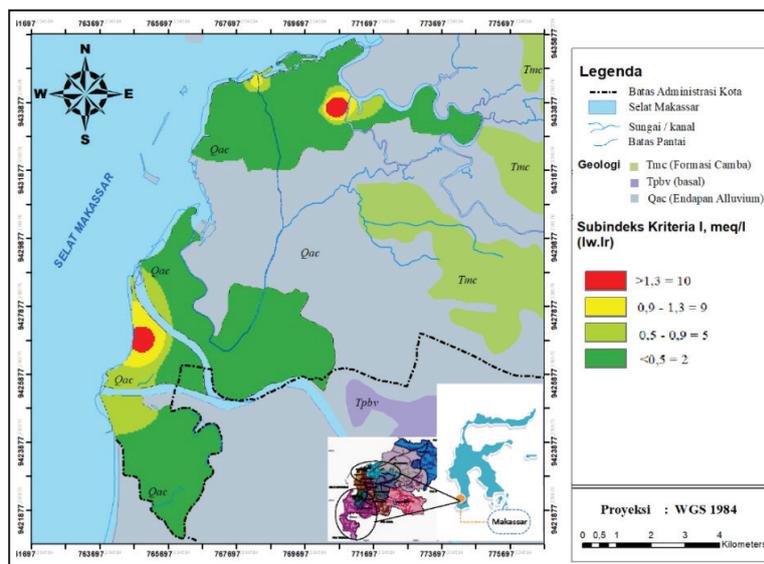
Kondisi elevasi muka air tanah pada daerah penelitian dapat dilihat pada Gambar 6. Konsentrasi aliran pada daerah penelitian terjadi pada daerah yang berada di dekat pantai, di mana aliran air tanah akan menuju pada arah muara Sungai Tallo, sedangkan pada daerah selatan berpusat pada morfologi cekungan yang berbatasan dengan daerah pantai dan berada di dekat muara Sungai Jeneberang. Berdasarkan *Laporan Akhir Kajian Pengelolaan dan Konservasi Air Tanah* (2016), Kondisi endapan

aluvium menempati daerah morfologi dengan sudut kemiringan lereng  $< 3\%$ . Menurut Djoendi & Soeroto (1989), kondisi topografi yang rendah pada daerah Sungai Jeneberang dan Sungai Tallo yang merupakan satuan delta menjadi penyebab aliran air tanah menuju ke daerah tersebut.

Hasil yang diperoleh untuk kriteria jarak terhadap pantai menunjukkan intrusi air laut akan mencapai nilai maksimum ketika akuifer dangkal berada di dekat garis pantai, sehingga air tanah akan rentan terhadap intrusi air laut. Hal



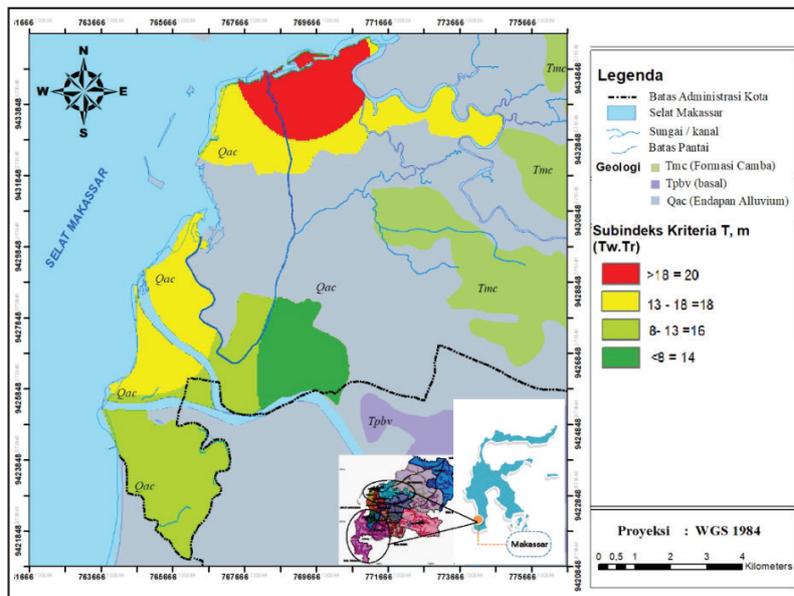
Gambar 7. Peta Sebaran Skor ( $w_D, r_D$ ) Jarak dari pantai (m).



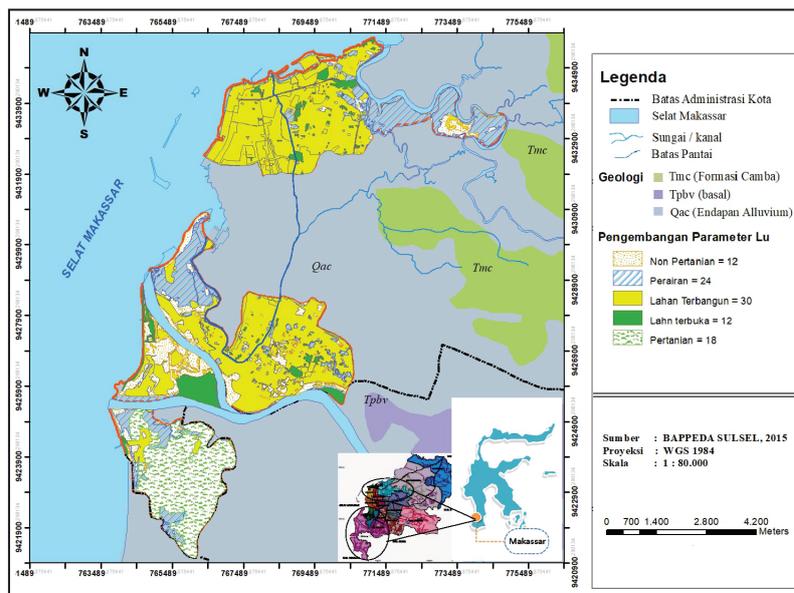
Gambar 8. Peta Sebaran Skor ( $w_r, r_r$ ) Pengaruh Intrusi Air Laut Sebelumnya (meq/l)

ini sesuai yang dipaparkan oleh Gangadharan dan Nila (2015) bahwa umumnya intrusi akan terjadi di daerah yang berbatasan dengan garis pantai. Dampak intrusi secara umum akan menurun ketika air laut bergerak tegak lurus dengan garis pantai. Hal ini dibuktikan dari hasil analisis (Gambar 7), bahwa sumur yang letaknya lebih dekat dari pantai <500 m memperoleh skor tertinggi yakni 40, sedangkan sumur yang letaknya jauh dari garis pantai memperoleh skor terendah yakni 8.

Pengaruh intrusi air laut sebelumnya dilihat dari konsentrasi rasio klorida karbonat-bikarbonat air tanah dangkal yang telah diuji sebelumnya. *Range* kelas dan skor subkriteria dapat dilihat pada Gambar 8. Berdasarkan hasil penilaian yang diperoleh, kian besar konsentrasi rasio ion klorida dan karbonat ( $Cl^-/CO_3^{2-}+HCO_3^-$ ), maka indikasi kehadiran adanya air asin yang ditandai dengan kehadiran garam-garaman dan ion terlarut dalam air tanah akan kian besar. Hal ini sesuai dengan kajian Damayanti (2018),



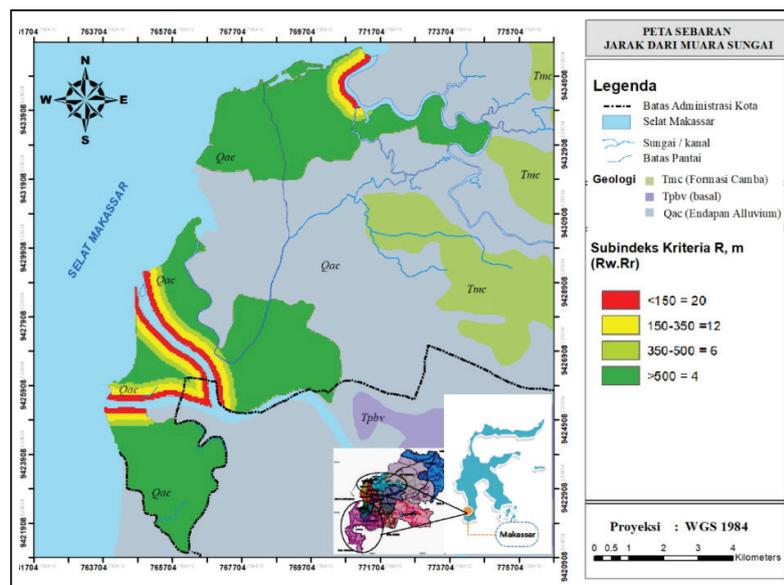
Gambar 9. Peta Sebaran Skor ( $w_r, r_p$ ) Ketebalan Akuifer (m).



Gambar 10. Peta Sebaran Skor ( $w_{lc}, r_{lc}$ ) Tutupan Lahan.

bahwa keberadaan intrusi air laut sebelumnya dapat dilihat dari nilai rasio karbonat dan bikarbonat ( $Cl^- / CO_3^{2-} + HCO_3^-$ ). Secara keseluruhan menunjukkan rata-rata nilai rasio  $Cl^- / CO_3^{2-} + HCO_3^-$  adalah 0,25 meq/l, maksimum 1,62 meq/l, minimum 0,04 meq/l, dengan standar deviasi 0,27 meq/l. Terdapat 3 titik lokasi yang memiliki nilai rasio  $Cl^- / CO_3^{2-} + HCO_3^-$  yang lebih tinggi dibanding daerah sekitarnya yang dapat dilihat pada Gambar 8.

Lokasi tersebut adalah daerah pesisir utara di Kecamatan Ujung Tanah memiliki nilai rasio  $Cl^- / CO_3^{2-} + HCO_3^-$  sebesar 0,9 meq/l, pesisir utara bagian timur sebesar 1,62 meq/l dan di pesisir bagian selatan sebelah barat pada Kecamatan Tamalate memiliki nilai rasio  $Cl^- / CO_3^{2-} + HCO_3^-$  sebesar 1,28 meq/l. Daerah penelitian menunjukkan nilai rasio sebesar  $\geq 0,9$  meq/l yang tergolong air payau ( $>0,5$  meq/l). Bila dikaitkan dengan tinggi muka air tanah (Gambar



Gambar 11. Peta Sebaran Skor ( $w_R, r_R$ ) Jarak dari Muara Sungai (m).

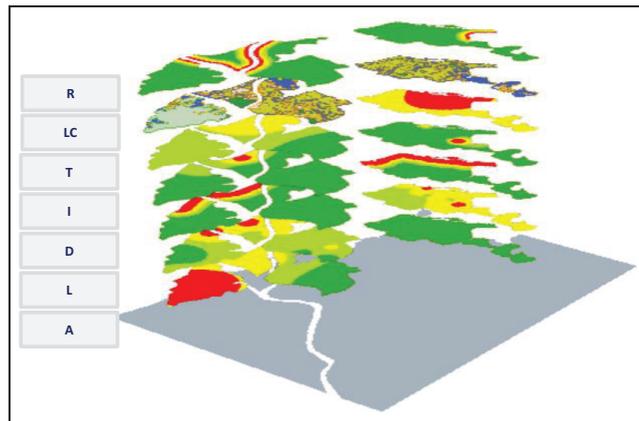
7)., nilai rasio  $Cl^- / CO_3^{2-} + HCO_3^-$  tinggi pada wilayah tersebut disebabkan karena tinggi muka air tanah juga tergolong rendah.

Menurut Tribelsi, drr. (2016) kian tebal akuifer, maka kian besar risiko air tanah akan terintrusi air laut, dan sebaliknya. Skor subkriteria ketebalan akuifer (Gambar 9) menunjukkan bahwa kian tebal akuifer maka potensi penyusupan air asin akan kian besar. Menurut Tasnim dan Subrina (2016), tingkat intrusi air laut lebih tinggi jika memiliki ketebalan akuifer besar karena memiliki ruang yang lebih luas dalam menyimpan air.

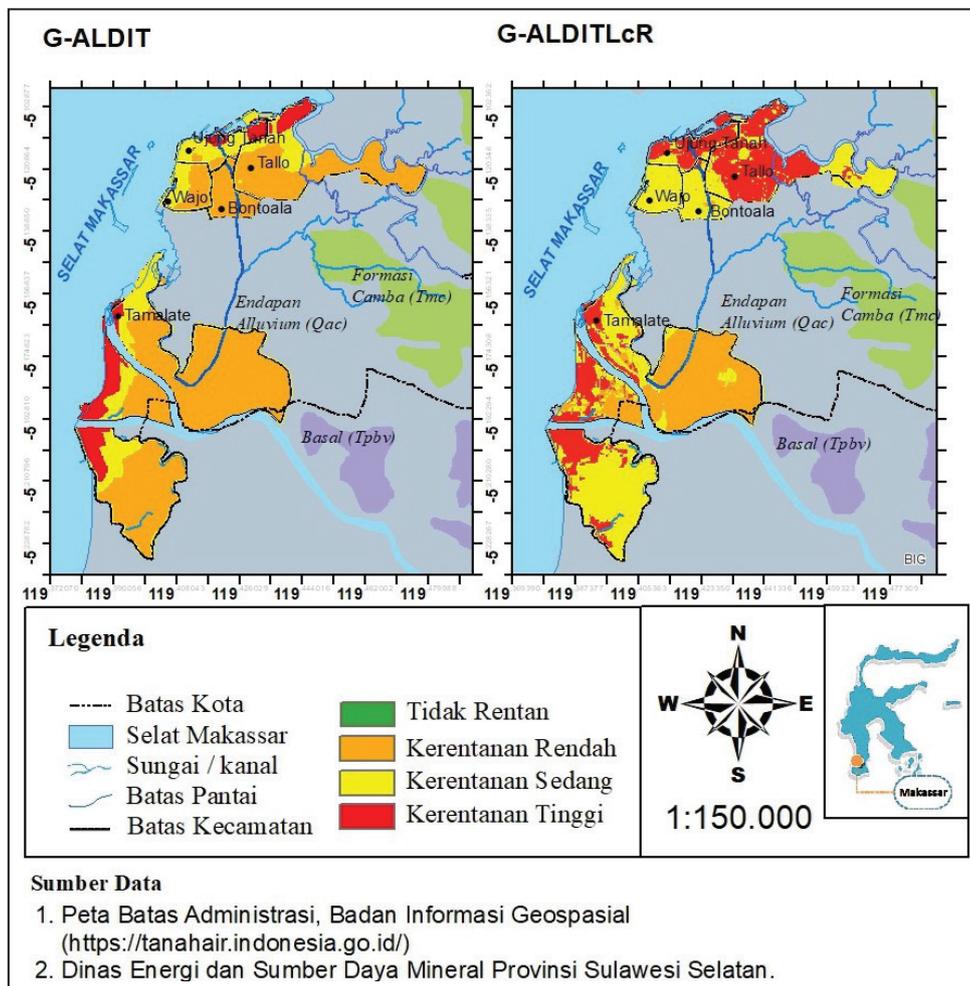
Penambahan kriteria tutupan lahan (Gambar 10) merupakan gambaran pengukuran kerentanan spesifik, yang tingkat kerentanannya diukur berdasarkan faktor alami dan faktor antropogenik. Faktor antropogenik berupa dampak aktivitas manusia yang akan kian meningkatkan risiko terjadinya penyusupan air laut ke dalam air tanah dangkal. Tutupan lahan yang mendapatkan skor tertinggi adalah lahan terbangun. Hal ini disebabkan karena kian meningkat lahan terbangun, maka berkurangnya infiltrasi air hujan ke dalam tanah, sehingga air hujan hanya akan melimpas ke permukaan. Oleh karena itu, bila tutupan lahan kian bertambah, maka akan kian berkurang area resapan air, sehingga akan memperlambat aliran air tanah ke air laut dan intrusi air laut akan mudah terjadi.

Jarak dari muara sungai merupakan kriteria tambahan yang mempertimbangkan adanya pengaruh pasang surut yang dapat menyebabkan terjadinya intrusi air laut (Ode, 2011). Menurut Mansour (2016), tingginya pengaruh arus pasang surut disebabkan adanya dinamika pasang surut yang menimbulkan perbedaan tekanan hidrostatik ke badan air sehingga menyebabkan pasang. Pada saat kondisi pasang maka air laut akan kian bergerak ke arah daratan dan dapat menyusup masuk ke dalam air tanah. Hasil ini menunjukkan bahwa air tanah yang berada di dekat muara sungai memperoleh skor tertinggi yaitu 20. Hal ini disebabkan karena terdapat pengaruh pasang surut yang menyebabkan air tanah akan lebih mudah terintrusi air laut apabila terjadi pasang, di mana kecepatan arus akan kian besar, sehingga energi air laut kian besar dan akan mendorong ke arah air tawar.

Tingkat kerentanan metode G-ALDIT dan G-ALDITLcR diperoleh dari skor subskrip w dan subskrip r ( $Aw Ar + Lw Lr + Dw Dr + Iw Ir + Tw Tr + LCw LCr + Rw Rr$ ) seperti pada Gambar 12. Tingkat kerentanan yang diperoleh dari perhitungan masing-masing kriteria diperoleh dari skor subskrip w (bobot) dan r (peringkat) dapat dilihat Gambar 13. *Overlay* dilakukan dengan dua tahap. Tahap pertama, *overlay* metode G-ALDIT



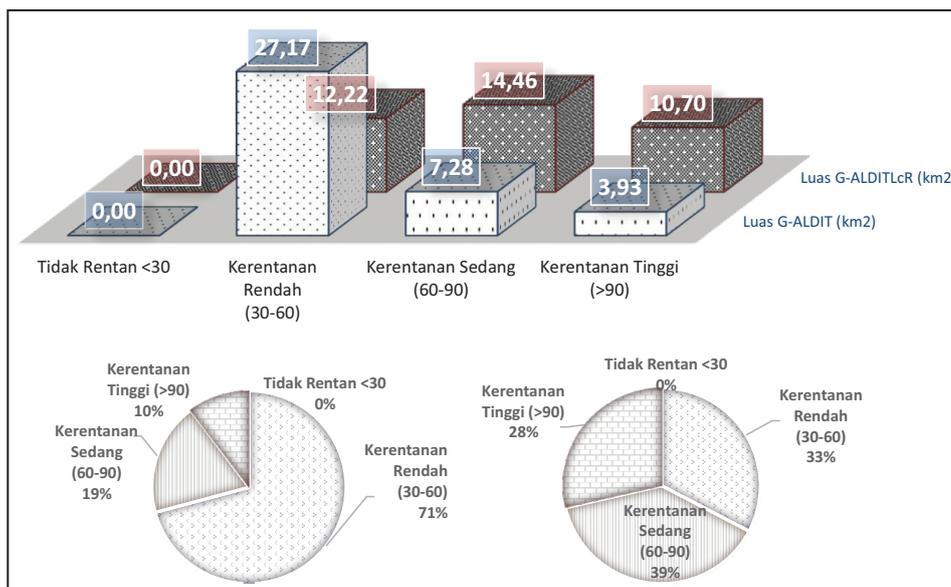
Gambar 12. Tingkat kerentanan metode G-ALDIT dan G-ALDITLcR.



Gambar 13. Indeks Kerentanan Metode G-ALDIT dan G-ALDITLcR Terhadap Intrusi Air laut.

yang terdiri atas 5 kriteria, sedangkan tahap kedua merupakan *overlay* metode G-ALDITLcR yang terdiri atas 7 kriteria termasuk 2 kriteria tambahan, yakni tutupan lahan dan jarak dari muara sungai.

Indeks kerentanan metode G-ALDIT dan G-ALDITLcR dapat dilihat pada Gambar 13 dan Gambar 14. Indeks kerentanan terbagi menjadi 4 kelas sesuai pada Tabel 3.



Gambar 14. Tingkat kerentanan (luas dan persentase) G-ALDIT dan G-ALDITLcR.

Dengan metode G-ALDIT terbukti bahwa tidak terdapat indeks kerentanan yang tergolong ke dalam klasifikasi yang tidak rentan. Sebagian besar dari zona di daerah penelitian tergolong ke dalam tingkat kerentanan yang rendah dengan luas area 27,17 km<sup>2</sup> menutupi zona daerah penelitian. Pada daerah pesisir utara zona ini tersebar di bagian tengah dan sebagian delta Sungai Tallo. Sedangkan pada daerah selatan zona ini tersebar di bagian timur lokasi yang mana terdiri atas empat kelurahan, yaitu Balang Baru, Manuruki, Pabaengbaeng, dan Mangasa, serta bagian tengah yang merupakan sebagian dari Kelurahan Tanjung Merdeka, pada bagian selatan yang merupakan sebagian dari Kelurahan Barombong dan bagian utara yang merupakan sebagian dari Kelurahan Maccini Sombala. Zona kerentanan sedang tersebar dengan luas 7,28 km<sup>2</sup> menutupi daerah penelitian berada di sepanjang garis pantai baik pada daerah pesisir utara dan selatan. Sedangkan zona kerentanan tinggi terdapat pada daerah utara di dekat pantai dan dekat muara Sungai Tallo, sedangkan pada daerah selatan berada di daerah cekungan delta Sungai Jeneberang. Zona kerentanan tinggi ini tersebar dengan luasan 3,93 km<sup>2</sup>.

Dengan menggunakan metode G-ALDITLcR dengan penambahan faktor tutupan lahan dan

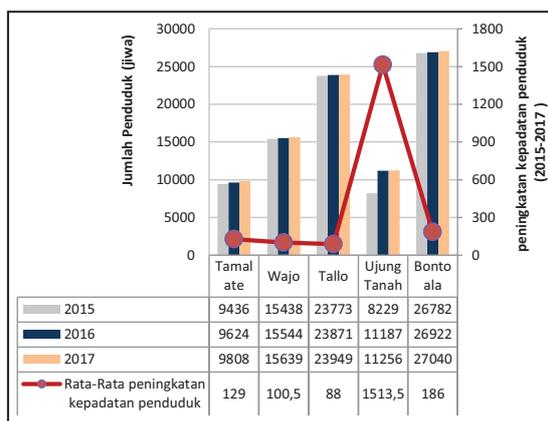
jarak dari muara sungai terbukti bahwa tingkat kerentanan akan kian meningkat. Hal ini dapat dibuktikan dengan zona kerentanan yang tinggi kian luas dari metode G-ALDIT (tanpa adanya kriteria tambahan). Indeks kerentanan tinggi yang awalnya hanya menutupi 3,93 km<sup>2</sup> menjadi 10,70 km<sup>2</sup>.

Gambar 14 menunjukkan peningkatan wilayah kerentanan antara metode G-ALDIT dan G-ALDITLcR mulai tingkat sedang hingga tinggi. Hal ini tentu membuktikan bahwa dengan menggunakan G-ALDIT yang telah dikembangkan menunjukkan tingkat kerentanan air tanah akibat intrusi air laut yang kian jelas dan lebih merepresentasikan kondisi di lapangan. Hasil ini sesuai dengan data kepadatan penduduk dari Badan Pusat Statistik selama tiga tahun terakhir (2015-2017) bahwa rata-rata kenaikan kepadatan penduduk pada daerah pesisir utara adalah 472 per km<sup>2</sup>, sedangkan pada daerah pesisir selatan rata-rata kenaikan kepadatan penduduk adalah 129 per km<sup>2</sup>. Jika ditinjau dari sisi industri, di pesisir utara Kota Makassar ada dua industri besar yang berada pada daerah utara tepatnya di Kecamatan Ujung Tanah (berbatasan dengan garis pantai). Adanya perbedaan tingkat kepadatan penduduk yang kian meningkat per tahunnya dan jumlah industri antarwilayah pe-

sisir utara dan selatan, berkaitan dengan jumlah pemakaian air tanah yang lebih besar karena kebutuhan akan lahan dan air bersih tentunya juga akan kian meningkat.

### Validasi

Berdasarkan data tingkat kepadatan penduduk yang diperoleh dari *Makassar Dalam Angka* yang dikeluarkan oleh Badan Pusat Statistik (2018), rata-rata tingkat kepadatan penduduk selama 3 tahun terakhir dari 2015-2017 pada daerah pesisir utara sebesar 472 per km<sup>2</sup>. Sedangkan pada daerah selatan rata-rata peningkatan kepadatan penduduk sebesar 129 per km<sup>2</sup>. Tingkat kepadatan penduduk selama 3 tahun terakhir (2015-2017) dapat dilihat pada Gambar 15.



Gambar 15. Rata-rata kenaikan kepadatan penduduk (2015-2017).

Jika mengacu pada data kenaikan kepadatan penduduk selama tiga tahun terakhir (2015-2017), terlihat bahwa pada Kecamatan Ujung Tanah mengalami peningkatan yang sangat signifikan. Peningkatan kepadatan penduduk pada Kelurahan Ujung Tanah (salah satu kelurahan yang berbatasan dengan garis pantai) menjadi salah satu yang faktor yang mendukung air tanah dangkal pada daerah utara akan lebih rentan terhadap intrusi air laut. Adanya perbedaan dari tingkat kepadatan penduduk yang semakin meningkat antarwilayah pesisir utara dan selatan, berkaitan dengan jumlah pemakaian air tanah yang lebih besar karena kebutuhan akan

lahan dan air bersih tentunya juga akan semakin meningkat. Oleh karena itu, daerah utara lebih rentan dibandingkan daerah selatan.

### KESIMPULAN

Hasil menunjukkan bahwa dengan menggunakan metode G-ALDIT dan G-ALDITLcR terbukti adanya tingkat kerentanan rendah hingga ke tinggi. Dengan metode G-ALDITLcR, zona tingkat kerentanan dengan klasifikasi tinggi meningkat sebesar  $\pm 18\%$ . Penambahan kedua kriteria tersebut terbukti dapat menunjukkan secara lebih jelas dan lebih luas wilayah yang memiliki tingkat kerentanan yang tinggi dibandingkan dengan metode G-ALDIT yang merupakan memodifikasi tanpa penambahan kriteria tutupan lahan dan jarak dari sungai.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) yang telah membiayai penulis dalam menyelesaikan studi dan penelitian ini. Selain itu, terima kasih kepada Balai Besar Laboratorium Kesehatan Makassar yang telah membantu penulis dalam pengujian kualitas air tanah dangkal.

### DAFTAR PUSTAKA

- Anggun, Amiruddin, dan Samsu Arif, 2016. Konservasi Air Tanah Menggunakan Metoda Sistem Dinamik (Studi Kasus: Kota Makassar, Provinsi Sulawesi Selatan), *Jurnal Geofisika Universitas Hasanuddin*.
- Aqli, W, 2010. Analisa Buffer dalam Sistem Informasi Geografis Untuk Perencanaan Ruang Kawasan, *INERSIA*, 6, 192-201.
- Badan Pusat Statistik, 2018. *Makassar Dalam Angka 2017*. <https://makassar-kota.bps.go.id/publication/2017/08/17/fd1f693590464095a91ae5ad/kota-makassar-dalam-angka-2017> (Diunduh pada tanggal 8 Februari 2018).

- Barwani, Al A., dan Helmi, T., 2006. *Seawater Intrusion in A Coastal Aquifer: A Case Study For The Area Between Seeb and Suwaiq in the Sultanate of Oman*. *Agric Mar Sci*, 11 (1), 55–69. DOI: 10.13140/2.1.3791.8081.
- Cahyadi, A., Wahyu H., dan Hendy F., 2017. Kajian Dampak Intrusi Air Laut pada Akuifer Pulau Koral Sangat Kecil Berdasarkan Analisis Perbandingan Ion Mayor, *Jurnal Kebencanaan Indonesia*, 5, 92-101.
- Chachadi A.G. & Lobo Ferreira, J.P., 2005. Assessing aquifer vulnerability to seawater intrusion using GALDIT method: Part 2. *Proceedings of the The Fourth Inter-Celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources*, 11-14.
- Damayanti, A. D., 2018. Pengembangan metode GALDIT untuk evaluasi kerentanan airtanah dangkal di kawasan pesisir Kota Makassar (studi kasus: air tanah dangkal pesisir utara dan selatan Kota Makassar), Tesis Program Magister, Institut Teknologi Bandung.
- Dinas Energi dan Sumber Daya Mineral, 2016. *Laporan Kegiatan Kajian dan Penyelidikan Zona Konservasi Airtanah*. Bidang Geologi dan Sumber Daya Mineral.
- Djoendi & Soeroto, 1988. *Survei Potensi Air Tanah Daerah Ujung Pandang*. Ujung Pandang.
- Gangadharan, R., Dr.P. Nila R. 2015. *GIS Based GALDIT-AHP Method for Assess the Impact of Shrimp Farms in the Coastal Watershed of Tamil Nadu, INDIA*. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 4, 475-479.
- Gemilang, W.A., Gunardi K., 2016. Gejala Intrusi Air LAut di Daerah Pesisir Padelegan Pademawu dan Sekitarnya, *Jurnal Kelautan*, 9, 99-106.
- Gemilang, W.A., Gunardi K., dan Ulung J.W., 2017. Penilaian Kerentanan Air Tanah menggunakan Metode GALDIT (Studi Kasus: Kawasan Pertanian Garam Pademawu, Madura-Indonesia), *Riset Sumber Daya dan Kerentanan Pesisir*, Vol 12 (3), 117-125, Desember 2017.
- Gorgij, A.D., dan Asghar A.M., 2016. *Vulnerability Assessment of Saltwater Intrusion using Simplified GAPDIT Method: A case Study of Azarshahr Plain Aquifer, East Azerbaijan, Iran*, *Arab J Geosci*. 9(2): 106. DOI 10.1007/s12517-015-2200-1.
- Hatori, C.A., Heru H., dan Doni P.E.P., 2008. *Studi Kerentanan Air Tanah terhadap Intrusi Air Laut di Kota Semarang, Jawa Tengah*. Tesis dari Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Honnanagoudar, S.S., D.Venkat R., dan Mahe-sha A., 2014. Analysis of Vulnerability Assessment in the Coastal Dakshina Kannada District, Mulki to Talapady Area, Karnataka, *International Journal of Computational Engineering Research (IJCER)*, 4, 19-24.
- Indriatmoko, R. H., 2016. Analisis terhadap Perubahan Salinitas Airtanah Dangkal Pada Sistem Akuifer Tak Tertekan Cekungan Jakarta, *Jurnal Air Indonesia*, 9, 37-46.
- Kinninmonth, W., 2004. *Climate Change. A Nature Hazard*. Multi Science Publishing Co., UK.
- Lappas, I., Kallioras A., Pliakas F., dan Rondo-gianni Th., 2016. *Groundwater Vulnerability Assessment to Seawater Intrusion through GIS-Based GALDIT Method*. Case Study: Atlanti Coastal Aquifer, Central Greece, *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 1, 798-807.
- Lubis, R.F., Ananta P., Hendra B., dan Gunardi W.K., 2018. Penentuan Indeks Kerentanan Airtanah Pesisir Jawa di Wilayah Selat Sunda dengan Menggunakan Metode GALDIT, *Riset Geologi dan Pertambangan*, Vol 28 No 1, Juni 2018 (49-59). DOI: 10.14203/risetgeotam2018.v28.554.
- Mansour, A.Y.S., 2016. *The Investigation of Seawater Intrusion of Coastal Aquifer in Karareis (Karaburun Peninsula)*. Thesis dari Inzmir Institute of Technology.
- Mongabay Indonesia., 2017. *Data Pemakaian Air Tanah Kota Makassar berdasarkan hasil wawancara masyarakat dari situs berita Mongabay Indonesia tahun 2017*. <http://>

- www.mongabay.co.id/2017/06/03/krisis-air-bersih-makassar-perempuan-pesisir-paling-terkena-dampak/(Diakses tanggal 4 Desember 2017).
- Muthusankar, Mr. G., 2011. *Multi Hazard Risk Assessment and Management Strategies For Nagapattinam Coastal Zone, Tamil Nadu*. Tesis dari Bharathidasan University.
- Notodarmojo, S. 2005. *Pencemaran Tanah dan Air Tanah*. Penerbit ITB, Bandung..
- Ode, I., 2011. Intrusi Air Laut, *Bimafika*, 3 (1), 266-271.
- Pramono, G. H., 2008. Akurasi Metode IDW dan Kriging untuk Interpolasi Sebaran Sedimen Tersuspensi, *Forum Geografi*, 22, 97-110.
- Surwanda., 2016. *Pekerjaan Geophysical Well Logging Kota Makassar*. Departemen Pertambangan dan Energi, Sulawesi Selatan.
- Satishkumar, V., S. Sankaran, Taufiquewarsi, B. dan Amarender, R. D. 2016. Mapping of Salinity Ingress Using GALDIT Model for Sirkali Coastal Region, *Journal of Geographic Information System*, 8, 526-536.
- Supriatna, A.M., 2017. *Pengembangan Kriteria Penilaian Metode Drastic Dalam Analisa Kerentanan Pencemaran Air Tanah Di Kota Bandung*. Tesis dari Institut Teknologi Bandung.
- Suroyo, H., 2019. *Modul 3 : Hidrogeologi, Pelatihan Teknik Geolistrik 2 Dimensi untuk Perencanaan Pemanfaatan Potensi Airtanah*. Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Suryadi, G., 2017. *Analisis Kerentanan Pencemaran Airtanah dengan Menggunakan Metode SINTACS dan Penentuan Skala Prioritas Tindakan Pengendalian Kerentanan Airtanah di Kota Cimahi*. Tesis dari Institut Teknologi Bandung.
- Tasnim, Z., Subrina T., 2016. Application of the Method of GALDIT for Groundwater Vulnerability Assessment: A Case of South Florida, *Asian Journal of Applied Science and Engineering*, 5, 27-40.