

Simulasi Aliran Air Tanah Cekungan Air Tanah Denpasar-Tabanan, Provinsi Bali

Simulation of Groundwater Flow, Denpasar-Tabanan Groundwater Basin, Bali Province

H. TirTomiHardjo dan T. SeTiawan

Pusat Sumber Daya Air Tanah dan Geologi Lingkungan, Badan Geologi
Jln. Diponegoro 57 Bandung

Sari

Karena kompleksitas sistem akuifer dan unit hidrogeologi yang berkaitan dengan ruang/wadah tempat air tanah berada, aliran air tanah dihitung dalam tiga dimensi (*3D Calculation*). Deskritisasi geometri dan prosedur iterasi berdasarkan metode beda terbatas terintegrasi (*integrated finite difference method*). Dalam makalah ini, semua sajian gambar ataupun tabel merupakan hasil model kalibrasi. Dengan demikian, hasil model simulasi aliran air tanah didasarkan pada data masukan yang diperoleh pada kondisi saat ini yang telah dikalibrasi selama proses simulasi. Simulasi aliran air tanah di daerah model mencakup simulasi kondisi tunak (*steady state run*), simulasi kondisi tidak tunak (*transient runs*) dengan debit pengambilan air tanah tahun 1989 (*Qabs-1989*) dan tahun 2009 (*Qabs-2009*), serta simulasi aliran air tanah dengan skenario debit pengambilan air tanah (*prognosis run*). Secara umum, hasil simulasi aliran air tanah pada kondisi tunak dan tidak tunak dengan *Qabs-1989* dan *Qabs-2009* menunjukkan perbedaan yang relatif kecil antara kedudukan permukaan air tanah hasil penghitungan (*calculated groundwater heads*) dan muka air tanah hasil pengukuran (*observed groundwater heads*). Oleh karena itu, hasil simulasi prognonis dapat dikatakan valid sebagai dasar untuk penyusunan rencana pengendalian penggunaan air tanah di Cekungan Air Tanah Denpasar-Tabanan.

Kata kunci: deskritisasi geometri, metode beda terbatas terintegrasi, kondisi tunak, kondisi tidak tunak, progresif, penggunaan air tanah

Abstract

Due to the complex structure of the aquifer systems and its hydrogeological units related with the space in which groundwater occurs, groundwater flows were calculated in three-dimensional method (3D Calculation). The geometrical descritization and iteration procedures were based on an integrated finite difference method. In this paper, all figures and graphs represent the results of the calibrated model. Hence, the model results were simulated by using the actual input data which were calibrated during the simulation runs. Groundwater flow simulation of the model area of the Denpasar-Tabanan Groundwater Basin (Denpasar-Tabanan GB) comprises steady state run, transient runs using groundwater abstraction in the period of 1989 (Qabs-1989) and period of 2009 (Qabs-2009), and prognosis run as well. Simulation results show, in general, the differences of calculated groundwater heads and observed groundwater heads at steady and transient states (Qabs-1989 and Qabs-2009) are relatively small. So, the groundwater heads situation simulated by the prognosis run (scenario Qabs-2012) are considerably valid and can properly be used for controlling the plan of groundwater utilization in Denpasar-Tabanan GB.

Keywords: *geometrical descritization, integrated finite difference method, steady state run, transient run, prognosis run, groundwater utilization*

Pendahuluan

Sebagai daerah tujuan wisata di Indonesia, Denpasar dan sekitarnya termasuk salah satu kawasan di Indonesia Bagian Barat yang mengalami kemajuan pembangunan secara pesat, terutama sarana fisik dan berbagai fasilitas dalam menunjang kegiatan sektor pariwisata yang menjadi andalan utama untuk pendapatan asli daerah (PAD). Perkembangan pembangunan yang demikian itu, ditambah dengan kebutuhan akan air untuk irigasi, serta pertumbuhan jumlah penduduk yang terus meningkat, merupakan faktor utama terjadinya peningkatan kebutuhan akan air bersih, yang sebagian besar dipasok dari air tanah. Peningkatan kebutuhan akan air bersih yang bersumber dari pasokan air tanah tersebut telah menyebabkan peningkatan penggunaan air tanah. Konsekuensinya, degradasi air tanah di daerah tersebut terjadi, sehingga upaya pengelolaan air tanah berbasis cekungan air tanah perlu terus dilakukan agar degradasi secara menerus yang sangat merugikan tidak terjadi.

Sehubungan dengan hal tersebut di atas, salah satu upaya teknis pengelolaan air tanah di Cekungan Air Tanah Denpasar-Tabanan yang mencakup Kota Denpasar, Kabupaten Tabanan, Badung, Gianyar, Klungkung, Bangli, dan Karangasem seluas sekitar 2080 km² (Gambar 1) perlu dilakukan melalui penyusunan model simulasi aliran air tanah. Tujuannya untuk menyusun skenario pengambilan air tanah yang dapat digunakan sebagai dasar pengendali-

an pengambilan air tanah bagi pemerintah daerah setempat dalam rangka konservasi air tanah CAT Denpasar-Tabanan.

Makalah ini menyajikan uraian tentang hasil simulasi aliran air tanah dan penyusunan skenario penggunaan air tanah di CAT Denpasar-Tabanan dengan menerapkan program aplikasi Visual Modflow Versi 3.1.

Metodologi

Makalah ini disusun melalui serangkaian tahapan yang mencakup pengumpulan, evaluasi, dan analisis data; penyiapan data masukan (input data), simulasi dan kalibrasi aliran air tanah kondisi tunak dan tidak tunak, serta simulasi aliran air tanah dengan skenario debit pengambilan air tanah yang ditetapkan berdasarkan debit pengambilan air tanah aktual (Gambar 2).

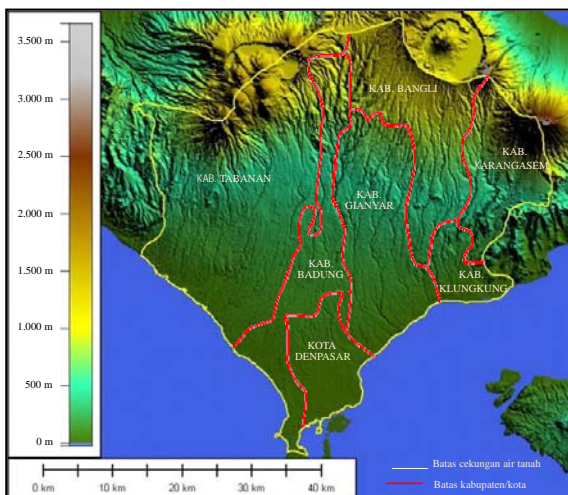
Simulasi aliran air tanah dilakukan dengan menggunakan program aplikasi *Visual Modflow* Versi 3.1 (*Waterloo Hydrogeologic Inc., Canada*). Data masukan yang dapat diimpor dengan program aplikasi tersebut disiapkan dengan program aplikasi *Excel*, *Map Surfer*, *MapInfo*, ataupun *ArcView* dan dikonversikan dalam format ASCII, *.SHP, *.DXF. Sebagian di antaranya, pemasukan data dilakukan secara langsung dengan menggunakan fasilitas *Assign* pada program *Visual Modflow* tersebut.

Model Konseptual

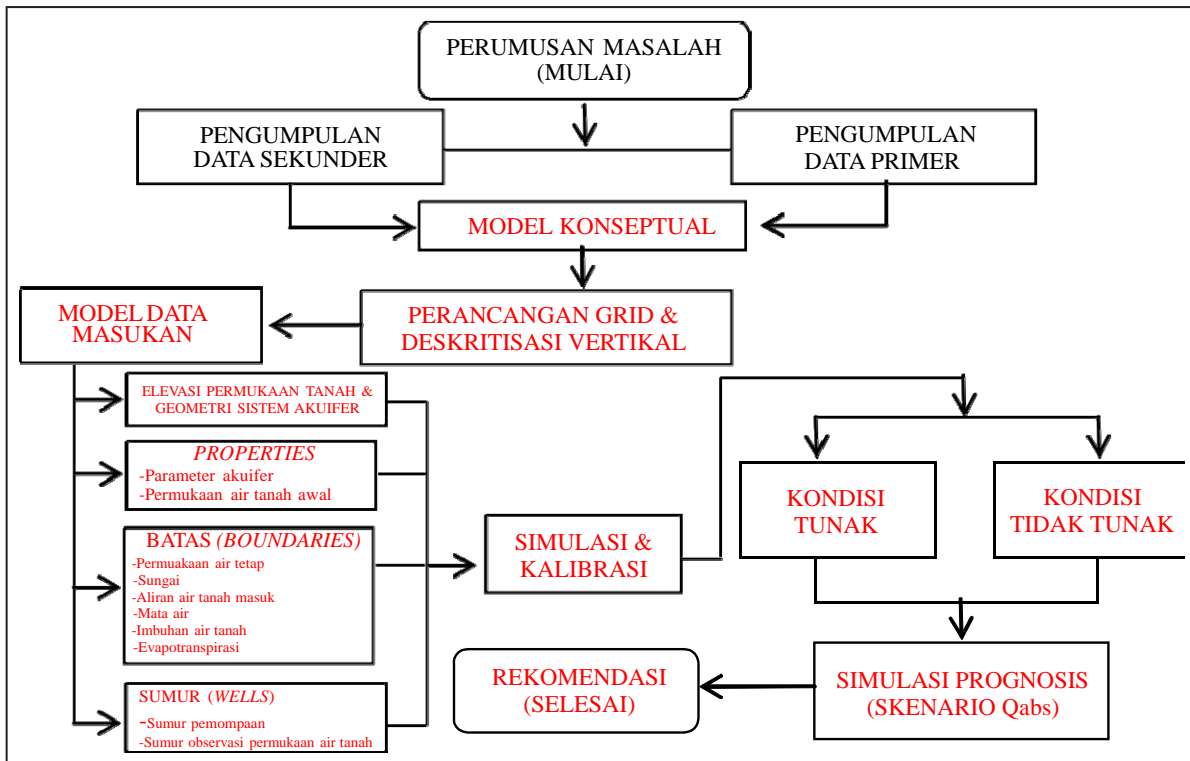
Model konseptual dibuat berdasarkan evaluasi dan analisis data geologi, hidrogeologi, serta konfigurasi dan parameter sistem akuifer daerah model yang diperoleh dari berbagai sumber, antara lain Pusat Sumber Daya Air Tanah dan Geologi Lingkungan, Dinas Pekerjaan Umum dan Lingkungan Hidup Provinsi Bali seperti disajikan pada acuan.

Berdasarkan evaluasi dan analisis tersebut, model konseptual CAT Denpasar-Tabanan (Gambar 3) dapat dijelaskan secara singkat sebagai berikut:

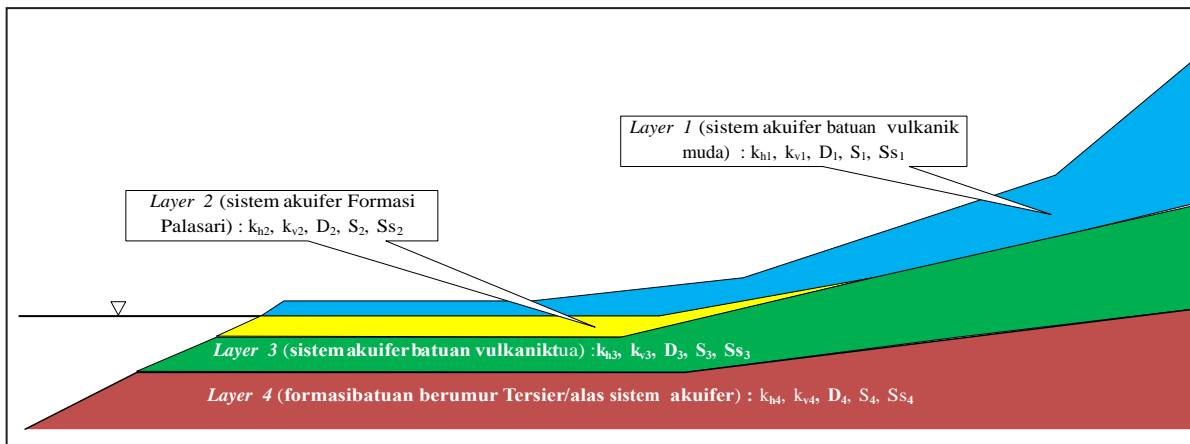
- a. Daerah model dibatasi di bagian utaranya oleh batas aliran air tanah (*groundwater inflow/flux boundary*); di bagian barat dan timur oleh batas pemisah air tanah (*groundwater divide*); di bagian barat daya, selatan, dan tenggara oleh batas permukaan air tetap (*constant head boundary*).



Gambar 1. Daerah model.



Gambar 2. Bagan alir kegiatan simulasi aliran air tanah CAT Denpasar-Tabanan (Haryadi dr., 2009).



Gambar 3. Model konseptual CAT Denpasar-Tabanan (daerah model).

- b. Daerah model terdiri atas empat unit hidrogeologi (4 layers), yakni *Layer 1* (sistem akuifer batuan vulkanik muda), *Layer 2* (sistem akuifer Formasi Palasari), dan *Layer 3* (sistem akuifer batuan vulkanik tua). Ketiga sistem akuifer itu dialasi oleh *Layer 4* (formasi batuan berumur Tersier) yang bersifat kedap air (nonakuifer).
- c. Setiap unit hidrogeologi dicirikan oleh sifat-sifat fisik yang disebut parameter akuifer dan nonakuifer, yakni koefisien kelulusan horizontal (k_h), koefisien kelulusan vertikal (k_v), ketebalan akuifer (D), koefisien simpanan (S), dan koefisien simpanan jenis (S_s). *Layer 1* (sistem akuifer batuan vulkanik muda) memiliki k_h

kv_1 , D_1 , S_1 , dan Ss_1 ; *Layer 2* (sistem akuifer Formasi Palasari) memiliki kh_2 , kv_2 , D_2 , S_2 dan Ss_2 ; *Layer 3* (sistem akuifer batuan vulkanik tua) memiliki kh_3 , kv_3 , D_3 , S_3 , dan Ss_3 ; serta *Layer 4* (formasi batuan berumur Tersier/ alas sistem akuifer) memiliki kh_4 , kv_4 , D_4 , S_4 , dan Ss_4 .

Rancangan *Grid Model*

Pembuatan rancangan *grid model (model grid design)* dimaksudkan untuk membantu dalam pemecahan permasalahan air tanah secara lebih sistematis dengan pendekatan matematis. Dalam merencanakan *grid model* perlu mempertimbangkan beberapa faktor, yakni:

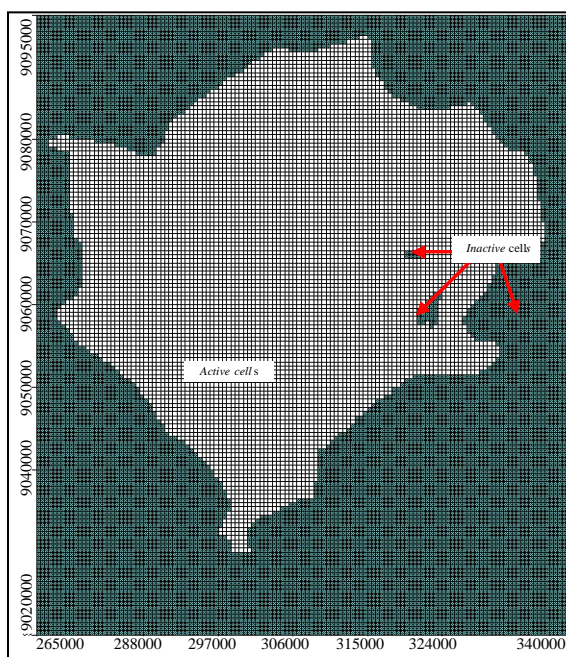
- jenis atau macam permasalahan yang akan dipecahkan;
- keakuratan hasil yang ingin dicapai;
- wujud dari akuifer;
- ketersediaan data;
- bentuk dari batas model;
- jumlah sel (*nodal cell*) yang direncanakan.

Dengan mempertimbangkan bentuk-bentuk di atas, rancangan *grid model* aliran air tanah di daerah model dibuat berdasarkan konsep metode beda terbatas (*finite difference method*). *Grid model* dibatasi berdasarkan koordinat UTM mulai dari 275.000 hingga 340.000 m pada arah barat-timur dan dari 9.020,000 hingga 9.095,000 m pada arah utara-selatan dengan ukuran *grid (grid spacing)* 500 m, sehingga terdapat 130 baris (*row*) dan 150 kolom (*column*). Rancangan *grid model* seperti disajikan pada Gambar 4.

Model Input data

Data masukan yang dibutuhkan untuk simulasi aliran air tanah CAT Denpasar-Tabanan terdiri atas beberapa hal sebagai berikut:

- 1) Elevasi permukaan tanah.
- 2) Geometri sistem akuifer.
- 3) *Properties*, terdiri atas:
 - a) parameter akuifer;
 - b) permukaan air tanah awal.
- 4) *Boundaries* (batas hidraulik), terdiri atas:
 - a) permukaan air tetap;
 - b) sungai;



Gambar 4. Rancangan *grid model* beda terbatas CAT Denpasar-Tabanan.

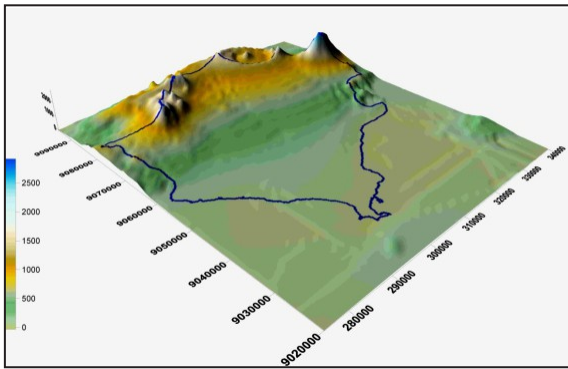
- c) aliran air tanah masuk;
 - d) mata air;
 - e) imbuhan air tanah;
 - f) evapotranspirasi.
- 5) *Wells* (sumur), terdiri atas:
- a) sumur pemompaan;
 - b) sumur/lokasi observasi permukaan air tanah.

Elevasi Permukaan Tanah

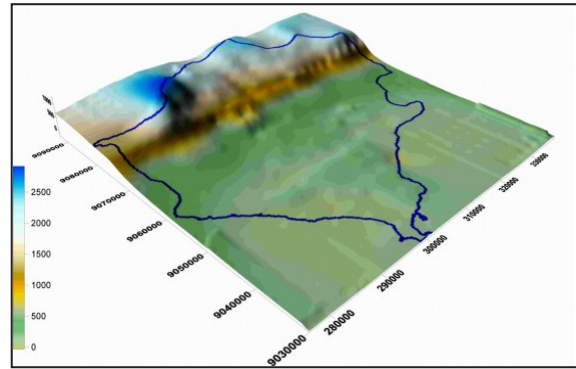
Elevasi permukaan tanah merupakan data masukan yang diperlukan untuk menggambarkan kondisi permukaan tanah dan untuk menentukan geometri sistem akuifer dan nonakuifer. Elevasi permukaan tanah diukur dalam meter dari permukaan laut rata-rata.

Data masukan elevasi permukaan tanah disiapkan dalam format *worksheet* yang terdiri atas koordinat (X,Y) dan ketinggian (H) setiap titik lokasi yang berada di daerah model. Penyiapannya dilakukan dengan cara menganalisis data SRTM (*Shuttle Radar and Topography Mission*) menggunakan piranti lunak *Global Mapper*.

Gambaran mengenai model tiga dimensi (3D) elevasi permukaan tanah di daerah model disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Model 3D elevasi permukaan tanah.

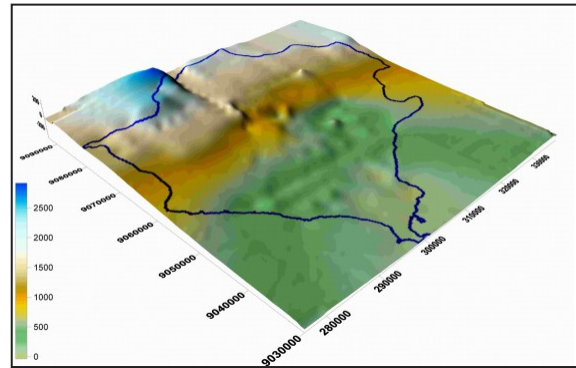


Gambar 7. Model 3D kedudukan bagian bawah *Layer 2* (sistem akuifer Formasi Palasari).

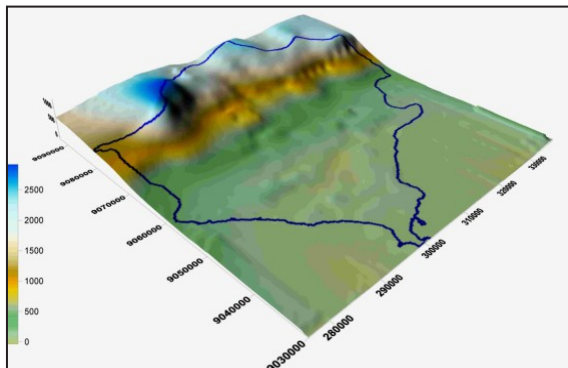
Geometri Sistem Akuifer

Pengelompokan unit hidrogeologi (sistem akuifer dan nonakuifer) daerah model dilakukan berdasarkan karakteristik satuan batuan penyusun yang relatif sama. Geometri sistem akuifer dan nonakuifer diperoleh dari hasil interpretasi data pengeboran dan pendugaan geolistrik yang tersedia serta informasi dari hasil penelitian sebelumnya (Haryadi dan Schmidt, 1991).

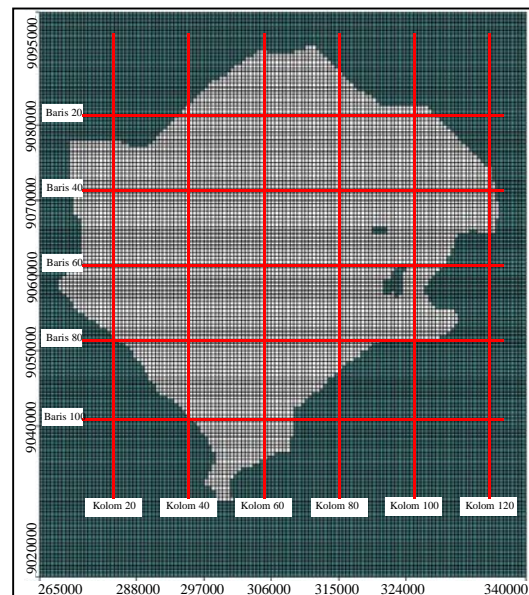
Data yang digunakan untuk interpretasi geometri sistem akuifer dan nonakuifer adalah koordinat (X,Y) dan ketinggian bagian bawah (*bottom elevation*) dari tiga sistem akuifer di daerah model, yakni *Layer 1* (sistem akuifer batuan vulkanik muda), *Layer 2* (sistem akuifer Formasi Palasari), *Layer 3* (sistem akuifer batuan vulkanik tua), dan *Layer 4* (satuan batuan berumur Tersier). Gambaran mengenai konfigurasi sistem akuifer di daerah model disajikan pada Gambar 5 - 11.



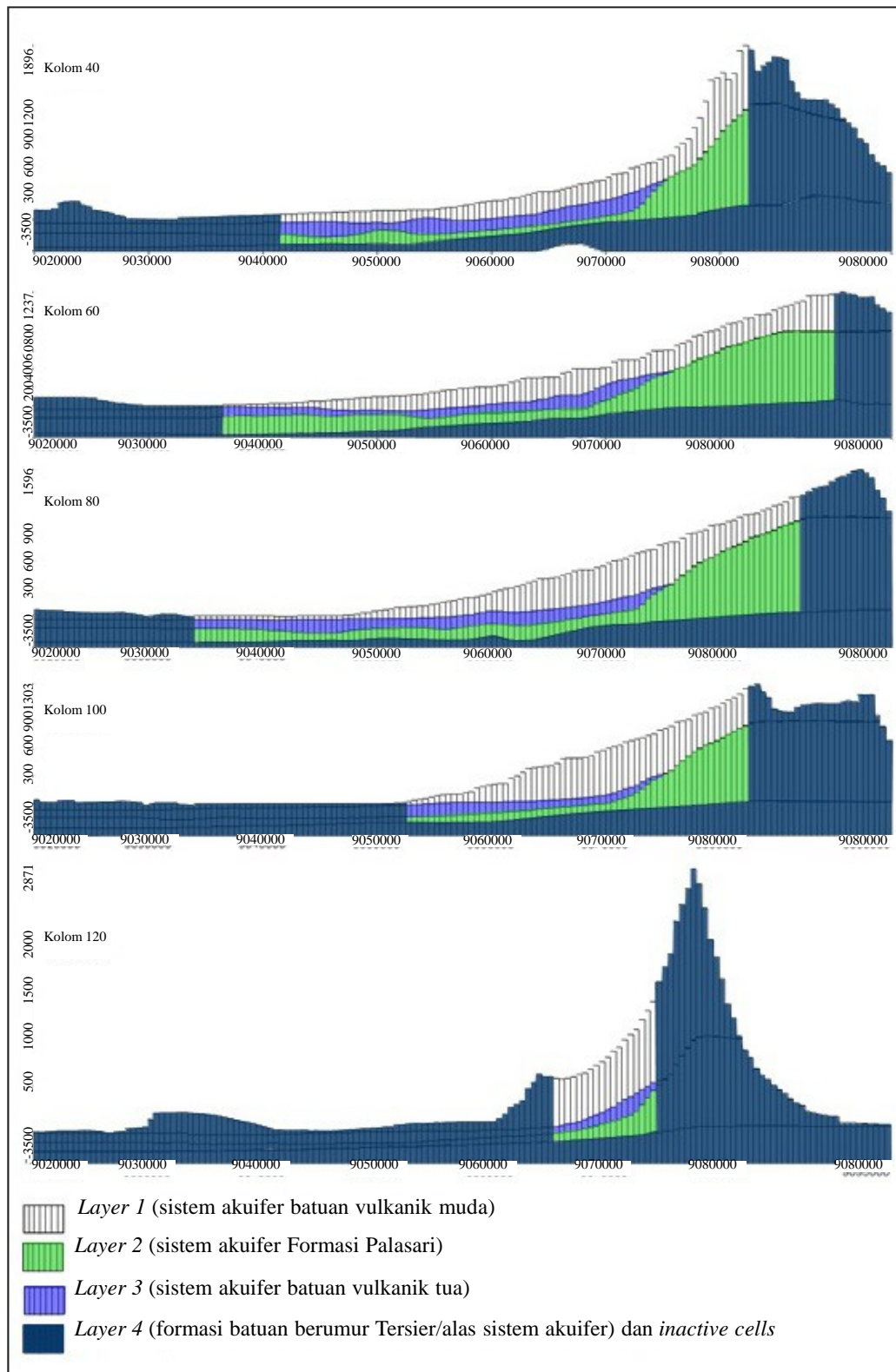
Gambar 8. Model 3D kedudukan bagian bawah *Layer 3* (sistem akuifer batuan vulkanik tua).



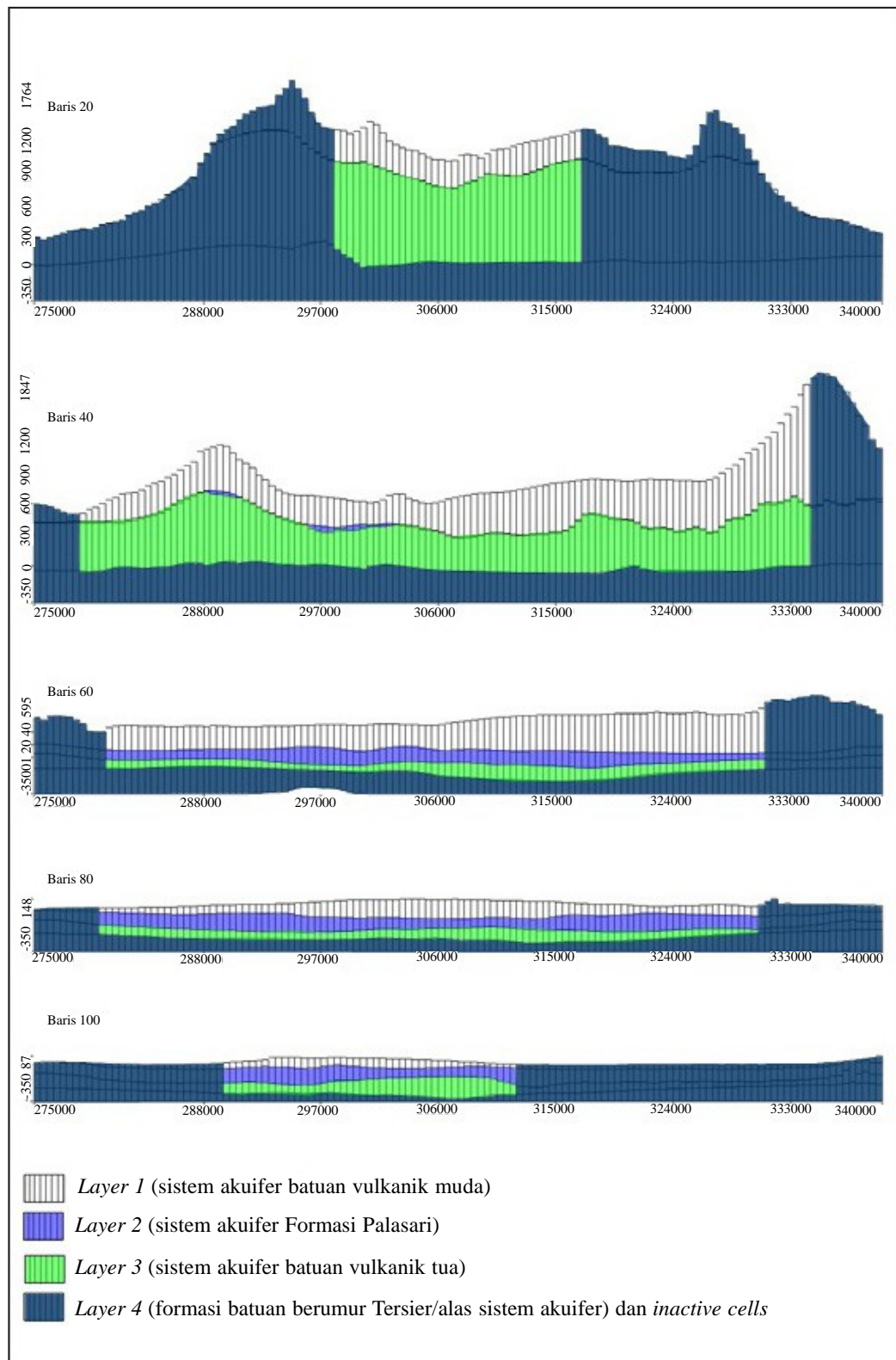
Gambar 6. Model 3D kedudukan bagian bawah *Layer 1* (sistem akuifer batuan vulkanik muda).



Gambar 9. Garis penampang hidrogeologi.



Gambar 10. Penampang hidrogeologi pada kolom 40, 60, 80, 100, dan 120.



Gambar 11. Penampang hidrogeologi pada baris 20, 40, 60, dan 80.

Properties

Parameter Akuifer

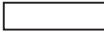





Data masukan berupa parameter akuifer yang meliputi kelulusan hidraulik (*hydraulic conductivity*) dan simpanan (*storage*) disajikan pada Tabel 1 dan Gambar 12 serta Tabel 2 dan Gambar 13.

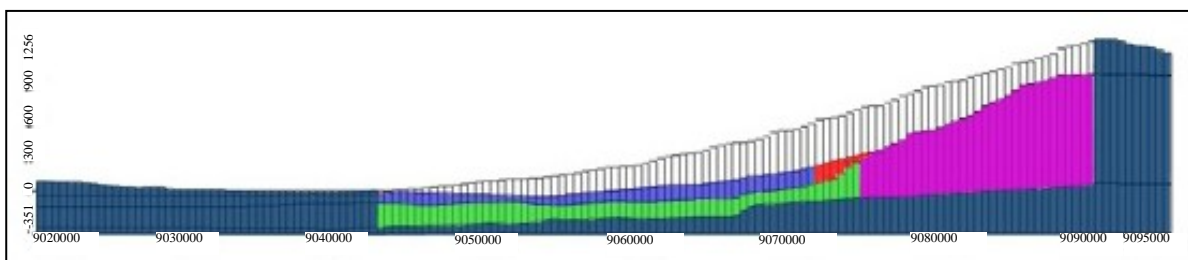
Permukaan Air Tanah Awal (*Initial Heads*)

Dalam simulasi aliran air tanah, kedudukan permukaan air tanah bebas atau muka freatik berperan sebagai batas vertikal atas dari sistem air tanah di daerah model. *Visual ModFlow* menetapkan muka freatik tersebut, dihitung dari permukaan laut, berfungsi sebagai permukaan air tanah awal (*initial heads*) yang digunakan sebagai titik referensi untuk menghitung perubahan permukaan air tanah antara sebelum dan setelah pengambilan air tanah pada periode tertentu (Guiger dan Thomas, 2003).

Distribusi permukaan air tanah awal pada *Layer 1* (sistem akuifer batuan vulkanik muda) yang mencakup daerah model (peta zonasi permukaan air tanah awal) disajikan pada Gambar 14. Pada peta tersebut, warna sel yang berbeda menunjukkan zona yang berbeda berdasarkan nilai kedudukan permukaan air tanah yang dihitung dari permukaan laut. Karena data kedudukan permukaan air tanah awal pada *Layer 2* (sistem akuifer Formasi Palasari) dan *Layer 3* (sistem akuifer batuan vulkanik tua) tidak tersedia, kedudukan permukaan air tanah awal pada kedua sistem akuifer tersebut diasumsikan sama dengan kedudukan permukaan air tanah awal pada *Layer 1* (sistem akuifer batuan vulkanik muda). Hal tersebut didasarkan pada karakteristik setiap akuifer yang diasumsikan homogen serta berfungsi sebagai media yang dapat menyimpan dan meluluskan air secara baik (*akuifer*) sehingga ada hubungan antarsistem akuifer tersebut.

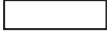



Tabel 1. Parameter Konduktivitas Hidraulik di Daerah Model

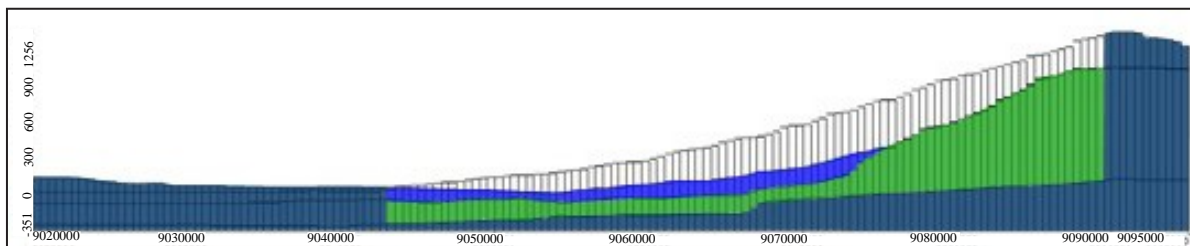
Zona	Warna pada penampang	Kx [m/s]	Ky [m/s]	Kz [m/s]	Keterangan
1		1,86E-5	1,86E-5	4,65E-9	<i>Layer 1</i> (sistem akuifer batuan vulkanik muda)
2		3,32E-5	3,32E-5	8,3E-9	<i>Layer 2</i> (sistem akuifer Formasi Palasari)
3		1,52E-5	1,52E-5	3,79E-9	<i>Layer 3</i> (sistem akuifer batuan vulkanik tua)
4		1,16E-9	1,16E-9	1,93E-13	<i>Layer 4</i> (formasi batuan berumur Tersier/alas akuifer) dan <i>inactive cells</i>
5		1,86E-5	1,86E-5	4,65E-9	<i>Layer 2</i> (sistem akuifer Formasi Palasari)
6		1,01E-8	1,01E-8	2,53E-12	<i>Layer 3</i> (sistem akuifer batuan vulkanik tua)



Gambar 12. Zona konduktivitas hidraulik (penampang pada kolom 70).

Tabel 2. Parameter Simpanan di Daerah Model

Zona	Warna pada penampang	Ss [1/m]	Sy [-]	Eff.Por [-]	Tot. Por [-]	Keterangan
1		1,00E-5	0,20	0,15	0,2	Layer 1 (sistem akuifer batuan vulkanik muda)
2		1,00E-5	0,30	0,20	0,3	Layer 2 (sistem akuifer Formasi Palasari)
3		2,24E-5	0,20	0,25	0,25	Layer 3 (sistem akuifer batuan vulkanik tua)
4		-	-	-	-	Layer 4 (formasi batuan berumur Tersier/alas akuifer) dan <i>inactive cells</i>



Gambar 13. Zona simpanan (penampang pada kolom 70).

Batas (*boundAries*)

Permukaan Air Tetap

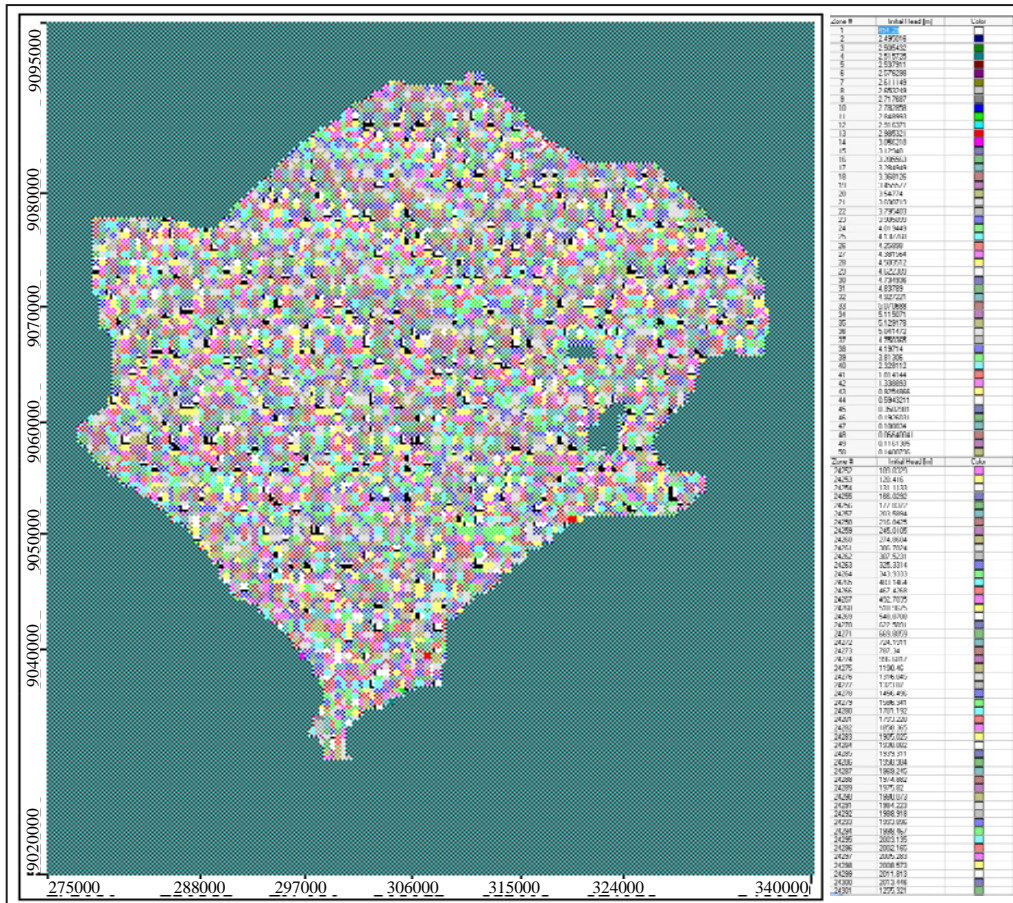
Dalam paket program *Visual ModFlow*, permukaan air tetap (*constant heads-CHD*) ditetapkan sebagai salah satu batas (*boundary*) karena memiliki hubungan yang erat dengan sistem air tanah di daerah yang dimodelkan. Pemasukan data CHD dilakukan secara langsung pada *Visual ModFlow* (*Menu Boundaries*) dengan cara mendeliniasi dan memberikan nilai parameter pada setiap sel yang berada sepanjang garis batas, yakni sepanjang garis pantai yang terletak di sebelah selatan daerah model (Gambar 15).

Parameter constant head-CHD yang diperlukan untuk data masukan meliputi deskripsi (*description*, diisi nomor lokasi CHD), waktu awal simulasi (*start time*, dalam hari), waktu akhir simulasi (*stop time*, dalam hari), kedudukan permukaan air pada

awal simulasi (*start time head*, dalam meter dari permukaan laut), dan kedudukan permukaan air pada akhir simulasi (*stop time head*, dalam meter dari permukaan laut) (Guiger dan Thomas, 2003).

Sungai

Sungai sebagai batas permukaan air permukaan, dalam paket program *Visual ModFlow* ditetapkan sebagai salah satu batas (*river boundary, RIV*) karena memiliki hubungan yang erat dengan sistem air tanah di daerah yang dimodelkan. Sungai yang ditentukan sebagai batas adalah sungai yang memiliki aliran permanen di daerah model (Gambar 15). Parameter sungai yang diperlukan untuk data masukan meliputi waktu awal simulasi (*start time*, dalam hari), waktu akhir simulasi (*stop time*, dalam hari), kedudukan permukaan air sungai (*river stage*, dalam meter dari permukaan laut), kedudukan dasar sungai (*riverbed bottom*, dalam meter dari permukaan laut),



Gambar 14. Permukaan air tanah awal (*initial heads*).

ketebalan lapisan dasar sungai (*riverbed thickness*, dalam meter), kelulusan vertikal lapisan dasar sungai, dalam meter/detik (Guiger dan Thomas, 2003).

Aliran Air Tanah Masuk

CAT Denpasar-Tabanan dibatasi di bagian utara-nya oleh batas pemisah air tanah (*groundwater divide*), artinya di sepanjang garis batas tersebut debit aliran air tanah sama dengan nol. Batas daerah model di bagian utara ditentukan pada jarak sekitar 2 km sebelah selatan batas cekungan air tanah tersebut, sehingga di sepanjang batas model perlu ditentukan debit aliran air tanah yang masuk ke dalam cekungan (*groundwater inflow/flux boundary*) karena daerah antara batas cekungan dan batas daerah model disusun oleh batuan vulkanik muda yang membentuk *Layer 1* (sistem akuifer batuan vulkanik muda). Debit aliran air tanah pada setiap sel dihitung berdasarkan hasil penghitungan debit aliran air tanah pada setiap

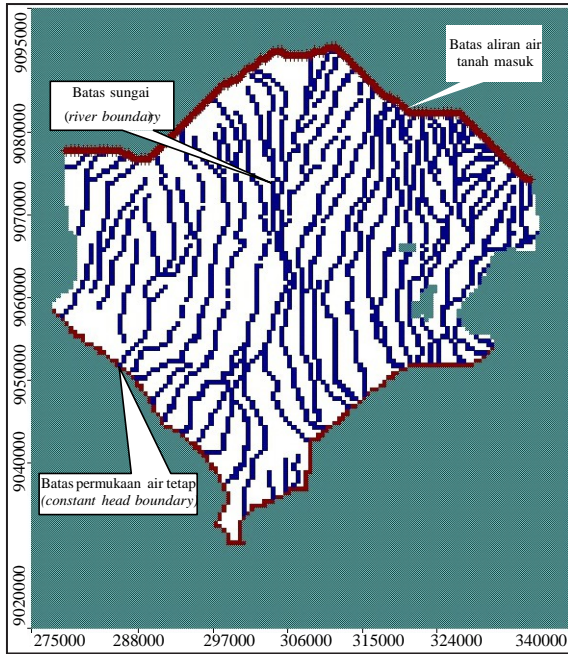
segmen. Hasil penghitungan menunjukkan total debit aliran air tanah yang masuk kedalam sistem akuifer (daerah model) mencapai $2,02 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{tahun}$.

Dalam proses pemasukan data perlu dilakukan pengecekan dan pengeditan langsung pada *Visual ModFlow*, terutama kedudukan saringan pada setiap sumur (*flux well*).

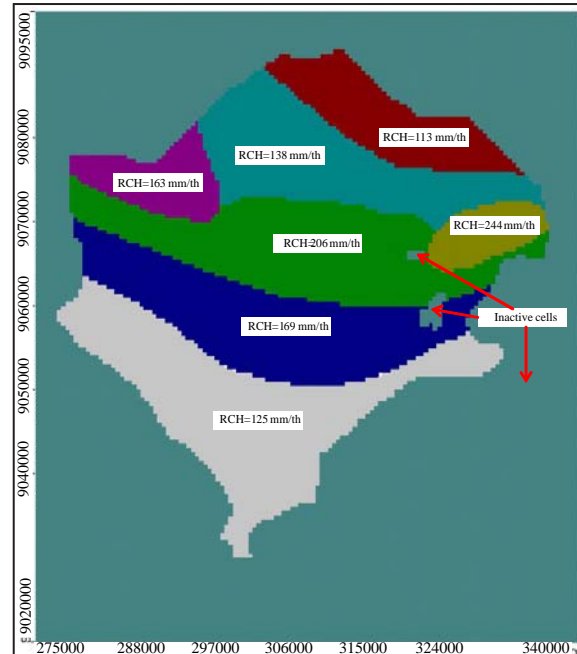
Mata Air

Mata air di daerah model ditentukan sebagai batas yang disebut dengan batas pelepasan (*drain boundary*, *DRN*) karena memiliki arti penting dan terkait erat dengan proses pelepasan air tanah dari sistem akuifer ke permukaan.

Parameter batas pelepasan yang diperlukan untuk data masukan meliputi waktu awal simulasi (*start time*, dalam hari), waktu akhir simulasi (*stop time*, dalam hari), ketinggian pemunculan mata air (*drain elevation*, dalam meter dari permukaan laut), kon-



Gambar 15. Kondisi batas (*boundaries*).



Gambar 16. Batas imbuhan air tanah (*recharge boundaries*).

duktansi (*conductance*, dalam $m^2/hari$), konduktansi per satuan luas (*conductance per unit area*, dalam $hari^{-1}$) (Guiger dan Thomas, 2003).

Imbuhan Air Tanah

Pemasukan data imbuhan air tanah (*recharge*, *RCH*) dilakukan secara langsung pada *Visual ModFlow (Menu Boundaries)* dengan cara mendeliniasi zonasi RC dan memberikan nilai RC pada setiap zona tersebut. Deliniasi zona RC dilakukan dengan cara overlay peta zona RC dalam format ESRI Shape (*.SHP) atau AutoCAD DXF (*.dxf) dan digitasi langsung pada *Visual ModFlow*. Mengacu kepada sebaran unit hidrogeologi di daerah model batas imbuhan air tanah hanya ditentukan pada *Layer 1* (batuan vulkanik muda).

Penghitungan imbuhan air tanah dilakukan dengan metode estimasi kuantitatif berdasarkan zona curah hujan (*P*, dalam $mm/tahun$), dan persentase imbuhan (*recharge percentage*, %RC) dengan mempertimbangkan macam batuan dan kelerengan topografi (Binnie dan Partners, 1994). Hasil penyiapan dan pemasukan data imbuhan air tanah menunjukkan daerah model dapat dibedakan menjadi tujuh zona sebagai berikut (Gambar 16):

1. Zona 1 menempati daerah dataran dengan kecepatan imbuhan 118 mm/tahun.

2. Zona 2 menempati daerah kaki gunung api dengan kecepatan imbuhan 225 mm/tahun.
3. Zona 3 menempati daerah lereng bagian bawah gunung api dengan kecepatan imbuhan mencapai 275 mm/tahun.
4. Zona 4 menempati daerah lereng bagian atas gunung api dengan kecepatan imbuhan mencapai 138 mm/tahun.
5. Zona 5 menempati daerah lereng bagian atas gunung api dengan kecepatan imbuhan mencapai 113 mm/tahun.
6. Zona 6 menempati daerah puncak gunung api di bagian barat laut dengan kecepatan imbuhan mencapai 163 mm/tahun.
7. Zona 7 menempati daerah puncak gunung api di bagian timur laut dengan kecepatan imbuhan mencapai 325 mm/tahun.

Evapotranspirasi

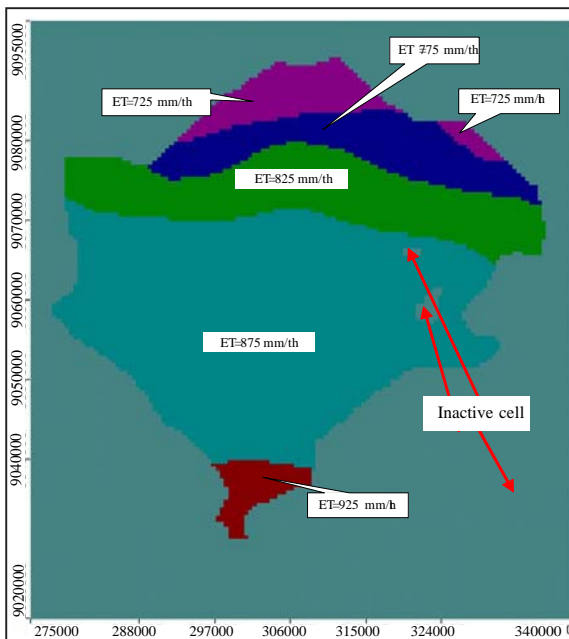
Evapotranspirasi (*evapotranspiration-EVT*) merupakan komponen pengurang (*losses component*) dalam sistem air tanah di daerah model. Di alam, proses evapotranspirasi akan berhenti pada kedalaman sekitar 1,0 - 2,0 m dari permukaan tanah setempat. Dalam simulasi aliran air tanah, evapotran-

spirasi dapat digunakan dalam kalibrasi, yakni untuk mengurangi kedudukan permukaan air tanah hasil penghitungan.

Pemasukan data EVT dilakukan secara langsung pada *Visual ModFlow (Menu Boundaries)* dengan cara *overlay* peta zona EVT dalam format ESRI Shape (*.SHP) atau AutoCAD DXF (*.dxf), digitasi, dan memberi nilai EVT setiap zona.

EVT dihitung berdasarkan data iklim yang tersedia di daerah model dengan metode Turc, yakni penghitungan EVT berdasarkan data suhu udara (Shaw, 1983). Hasil penghitungan EVT dengan interval 50 mm/tahun menunjukkan daerah model dapat dibedakan menjadi lima zona sebagai berikut (Gambar 17):

1. Zona 1 menempati daerah dataran di bagian selatan dengan kecepatan evapotranspirasi mencapai 925 mm/tahun.
2. Zona 2 menempati daerah dataran hingga kaki gunung api dengan kecepatan evapotranspirasi mencapai 875 mm/tahun.
3. Zona 3 menempati daerah lereng bagian bawah gunung api dengan kecepatan evapotranspirasi mencapai 825 mm/tahun.
4. Zona 4 menempati daerah lereng bagian atas gunung api dengan kecepatan evapotranspirasi mencapai 775 mm/tahun.



Gambar 17. Zona evapotranspirasi (*EVT boundary*).

5. Zona 5 menempati daerah puncak gunung api di bagian utara dengan kecepatan evapotranspirasi mencapai 725 mm/tahun.

SuMur (*Wells*)

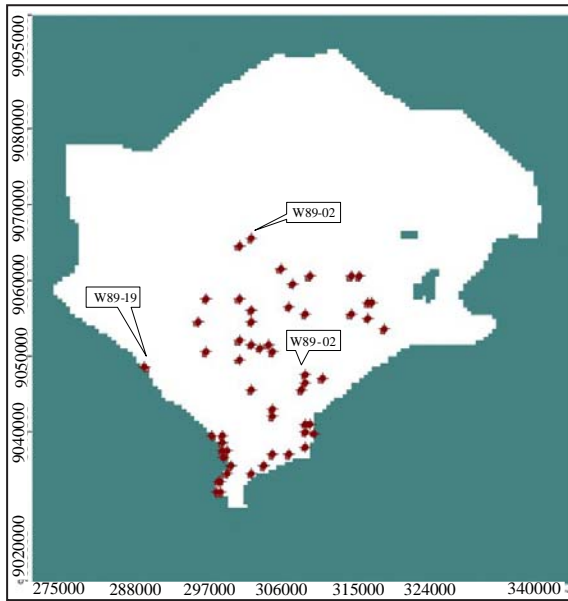
Sumur Pemompaan

Data sumur pemompaan (*pumping wells*) yang meliputi distribusi sumur produksi dan debit pengambilan air tanah (*groundwater abstraction, Qabs*) yang tersedia adalah data pada periode 1989 dan 2009. Debit pengambilan air tanah tersebut merupakan faktor penyebab terjadinya perubahan kedudukan permukaan air tanah di daerah model pada periode tersebut. Data *Qabs-1989* dan *Qabs-2009* digunakan sebagai data masukan untuk simulasi aliran air tanah dalam kondisi tidak tunak (*transient flow*) dengan maksud untuk mengetahui kondisi permukaan air tanah akibat pengambilan air tanah pada periode tersebut.

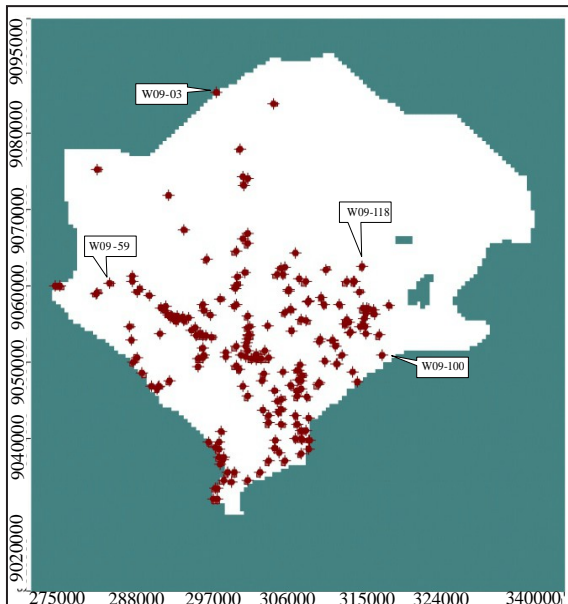
Data masukan yang berkaitan dengan sumur pemompaan terdiri atas nomor dan koordinat lokasi sumur pemompaan (sumur produksi), identitas saringan (*screen ID*), kedudukan saringan bagian atas (*screen top*, dalam m dari permukaan laut), kedudukan saringan bagian bawah (*screen bottom*, dalam m dari permukaan laut), jari-jari pipa saringan dan jari-jari pipa naik (dalam m), waktu akhir simulasi (*stop time*, dalam hari), dan debit pengambilan air tanah (*rate*, dalam m³/hari) (Guiger dan Thomas, 2003). Berdasarkan data yang tersedia, *Qabs-1989* tercatat 85,1 juta m³/tahun dari sekitar 128 sumur bor (Danaryanto, 1991) dan *Qabs-2009* mencapai 120,01 juta m³/tahun dari sekitar 474 sumur bor (Dinas Pekerjaan Umum dan Lingkungan Hidup, 2009). Sebaran sumur produksi pada periode 1989 dan 2009 disajikan pada Gambar 18 dan Gambar 19.

Sumur Observasi Permukaan air Tanah

Dalam model simulasi aliran air tanah, permukaan air tanah sumur observasi (*head observation well*) atau sering disebut permukaan air tanah hasil pengukuran (*observed head*) digunakan untuk kalibrasi, yakni proses penyesuaian antara permukaan air tanah hasil simulasi (*calculated head*) dan permukaan air tanah hasil pengukuran tersebut. Data masukan permukaan air tanah sumur observasi meliputi nomor dan koordinat lokasi sumur ob-



Gambar 18. Peta Lokasi sumur produksi pada periode 1989.

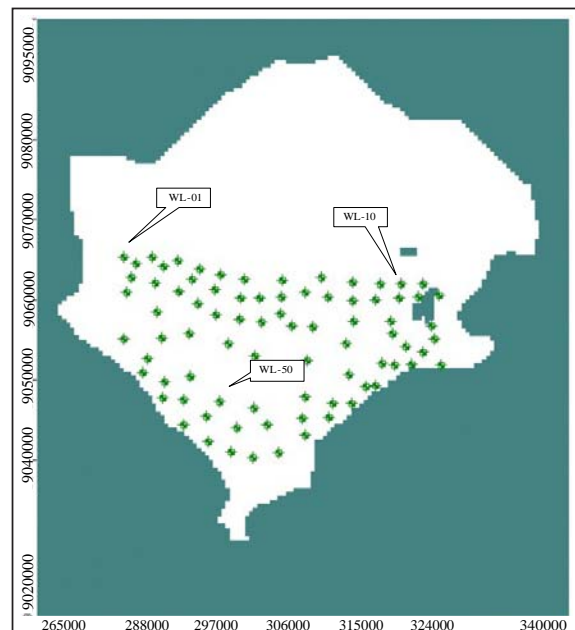


Gambar 19. Peta lokasi sumur produksi pada periode 2009.

servasi, identitas saringan (*screen ID*), ketinggian rata-rata saringan (*screen elevation*, dalam meter dari permukaan laut), waktu pengukuran (*time*, dalam hari), dan ketinggian permukaan air tanah (*head*, dalam meter dari permukaan laut) (Guiger dan Thomas, 2003).

Data masukan permukaan air tanah pada sumur/titik lokasi observasi pada 1970 yang mewakili kondisi awal (*initial/natural condition*) dan pada periode 1989 ditentukan berdasarkan kontur permukaan air tanah yang dibuat berdasarkan pengukuran permukaan air tanah pada periode tersebut, masing-masing terdiri atas 81 dan 143 titik lokasi observasi (Danaryanto, 1989). Sementara itu, data permukaan air tanah periode 2009 berdasarkan hasil pengukuran pada 51 sumur produksi dan sumur pantau yang dilakukan pada saat penelitian dilakukan.

Lokasi sumur/titik lokasi observasi air tanah pada periode 1970, 1989, dan 2009 disajikan pada Gambar 20 - 22.

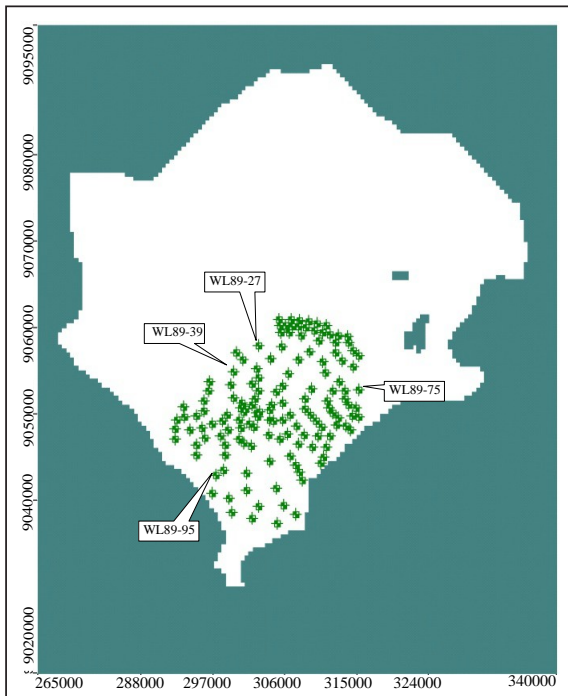


Gambar 20. Peta titik lokasi observasi permukaan air tanah pada kondisi awal (periode 1970).

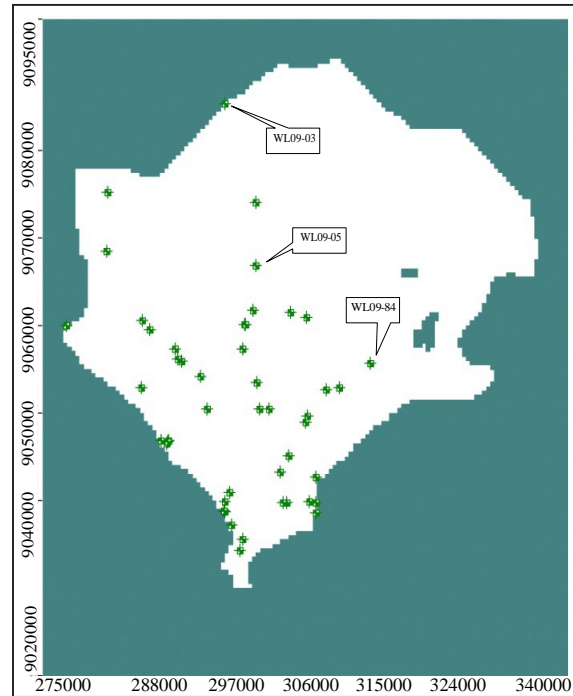
Simulasi air tanah

Simulasi Aliran Air Tanah Kondisi Tunak (*Steady State*)

Hasil simulasi aliran air tanah menunjukkan kondisi tunak dicapai dengan baik setelah dilakukan kalibrasi data masukan dan membandingkan antara permukaan air tanah hasil penghitungan dan permukaan air tanah hasil pengukuran pada kondisi awal.



Gambar 21. Peta titik lokasi observasi permukaan air tanah pada periode 1989.



Gambar 22. Peta lokasi sumur observasi permukaan air tanah periode 2009.

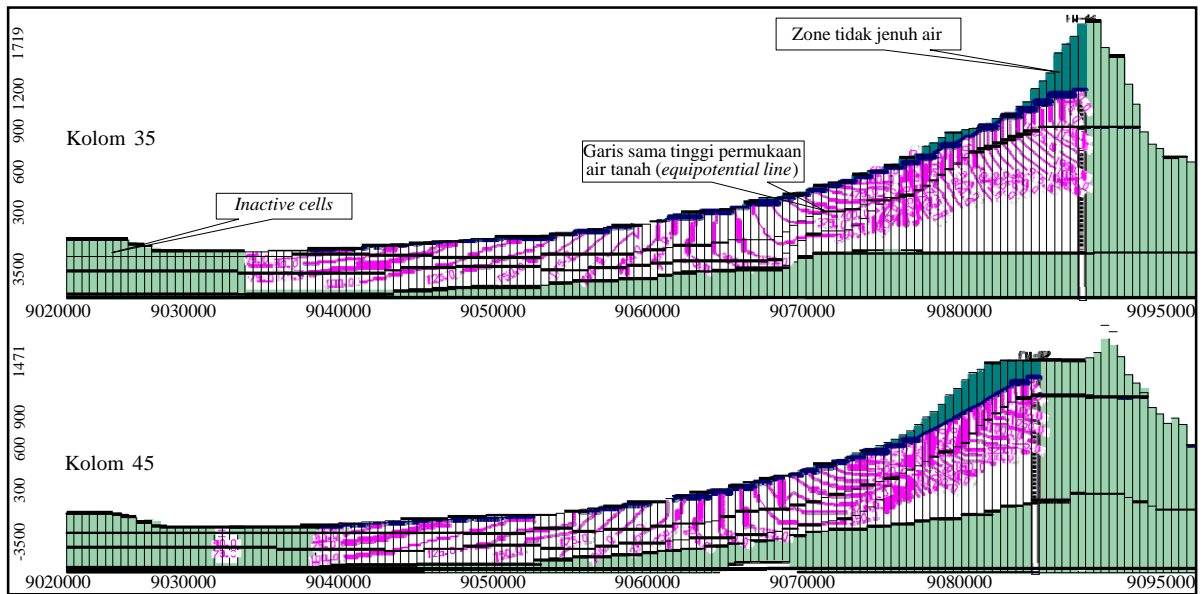
Hasil kalibrasi terhadap data masukan awal (asumsi awal) adalah sebagai berikut:

1. Imbuan air tanah, yakni diperoleh jumlahnya yang sesuai (*reliable*) sekitar 598 juta juta m^3 /tahun atau sekitar 145% dari angka pada asumsi awal sebesar 412 juta m^3 /tahun. Persentase imbuan air tanah rata-rata terkalibrasi di daerah model sekitar 12,19% dari jumlah curah hujan di daerah tersebut.
2. Debit aliran air tanah masuk (*flux*), yakni diperoleh angka yang sesuai sebesar $205 \times 10^6 m^3$ /tahun, atau sekitar 3,0% dari angka pada asumsi awal sebesar $8,04 \times 10^9 m^3$ /tahun.
3. Koefisien kelulusan terkalibrasi (k_x dan k_y) pada *Layer 1* (sistem akuifer batuan vulkanik muda) sekitar 15%, *Layer 2* (sistem akuifer Formasi Palasari) sekitar 20%, dan *Layer 3* (sistem akuifer batuan vulkanik tua) sekitar 15% dari nilai k_x dan k_y pada asumsi awal. Hasil kalibrasi menunjukkan *vertical anisotropy* (k_z/k_x) pada setiap sistem akuifer diperoleh 1/4000. Nilai *anisotropy* tersebut sesuai dengan karakteristik sistem akuifer yang memiliki k_x dan k_y antara $1,01E-08$ m/detik

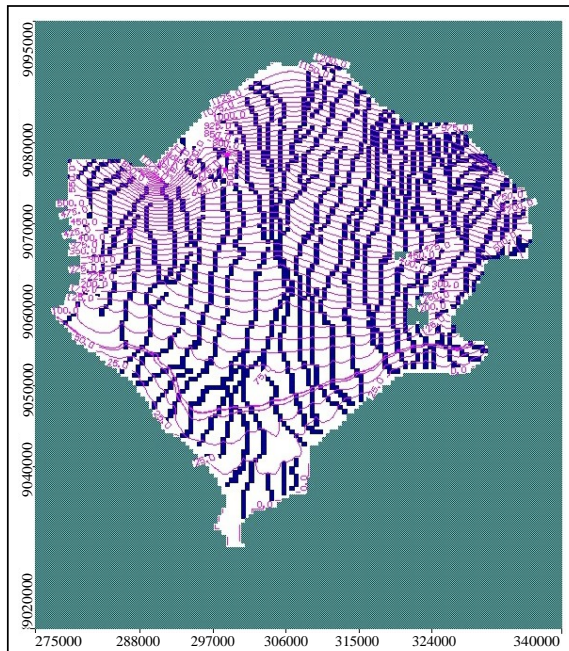
dan $3,32E-05$ m/detik, yakni berupa batupasir halus sampai batupasir sedang (Kruseman dan de Ridder, 1970).

Hasil simulasi kondisi tunak yang cukup baik tersebut ditunjukkan oleh perbedaan antara permukaan air tanah hasil simulasi dan permukaan air tanah hasil pengukuran pada *Layer 1* (sistem akuifer batuan vulkanik muda) dan *Layer 2* (sistem akuifer Formasi Palasari) umumnya relatif kecil, yakni antara 0,08 - 1,90 m. Di samping itu, pola permukaan air tanah hasil simulasi tersebut mencerminkan ciri-ciri permukaan air tanah pada kondisi awal/alamiah, yakni di bagian atas sistem aliran air tanah (*upper part of groundwater flow regime*) alirannya secara vertikal ke bawah (*vertical downward flow*), sedangkan di bagian bawah sistem aliran air tanah secara vertikal ke atas (*vertical upward flow*). Secara umum aliran air tanah dari utara ke selatan (Gambar 23).

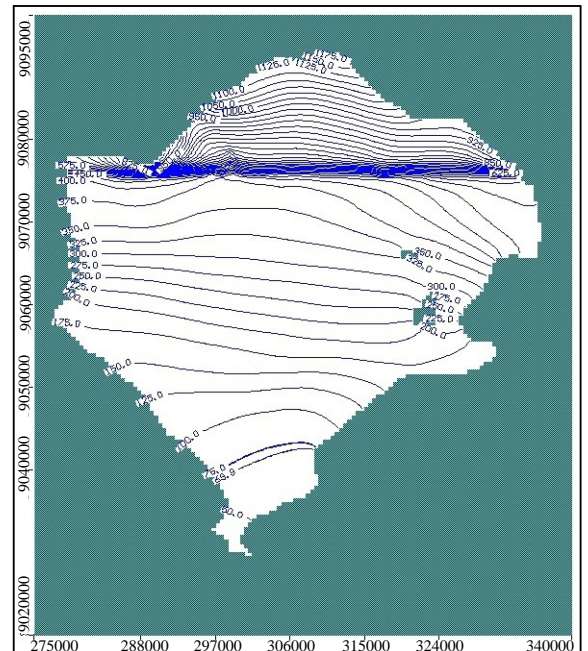
Distribusi horizontal dan pola permukaan air tanah pada *Layer 1* (sistem akuifer batuan vulkanik muda), *Layer 2* (sistem akuifer Formasi Palasari), dan *Layer 3* (sistem akuifer batuan vulkanik tua) pada kondisi awal disajikan pada Gambar 24 - 26.



Gambar 23. Penampang permukaan air tanah kondisi awal pada kolom 35 dan kolom 45.



Gambar 24. Permukaan air tanah pada *Layer 1* (sistem akuifer batuan vulkanik muda), hasil simulasi kondisi tunak ($Q_{abs}=0$).

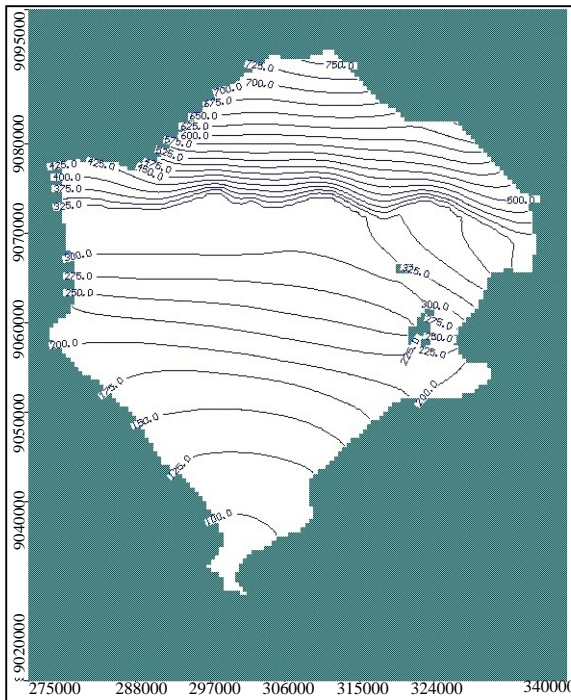


Gambar 25. Permukaan air tanah pada *Layer 2* (sistem akuifer Formasi Palasari), hasil simulasi kondisi tunak ($Q_{abs}=0$).

Simulasi Aliran Air Tanah Kondisi Tidak Tunak (Transient), Q_{abs} -1989

Simulasi aliran air tanah dengan Q_{abs} 1989, yakni pada bulan September 1989 atau *time*

step 6.935 hari (dihitung dari kondisi awal), menunjukkan hasil yang baik setelah dilakukan kalibrasi antara permukaan air tanah hasil penghitungan dan permukaan air tanah hasil pengukuran pada

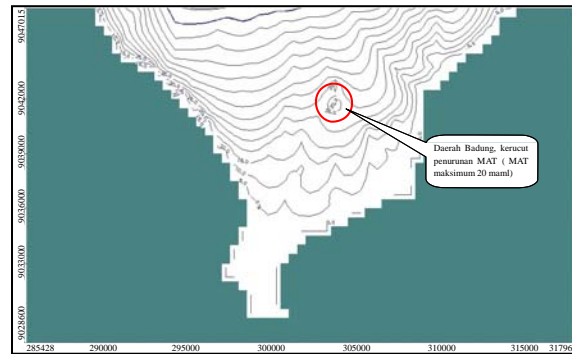


Gambar 26. Permukaan air tanah pada *Layer 3* (sistem akuifer batuan vulkanik tua), hasil simulasi kondisi tunak ($Q_{abs}=0$).

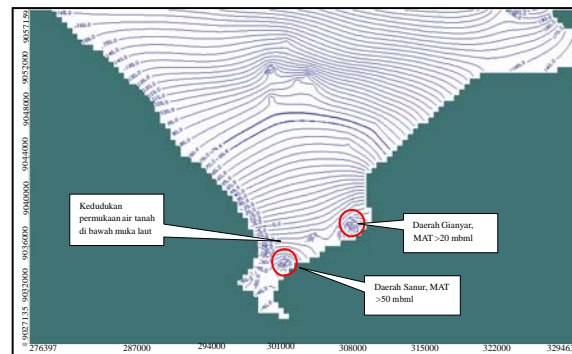
periode 1989. Hal itu ditunjukkan oleh perbedaan antara permukaan air tanah hasil simulasi dan permukaan air tanah hasil pengukuran pada *Layer 1* (sistem akuifer batuan vulkanik muda) dan *Layer 2* (sistem akuifer Formasi Palasari) umumnya relatif kecil, yakni kurang dari 5,0 m.

Hasil simulasi menunjukkan pada *Layer 1* (sistem akuifer batuan vulkanik muda) dan *Layer 3* (sistem akuifer batuan vulkanik tua), kondisi permukaan air tanah umumnya relatif tidak berubah dibandingkan dengan kondisi alamiahnya. Namun demikian gejala degradasi pada *Layer 1* (sistem akuifer vulkanik muda) dapat dilihat dengan adanya kerucut penurunan permukaan air tanah (*cone of depression*) di daerah Badung dengan kedudukan permukaan air tanah terdalam mencapai 19 m di atas permukaan laut (maml). Kerucut penurunan permukaan air tanah tersebut diakibatkan oleh pengambilan air tanah pada kelompok sumur bor W89-17 dan W89-18 di kompleks perhotelan di daerah Badung (Gambar 27).

Pada *Layer 2* (sistem akuifer Formasi Palasari), permukaan air tanah di daerah pusat pengambilan



Gambar 27. Kerucut penurunan permukaan air tanah pada *Layer 1* (sistem akuifer batuan vulkanik muda), hasil simulasi kondisi tidak tunak ($Q_{abs}-1989=85,2$ juta m^3 /tahun).



Gambar 28. Kerucut penurunan permukaan air tanah pada *Layer 2* (sistem akuifer Formasi Palasari), hasil simulasi kondisi tidak tunak ($Q_{abs}-1989=85,2$ juta m^3 /tahun).

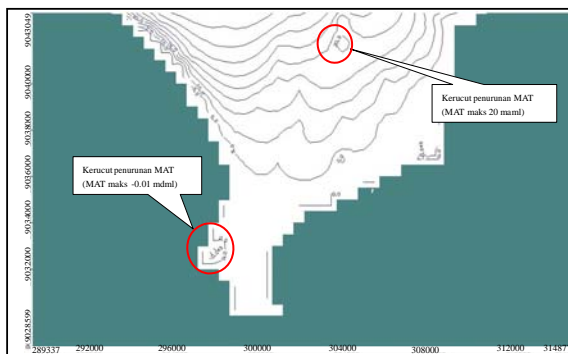
air tanah seperti di daerah Kuta, Sanur, dan Gianyar menunjukkan pola yang memusat (kerucut penurunan permukaan air tanah) seperti ditunjukkan pada Gambar 28. Di daerah Gianyar kedudukan permukaan air tanah mencapai lebih dari 20 m di bawah permukaan laut (mbml) dengan kedudukan maksimum mencapai 54 mbml, di daerah Sanur dan Kuta lebih dari 50 mbml dengan kedudukan maksimum mencapai 75 mbml di Sanur dan 60 mbml di Kuta. Distribusi permukaan air tanah di bawah permukaan laut relatif luas, yakni di daerah pantai selatan dengan ketinggian tempat kurang dari 30 maml.

Simulasi Aliran Air Tanah Kondisi Tidak Tunak (*Transient*), $Q_{abs}-2009$

Simulasi aliran air tanah dengan $Q_{abs}-2009$, yakni pada bulan Juni 2009 atau *time step* 14.055

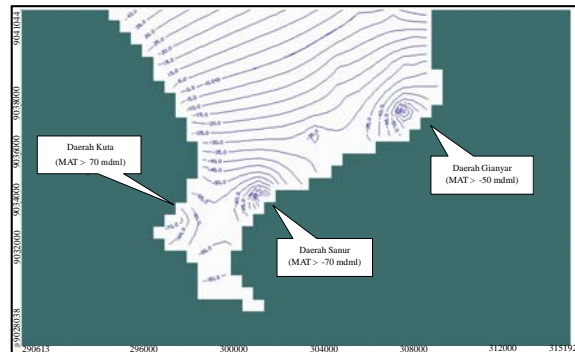
hari (dihitung dari kondisi awal), menunjukkan hasil yang baik setelah dilakukan kalibrasi antara permukaan air tanah hasil penghitungan dan permukaan air tanah hasil pengukuran pada periode 2009 (Juni 2009 atau *time step* 14.055 hari). Hasil simulasi tersebut menunjukkan perbedaan antara permukaan air tanah hasil simulasi dan permukaan air tanah hasil pengukuran pada *Layer 1* (sistem akuifer batuan vulkanik muda) dan *Layer 2* (sistem akuifer Formasi Palasari) umumnya cukup kecil, yakni kurang dari 2,0 m.

Hasil simulasi menunjukkan pada *Layer 1* (sistem akuifer batuan vulkanik muda), kerucut penurunan permukaan air tanah terjadi di daerah Kuta, yakni mencapai sekitar 0 mdml, dan di daerah Badung mencapai 20 maml (Gambar 29). Dibandingkan dengan kondisi pada periode 1989, hal itu berarti telah terjadi peningkatan degradasi air tanah pada sistem akuifer batuan vulkanik muda terutama di daerah Kuta.



Gambar 29. Kerucut penurunan permukaan air tanah pada *Layer 1* (sistem akuifer batuan vulkanik muda), hasil simulasi kondisi tidak tunak (Qabs-2009=120,1 juta m³/tahun).

Pada *Layer 2* (sistem akuifer Formasi Palasari), pola permukaan air tanah di daerah pusat pengambilan air tanah seperti di daerah Gianyar, Kuta, dan Sanur menunjukkan adanya kerucut penurunan permukaan air tanah (Gambar 30). Di daerah Gianyar, kedudukan permukaan air tanah turun mencapai lebih dari 50 mbml (maksimum 72 mbml) sedangkan di daerah Kuta dan Sanur lebih dari 60 mbml dengan penurunan maksimum mencapai 73 mbml di daerah Kuta dan 89 mbml di daerah Sanur. Sebaran daerah dengan kedudukan permukaan air tanah di bawah permukaan laut rela-



Gambar 30. Kerucut penurunan permukaan air tanah pada *Layer 2* (sistem akuifer Formasi Palasari), hasil simulasi kondisi tidak tunak (Qabs-2009=120,1 juta m³/tahun).

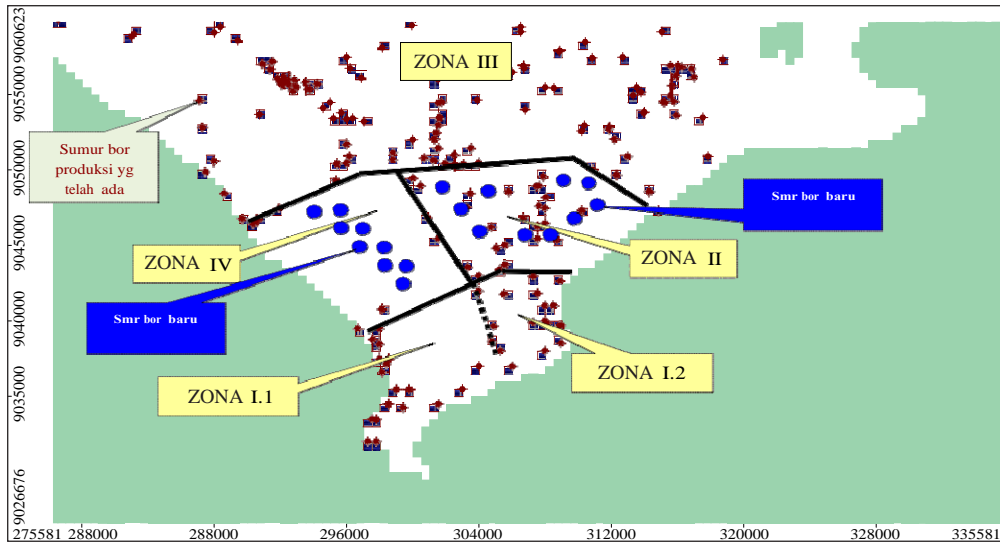
tif sama dibandingkan dengan kondisi pada 1989, yakni menempati daerah dengan ketinggian kurang dari 30 maml.

Simulasi Aliran Air Tanah dengan Skenario Qabs-2012

Simulasi aliran air tanah berdasarkan skenario debit pengambilan air tanah dilakukan untuk memulihkan kedudukan permukaan air tanah pada *Layer 2* (sistem akuifer Formasi Palasari) di daerah pusat pengambilan air tanah, terutama mencakup daerah Kuta, Sanur, dan Gianyar serta daerah yang kedudukan permukaan air tanahnya di bawah permukaan laut akibat Qabs-1989 dan Qabs-2009. Skenario distribusi dan debit pengambilan air tanah dilakukan dengan waktu awal simulasi (*start time*) pada periode 2012 atau 15.330 hari dan waktu akhir simulasi (*stop time*) pada periode 2014 atau 16.060 hari.

Secara umum, skenario Qabs-2012 dilakukan dengan mengurangi Qabs-2009 pada *Layer 2* (sistem akuifer Formasi Palasari) di Zona I (Subzona I.1 dan Subzona I.2) dan memindahkannya ke Zona IV dan Zona II (pada sistem akuifer yang sama) seperti dapat dilihat pada Gambar 31 dan Tabel 3.

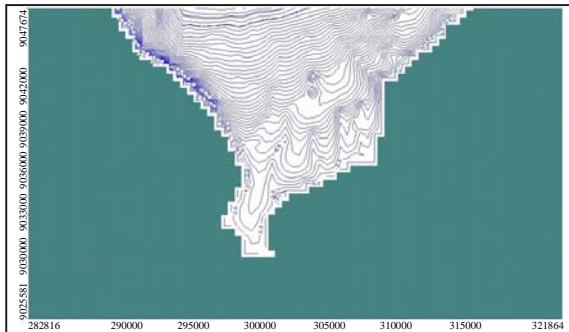
Dengan skenario Qabs-2012 seperti di atas, permukaan air tanah pada *Layer 1* (sistem akuifer batuan vulkanik muda) pulih dengan kedudukan terdalam 0 m dari permukaan laut (Gambar 32); sementara itu, pada *Layer 2* (sistem akuifer Formasi Palasari) umumnya mencapai kedudukan di atas permukaan laut kecuali setempat-setempat di daerah Kuta dan Sanur kedudukannya masih mencapai 2 m di bawah permukaan laut (Gambar 33).



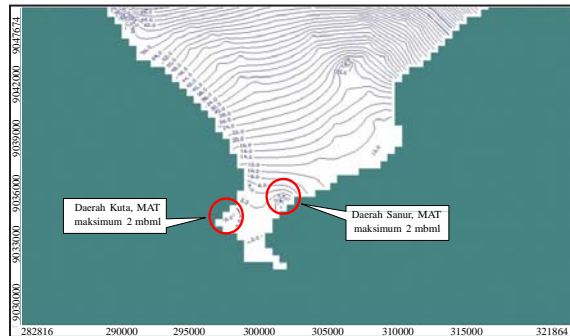
Gambar 31. Skenario jumlah pengambilan air tanah (Qabs-2012).

Tabel 3. Skenario Jumlah Pengambilan Air Tanah (Qabs-2012)

Zona Qabs	2009			2012		
	Σsumur	Qabs [m ³ /hari]	%	Σsumur	Qabs [m ³ /hari]	%
I.1	16	-56875	17	16	-28484	9
I.2	15	-39942	12	15	-15408	5
II	31	-45644	14	41	-70175	21
III	155	-184395	56	155	-184396	56
IV	4	-2166	1	14	-30558	9
JUMLAH	221	-329022	100	241	-329022	100



Gambar 32. Permukaan air tanah pada Layer 1 (sistem akuifer batuan vulkanik muda), hasil simulasi aliran air tanah dengan skenario Qabs-2012.



Gambar 33. Permukaan air tanah pada Layer 2 (sistem akuifer Formasi Palasari), hasil simulasi aliran air tanah dengan skenario Qabs-2012.

Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan

Simulasi aliran air tanah kondisi tunak menunjukkan anisotropi vertikal (k_z/k_x) setiap sistem akuifer 1/4000. Air tanah secara umum mengalir dari utara ke selatan. Di bagian atas sistem aliran air tanah, air tanah mengalir secara vertikal ke bawah, sedangkan di bagian bawah sistem aliran air tanah alirannya secara vertikal ke atas.

Simulasi aliran air tanah kondisi tidak tunak dengan Qabs-1989 dan Qabs-2009 secara umum berpengaruh secara signifikan terhadap perubahan permukaan air tanah pada sistem akuifer produktif yang banyak dimanfaatkan, terutama *Layer 2* (sistem akuifer Formasi Palasari). Perubahan kedudukan permukaan air tanah tersebut ditunjukkan oleh kerucut penurunan permukaan air tanah di daerah Kuta, Sanur, dan Gianyar dengan kedudukan permukaan air tanah terdalam mencapai lebih dari 50 m di bawah permukaan laut.

Upaya pemulihan kedudukan permukaan air tanah dapat dilakukan dengan menyusun skenario pengambilan air tanah, misalnya mulai periode 3 tahun mendatang hingga 5 tahun mendatang, dihitung sejak periode 2009. Permukaan air tanah di Zona I (Subzona I.1 dan Subzona I.2) dengan kedudukan permukaan air tanah di bawah 0 m dari permukaan laut karena pengaruh Qabs-2009 dapat pulih hingga kedudukan 0 mdml jika Qabs-2012 setiap sumur produksi di kedua subzona tersebut dikurangi sekitar 20-50% atau sekitar 5-9% dari Qabs-2009 di daerah model.

Saran

Pemerintah Daerah Provinsi Bali perlu melaksanakan inventarisasi sumur produksi untuk melengkapi data yang telah ada, terutama penentuan koordinat lokasi, kedalaman, kedudukan akuifer yang disadap, debit pengambilan air tanah, dan konstruksi semua sumur produksi yang ada di wilayahnya. Hal itu penting dilakukan untuk melakukan simulasi dengan Qabs pada periode 3 tahun hingga 5 tahun mendatang yang bertujuan untuk validasi data Qabs dan kalibrasi permukaan air tanah hasil penghitungan dengan skenario Qabs yang telah ditetapkan.

Permukaan air tanah pada kondisi awal baik pada *Layer 1*, *Layer 2*, maupun *Layer 3* perlu di-

gunakan sebagai titik referensi (*reference point*) dalam kegiatan pemantauan kuantitas air tanah, yakni untuk mengetahui perubahan permukaan air tanah akibat penggunaan air tanah pada sistem akuifer tersebut.

Skenario pengambilan air tanah yang bertujuan untuk mencegah degradasi air tanah baik kuantitas maupun kualitas digunakan sebagai acuan bagi Pemda setempat dalam penyusunan rencana pengelolaan air tanah khususnya dalam hal pengendalian penggunaan air tanah di daerah lepasan.

Ucapan Terima Kasih—Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala Pusat Lingkungan Geologi (sekarang Pusat Sumber Daya Air Tanah dan Geologi Lingkungan) yang telah memberikan kesempatan untuk melakukan penelitian ini. Terima kasih juga disampaikan kepada Idham Effendi yang telah membantu dalam memasukan data untuk pemodelan.

Acuan

- Binnie dan Partners (Far East) Ltd., 1994. *Groundwater Evaluation for Water Resources Projects*. Ministry of Public Works.
- Danaryanto, H., 1991. *Groundwater Quantification for Four Urban Development Areas - Laporan Pengumpulan Data, Evaluasi, dan Pengembangan Konsep Model Air Tanah Daerah Denpasar, Bali, DEG-Bandung-BGR-Hannover, Bandung*.
- Dinas Pekerjaan Umum dan Lingkungan Hidup, 2009. *Jumlah Pengambilan dan Pemanfaatan Air Bawah Tanah di Kota Denpasar, Kabupaten Tabanan, Badung, dan Gianyar, Pemerintah Provinsi Bali*.
- Guiger, N. dan Thomas, F., 2003. *User's Manual for Visual Modflow*. Waterloo Hydrogeologic Inc., Ontario, Canada.
- Haryadi, T. dan Schmidt, G., 1991. *Groundwater Quantification for Four Urban Development Areas - Groundwater Flow Simulation Model, Denpasar*. Bundesanstalt fuer Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- Haryadi, T., Setiawan, T., dan Effendi, I., 2009. *Kuantifikasi dan Pemodelan Air Tanah CAT*. Denpasar-Tabanan. Pusat Lingkungan Geologi, Bandung.
- Kruseman, G.P. dan de Ridder, N.A., 1970. *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data. Bulletin II, International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands*.
- Shaw, E.M., 1983. *Hydrology in Practice*. Van Nostrand Reinhold (UK) Co. Ltd. Molly Millars Lane, Wokingham, Berkshire, England.