

PEMODELAN PENGARUH PEMOMPAAN SUMUR PRODUKSI PADA AKIFER DENGAN MUKA AIR TANAH MIRING

Muhammad Ramli^{1,*}, Muhram Sula Idris¹, Wihdah¹, Aswad Almuqarram¹,
St. Hamdana Khaerunnisa¹

¹)Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin,
Jl. Poros Malino Km.6 Sungguminasa, 92171

^{*})Email: ramli@unhas.ac.id

Abstract

The main issue in the utilization of ground water is always related to the decrease in water table or piezometric level. The decreasing of groundwater level is often accompanied by number of environmental impacts such as; subsidence, sea water intrusion, or reduced water from residents' wells and surface water bodies. Therefore, an experimental and numerical study was carried out to learn phenomena of cone depression resulted by groundwater production well. The experimental study of physical modeling used the S12-MKII Hydrology Study System equipment, and numerical modeling used Groundwater Modeling Software - Modflow. The modeling results were verified by analytical estimation. The results indicated that the groundwater withdrawn obtained with physical model and numerical simulation is bigger than estimated by analytical equation, particularly in estimating groundwater divide to a well.

Kata kunci : *aquifer, cone depression, groundwater, pumping*

PENDAHULUAN

Air tanah merupakan sumber air tawar terbesar yang dimanfaatkan di berbagai daerah. Daerah dengan ketersediaan air permukaan terbatas, kebutuhan air domestik, pertanian, dan industri hanya dapat dipenuhi melalui pemanfaatan air tanah. Pemanfaatan air tanah sering menyebabkan masalah lingkungan khususnya bilamana laju pemompaan yang lebih cepat daripada pengisian ulang. Berdasarkan atas fenomena tersebut, sistem air tanah dapat dikategorikan atas dua kondisi, yaitu pemompaan yang akan mencapai kondisi keseimbangan baru, dan tekanan pemompaan yang sangat besar sehingga keseimbangan baru tidak mungkin terjadi. Sistem air tanah yang

mencapai kesetimbangan baru dapat dilakukan pemompaan tanpa batas waktu, sedangkan sistem air tanah yang tidak dapat mencapai kondisi kesetimbangan baru akan menyebabkan pelebaran kerucut depresi yang semakin meluas. Sistem kedua ini merupakan sistem air tanah besar yang dapat mencapai kondisi keseimbangan baru dalam waktu lama. Sistem besar ini menjadi tantangan bagi pengelola air, terutama ketika ada komitmen yang kuat untuk mencapai keadaan keseimbangan baru di mana kedudukan muka air atau bidang piesometer akan stabil dan sistem dapat dipertahankan tanpa batas waktu (Bredehoeft and Durbin, 2009). Pelebaran kerucut depresi

pemompaan dapat mempengaruhi kondisi air permukaan, termasuk danau, kolam, sungai, anak sungai, aliran, mata air, lahan basah, dan muara dengan dampak bervariasi dari minimal hingga bencana.

Model komputasi numerik merupakan alat paling penting dalam pengelolaan, perlindungan, dan remediasi sumber daya air tanah. Namun demikian, model merupakan penyederhaan realitas sehingga menjadi tidak sempurna. Ahli statistik George Box menegaskan bahwa “semua model salah, tetapi berguna”. Oleh karena itu, penerapan dan penggunaan model sangat tergantung pada tujuannya. Tantangannya adalah bagaimana menyajikan kondisi alam dalam bentuk yang disederhanakan tanpa mengorbankan akurasi atau membuat asumsi yang tidak valid. Penyajian representasi terbaik dari realitas kondisi alam dilakukan dengan mengumpulkan data sebanyak mungkin (Baalousha, 2008). Model komputasi numerik harus selalu dibandingkan dan dikalibrasi dengan pengukuran eksperimental, serta dalam prakteknya sering dikombinasikan metode geofisika (Vazques-Baez et al, 2019).

Dalam beberapa tahun terakhir, pengelolaan air tanah ditekankan pada pencegahan polusi dan remediasi akuifer. Hal ini menyebabkan ahli hidrogeologi memfokuskan penelitian ke pengertian yang lebih tepat terhadap beberapa parameter dasar, seperti: radius pengaruh, zona tangkapan, zona pengaruh dan waktu pergerakan air (Fileccia, 2015). Pemahaman tentang

parameter tersebut memungkinkan untuk menentukan area perlindungan pada sekitar sumur pompa. Dalam sudut pandang praktis, pemahaman dimensi akuifer yang dipengaruhi oleh pemompaan atau jarak pengimbuhan air ke sumur pemompaan menjadi penting, sedangkan penurunan muka air tanah yang terjadi dalam sumur dapat diabaikan. Luas batas zona tangkapan sumur pemompaan atau jari-jari pengaruh dapat ditentukan dengan menggunakan parameter hidrogeologis melalui berbagai prosedur, dari rumus empiris sederhana hingga model analitik dan numerik yang rumit.

Penurunan muka air tanah atau bidang piezometer di dalam daerah pengaruh pemompaan sering juga dikenal dengan istilah kerucut depresi. Bentuk kerucut depresi tersebut tergantung pada berbagai faktor, diantaranya; debit pemompaan, konduktifitas hidrolika akifer, storatifitas akifer, landaian hidrolika air tanah, ukuran butir material akifer, besar imbuhan, dan jarak titik pemompaan dari sumber air permukaan. Studi tentang penurunan permukaan air akibat pemompaan air tanah umumnya dikaji dengan mengasumsikan kondisi muka air tanah yang datar, tetapi pada kenyataan semua air tanah di alam memiliki kemiringan. Oleh karena itu, penelitian ini mencoba memodelkan penurunan yang terjadi pada kondisi muka air tanah yang memiliki kemiringan atau nilai kelandaian hidrolika. Studi dilakukan dengan menggunakan model fisik dalam skala laboratorium dan

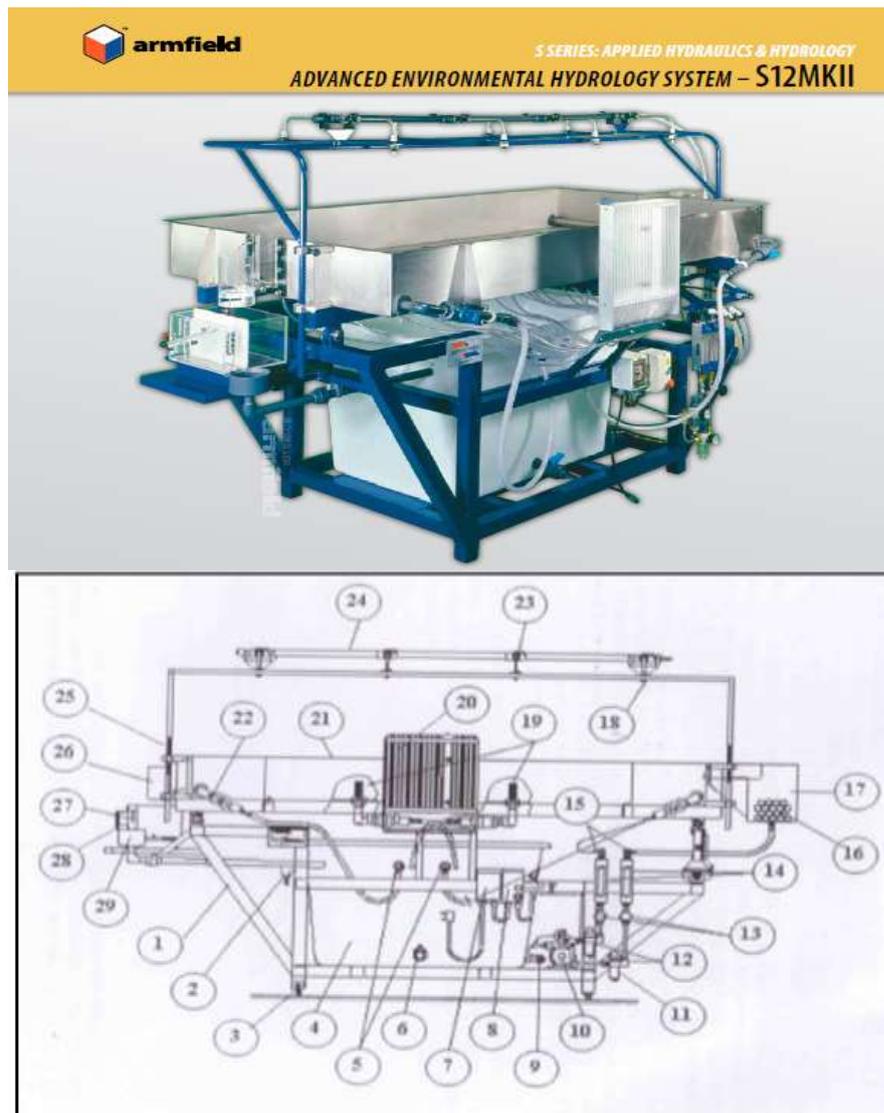
model numerik untuk membandingkan hasil yang diperoleh untuk menjelaskan tentang fenomena yang terjadi.

METODE PENELITIAN

Peralatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan model fisik dan model numerik untuk merepresentasikan dan mensimulasikan aliran dalam sistem

akuifer. Model fisik merupakan representasi kondisi akuifer dan aliran air tanah melalui suatu kotak pasir, sedangkan model numerik mensimulasikan aliran air tanah melalui bentuk persamaan matematik dengan solusi metode numerik. Model fisik menggunakan alat *S12-MKII Hydrology System*, dan model numerik menggunakan software *Groundwater Modeling System (GMS)*.

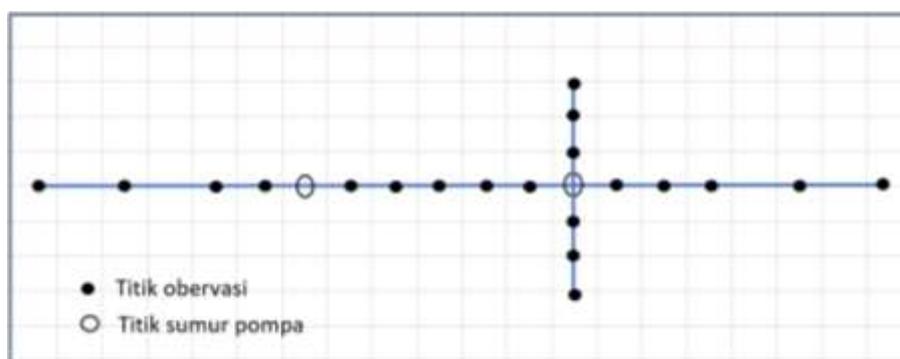


Gambar 1. Foto Peralatan *S12-MKII Hydrology Study System* beserta kelengkapannya.

Alat *S12-MKII Hydrology Study System* didesain untuk menunjukkan proses hidrologi dalam skala kecil untuk proses abstraksi air tanah dari sumur. Komponen utama peralatan *S12-MKII* ini terdiri atas: kotak baja berukuran 2,0 m x 1,0 m untuk memodelkan akuifer air tanah, dua flowmeters (3,0 liter/min dan 5,0 liter/min) untuk mengukur dan menyesuaikan aliran inlet (debit aliran bawah tanah), dua titik sumur dan 20 manometer pengukur tekanan (tinggi muka air tanah). Pengaturan kemiringan lapisan akuifer dapat dilakukan sistem pengait ganda yang terhubung dengan kotak baja.

Pemodelan akuifer dilakukan dengan menempatkan material pasir atau bahan granular lain ke dalam kotak baja dari stainless (21). Pada kedua ujung kotak baja dipasang pipa

perforasi selebar kotak (22) sebagai pensuplai air ke dalam material akuifer dan sebuah diffuser pada ujung kotak (26) untuk pelepasan air. Sejumlah rangkaian selang pada dasar kotak pasir terhubung ke multi-tabung manometer (20) yang memungkinkan untuk mengetahui kedudukan permukaan air (permukaan freatik). Material granular yang digunakan dalam kotak pasir seharusnya bebas dari sedimen halus yang secara bertahap dapat memblokir bahan filter yang digunakan pada selang air. Ketinggian pada setiap tabung dapat dibaca dengan menggeser mistar skala di sepanjang jalur pada bagian atas manometer. Referensi nomor / jarak dari selang dan posisi sumur (19) seperti pada Gambar 2 berikut. Dalam penelitian ini hanya dianalisis kondisi pada arah memanjang model.



Gambar 2. Lokasi titik observasi dan sumur dalam tangki pasir dengan satu grid mewakili jarak 10 cm.

Sistem aliran air tanah diatur melalui sebuah tangki air (4) dan pompa sentrifugal (10) dipasang pada alat di bawah kotak pasir untuk mensuplai air. Air keluar dari kotak pasir melalui berbagai outlet dan kembali ke tangki air secara gravitasi

untuk digunakan kembali. Air dari pompa sentrifugal melewati dua pengaturan input paralel, masing-masing dilengkapi filter (12), tekanan regulator (11), katup kontrol aliran (13) dan flowmeter (14). Regulator tekanan di setiap input memastikan

bahwa aliran ini tidak dipengaruhi oleh perubahan input lain. Outlet dari setiap input tersambung dengan konektor pelepasan cepat (15) yang memungkinkan air untuk mencapai ujung kotak baja, nozel atau inlet tangki yang diperlukan melalui koneksi flexibel yang sesuai. Konektor pelepasan cepat memungkinkan perubahan cepat terhadap konfigurasi tanpa perlu alat bantu.

Simulasi numerik menggunakan *Groundwater Modeling Software (GMS)* versi 9.2.9 yang merupakan grafik komprehensif untuk melakukan simulasi air tanah. Seluruhnya sistem GMS merupakan grafik antarmuka pengguna dengan sejumlah kode analisis (MODFLOW, MT3DMS, dll.). Beberapa tipe model didukung dan difasilitasi untuk berbagi informasi antar model dan tipe data yang berbeda. *Tool* disediakan untuk karakterisasi situs, model konseptual, pembentukan mesh dan grid, geostatistik, dan *post-processing*. Analisis numerik dilakukan dengan program yang terpisah dari GMS. Namun demikian, GMS dapat membaca dan menampilkan hasil analisis dari *software* numerik. GMS memiliki opsi untuk menjalankan model dan menampilkan hasil secara real selama simulasi. Model numerik yang didukung dalam GMS versi 9.2.9 meliputi MODFLOW, MODPATH, MT3DMS, RT3D, ART3D, SEAM3D, UTCHEM, PEST, SEAWAT,

MODAEM, UTEXAS, SEEP2D, FEMWATER, and T-PROGS. Namun model numerik yang digunakan dalam simulasi ini adalah MODFLOW.

Penentuan karakteristik dan parameter material akuifer model.

Pengujian dilakukan dengan menempatkan material pasir yang telah dibersihkan dari material berukuran lempung-lanau pada kotak baja (21) di alat *S12-MKII Hydrology Study System*. Karakteristik fisik material yang digunakan tersebut ditentukan melalui pengayakan mekanis. Pada kedua pipa perforasi (22) yang terletak pada kedua ujung kotak baja dialiri air debit tertentu hingga terjadi kondisi tunak (langgeng). Kondisi tunak diidentifikasi dengan tidak adanya perubahan tinggi muka air pada manometer ukur (20). Kondisi tunak dicapai dengan menyeimbangkan antara aliran masuk dari kedua pipa perforasi dengan debit keluaran pada saluran pelepasan (26). Pada saat kondisi tunak tercapai, dilakukan pelepasan air melalui satu katup pada dasar kotak pasir (representasi sumur pada Gambar 2) hingga terbentuk kondisi tunak baru. Besar perubahan kedudukan muka air pada manometer dinyatakan sebagai penurunan muka air tanah. Nilai perubahan tersebut digunakan untuk perhitungan nilai konduktivitas material melalui Persamaan Thiem (Fetter, 2001).



Gambar 3. Penempatan material pada kotak baja untuk akuifer bebas (kiri), dan akuifer tertekan (kanan)

Uji eksperimen pengaruh pemompaan terhadap penurunan muka air tanah

Simulasi pengaruh pemompaan terhadap perkembangan kerucut depresi pemompaan dilakukan untuk jenis akuifer bebas dan akuifer tertekan. Akuifer bebas dimodelkan dengan menempatkan pasir ke dalam kotak baja. Akuifer tertekan dimodelkan dengan menambahkan lapisan penutup berupa material plastik sebagai lapisan kedap air, dan di atas plastik tersebut diisi dengan material lain sebagai pemberat. Dimensi akuifer yang dimodelkan adalah panjang 200 cm, lebar 100 cm, dan ketebalan 12,5 cm. Sebagaimana halnya di alam, aliran air tanah akan mengalir mengikuti landaian hidrolika, sehingga dalam pemodelan ini pengimbuhan aliran air tanah melalui salah satu pipa perforasi yang berada pada ujung kotak dengan sisi yang berbeda dengan saluran pelepasan air. Kedudukan muka air pada tabung manometer menunjukkan kemiringan. Simulasi pemompaan dilakukan dengan menggunakan satu sumur pompa yang berada pada jarak

120 cm dari titik observasi paling kiri (Gambar 2). Sumur pompa tersebut dilengkapi dengan katup untuk pengaturan debit pelepasan sebagai debit pemompaan. Pengamatan pengaruh pemompaan dilakukan setelah terjadi kondisi tunak dengan memperhatikan waktu pemompaan yang telah berlangsung.

Simulasi Numerik pengaruh pemompaan terhadap penurunan muka air tanah

Model konseptual untuk simulasi numerik penurunan muka air tanah akibat pemompaan disesuaikan dengan model fisik yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya. Tipe akuifer yang dianalisis meliputi akuifer bebas dan akuifer tertekan. Dimensi akuifer yang disimulasikan juga dimensi yang sama dengan panjang, lebar, dan ketebalan sebesar 200 cm x 100 cm x 12,5 cm. Parameter hidrogeologi akuifer menggunakan hasil data eksperimen. Selanjutnya pendefinisian neraca air pada kedua akuifer adalah imbuhan air ke dalam akuifer hanya berupa aliran bawah tanah pada sisi hulu dengan

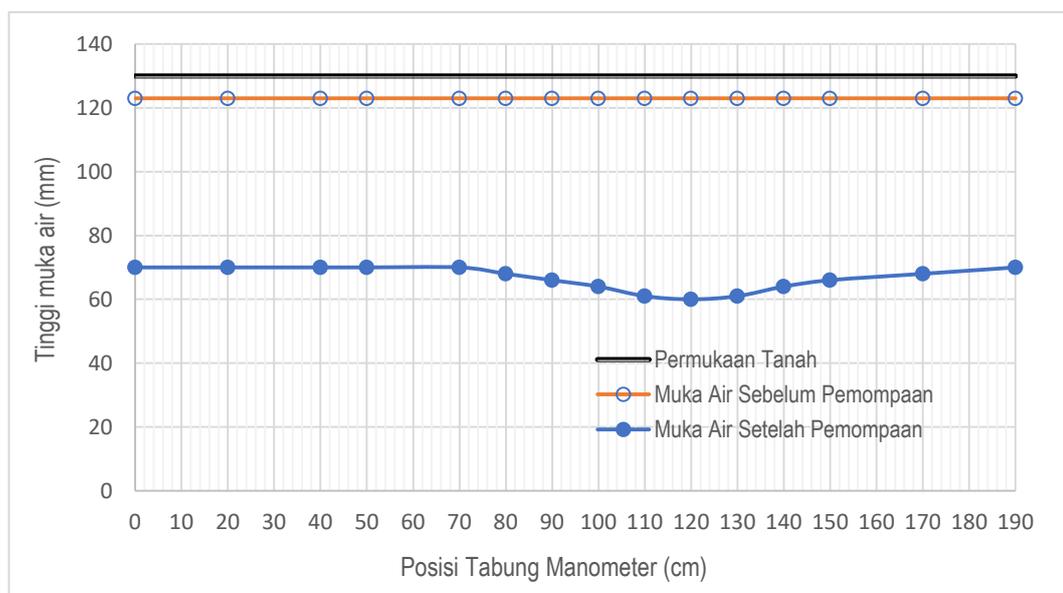
debit aliran tetap, dan pada bagian hilir akifer berupa kondisi tinggi tekanan hidrolika konstan. Simulasi dilakukan untuk mencapai kondisi tunak, baik dengan tanpa pemompaan maupun setelah ada pemompaan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Material Model Akuifer

Ukuran material rata-rata yang digunakan untuk memodelkan akifer

berdasarkan hasil ayak mekanik merupakan pasir kasar. Kurva distribusi ukuran butir menunjukkan material tersebut memiliki nilai $d_{60} = 4,8$ mm, dan $d_{10} = 1,70$ mm. Dengan demikian material tersebut memiliki koefisien keseragaman ($C_u = d_{60}/d_{10}$) = 2,82 yang dikategorikan sebagai material yang seragam karena nilai C_u lebih kecil dari 5.0 (McCarthy, 1993). Ukuran butir efektif (d_{10}) = 1,70 mm yang merupakan material pasir sedang.



Gambar 4. Kedudukan muka air pada uji konduktifitas hidrolika material

Perhitungan konduktifitas hidrolika menggunakan persamaan Theim, untuk kondisi air tanah dalam kondisi tunak dan posisi lapisan pembawa air horizontal. Persamaan Thiem untuk akuifer bebas (Fetter, 2001)

$$k = \frac{Q_0}{\pi \cdot (b_2^2 - b_1^2)} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (1)$$

Dimana; k adalah konduktifitas hidrolika (L/T), Q adalah debit pemompaan (L^3/T), b_1 adalah ketebalan zone jenuh pada jarak $r_1(L)$,

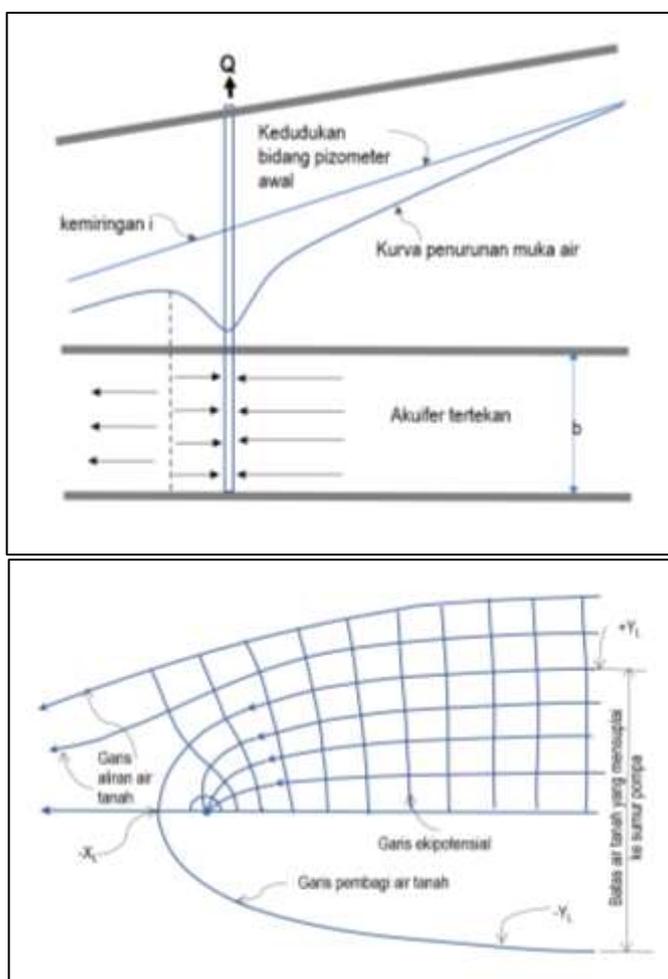
dan b_2 adalah ketebalan zona jenuh pada jarak r_2 (L). Hasil uji konduktifitas hidrolika akuifer diperoleh nilai yang bervariasi 2,421 – 2,587 cm/detik atau dengan nilai rata-rata 2,504 cm/detik

Estimasi Daerah Pengaruh Pemompaan dengan Persamaan Empiris

Analisis empiris tentang penurunan muka air tanah di sekitar sumur pemompaan pada umumnya

diasumsikan sebagai permukaan air tanah horizontal. Asumsi ini tidak sesuai dengan kondisi di alam, dimana air tanah selalu bergerak mengikuti arah kemiringan muka air tanah. Dengan demikian, penerapan

persamaan aliran radial Dupuit untuk menggambarkan pola aliran radial menjadi terdistorsi membentuk daerah pengaruh seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5 (Todd and Mays, 2005)



Gambar 5. Kenampakan aliran air tanah ke sumur pemompaan pada bidang piezometer miring (Todd and Mays, 2005)

Batas daerah pengaruh pemompaan ditandai (y_L) menunjukkan batas wilayah air tanah yang mensuplai sumur pemompaan yang dapat dinyatakan dengan persamaan;

$$-\frac{y}{x} = \tan\left(\frac{2\pi K b i}{Q} y\right) \quad (2)$$

di mana Q adalah debit pemompaan (L^3/T), b adalah ketebalan akuifer (L),

I adalah landaian hidrolika (-), dan K adalah konduktivitas hidrolik. Dari persamaan tersebut dapat ditentukan batas daerah pengaruh pada sisi sumur (y_L), dan batas daerah pengaruh di bagian hilir sumur (x_L) sebagai berikut;

$$y_L = \pm \frac{Q}{2\pi K b i} \quad (3)$$

$$\text{dan } x_L = -\frac{Q}{2\pi K b i} \quad (4)$$

Kondisi sistem akuifer dan aliran air tanah yang dianalisis dalam artikel ini adalah akuifer bebas dengan ketebalan akuifer 12,50 cm, nilai konduktifitas hidrolika 2,504 cm/detik. Pengimbuhan aliran air tanah pada salah satu ujung kotak pasir dengan debit sebesar 2000 cm³/menit untuk akuifer bebas diperoleh kelandaian hidrolika dalam kondisi tunak sebesar 0,079, sedangkan untuk akuifer tertekan menggunakan debit imbuhan

sebesar 2500 cm³/detik dan diperoleh kelandaian hidrolika 0,092. Dalam simulasi pemompaan untuk kedua akuifer menggunakan tiga nilai debit berbeda. Akuifer bebas dipompa dengan debit 18,34 cm³/detik, 38,96 cm³/detik, dan 54,02 cm³/detik, sedangkan akuifer tertekan dengan debit 15,74 cm³/detik, 18,87 cm³/detik, dan 44,94 cm³/detik. Hasil perhitungan jarak pensuplai air sumur pada bagian hilir dituliskan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perhitungan jari-jari pengaruh pemompaan

Jenis Akuifer	K (cm/det)	B (cm)	I -	Q (cm ³ /detik)	X _L (cm)
Akuifer bebas	2,504	12,5	0.079	18.34	2.35
				38.96	4.99
				54.02	6.91
Akuifer tertekan	2,504	12,5	0.092	15.74	1.74
				18.87	2.09
				44.94	4.97

Pemodelan Fisik dan Numerik Daerah Pengaruh Pemompaan

Model merupakan representasi penyederhaan dari kondisi alam yang kompleks. Model konseptual dari sistem air tanah menyederhanakan dan merangkum apa yang diketahui tentang hidrogeologi dalam bentuk teks tertulis, diagram alir, potongan melintang, diagram blok, dan tabel. Suatu model air tanah adalah model yang secara kuantitatif mewakili kedudukan muka air tanah/bidang piezometer dalam ruang dan waktu dalam representasi yang disederhanakan dari kondisi hidrogeologis yang kompleks di bawah permukaan. Secara garis besar, model air tanah dapat dibagi menjadi fisik

model (laboratorium) dan model matematika/numerik (Anderson and Woessner, 2015).

Model fisik dapat berupa tangki dan kolom laboratorium yang dikemas dengan bahan berpori (biasanya pasir) tempat tinggi muka air dan aliran air tanah diukur secara langsung. Model matematika berdasarkan pada proses yang terdiri dari persamaan pengatur, kondisi batas, waktu, dan kondisi awal terhadap masalah yang dimodelkan. Model numerik disadari sebagai salah satu alat yang efisien untuk simulasi aliran air tanah. Simulasi dilakukan dengan menyederhanakan kondisi real yang tidak mempengaruhi akurasi dan kemampuan output model untuk memenuhi tujuan yang dimaksud.

Tujuan tersebut menjadi pertimbangan dalam merancang model konseptual dengan baik. Untuk membangun model konseptual yang tepat, data hidrogeologis harus cukup dan dapat diandalkan. Kalibrasi dan verifikasi adalah langkah terakhir dalam pemodelan sebelumnya menulis laporan model akhir.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa model eksperimen menggunakan kotak pasir berukuran panjang 200 cm, lebar 100 cm, dan tebal akuifer 12,5 cm. Model fisik

dilengkapi dengan 2 titik sumur pemompaan dan 20 titik observasi. Penyesuaian model fisik dan model numerik dilakukan pengaturan posisi grid. Software model numerik yang digunakan menempatkan posisi kedudukan muka air tanah pada bagian tengah grid sehingga daerah model fisik dideskripsikan dengan 40 x 9 grid. Penomoran grid diawali dari sudut kiri atas dan berakhir pada sudut kanan bawah. Hubungan antara posisi titik observasi dengan posisi node ditunjukkan pada Tabel 2.

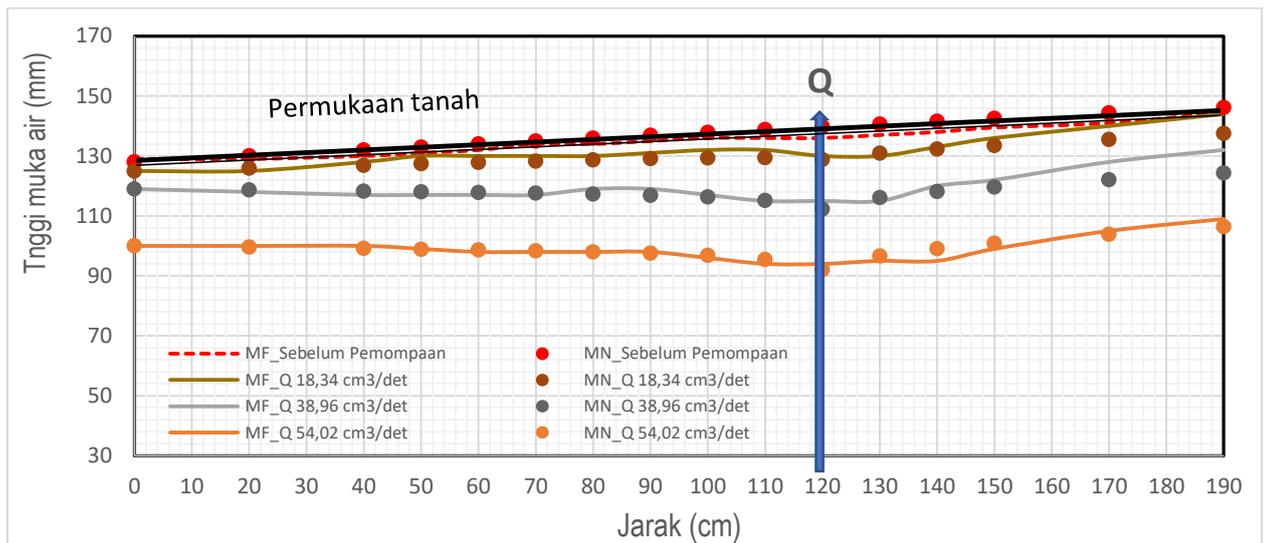
Tabel 2. Kesesuaian titik observasi pada model fisik dan grid model numerik

Titik Observasi	Posisi Model Fisik		Nomor Grid	Titik Observasi	Posisi Model Fisik		Nomor Grid
	x	y			x	y	
1	5	50	81	8	105	50	91
2	25	50	83	9	115	50	92
3	45	50	85	10	135	50	94
4	55	50	86	11	145	50	95
5	50	50	88	12	155	50	96
6	85	50	89	13	175	50	98
7	95	50	90	14	195	50	100

Penomena pada Akuifer Bebas

Pemodelan fisik maupun numerik dilakukan untuk dua kondisi akuifer yaitu akuifer bebas dan akuifer tertekan. Pada uji akuifer bebas, akuifer dimodelkan dengan kondisi akuifer menerima imbuhan dari aliran sebesar sebesar 2 liter/menit. Tinggi muka air tanah mencapai kondisi tunak pada pembacaan manometer 129 mm pada manometer 1 hingga 144 mm pada manometer 20, yang membentuk

nilai landaian hidrolika 0,076. Simulasi pemompaan dilakukan dengan tiga nilai debit berbeda, yaitu; 18,34 cm³/detik, 38,96 cm³/detik, dan 54,02 cm³/detik. Pemompaan dengan debit 18,34 cm³/detik menunjukkan kedudukan muka air 125-144 mm, sedangkan untuk debit 38,96 cm³/detik pada elevasi 115 – 132 mm, dan debit 54,02 cm³/detik berada pada 94 – 109 mm.



Gambar 6. Perbandingan nilai muka air pada simulasi model fisik (MF) dan model numerik (MN) untuk akuifer bebas

Pemodelan numerik untuk kondisi tersebut dengan 153 grid berukuran seragam yaitu 10,00 cm x 11,11 cm. Imbuan ke dalam akifer pada sisi kanan domain berupa aliran bawah tanah dinyatakan sebagai imbuan sebesar 2000 cm³/menit atau 0,033 cm³/detik/nod. Kondisi awal dengan nilai tinggi muka air untuk semua nod sebesar 12,50 cm. Kondisi tunak tercapai dengan elevasi muka air tanah bervariasi dari 128,00 cm – 146,15 mm. Nilai *mean error* (ME) sebesar -2,14 mm, dan *mean absolute error* (MAE) sebesar 2,26 mm. Simulasi dengan debit pemompaan 18,34 cm³/detik menunjukkan posisi muka air tanah dalam kondisi tunak bervariasi 125,00 mm – 137,49 mm dengan nilai ME sebesar 1,86 mm dan MAE sebesar 2,09 mm. Simulasi dengan debit 38,96 cm³/detik diperoleh nilai kedudukan muka air tanah 112,80 – 124,32 mm dengan nilai ME sebesar 1,23 dan MAE sebesar 1,90. Simulasi dengan debit 54,02 cm³/detik diperoleh nilai

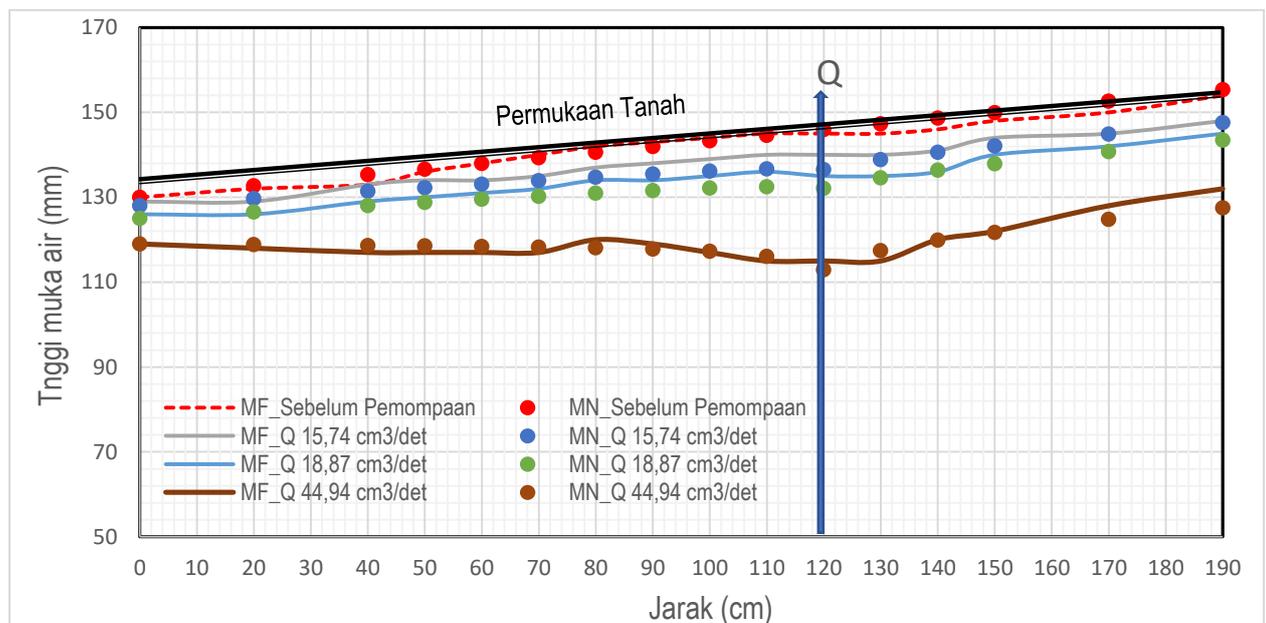
kedudukan muka air bervariasi 96,6 mm – 106,38 mm dengan nilai ME - 0,20 dan MAE sebesar 1,16 mm.

Hasil pemodelan fisik dan simulasi numerik menunjukkan kesesuaian nilai yang baik. Ketiga debit pemompaan menyebabkan penurunan muka air hingga ke batas model fisik. Namun demikian, kedua model menunjukkan perbedaan daerah pensuplai air ke dalam sumur pada bagian hilir sumur pemompaan. Dengan model fisik, jarak pensuplai air ke dalam sumur 10 cm untuk debit 18,34 cm³/detik, 30 cm untuk debit 38,96 cm³/detik dan debit 54,02 cm³/detik. Daerah pensuplai air ke sumur pemompaan berjarak masing-masing 10 cm untuk debit pemompaan 18,34 cm³/detik, 20 cm untuk debit 38,96 cm³/detik, dan 30 cm untuk debit 54,02 cm³/detik. Jarak ini lebih besar daripada estimasi dengan menggunakan Persamaan 4 dengan nilai untuk ketiga debit lebih kecil dari 10 cm.

Penomena pada Akuifer Tertekan

Akuifer tertekan dimodelkan dengan pengimbuhan yang sama dengan akuifer bebas sebagai aliran bawah permukaan dengan debit yang lebih besar yaitu 2,5 liter/menit. Pada tabung manometer terbaca ketinggian muka air dalam kondisi tunak yang bervariasi dari 130 – 154 mm. Landaian hidrolika yang terbentuk sebesar 0,092. Pemompaan disimulasikan dengan

menggunakan tiga debit berbeda, yaitu; 15,74 cm³/detik, 18,34 cm³/detik, dan 44,94 cm³/detik. Kondisi tunak dengan debit pemompaan 15,74 cm³/detik menunjukkan variasi kedudukan muka air 129-148 mm. Perubahan debit pemompaan menjadi 18,87 cm³/detik menunjukkan elevasi muka air 126 – 145 mm. Selanjutnya dengan debit pemompaan 44,94 cm³/detik diperoleh variasi tinggi muka pada nilai 115 – 132 mm.



Gambar 7. Perbandingan nilai muka air pada simulasi model fisik (MF) dan model numerik (MN) untuk akuifer tertekan

Pemodelan numerik untuk akuifer tertekan menggunakan grid yang sama dengan akuifer bebas yaitu 153 grid berukuran seragam yaitu 10,00 cm x 11,11 cm. Imbuhan berupa aliran bawah permukaan sebesar 2500 cm³/menit atau 0,042 cm³/detik/nod merupakan imbuhan yang bersifat kontinu. Simulasi menggunakan nilai kondisi awal tinggi muka air yang seragam pada semua nod sebesar 12,50

cm. Kondisi tunak tercapai dengan elevasi muka air tanah bervariasi dari 130,00 cm – 155,31 mm. Kalibrasi nilai terukur pada model fisik dan nilai simulasi numerik untuk kondisi sebelum pemompaan menunjukkan *mean error* (ME) sebesar -0,69 mm, dan *mean absolute error* (MAE) sebesar 1,23 mm. Tinggi muka air hasil simulasi numerik untuk debit pemompaan 15,74

cm³/detik diperoleh nilai sebesar 125,00 mm – 143,43 mm dengan nilai ME sebesar 1,51 mm dan MAE sebesar 1,60 mm. Kedudukan muka air untuk simulasi numerik dengan debit 18,87 cm³/detik diperoleh nilai 112,80 – 124,32 mm dengan nilai kalibrasi untuk ME sebesar 1,23 dan MAE sebesar 1,90. Pada simulasi numerik dengan debit pemompaan 44,94 cm³/detik diperoleh nilai kedudukan muka air bervariasi 112,91 mm – 127,52 mm dengan nilai ME 0,19 dan MAE sebesar 1,48 mm.

Hasil pemodelan fisik dan simulasi numerik untuk akufier tertekan menunjukkan kesesuaian nilai yang baik. Pemodelan fisik dan simulasi numerik menunjukkan ketiga debit pemompaan mempengaruhi penurunan muka air hingga ke batas model. Analisis daerah pensuplai air ke dalam sumur pada bagian hilir sumur untuk debit pemompaan 15,74 cm³/detik tidak teridentifikasi, sedangkan dengan debit 18,34 cm³/detik berjarak 10 cm, dan pada debit pemompaan 44,94 cm³/detik berjarak 40 cm. Hal yang berbeda dijumpai pada hasil simulasi numerik dengan daerah pensuplai pada jarak 10 cm untuk debit pemompaan 15,74 cm³/detik dan 18,87 cm³/detik, sedangkan untuk pemompaan 44,94 cm³/detik berjarak 40 cm. Jarak daerah pengimbuhan untuk debit 18,34 cm³/detik dan 44,94 cm menunjukkan kesamaan antara hasil model fisik dan hasil simulasi numerik. Hasil kedua pemodelan ini menunjukkan nilai yang lebih besar dibandingkan nilai estimasi

yang diperoleh dengan menggunakan persamaan analitik.

SIMPULAN

Pemodelan fisik dan simulasi numerik menunjukkan hasil dengan kesesuaian yang tinggi. Pada pemodelan uji pemompaan seluruh skim pemompaan yang diujikan memberikan pengaruh penurunan muka air hingga ke batas model. Analisis terhadap jarak daerah pengimbuhan air ke dalam sumur pemompaan juga menunjukkan hasil yang serupa untuk kedua metode tersebut. Hasil tersebut berbeda dengan nilai yang terhitung dengan menggunakan persamaan empiris. Pada pemompaan dengan debit kecil pada akifer tertekan tidak dapat teridentifikasi dengan model fisik. Hal ini dikarenakan tingkat akurasi penempatan titik observasi pada model fisik yang sulit diatur dengan spasi kecil. Namun demikian, dari kegiatan pemodelan ini terlihat bahwa ada kemungkinan besar terjadi kesalahan estimasi terhadap daerah pensuplai air ke dalam sumur pompa dengan menggunakan persamaan empiris, terutama jika digunakan untuk pengaturan penempatan sumur produksi di lapangan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat Universitas Hasanuddin yang telah memfasilitasi pembiayaan penelitian dengan skim Penelitian Dosen Penasehat Akademik tahun 2020.

DAFTAR PUSTAKA

- Anderson M.P., and Woessner W.W., 2015, *Applied Groundwater Modeling*, Simulation of flow and advective transport, Elsevier, London.
- Bredehoeft J., and Durbin T., 2009, Ground water development – The time to full capture problem, *Ground Water*, Vol. 47 Issue 2, pp. 506-514.
- Baalousha H., 2008, Fundamentals of groundwater modelling. In Konig L.F., and Weiss J.L (Ed), *Groundwater; Modelling, Management, dan Contaminantion*, Nova Publisher
- Fetter C.W., 2001, *Applied Hydrogeology*, Prentice Hall Inc, New Jersey.
- Fileccia A., 2015, Some simple procedures for the calculation of the influence radius and well head protection areas (theoretical approach and a field case for a water table aquifer in an alluvial plain), *Italian Journal of Groundwater*. DOI 10.7343/AS-117-15-0144.
- McCarthy F.D., 1993, *Essential of Soil Mechanics and Foundations*, Regents/Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, p. 618.
- Todd D.K., and Mays L.W., 2005, *Groundwater Hydrology*, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc.
- Vaquez-Baez V., Rubio-Arellano A., Garcia-Toral D., and Rodrigues Mora I., 2019, Modeling an Aquifer; Numerical solution to the groundwater flow equation, *Hindawi Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/1613726>.