

APLIKASI METODE ANALITIS DAN PEMODELAN NUMERIK UNTUK PREDIKSI INTRUSI AIR LAUT DI KABUPATEN JENEPONTO

Sugiarto Badaruddin¹⁾, Akhmad Azis¹⁾, Indra Mutiara¹⁾
¹⁾ Dosen Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Ujung Pandang, Makassar

ABSTRACT

In the last decade, there has been a rapid growth in population which leads to a large increase of clean water demand and groundwater has finally taken an important role in meeting these needs. There are negative effects that arise when exploitation of groundwater becomes excessive and one is the occurrence of seawater intrusion (SWI) which damages the quality and quantity of groundwater. This study purposes to determine the current extent of SWI that occurred in Jeneponto Regency using analytical sharp-interface approach and numerical-dispersive solution of SEAWAT, based on the data obtained from the field. From the results of this study, it was found that the maximum SWI extent occurs in the aquifer of Binamu2, where the analytical solution and numerical simulation produced SWI extent of 850.4 m and 510 m, respectively. In general, the extents of SWI obtained from the analytical solution for four aquifers are larger relative to the results of numerical solutions. This is due to the "pushing seaward effect" due to the influence of circulation flow in the mixing zone which is considered in numerical solution but neglected in the analytical solution. Further field research is required in the form of boring log and geophysical data to validate the results obtained in this research.

Keywords: *Saltwater intrusion, numerical modelling, analytical solution*

1. PENDAHULUAN

Secara topografi kawasan pantai merupakan kawasan dataran rendah dan dilihat secara morfologi berupa dataran pantai. Secara geologi batuan penyusun dataran umumnya berupa endapan aluvial yang terdiri atas lempung, pasir, dan kerikil hasil pengangkutan dan erosi batuan di bagian hulu sungai. Pada umumnya, batuan di dataran bersifat kurang kompak sehingga potensi air tanahnya cukup baik. Akuifer di dataran pantai yang baik umumnya berupa akuifer tertekan, tetapi akuifer bebas pun dapat menjadi sumber air tanah yang baik terutama pada daerah-daerah tepi pantai. Permasalahan pokok pada kawasan pantai adalah keragaman sistem akuifer, posisi dan penyebaran air laut baik secara alami maupun secara buatan yang diakibatkan adanya pengambilan air tanah untuk kebutuhan domestik, nelayan, dan industri. Pada akuifer pantai, perubahan hidrogeologi daerah pantai bisa menyebabkan pergerakan air laut ke arah daratan yang mencemari air tanah dalam akuifer dan dikenal dengan nama intrusi air laut (IAL).

Secara historis, terjadinya IAL pada umumnya disebabkan oleh pemompaan air tanah yang berlebihan atau pengambilan air tanah di daratan dan hal ini bisa menyebabkan kehilangan yang signifikan pada ketersediaan air tanah di dalam akuifer pantai di seluruh dunia (Badaruddin et al., 2015; FAO, 2007). Meskipun demikian, efek perubahan iklim (misalnya kenaikan muka air laut dan penurunan jumlah imbuhan air tanah) bisa juga menyebabkan terjadinya IAL (Post, 2005). Oleh sebab itu, kerentanan akuifer pantai terhadap perubahan iklim, peningkatan volume pemompaan air tanah dan kenaikan muka air laut harus dipertimbangkan secara integral dalam investigasi manajemen air tanah.

IAL pada dasarnya adalah sebuah proses yang kompleks yang melibatkan aliran dengan kepadatan yang bervariasi (variable-density flow), transportasi larutan, dan proses hidrokimia (Werner et al., 2012), yang membuat penilaian air tanah menjadi relative sulit dan mahal. Sebagai akibatnya, penilaian kerentanan akuifer pantai terhadap IAL dalam skala besar umumnya hanya menggunakan metode kualitatif seperti GALDIT (Lobo-Ferreira et al., 2007) dan CVI (Ozyurt, 2007), yang hanya mempertimbangkan sebagian faktor yang dianggap berdampak pada IAL. Selain itu, metode-metode ini pada umumnya kurang dalam dasar teori dan secara subyektif lebih terfokus pada pemilihan satu elemen saja yang berhubungan dengan IAL. Baru-baru ini, sebuah alternatif prediksi IAL skala besar telah dikembangkan oleh Werner et al. (2012). Metode ini berdasarkan pada kondisi aliran tetap (steady-state), persamaan Strack (1976) yang berasumsi bahwa pertemuan antara air laut dan air tawar di dalam akuifer adalah berupa garis tipis (sharp-interface), sehingga metode ini melibatkan mekanika fisik IAL meskipun dalam kondisi yang sangat ideal. Sedangkan untuk mendapatkan kondisi yang mendekati kondisi ril dalam memprediksi IAL, diperlukan pemodelan numerik yang berasumsi bahwa pertemuan antara air laut dan air tawar dalam akuifer adalah berupa daerah pencampuran (mixing zone).

¹⁾ Korespondensi penulis: Sugiarto Badaruddin, Telp: 082291300808, sugibadaruddin@poliupg.ac.id

Pada satu dekade terakhir ini telah terjadi pertumbuhan penduduk yang sangat pesat di seluruh dunia termasuk di Indonesia, dan hal tersebut menyebabkan eksploitasi air bawah tanah terus meningkat dengan pesat. Fenomena ini telah menyebabkan dampak negatif terhadap kuantitas maupun kualitas air tanah, antara lain penurunan muka air tanah, fluktuasi yang semakin besar serta penurunan kualitas air tanah, serta terjadinya intrusi air laut (IAL) di beberapa wilayah. Dengan demikian perlu dilakukan upaya nyata dan terpadu untuk meminimalkan dampak negatif tersebut, baik oleh pemerintah, masyarakat maupun swasta.

Dalam penelitian ini, kami mengaplikasikan metode analitis dari Werner et al. (2012) dan metode pemodelan numerik dalam memprediksi IAL di dua kecamatan di Kabupaten Jeneponto. Untuk pertama kalinya, metode analitis dan metode numerik 2 dimensi diaplikasikan dalam menentukan panjang intrusi air laut di Kabupaten ini. Kabupaten Jeneponto adalah salah satu kabupaten di Sulawesi Selatan Indonesia yang posisinya berada di tepi laut dan sangat memungkinkan untuk mengalami proses IAL karena air tanah di kabupaten tersebut sudah lama digunakan untuk keperluan domestik dan irigasi. Dengan melihat kondisi yang ada di Kabupaten Jeneponto yang sudah lama menggunakan air tanah (khususnya untuk keperluan pertanian dan domestik) (Syamsuddin et al., 2009), maka dibutuhkan pelaksanaan penilaian permulaan mengenai kondisi IAL di daerah ini dan dianggap perlu mengetahui faktor penyebab terjadinya intrusi air laut dan membuat keputusan mengenai tindakan yang perlu dilakukan dalam memproteksi sumber daya air tanah di kabupaten tersebut.

2. METODE PENELITIAN

Pelaksanaan penelitian ini meliputi tahap persiapan, pengambilan data primer dan data sekunder, pengolahan data, dan pembahasan. Penelitian dilakukan di 2 (dua) Kecamatan (Kec. Binamu dan Kec. Arungkeke) di Kabupaten Jeneponto. Data-data yang diperlukan dalam penelitian ini adalah data primer dan data sekunder. Data primer berupa data hasil pengukuran muka air tanah dan foto-foto singkapan tanah di lokasi penelitian, sedangkan data sekunder berupa data-data penelitian terdahulu yang mendukung tercapainya tujuan penelitian ini, antara lain data hidrologi dan hidrogeologi di daerah penelitian. Setelah mendapatkan data yang diperlukan, langkah selanjutnya adalah mengolah data tersebut.

Pada tahap mengolah atau menganalisis data dilakukan dengan memasukkan data-data ke dalam persamaan analitis dan kemudian memprediksi panjang IAL. Dalam menganalisis IAL, untuk aquifer tidak tertekan, digunakan Persamaan (1) (Gambar 1a) dan (2) (Gambar 1a) seperti di bawah ini:

$$\text{Zona 1 (} x \geq x_t \text{)} \quad h_f = \sqrt{\frac{2q_0x - W_{net}x^2}{K} + (1 + \delta)z_0^2} - z_0 \quad (1)$$

Dan,

$$\text{Zona 2 (} x \leq x_t \text{)} \quad h_f = \sqrt{\left(\frac{\delta}{1 + \delta}\right) \frac{2q_0x - W_{net}x^2}{K}} \quad (2)$$

Dan dari Cheng and Ouazar (1999), diperoleh posisi terjauh IAL (x_t , [L]) seperti yang ditunjukkan oleh Persamaan (3):

$$x_t = \frac{q_0}{W_{net}} - \sqrt{\left(\frac{q_0}{W_{net}}\right)^2 - \frac{K\delta(1 + \delta)z_0^2}{W_{net}}} \quad (3)$$

Untuk aquifer tertekan, digunakan Persamaan (4) (Gambar 1b) dan (5) (Gambar 1b) seperti di bawah ini:

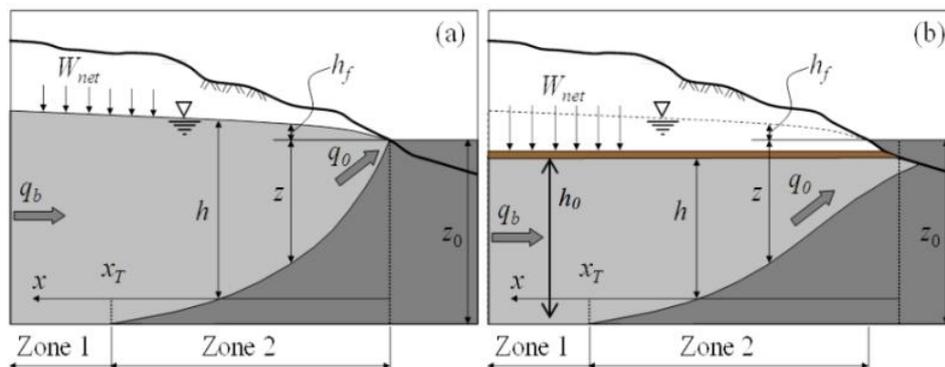
$$\text{Zona 1 (} x \geq x_t \text{)} \quad h_f = \frac{q_0x - W_{net} \frac{x^2}{2}}{Kh_0} + \delta z_0 - \frac{\delta h_0}{2} \quad (4)$$

Dan,

$$\text{Zona 1 (} x \leq x_t \text{)} \quad h_f = \sqrt{\left(2q_0x - W_{net}x^2\right) \frac{\delta}{K}} + \delta z_0 - \delta h_0 \quad (5)$$

Dan dari Cheng and Ouazar (1999), diperoleh posisi terjauh IAL (x_T [L]) seperti yang ditunjukkan oleh Persamaan (6)

$$x_T = \frac{q_0}{W_{net}} - \sqrt{\left(\frac{q_0}{W_{net}}\right)^2 - \frac{K\delta(1 + \delta)z_0^2}{W_{net}}} \quad (6)$$



Gambar 1. Deskripsi parameter hydrogeology untuk (a) aquifer tidak tertekan dan (b) aquifer tertekan, berdasarkan teori dari Strack (1976) (Werner et al., 2012)

Sebagai pembanding dalam memperkirakan panjang IAL, dalam penelitian ini digunakan juga pemodelan 2D (dua dimensi) dengan menggunakan program SEAWAT yang dikhususkan untuk aliran dengan variasi kepadatan dan transportasi larutan. Program ini menggunakan metode beda hingga yang dapat dipergunakan hanya untuk aliran dengan kondisi jenuh air. Deskripsi metode numerik dan persamaan yang dipakai dalam SEAWAT dapat dilihat di Guo and Langevin (2002) dan Langevin et al. (2008).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Geologi dan Hidrogeologi Daerah Penelitian

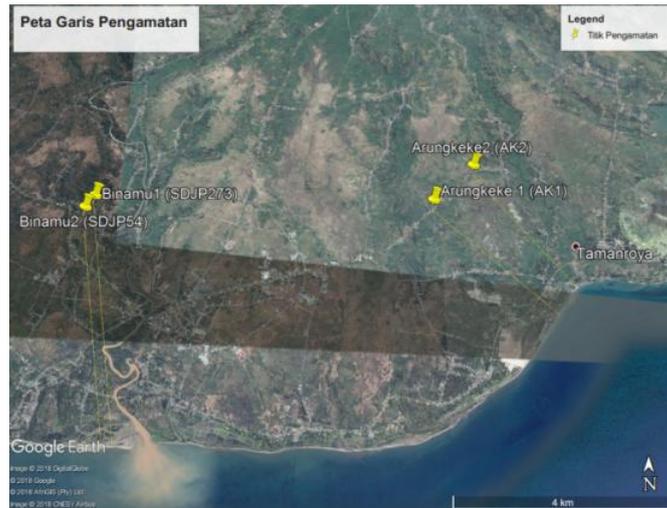
Pada Tabel 1 berikut disajikan data tinggi muka air di 4 (empat) titik pengamatan di masing-masing kecamatan Binamu dan Kecamatan Arungkeke di Kabupaten Jeneponto. Berdasarkan data pengamatan muka air, diketahui bahwa muka air tanah di lokasi pengamatan cukup variatif yang kemungkinan disebabkan oleh kondisi tanah yang heterogen.

Tabel 1. Tinggi muka air di lokasi pengamatan (muka air tanah/MAT dihitung dari muka air laut/MAL)

Kode	Kecamatan	Koordinat		Elevasi MAT dari MAL (m)
		Lintang	Bujur	
Binamu1/SDJP273	Binamu	5°39'25''	119°43'52''	3.6
Binamu2/SDJP54	Binamu	5°39'33.5''	119°43'46''	2.0
Arungkeke1/AK1/TP1	Arungkeke	5°39'28.7''	119°47'42''	9.5
Arungkeke2/AK2/TP2	Arungkeke	5°39'2.4''	119°48'10''	8.7

Konseptualisasi dan Parameterisasi Model Daerah Penelitian

Dalam penelitian ini, penentuan panjang IAL dilakukan hanya pada 4 (empat) potongan melintang pada lokasi-lokasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. dan hanya pada kondisi steady-state. Karena keterbatasan data hidrologi dan hidrogeologi yang tersedia (misalnya tebal aquifer, stratigraphi tanah, recharge dan tampungan spesifik), maka penyederhanaan dilakukan pada beberapa data hidrogeologi tetapi tetap mempertimbangkan data-data sekunder dari penelitian terdahulu. Karena belum ada data boring log detail yang bisa memberikan deskripsi kondisi stratigrafi lapisan tanah di daerah lokasi penelitian secara komprehensif, maka diasumsikan bahwa tipe aquifer di lokasi penelitian adalah aquifer tidak tertekan (unconfined aquifer). Tabel 2 memberikan data-data hidrogeologi yang digunakan dalam analisa IAL pada penelitian ini.



Gambar 2. Peta garis pengamatan IAL (garis pengamatan ditunjukkan dengan garis kuning)

Tabel 2. Data hidrogeologi lokasi penelitian yang digunakan dalam pemodelan

Parameter	Kasus			
	Binamu1	Binamu2	Arungkeke1	Arungkeke2
K (m/d)	5.80	5.80	5.80	5.80
h_s (m)	68	68	64	64
MAT h_f (m)	3.6	2.0	9.5	8.7
x_f (m)	5000	4800	3300	3200
n (-)	0.46	0.46	0.46	0.46
S_y (-)	0.32	0.32	0.32	0.32
α_L (m)	4	4	4	4
α_T (m)	0.4	0.4	0.4	0.4
D_m (m ² /d)	8.6×10^{-5}	8.6×10^{-5}	8.6×10^{-5}	8.6×10^{-5}
δ (-)	0.025	0.025	0.025	0.025
W_{net} (mm/y)	56.70	56.70	56.70	56.70

IAL Dari Metode Analitis

Parameter hidrogeologi yang tertera pada Tabel 3 bersama dengan Persamaan (1), (2), (3), dan (6) digunakan dalam memperkirakan besaran debit aliran air tanah ke laut dan juga panjang teoritis IAL dalam kondisi ‘steady-state’ pada setiap akuifer yang diteliti, yang ditunjukkan pada tabel 3. Hasil ini mewakili kondisi teoritis IAL dalam waktu yang sangat lama (steady-state) berdasarkan pada parameter hidrologi and hidrogeologi saat ini.

Tabel 3. Hasil perhitungan IAL berdasarkan solusi analitis

Kode	Kecamatan	Koordinat		Panjang IAL dari garis pantai (x_T) (m)
		Lintang	Bujur	
Binamu1/SDJP273	Binamu	5°39’25’’	119°43’52’’	607.0
Binamu2/SDJP54	Binamu	5°39’33.5’’	119°43’46’’	850.4
Arungkeke1/AK1/TP1	Arungkeke	5°39’28.7’’	119°47’42’’	234.8
Arungkeke2/AK2/TP2	Arungkeke	5°39’2.4’’	119°48’10’’	250.6

AL Dari Metode Numerik

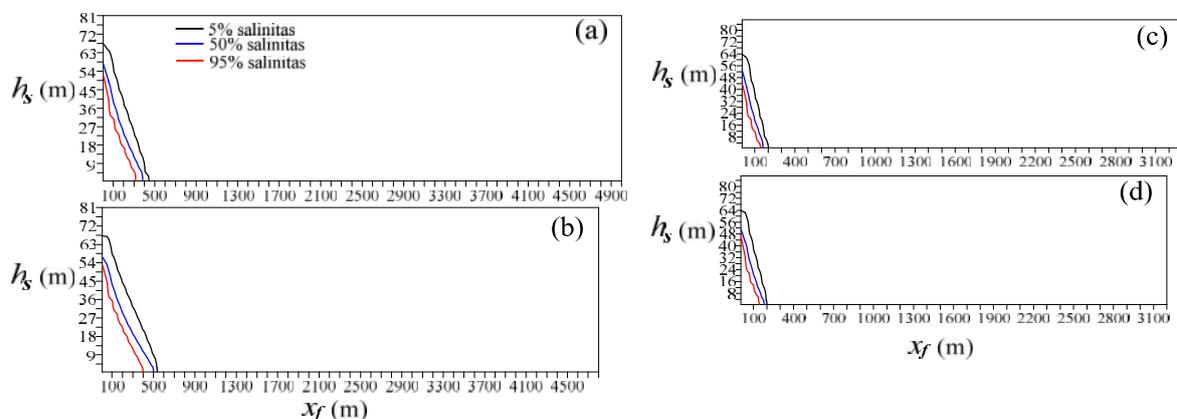
Konseptualisasi aquifer dari keempat lokasi penelitian yang digunakan dalam model numerik dikonfigurasi sebagai aquifer terpisah untuk aquifer Binamu1, Binamu2, Arungkeke1 dan Arungkeke2 dan

dimodelkan dalam dua dimensi dan potongan melintang tegak lurus ke arah pantai. Dalam penelitian ini, semua representasi model numerik (kondisi batas) diasumsikan sebagai kondisi “head controlled” (kondisi batas Dirichlet) (Werner and Simmons, 2009) dan tinggi energinya dianggap tetap meskipun terdapat efek pemompaan air tanah.

Domain model didiskritisasi secara seragam dalam melakukan simulasi “steady-state” untuk keempat aquifer, di mana untuk aquifer Binamu1 menggunakan 500 kolom vertikal dengan lebar 10 m dan 76 lapisan horizontal dengan tebal 1 m, aquifer Binamu2 menggunakan 480 kolom vertikal dengan lebar 10 m dan 76 lapisan horizontal dengan tebal 1 m, aquifer Arungkeke1 menggunakan 330 kolom vertikal dengan lebar 10 m dan 78 lapisan horizontal dengan tebal 1 m, sementara aquifer Arungkeke2 menggunakan 320 kolom vertikal dan 78 lapisan horizontal dengan tebal 1 m. Diskritisasi ini konsisten dengan Peclet number lebih kecil dari 4, yang direkomendasikan oleh Voss and Souza (1987) untuk mereduksi osilasi numerik. Kondisi “tinggi energy tertentu” diasumsikan pada kondisi batas muka air tanah di daratan dan kondisi “konsentrasi konstan” diasumsikan pada kondisi batas daerah pantai, dengan konsentrasi air laut sebesar 35 kg/m^3 . Preconditioned Conjugate-Gradient 2 (PCG2) and General Conjugate Gradient (GCG) berturut-turut digunakan sebagai solusi untuk persamaan aliran dan transportasi larutan. Skema differensial hingga digunakan untuk solusi adveksi dengan nomor Courant sebesar 0.75. Penggunaan nomor Courant lebih kecil atau sama dengan 1 biasanya dibutuhkan untuk membatasi terjadinya disperse numerik dalam rangka mencapai hasil yang lebih akurat (Zheng and Bennet, 2002).

Untuk nilai parameter yang tertera pada Tabel 2, kondisi “steady-state” untuk aquifer Binamu1, Binamu2, Arungkeke1 dan Arungkeke2 dicapai dengan menggunakan waktu yang sangat lama (300 tahun), sampai ujung IAL berada pada posisi stabil (tidak mengalami perubahan posisi selama durasi pengamatan). Untuk keempat aquifer yang diamati, nilai x_T yang diperoleh lebih kecil dibandingkan dengan hasil yang diperoleh dari solusi analitis. Prediksi IAL yang lebih besar oleh solusi analitis (metode garis pertemuan tipis) sudah diperkirakan akan terjadi (misalnya dari kasus Pool and Carrera, 2011), karena garis batas intrusi akan tertekan ke arah laut akibat adanya sirkulasi aliran dalam zona pertemuan antara air tawar dan air laut akibat pencampuran antara air laut dan air tawar yang dalam hal ini dipertimbangkan dalam metode numerik tetapi diabaikan dalam solusi analitis.

Seperti yang dijelaskan sebelumnya bahwa nilai-nilai parameter yang digunakan dalam simulasi numerik SEAWAT ditunjukkan pada Tabel 2. Untuk keperluan penentuan jarak intrusi dan perbandingan dengan solusi analitis, ujung IAL (x_T) didefinisikan sebagai garis perpotongan antara garis 50% konsentrasi isochlor dengan dasar aquifer, akan tetapi garis 5% dan 95% konsentrasi isochlor tetap ditampilkan sebagai tambahan informasi. Seperti yang terlihat pada Gambar 3, besar nilai x_T yang diperoleh untuk aquifer Binamu1, Binamu2, Arungkeke1 dan Arungkeke2 adalah 390, 510, 160, dan 190 m berturut-turut. Berbeda dengan Arungkeke1 dan Arungkeke 2 yang nilai panjang IALnya hampir sama, untuk Binamu1 dan Binamu2, meskipun lokasi pengamatannya hanya terpisah sekitar ratusan meter, akan tetapi nilai x_T yang diperoleh dari solusi numerik dan solusi analitis cukup berbeda. Hal ini berkorelasi dengan hasil pengamatan tinggi muka air yang cukup berbeda antara aquifer Binamu1 dan Binamu2 (sekitar 1.6 m) yang diperoleh dari survey lapangan, yang kemungkinan besar hal ini diakibatkan oleh pengaruh heterogenitas tanah yang tidak diperhitungkan dalam penelitian ini.



Gambar 3. Hasil simulasi numerik SEAWAT untuk prediksi IAL pada (a) aquifer Binamu1, (b) aquifer Binamu2, (c) aquifer Arungkeke1, dan (d) aquifer Arungkeke2, dalam kondisi ‘steady-state’.

4. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa terdapat tinggi muka air yang variatif pada lokasi-lokasi yang cukup berdekatan di daerah penelitian yaitu misalnya tinggi MAT di Binamu1 dan Binamu2 yang jaraknya hanya sekitar ratusan meter tetapi memiliki deviasi MAT berkisar 1.6 m. Hal ini kemungkinan besar disebabkan oleh heterogenitas lapisan tanah di lokasi penelitian yang datanya belum diketahui secara detail.

Dari hasil penelitian ini diketahui bahwa nilai IAL maksimum terjadi pada akuifer Binamu2 di mana solusi analitis dan simulasi numerik menghasilkan panjang IAL sebesar 850.4 m and 510 m, berturut-turut. Secara umum dari hasil penelitian diperoleh hasil prediksi IAL yang cukup berbeda antara solusi analitis dan solusi numerik di mana nilai IAL dari solusi analitis lebih besar dibandingkan dengan nilai IAL dari solusi numerik. Hal ini disebabkan oleh perbedaan peninjauan dari kedua metode tersebut, yaitu keberadaan zona pencampuran antara air laut dan air tawar yang diperhitungkan dalam metode numerik (diabaikan dalam solusi analitis) memberikan “efek dorong” ke arah laut (akibat pengaruh sirkulasi aliran dalam zona pencampuran) terhadap batas IAL. Meskipun ada perbedaan antara solusi analitis dan numerik, namun dari hasil penelitian ini dapat diketahui bahwa hasil dari solusi analitis dapat tetap digunakan dalam penilaian awal IAL karena mampu memberikan hasil secara cepat. Berbeda dengan solusi numerik, dibutuhkan waktu yang lebih lama untuk menyiapkan sumber daya yang dibutuhkan untuk melakukan simulasi pemodelan dalam rangka prediksi IAL (misalnya software dan penyiapan domain model).

Sebaiknya dilakukan penelitian lanjutan dengan melibatkan beberapa parameter yang berbeda dengan yang digunakan dalam penelitian ini, misalnya heterogenitas tanah dan vegetasi dan demikian pula dengan data penggunaan air tanah di daerah penelitian agar memungkinkan untuk melakukan prediksi IAL sampai beberapa ratus tahun ke depan dengan berdasarkan pada kondisi eksisting yang ada.

DAFTAR PUSTAKA

- Badaruddin, S. and A. D. Werner. 2015. Water Table Salinization Due to Seawater Intrusion. *Water Resources Research*.
- Cheng, A.H.D. and D. Ouazar 1999. *Analytical Solutions in: Bear, J., Cheng, A.H.D., Sorek, S., Ouazar, D., Herrera, I. (Eds.), Seawater Intrusion in Coastal Aquifers: Concepts, Methods, and practices*. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- FAO. 1997. *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers: Guidelines for Study, Monitoring and Control*, FAO Water Reports no. 11. Italy: Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations, Rome.
- Guo, W. and C. Langevin. 2002. *User's Guide to SEAWAT: A Computer Program for the Simulation of Three-Dimensional Variable-Density Ground-Water Flow: USGS Techniques of Water Resources Investigations*, Book 6, Chapter A7.
- Langevin, C.D. at al. 2008. *SEAWAT Version 4: A Computer Program for Simulation of Multi-Species Solute and Heat Transport: USGS Techniques and Methods*, Book 6, Chapter A22.
- Ozyurt, G. 2007. *Vulnerability of Coastal Areas to Sea Level Rise: A Case Study on Goksu Delta*, Masters Thesis. Ankara, Turkey: Department of Civil Engineering, Middle East Technical University.
- Pool, M. and J. Carrera. 2011. A Correction Factor to Account for Mixing in GhybenHerzberg and Critical Pumping Rate Approximations of Seawater intrusion in Coastal Aquifers. *Water Resources Research*, 47.
- Post, V. 2005. Fresh and Saline Groundwater Interaction in Coastal Aquifers: Is Our Technology Ready for the Problems Ahead? *Hydrogeology Journal*, 13: 120—123.
- Strack, O.D.L. 1976. Single-Potential Solution for Regional Interface Problems in Coastal Aquifers. *Water Resources Research*, 12: 1165—1174.
- Syamsuddin, dkk. 2009. *Simulasi Fluktuasi Muka Air Tanah di Daerah Pesisir Jeneponto*. Thesis. Makassar: Universitas Hasanuddin.
- Werner, A. D. et al. 2012. Vulnerability Indicators of Sea Water Intrusion. *Ground Water*, 50 (1): 48-58.
- Zheng, C. and G.D Bennett. 2002. *Applied Contaminant Transport Modeling*. 2nd Edition. New York: Wiley Interscience,