

PEMODELAN AIR TANAH DI CEKUNGAN AIR TANAH (CAT) SINGARAJA DENGAN VISUAL MODFLOW

Ketut Agus Karmadi, I Made Sastra Wibawa, Ida Bagus Wirahaji

*Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Mahasaraswati Denpasar
Email: agus.karmadi@gmail.com*

ABSTRAK: Cekungan Air Tanah (CAT) Singaraja adalah merupakan cekungan air tanah utama andalan untuk wilayah Singaraja dan sekitarnya. Begitu pentingnya Cekungan Air Tanah tersebut bagi penduduk di Singaraja maka CAT ini sangat perlu sekali untuk dijaga agar potensi air tanah tersebut tidak mengalami degradasi secara drastis mengalami penurunan akibat pemboran air tanah yang berlebihan karena pada daerah tersebut merupakan daerah pariwisata dan perumahan. Untuk melihat perilaku terhadap perubahan muka air tanah yang terjadi di CAT Singaraja maka dilakukan pemodelan air tanah dengan menggunakan program Visual MODFLOW Premium 4.3. Program tersebut selanjutnya dikalibrasi dengan menggunakan data muka air yang dianalisis oleh Subdin ESDM Provinsi Bali pada tahun 2000. Setelah dilakukan kalibrasi maka dilakukan analisis pemodelan sampai dengan tahun 2021 sehingga diperoleh hasil kondisi muka airnya. Berdasarkan hasil muka air pada tahun 2000 maka selanjutnya dilakukan skenario dengan meningkatkan jumlah pemompaan di seluruh lokasi baik secara kuantitas maupun secara areal. Berdasarkan hasil skenario tersebut maka terjadi surutan yang lebih besar pada skenario I sampai dengan skenario III dibandingkan dengan urutan yang terjadi pada skenario IV sampai dengan skenario VI.

Kata kunci: Air Tanah, CAT Singaraja, Visual MODFLOW 4.3.

ABSTRACT: The Singaraja Groundwater Basin (CAT) is the mainstay groundwater basin for the Singaraja region and its surroundings. Once the importance of the Groundwater Basin for residents in Singaraja, this CAT is very necessary to be maintained so that the potential for groundwater does not experience drastic degradation due to excessive groundwater drilling because the area is a tourism and residential area. To see the behavior of groundwater level changes that occur in the Singaraja CAT, groundwater modeling is carried out using the Visual MODFLOW Premium 4.3 program. The program is then calibrated using water level data which was analyzed by the ESDM Sub-Department of Bali Province in 2000. After calibration Then the modeling analysis is carried out until 2021 so that the results of the water level conditions are obtained. Based on the results of the water level in 2000, the next scenario was carried out by increasing the amount of pumping in all locations both in terms of quantity and area. Based on the results of these scenarios, there will be a larger downturn in scenario I to scenario III compared to that in scenario IV to scenario VI.

Keywords: underwater, Singaraja CAT, Visual MODFLOW 4.3.

PENDAHULUAN

Sebagai daerah tujuan wisata di Indonesia, Kabupaten Buleleng dan sekitarnya termasuk salah satu kawasan yang terletak di Bali Utara 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 Bali Utara yang mencakup Kota Singaraja, berbatasan di selatan Kabupaten Tabanan, dan Kab.Badung, di Timur dengan Kab. Karangasem dan di Barat dengan Kab. Jembrana. 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 pengendalian pengambilan air tanah bagi pemerintah daerah setempat dalam rangka konservasi air tanah CAT Bali Utara.

Makalah ini menyajikan uraian tentang hasil simulasi aliran air tanah dan penyusunan skenario penggunaan air tanah di CAT Bali utara yang meliputi CAT Singaraja, dengan menerapkan program aplikasi Visual Modflow Versi 4.3.



Gambar 1. Peta wilayah penelitian

PEMODELAN AIR TANAH

Pemodelan air tanah adalah peniruan kondisi sistem air tanah dengan cara penyederhanaan sistem air tanah dan upaya manusia dalam pengelolaan yang berkaitan dengan air tanah. Prinsip pemodelan air tanah adalah untuk memperkirakan seberapa jauh perubahan kondisi muka air tanah akan terjadi di masa mendatang akibat pola pengembangan air tanah yang sedang berlangsung atau akibat usulan pengelolaan baru.

Evaluasi kondisi air tanah saat ini merupakan interpretasi hasil simulasi kondisi saat ini dan evaluasi kondisi air tanah di masa mendatang merupakan interpretasi hasil simulasi kondisi air tanah di kemudian hari. Peramalan dampak akibat perubahan alam dan aktivitas manusia terhadap sistem air tanah, dipakai sebagai bahan pertimbangan untuk usulan pengembangan selanjutnya.

Pemodelan air tanah mengalami perkembangan. Berbagai cara untuk menilai kondisi air tanah dikembangkan, misalnya laju imbunan air tanah dihitung dengan ArcGIS dan Modflow yang telah diterapkan sebagai kondisi batas imbunan untuk model airtanah regional Provinsi Bali.

1. Kondisi mata air tanah dangkal di CAT Singaraja

Sumur dangkal berupa sumur gali penduduk banyak ditemukan di wilayah Kecamatan Banjar, dengan tinggi muka air mulai 1,4 m sampai 17,1 m bmt dan di wilayah Kecamatan Seririt 0,6 m sampai yang paling dalam 13 m bmt. Muka air tanah pada sumur gali penduduk di Kecamatan Buleleng, Sukasada, dan Sawan pada umumnya cukup dangkal yaitu < 7 m dari muka tanah, dengan kedalaman maksimum 7,82 m.

JICA (1990) telah melakukan pengukuran muka air tanah dangkal dan pada tahun 2001 ESDM Provinsi Bali melakukan kembali pengukuran muka air tanah dangkal dari sumur gali. Dari kedua pengukuran tersebut terdeteksi adanya pergeseran pola garis kontur muka air tanah 20 m dari Selatan ke Utara. Kedudukan muka air tanah dangkal yang diukur melalui sumur gali di daerah dataran Kalibukbuk adalah 1,5 – 3,5 mdmt, sedangkan di daerah perbukitan 11,8 – 17,5 mdmt (Karmadi, 2020).

Secara umum berdasarkan pengukuran, pola muka air tanah dangkal pada periode tahun 1990-1995 digambarkan pada peta kontur muka air, dengan arah aliran dari Selatan ke Utara. Pola muka air tanah bebas tahun 1990 dan tahun 1995 tidak berubah, sedangkan kedudukan muka air tanah bebas sedikit bergeser dari Utara ke arah Selatan 1-5 m.

2. Sistem akuifer Cekungan Air Tanah (CAT) Singaraja

Gambaran sistem akuifer di cekungan air tanah Singaraja dapat dikelompokkan menjadi 2 lapisan yaitu; di bagian atas merupakan akuifer bebas dan dibagian bawah merupakan akuifer terkekang. Berdasarkan hasil pendugaan geolistrik, dijumpai akuifer bebas yang mempunyai kedalaman sangat beragam dari 3 m sampai 15 m dmt (di bawah muka tanah), sedangkan akuifer terkekang terdiri dari akuifer terkekang I dengan kedalaman dari 3 m sampai 35 mdmt dan dengan ketebalan rata-rata 10 m sampai 30 m. Kelompok akuifer terkekang II, mempunyai kedalaman pada interval kedalaman 22 m sampai 75 mdmt dan ketebalan akuifer bervariasi antara 24 m sampai 94 m, sedangkan kisaran umum adalah 50 m sampai 70 m. Akuifer utama yang berperan pada cekungan air tanah Singaraja adalah akuifer terkekang I dan II.

METODE PENELITIAN

Metode yang dilakukan pada penelitian ini adalah pemodelan air tanah dengan menggunakan model dari VISUAL MODFLOW. Program ini digunakan untuk melihat hasil perilaku pergerakan air tanah. Untuk program MODFLOW ada beberapa mesin atau algoritma perhitungan yang tersedia yaitu

MODFLOW 96, MODFLOW 2000, MODFLOW 2005, MODFLOW SURFACT, dan MODFLOW Seawat 2000. Untuk lokasi studi, algoritma yang digunakan menggunakan mesin MODFLOW SURFACT dengan tipe simulasi unsteady state flow (aliran tak langgeng). Berdasarkan hasil simulasi setelah dilakukan kalibrasi dan verifikasi model tersebut, dapat dilihat hasil keluaran model berupa pergerakan besarnya kecepatan aliran air tanah baik besar maupun arah aliran yang terjadi, serta proses muka airnya.

Model simulasi air tanah yang digunakan pada studi ini adalah menggunakan software Visual MODFLOW Premium versi 4.3. Perangkat lunak ini merupakan sebuah program komputer yang dapat mensimulasikan aliran tanah tiga dimensi yang melewati media porous dengan menggunakan metode beda hingga (finite- difference) (McDonald dan Harbaugh, 1988).

1. Dasar teoritis Modflow

Proses terjadinya aliran air tanah, dijelaskan dengan aspek dasar teori air tanah. Persamaan aliran yang digunakan dalam program MODFLOW adalah dengan mengasumsikan sebuah kotak dimana aliran yang masuk ke dalam kotak dari berbagai arah sumbu dikurangi oleh aliran yang ke luar kotak dari berbagai arah sumbu sama dengan nol, yaitu untuk aliran langgeng (steady state groundwater flow), seperti yang terlihat berikut ini (Harbaugh, et al. 2000):

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} \Delta x \cdot \Delta z \cdot \Delta y + \frac{\partial v_y}{\partial y} \Delta y \cdot \Delta z \cdot \Delta x + \frac{\partial v_z}{\partial z} \Delta z \cdot \Delta x \cdot \Delta y = 0 \tag{1.1}$$

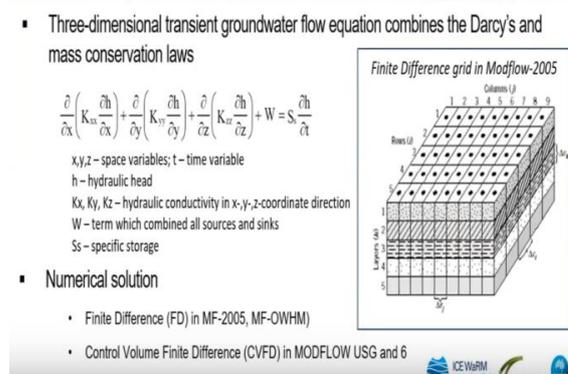
$$V_x = -k \frac{\partial \phi}{\partial x} V_y = -k \frac{\partial \phi}{\partial y} V_z = -k \frac{\partial \phi}{\partial z} \tag{1.2}$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \text{ atau } \nabla^2 \phi = 0 \tag{1.4}$$

Persamaan umum yang digunakan untuk aliran air tanah lekang yang diadopsi oleh MODFLOW adalah sebagai berikut (Harbaugh, et al. 2000):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \tag{1.5}$$

dengan keterangan K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} adalah nilai kelulusan hidraulik arah sumbu x, y, dan z, h adalah tinggi potensiometri, W adalah fluks volume, S_s adalah tampungan spesifik pada material porous.



Gambar 2. Kenampakan 3 dimensi aliran air tanah (*finite difference*), hukum Darcy

Persamaan tersebut di atas dapat diselesaikan dengan menggunakan beda hingga (*finite difference*) yang dibagi berdasarkan grid. Persamaan yang dihasilkan dengan menggunakan beda hingga untuk aliran tak langgeng adalah sebagai berikut (Harbaugh, et al. 2000)

$$\begin{aligned} & CR_{i,j-\frac{1}{2},k} (h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CR_{i,j+\frac{1}{2},k} (h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{i-\frac{1}{2},j,k} (h_{i-1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) \\ & + CC_{i+\frac{1}{2},j,k} (h_{i+1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} (h_{i,j,k-1}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} (h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) + P_{i,j,k} h_{i,j,k}^m + \\ & Q_{i,j,k} = SS_{i,j,k} (DEL R_j \times DEL C_i \times THICK_{i,j,k}) \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t^m - t^{m-1}} \end{aligned} \tag{1.6}$$

Keterangan :

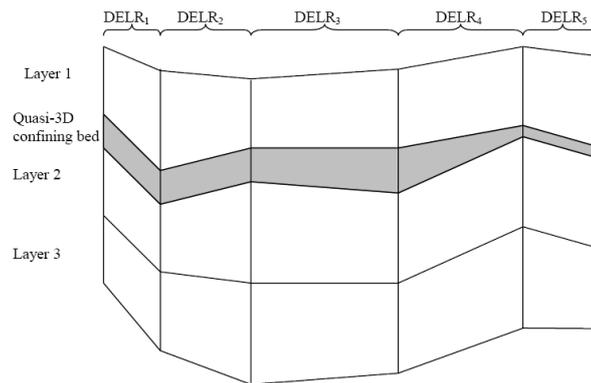
$h_{i,j,k}^m$, tinggi pada kotak cell i, j, k pada waktu m
 (m); m k,j,i CC,CR,CV ,konduktivitas hidraulik atau branch konduktivitas antara node i,j,k $P_{i,j,k}$ jumlah koefisien ketinggian dari sumbernya dan keluarannya (m^2 /s); $Q_{i,j,k}$, jumlah konstan dari sumbernya dan keluarannya dengan $Q_{i,j,k} < 0.0$ untuk aliran keluaran dari sistem air tanah dan $Q_{i,j,k} > 0.0$ untuk aliran masuk dalam sistem (m^3/s); $SS_{i,j,k}$, spesifik storage (1/m); $DEL R_j$, lebar cell pada

kolom j pada semua baris (m); $DEL C_i$, lebar cell pada baris I pada semua kolom (m); $THICK_{i,j,k}$, tebal dari setiap cell I,j,k (m); t_m , waktu pada waktu m (detik).

Persamaan ini merupakan bentuk diskritisasi dari persamaan sebelumnya yang bersifat kontinu (atau menerus). Jika dijumpai dua sistem akuifer dengan sekat akuitar di antara keduanya, maka rumus tersebut di atas berlaku untuk masing-masing akuifer dengan datanya sendiri-sendiri (termasuk kondisi batasnya) ditambah dengan rumus aliran air tanah yang melalui akuitar.

Untuk persamaan aliran langgeng maka persamaan yang di atas dinyatakan dalam bentuk persamaan berikut ini (Harbaugh, et al. 2000):

$$CR_{I,j-\frac{1}{2},k} (h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CR_{I,j+\frac{1}{2},k} (h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{I-\frac{1}{2},j,k} (h_{i-1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{I+\frac{1}{2},j,k} (h_{i+1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{I,j,k-\frac{1}{2}} (h_{i,j,k-1}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{I,j,k+\frac{1}{2}} (h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) + P_{I,j,k} h_{i,j,k}^m + Q_{i,j,k} = 0$$



Gambar 3. Penampang melintang dari sistem akuifer berdasarkan baris

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemodelan air tanah dengan Visual Modflow 4.3 digunakan untuk melihat model perilaku aliran air tanah di Cekungan Air Tanah (CAT) Singaraja dilakukan dengan menggunakan persamaan-persamaan yang telah umum digunakan. Pemodelan air tanah merupakan pendekatan suatu sistem yang ada di dalam tanah. Jadi proses pemodelan tersebut sedapat mungkin dilakukan peniruan sistem aliran air tanah yang terjadi dengan melihat kondisi kenyataan di lapangan.

Peniruan sistem tersebut maka diperlukan karakteristik dari daerah tersebut yaitu berupa parameter air tanah. Parameter tersebut merupakan masukan dari program Visual Modflow agar dapat dijalankan. Pemodelan air tanah dengan Visual Modflow dapat berjalan apabila data yang diperlukan tersedia, untuk itu maka diperlukan pengumpulan data yang berkaitan dengan air tanah di CAT Singaraja.

Pengumpulan data dilakukan untuk memperoleh informasi yang berkaitan dengan penggunaan air tanah yaitu yang berkaitan dengan eksploitasi air tanah untuk berbagai keperluan. Pemanfaatan air tanah di masyarakat sangat banyak dan secara signifikan pemanfaatan air tanah dilakukan oleh industri. Data yang telah berhasil dikumpulkan terdiri sumur gali dan sumur bor yang diperoleh dari P2AT dan juga dari Sub Dinas ESDM yang berkaitan dengan izin perolehan pemanfaatan air tanah serta kajian atau studi yang berkaitan dengan air tanah pada tahun-tahun sebelumnya.

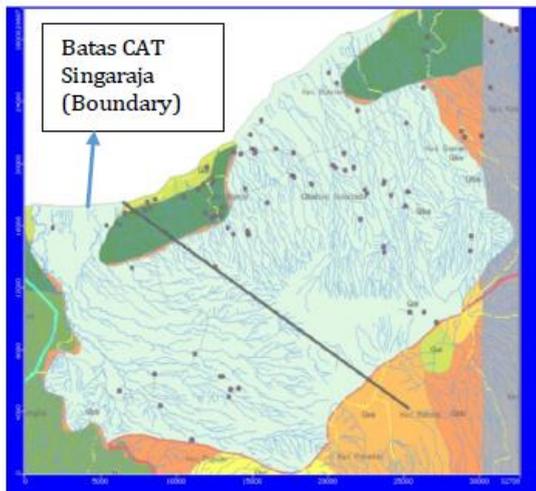
1. Model air tanah Singaraja

Pemodelan air tanah merupakan suatu pendekatan untuk menirukan keadaan pergerakan air tanah baik secara vertikal maupun horizontal. Secara prinsip bahwa pemodelan ini menggunakan kaidah-kaidah atau persamaan yang telah umum digunakan untuk memperkirakan besaran maupun distribusi pergerakan air tanah. Pada lokasi studi pemodelan terdiri dari dua akuifer dengan tiga lapisan dengan kedalaman lapisan akuifer yang dibuat sekitar 100 m dan lapisan di antara akuifer sekitar 1m. Untuk menirukan pergerakan air tanah seperti yang telah disebutkan pada bahasan sebelumnya menggunakan program Visual Modflow 4.3 maka perlu untuk melakukan inputing data-data yang diperlukan.

2. Data input untuk pemodelan

a. Data spasial

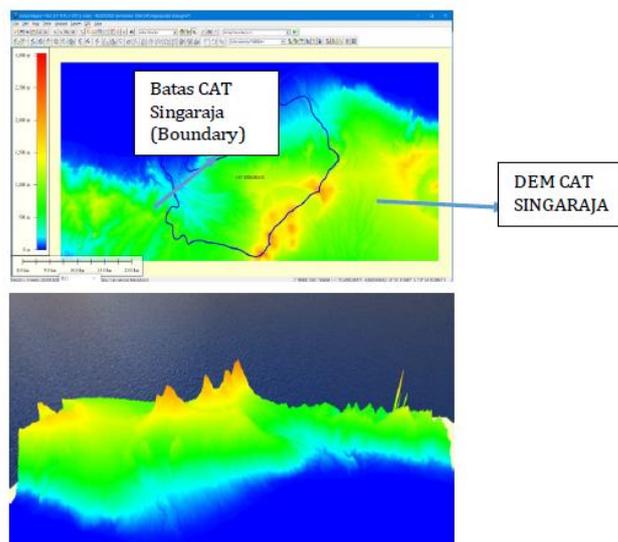
Pemodelan air tanah merupakan suatu pendekatan untuk menirukan keadaan pergerakan air tanah baik Dalam memodelkan air tanah langkah awal adalah pembuatan peta spasial dengan mengambil batas CAT yang telah ditetapkan oleh Pemerintah Daerah dalam hal ini Sub Dinas ESDM Provinsi Bali. Penentuan Batas (boundary) ini sangat penting untuk membatasi area CAT tersebut dengan menggunakan software GIS (Geographic Information system) dengan sistem proyeksi WGS 84 dari Bakosurtanal (BIG) yaitu menggunakan Software ArcGIS seperti terlihat pada gambar berikut.



Gambar 4. Peta area CAT Singaraja

b. Inputing data DEM

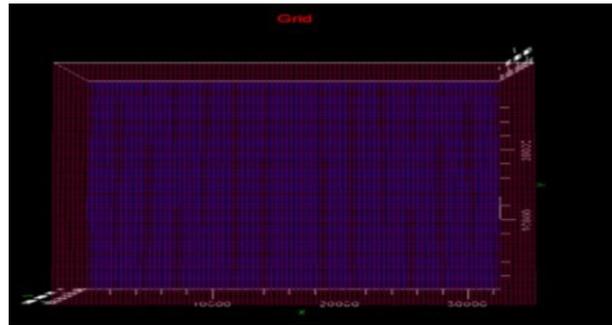
Langkah selanjutnya adalah pembuatan Peta DEM (digital elevation Model) untuk mendapatkan elevasi dari are CAT dan pembuatan 3D. DEM didapat dengan mendownload dari DEMNAS dengan menggunakan software Global Mapper. Selanjutnya diinput di Modflow dengan perintah : Impor elevation.



Gambar 5. Digital elevation model (DEM) CAT Singaraja

c. Import elevation

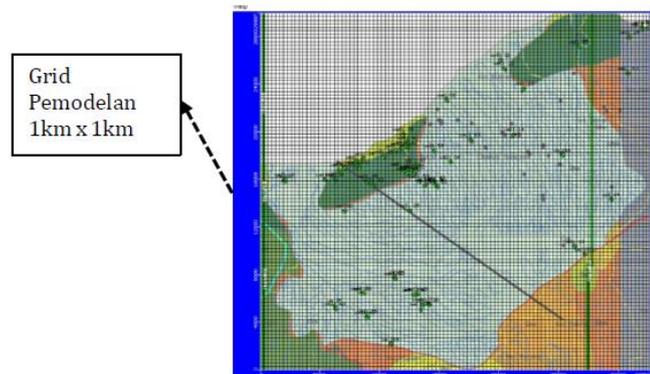
Digital Elevation Model (DEM) atau model ketinggian yang telah diperoleh dengan menggunakan software Global Mapper, selanjutnya di import dengan software modflow sehingga ketinggian atau elevasi akan muncul seperti gambar berikut :



Gambar 6. Grid pemodelan mudflow

1) Data grid model

Sebagai langkah awal dalam pemodelan tersebut adalah melakukan pembagian grid atau segmentasi terhadap CAT Singaraja dengan ukuran yang diinginkan. Adapun ukuran grid yang digunakan adalah sebesar 1 km x 1 km dengan luas CAT Singaraja kl. 1012.62 km². Pembagian lokasi studi menjadi ukuran yang lebih kecil diharapkan agar supaya parameter dan karakteristik dari grid tersebut menjadi lebih homogen. Adapun bentuk sistem grid dari lokasi CAT Singaraja dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Sistem grid CAT Singaraja

Selain dari ukuran grid, juga harus ditentukan sistem akuifer yang terjadi di CAT Singaraja. Seperti yang telah dijelaskan bahwa di CAT Singaraja terdiri dari dua akuifer maka dalam sistem pemodelan digunakan tiga lapisan yaitu lapisan pertama dan lapisan ketiga sebagai akuifer dan lapisan kedua sebagai lapisan yang kedap.

d. Data sumur bor (Pumping Well)

Data sumur bor (*pumping well*) merupakan salah satu parameter utama yang diperlukan dalam pemodelan di CAT Singaraja. *Pumping well* tersebut dapat berupa pengambilan air maupun sebagai peresapan air ke dalam tanah. Karakteristik dari setiap *pumping well* meliputi data debit pengambilan dan juga peresapan air beserta periodenya. Selain itu juga diperlukan *interval screen* dari setiap sumur bor tersebut.

Untuk lokasi studi, data sumur bor di lokasi studi hanya tersebar pada daerah pada bagian bawah dari CAT singaraja sehingga terpusat hanya pada beberapa lokasi saja. Data tersebut dimasukkan melalui *pumping well* yang terdiri dari 18 buah smur yang diperoleh dari berbagai sumber termasuk P2AT, PU, JICA dan juga dari industri yang datanya diperoleh dari Sub Dinas Energi Sumber Daya Mineral (ESDM). Keseluruhan data tersebut berdiri sejak tahun 1992 sampai dengan sekarang. Berdasarkan data yang terkumpul diperoleh informasi sumur bor sekitar 19 buah untuk periode tahun 1990 sampai dengan 1995, sementara periode penambahan sampai pada tahun 2000 ada sekitar 13 buah dan sampai pada tahun 2013 ada penambahan sekitar 22 buah dan sampai pada tahun 2018 terjadi penambahan 3 buah. Data *pumping well* yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1 sampai pada Tabel 3. Adapun penyebaran dari *pumping well* di CAT Singaraja dapat dilihat pada Gambar 8 dan juga tampilan masukan data yang berkaitan dengan *pumping well* seperti pada Gambar 9.

Tabel 1. Data pumping well mulai dari tahun 1990-1995

ID	KODE	STASIUN	BUIUR	LINTANG	DESA	KECAMATAN	M	LT_DT	MUKA_AIR_M	DRAW_DOWN	PENGEBORAN	DATA
168	NB.48	Banjar Asem	114.8877360	-8.205458	BANJAR ASEM	SERIRIT	115	8	11.8	3.2	1992/1993	PIB bagian proyek PA
169	NB.50	Pangkung Paruk	114.8888890	-8.2138890	PANGKUNGPANUK	SERIRIT	110	0.5	17.5	10	1992/1994	PI, JICA
170	BL.371	Seririt	114.9364850	-8.1940070	SEIRIT	SERIRIT	120	0.775	5.8	3.5	1977	PU
171	Kayu putih	Kayu Putih	115.0333060	-8.1662220	KAYUPUTIH	SUKADASA	125	9	8.47	7.8	1993	PIB bagian proyek PA
172	NB.25	NB.25	115.0323060	-8.1683330	KAYUPUTIH	SUKADASA	103	5.96	5.8	1.3	1989/1990	PIB bagian proyek PA
173	NB.29	NB.29	115.0270560	-8.1686940	KALIASEM	BANJAR	90	8.47	8.47	0.6	1989/1990	PIB bagian proyek PA
174	NB.28	NB.28	115.0240000	-8.0706110	KALIASEM	BANJAR	99	3.28	3.28	1.86	1989/1990	PIB bagian proyek PA
175	NB.25	Kayu Putih	115.0372980	-8.1872270	KAYUPUTIH	SUKADASA	103	5.8	5.8	1.3	1989/1990	PU, JICA
176	NB.26	Kayu Putih	115.0451000	-8.1981920	KAYUPUTIH	SUKADASA	93	4.97	4.97	0.7	1989/1990	PU, JICA
177	NB.27	Kayu Putih	115.0387810	-8.1824110	KAYUPUTIH	SUKADASA	120	19.94	19.94	3.7	1989/1990	PU, JICA
178	NB.28	Kaliasem	115.0321730	-8.1884480	KALIASEM	BANJAR	99	5.28	5.28	1.86	1989/1990	PU, JICA
179	NB.29	Kaliasem	115.0282890	-8.1858110	KALIASEM	BANJAR	90	8.47	8.47	0.6	1989/1990	PU, JICA
180	NB.30	Kaliasem	115.0341880	-8.1876510	KALIASEM	BANJAR	120	7.59	7.59	19.91	1989/1990	PU, JICA
181	NB.34	Kalibukbuk	115.0291670	-8.1583330	KALIBUBUK	BULELENG	120	14.66	14.66	10.93	1991/1992	PU, JICA
182	Tk. Mungga	Tk. Mungga	115.0585560	-8.1503890	TUKADMUNGGA	BULELENG	115	8.47	8.47	5.7	2000	PIB bagian proyek PA
183	Anturan	Anturan	115.0498890	-8.1510830	ANTURA	BULELENG	80	8.57	8.57	5.62	2000	PIB bagian proyek PA
184	Jagaraga	Jagaraga	115.1605350	-8.1124780	JAGARAGA	SAWAN	108	8.3	8.3	5.5	1990/1991	PU, JICA
185	Panji	Panji	115.0712270	-8.1480690	PANJI ANOM	SUKADASA	132	18.2	18.2	0.89	1993/1994	PU, JICA

3. Karakteristik hidraulik akuifer

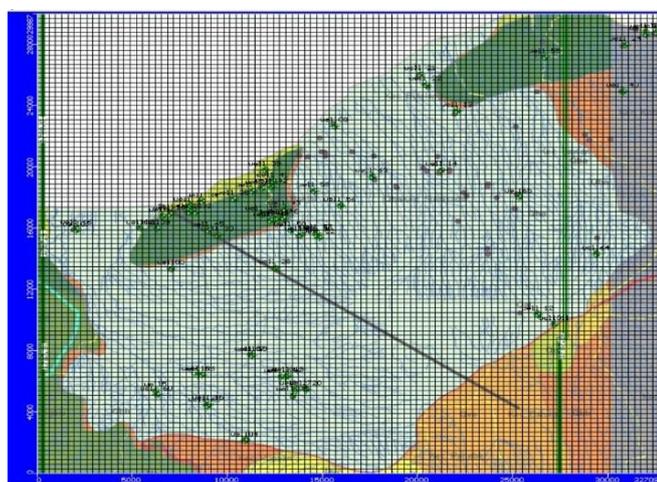
Karakteristik hidraulik akuifer yang berperan pada program *VISUAL MODFLOW* adalah *conductivity*, *storage*, *initial head*, dan *vadose zone*. Pada pemodelan air tanah di CAT Singaraja digunakan karakteristik konduktivitas, kapasitas dan *initial head* sebagai parameter model untuk melakukan simulasi. Adapun lebih jelasnya dari setiap data tersebut dijelaskan berikut ini. **Konduktivitas atau Koefisien Kelulusan ($k = Permeability$)**, merupakan besaran yang menunjukkan jumlah aliran per satuan luas permukaan di bawah pengaruh gradien hidraulik dengan satuan $L^3 / L^2 \times t = L / t$. Dari hasil evaluasi data pemompaan uji semua sumur PAT menunjukkan bahwa sumur-sumur di wilayah CAT Singaraja umumnya mempunyai nilai koefisien kelulusan rata-rata antara 1 – 10 m/hari seperti pada Tabel 4. Nilai koefisien kelulusan di atas berdasarkan klasifikasi United State Geological Survey (*USGS*) termasuk kelulusan sedang sampai tinggi. Menurut Illman, et al. (2010) bahwa nilai konduktivitas merupakan salah satu komponen dalam pemodelan air tanah yang sangat berperan penting pada kondisi aliran *steady*, dan beberapa pendekatan dilakukan untuk menentukan besarnya nilai konduktivitas pada suatu wilayah. Straface, et al. (2010) menghitung nilai konduktivitas hidraulik dan *water table* pada model skala laboratorium dengan metode *means of the self potential*.

Tabel 2. Data pumping well mulai dari tahun 1995-2016

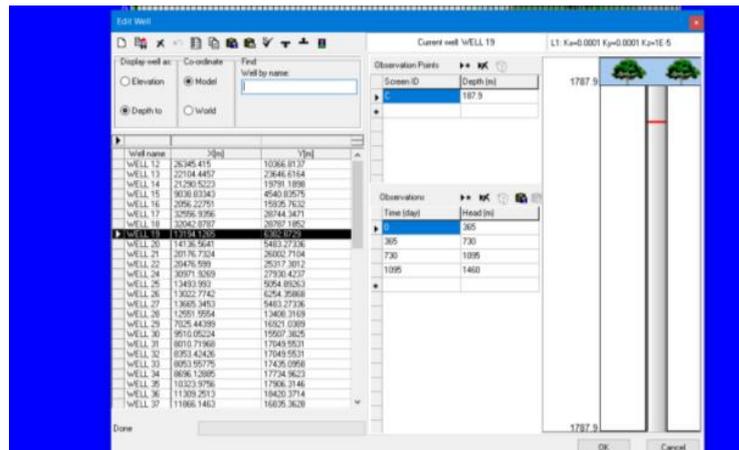
NOMOR URUT	LOKASI		NAMA/ALAMAT PERUSAHAAN	JENIS USAHA	JENIS SIPA	JENIS PENGAMBILAN AIR		DEBIT MAX DIUNKAN (MP/Hari)	KETERANGAN (KOORDINAT)
	KECAMATAN	DESA				S. BOR / S. GALI	Jumlah Pumping Test (t / d)		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Banjar	Gobleg	PT.MARSINI BALI (MUNDUK MOONG PLATATION) Br.Dinas Asah	Hotel	Baru	SB.1	-	Maksimum 20 MP/Hari (12 jam/Hari)	LS : 08° 14'21.6" BT : 115° 04'18.8"
2	Tejakula	Bondalem	PT.FELICIANAS RESORT Br.Dinas Jro Kuta	Hotel	Baru	SB.1	-	Maksimum 10 MP/Hari (12 jam/Hari)	LS : 08° 06'91.9" BT : 115° 18'41.4"
3	Tejakula	Bondalem	PT.FELICIANAS RESORT Br.Dinas Jro Kuta	Hotel	Baru	SB.2	-	Maksimum 5 MP/Hari (12 jam/Hari)	LS : 08° 06'32.6" BT : 115° 18'40.9"
4	Tejakula	Bondalem	PT.PRAMA VEDA BALI Br.Dinas Kelod Kauh	Hotel	Baru	SG.1	-	Maksimum 5 MP/Hari (12 jam/Hari)	LS : 08° 06'36.3" BT : 115° 18'57.6"
5	Tejakula	Bondalem	PT.PRAMA VEDA BALI Br.Dinas Kelod Kauh	Hotel	Baru	SB.1	-	Maksimum 5 MP/Hari (12 jam/Hari)	LS : 08° 06'35.6" BT : 115° 18'58.3"
6	Banjar	Kaliasem	PT. C A R U D I A N (ADIRAMA HOTEL & RESTAURANT) Jln. Singaraja-Seririt, Br. Enjung Sangiang	Hotel	Baru	SB.1	-	Maksimum 5 MP/Hari (12 jam/Hari)	LS : 08° 09'57.5" BT : 115° 00'45.8"
7	Banjar	Kaliasem	PT. C A R U D I A N (ADIRAMA HOTEL & RESTAURANT) Jln. Singaraja-Seririt, Br. Enjung Sangiang	Hotel	Baru	SB.1	-	Maksimum 5 MP/Hari (12 jam/Hari)	LS : 08° 09'57.2" BT : 115° 00'46.8"
8	Buleleng	Pemaron	HOTEL PURI SARON BARUNA BEACH COTTAGE Jln. Pantai Baruna	Hotel	Perpanjangan	SB.1	-	Maksimum 10 MP/Hari (12 jam/Hari)	LS : 08° 09'02.1" BT : 115° 03'26.6"
9	Buleleng	Pemaron	HOTEL PURI SARON BARUNA BEACH COTTAGE Jln. Pantai Baruna	Hotel	Perpanjangan	SB.1	-	Maksimum 10 MP/Hari (12 jam/Hari)	LS : 08° 08'00.7" BT : 115° 03'26.0"
10	Buleleng	Pemaron	PT.INDONESIA POWER UPJP BALI Jln.Raya Singaraja Seririt KM6	Pembangkit Listrik	Perpanjangan	SB.1	-	Maksimum 30 MP/Hari (12 jam/Hari)	LS : 08° 08'08.7" BT : 115° 03'39.1"

Tabel 3. Data pumping well mulai dari tahun 2016-2020

NOMOR URUT	LOKASI		NAMA / ALAMAT PERUSAHAAN	JENIS SIPA	JENIS PENGAMBILAN AIR	
	KECAMATAN	DESA			S. BOR / S. GALI	Pumping Test (lt / dt)
1	2	3	4	6	7	8
1	Buleleng	Baryuasri	SAMA JAYA MOTOR Jl. A. Yani No. 196	Baru	SB	8
2	Buleleng	Kalibubuk	BANYUALIT SPA' N RESORT Jl. Lavian, Lovina	Baru	SG	5
3	Gerogak	Pejarakan	PT. DINAR DARUM LESTARI (UNIT PERWAKILAN GORIS)	Baru	SB	6
4	Gerogak	Pejarakan	PT. DINAR DARUM LESTARI (UNIT PERWAKILAN Tembok)	Baru	SB	5
5	Banjar	Temukus	PT. KRISNA WAHANA PERMAINAN (KRISNA FUNTASTIC LAND) Jl. Singaraja Gilimanuk	Baru	SB	5
6	Banjar	Temukus	CV. KRISNA KULINER (BEBEK TEPI SAWAH) Jl. Singaraja Gilimanuk	Baru	SB	5
7	Tejakula	Gretek	EDDY WAHYUONO Desa Gretek, Tejakula, buleleng	Baru	SG	5
8	Gerogak	Sumber Kima	EDDY WAHYUONO Dusun Pengametan, Ds. Sumber Kima	Baru	SB	5
9	Banjar	Kaliasem	PT. SELTIM BĀTARA (Hotel Padmasari) Br. Dinas Enjung Sangiang	Baru	SG	7
10	Gerogak	Pemuteran	PT. GEDE ANUGRAH MARGI ANTAI (HOTEL ANTARI) Br. Dinas Palasari	Baru	SB	8
16	Buleleng	Kampung Baru	PT. ARTA SEDANA PROPERTINDO (HARDYS MALL URAPATI) Jl Surapati	Perpanjangan	SB.1	-
17	Tejakula	Penutukan	PT. BALI VILLA DIVE RESORT Jln. Singaraja-Amlapura	Baru	SG.1	
18	Tejakula	Penutukan	PONDOK WISATA ALAM MIMPI	Baru	SG.1	
19	Gerogak	Penyabagan	PT. YONISO MANASIKARA Jl. Seririt, gilimanuk, br. Triamerta Dsn. Penyabangan Kec. grogak, Kab. Buleleng	baru	SB.1	
20	Sukasada	Wanagiri	CV BAGA TIRTA UTAMA (AIR MINUM DALAM KEMASAN) Br. dinas panji, desa wanagiri	Baru	SB.1	
21	Buleleng	Kampung Baru	PT. HARDYS GLOBAL INVESTINDO (POP HOTEL HARDTS SINGARAJA SQUARE) Jl. Surapati.	Perpanjangan	SB.1	
22	Seririt	Sulanyah	PT. MEKAR SHANTI GRAHA Dusun Taman sari	Perpanjangan	SB.1	



Gambar 8. Distribusi pumping well di CAT Singaraja



Gambar 9. Tampilan input untuk pumping well

Tabel 4. Koefisien kelulusan sumur bor PAT pada CAT Singaraja

No	Nilai K (m/hari)	Jumlah sumur	%	Kelas
1.	$<10^{-3}$	-	-	-
2.	$10^{-3}-10^{-2}$	-	-	Rendah
3.	$10^{-2}-10^{-1}$	1	1.64	1
4.	$10^{-1}-10^0$	12	9.67	Sedang
5.	10^0-10^1	44	72.13	-
6.	10^1-10^2	4	6.56	Tinggi
7.	$>10^2$	-	-	-
Jumlah		61	100	

Klasifikasi USGS

Untuk lebih jelasnya nilai konduktivitas dari setiap sumur tersebut dapat dilihat pada Tabel 6. **Kapasitas (S= storage)**, yang digunakan dalam pemodelan ini adalah dengan menggunakan data yang homogen diseluruh lokasi CAT Singaraja secara horizontal namun berbeda secara vertikal. Kapasitas (*storage*) yang digunakan dalam program MODFLOW terdiri dari kapasitas spesifik (*specific storage*), *specific yield*, porositas efektif dan total porositas. Adapun nilai dari setiap variabel tersebut adalah sebagai berikut:

1. Kapasitas spesifik (S_s) = 10^{-5} (1/m)
2. Specific Yield = 0.2
3. Eff. Porosity = 0.15
4. Dan total porosity = 0.3

Initial Head, yang digunakan dalam pemodelan ini adalah menggunakan cara *trial and error* dengan melakukan penyesuaian hasil akhir muka air tanah dari pemodelan pada tahun 1995 dengan data muka air tanah yang dihasilkan dari ESDM Provinsi Bali. Dengan diperolehnya hasil muka air yang sesuai, maka selanjutnya nilai *head* awal yang telah digunakan tersebut selanjutnya digunakan untuk pemodelan pada tahun berikutnya. Pemodelan yang digunakan untuk tahun berikutnya merupakan perpanjangan data dan periode simulasi model sampai pada tahun 2018. Untuk pengembangan model dengan berbagai skenario digunakan berdasarkan simulasi sampai pada tahun 2018 ditambah dengan penambahan pengambilan air tanah berupa *pumping well* dengan periode simulasi yang tetap.

Transmisibilitas (T), atau keterusan adalah kecepatan aliran di bawah gradien hidraulik per satuan luas permukaan yang menembus seluruh ketebalan akuifer. Ringkasan hasil evaluasi nilai keterusan untuk sumur-sumur sekitar Singaraja dijelaskan pada Tabel 5. Angka pada tabel di atas menginformasikan bahwa dari nilai koefisien keterusan (T) sumur-sumur di wilayah ini dari sisi kebutuhan domestik memiliki potensi yang besar, karena 46 sumur (75,41 %) mempunyai nilai T antara 10 – 100 m²/hari.

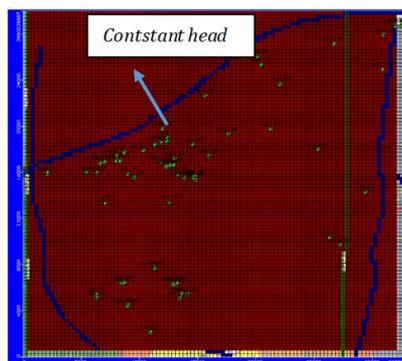
Tabel 5. Koefisien keterusan sumur bor di CAT Singaraja

Nilai T (m ² /hari)	Jumlah sumur	%	Kelas Potensi	
			Domestik	Irigasi
<1	-	-	Kecil	-
1-10 ¹	4	6,56	Sedang	-
10 ¹ -10 ²	46	75,41	Besar	Kecil
10 ² -10 ³	9	14,75	-	Sedang
>10 ³	2	3,28	-	Besar
Jumlah	61	100		

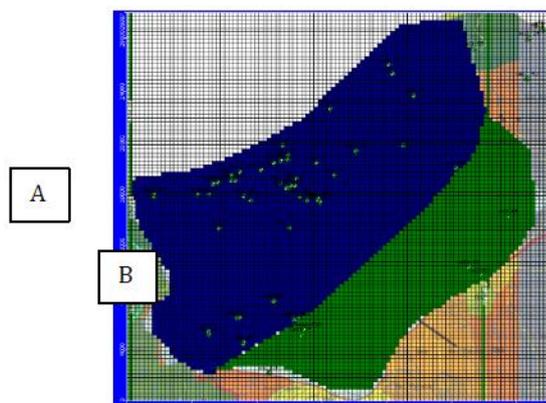
4. Kondisi batas (Boundary Conditions)

Kondisi batas atau *boundary conditions* yang ada di program MODFLOW 4.3 terdiri dari 8 variabel yaitu *constant head*, *river*, *stream*, *general head*, *drain*, *wall*, *recharge* dan *evapotranspiration*. Kondisi batas ini tidak sekaligus semua variabel digunakan pada waktu melakukan pemodelan namun tergantung pada kondisi lokasi dan ketersediaan data. Untuk kasus di CAT Singaraja kondisi batas yang digunakan adalah adanya *constant head*, *wall* dan juga *recharge*.

Constant head digunakan pada grid yang berada di sepanjang daerah pesisir pantai sampai pada batas sebelah barat dari CAT yang merupakan sebuah sungai begitu pula sebelah timur berupa sungai. Selain itu juga digunakan *Wall* yang digunakan untuk membatasi wilayah sebelah timur sampai ke selatan yang digunakan untuk membatasi pengaruh di luar dari sistem CAT Singaraja (Gambar 7). Sedangkan *Recharge* digunakan pada seluruh grid yang berada pada CAT Singaraja. *Recharge* tersebut berbeda-beda berdasarkan sub daerah aliran sungai yang berada dalam CAT tersebut. Nilai *recharge* yang digunakan diperoleh berdasarkan hasil analisa hidrologi dengan menggunakan nilai curah hujan 10 tahun terakhir pada daerah tersebut. Distribusi *recharge* di CAT Singaraja dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Distribusi constant head dan wall



Gambar 11. Distribusi recharge di CAT Singaraja

Nilai recharge untuk peta diatas adalah sebagai berikut:

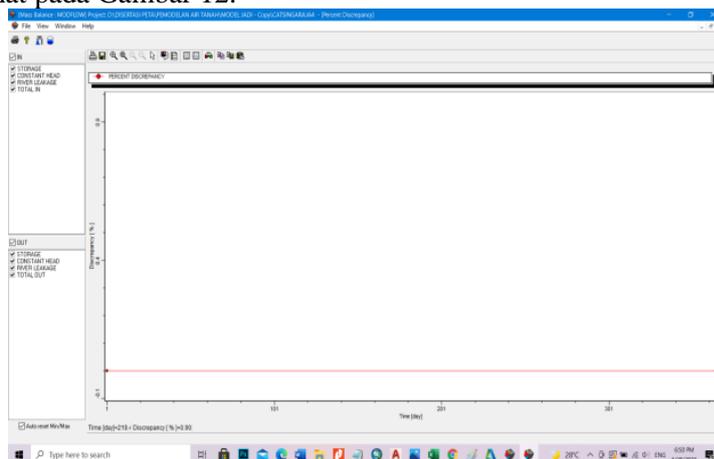
- 5. A = 892.3 mm/tahun
- 6. B = 1575.3 mm/tahun

5. Kalibrasi model MODFLOW

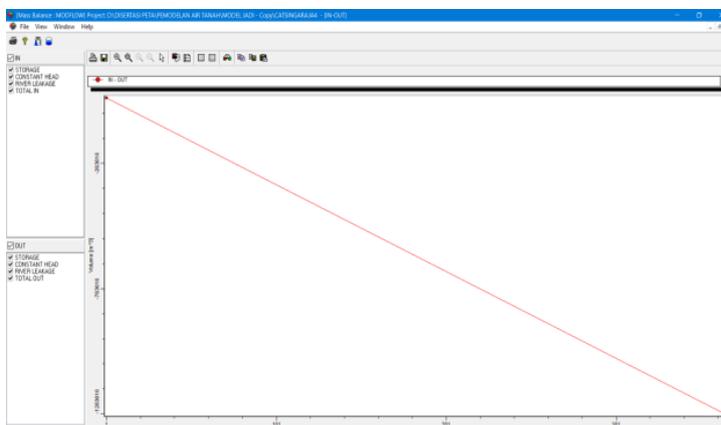
Kalibrasi model dilakukan untuk melihat perilaku hasil model dengan kenyataan di lapangan. Kalibrasi model yang digunakan adalah muka air yang terjadi pada tahun 1986 dengan pengambilan air melalui *pumping well* dan lain- lain sebelum tahun 1986. Hasil muka air yang diperoleh disesuaikan dengan kenyataan di lapangan secara regional, dan bukan dilihat berdasarkan muka air yang terjadi pada suatu *grid*. Adapun muka air yang dihasilkan oleh Nipon Koei pada tahun 1986 sperti terlihat pada Gambar 9 di bawah ini. Sedangkan hasil keluaran dari program MODFLOW dapat dilihat pada Gambar 10.

6. Hasil pemodelan MODFLOW

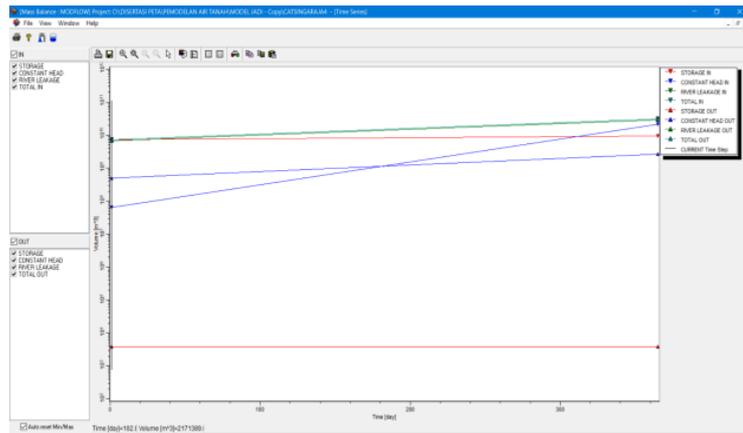
Setelah data berhasil diinputing dan telah dilakukan kalibrasi model secara regional dengan melihat pola muka air yang terjadi seperti yang dijelaskan pada bab sebelumnya, maka selanjutnya melakukan simulasi atau menjalankan program untuk melihat hasil perilaku kondisi air tanah dengan periode sampai pada tahun 2020. Berdasarkan hasil simulasi, maka dapat dilihat hasil keluaran model berupa elevasi muka air tanah yang terjadi serta surutan (*drawdown*) dan juga pergerakan besarnya kecepatan aliran air tanah baik besar maupun arah aliran yang terjadi. Nilai tersebut dapat dilihat pada setiap grid yang telah dilakukan pemodelan. Namun program MODFLOW 4.3 memberikan informasi dari setiap gridnya seperti terlihat pada Gambar 12.



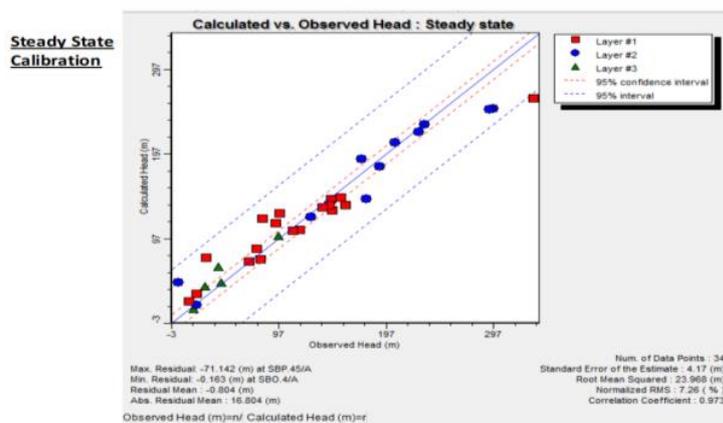
Gambar 12. Grafik yang menunjukkan besar debit air tanah yang masuk dan keluar hasil pemrosesan Modflow 4.2 (Q-In-Out)



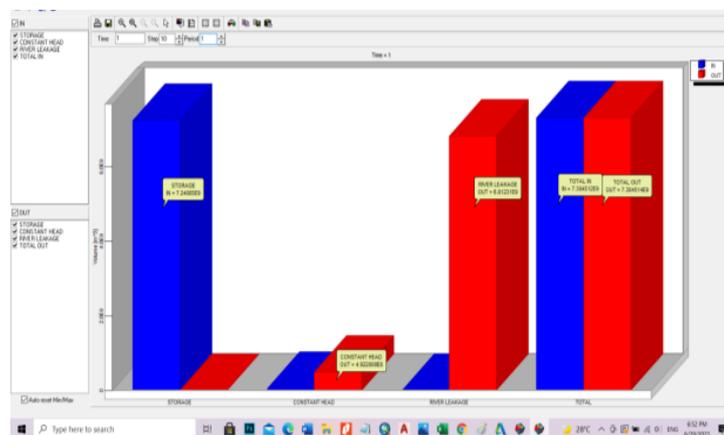
Gambar 13. Grafik yang menunjukkan percent discrepancy



Gambar 14. Grafik yang menunjukkan *Time Series* air tanah yang masuk, keluar, tampungan (storage), *Total in*, *constant head out*, *River leakage out*, dan *total out* hasil pemrosesan Modflow 4.3



Gambar 15. Kalibrasi muka air tanah kondisi tunak pemodelan air tanah CAT Singaraja



Gambar 16. Grafik yang menunjukkan tahapan skenario 1. (STEP PERIODE 01)

Selain dari pemodelan di atas juga dilakukan suatu pengembangan pengambilan air tanah yang tidak terkontrol dengan melakukan skenario pengambilan air tanah. Adapun skenario yang dibuat adalah sebagai berikut:

7. Skenario I: dilakukan penambahan pemompaan pada setiap grid mulai elevasi 25 m ke bawah dengan laju pemompaan sekitar 5 l/s.
8. Skenario II: dilakukan penambahan pemompaan pada setiap grid mulai elevasi 25 m ke bawah dengan laju pemompaan sekitar 10 l/s.
9. Skenario III: dilakukan penambahan pemompaan pada setiap grid mulai elevasi 25 m ke bawah dengan laju pemompaan sekitar 15 l/s.

10. Skenario IV: dilakukan penambahan pemompaan pada setiap grid mulai elevasi 25 m sampai elevasi 250 m dengan laju pemompaan sekitar 5 l/s.
11. Skenario V: dilakukan penambahan pemompaan pada setiap grid mulai elevasi 25 m sampai elevasi 250 m dengan laju pemompaan sekitar 10 l/s.
12. Skenario VI: dilakukan penambahan pemompaan pada setiap grid mulai elevasi 25 m sampai elevasi 250 m dengan laju pemompaan sekitar 15 l/s.

Berdasarkan batasan skenario yang dibuat maka selanjutnya dapat dilakukan analisa dengan menggunakan MODFLOW sehingga diperoleh hasil dengan kondisi muka air tanah dan surutan dari setiap skenario yang dibuat. Adapun hasil dari semua skenario yang dibuat secara umum menunjukkan terjadinya pergerakan muka air tanah dari utara ke selatan. Namun perbedaan yang sangat jelas terjadi apabila skenario I sampai III dilakukan bila dibandingkan dengan skenario IV sampai dengan Skenario VI. Hal ini dapat dilihat dari hasil pemodelan berupa muka air tanah dengan skenario I sampai dengan skenario III seperti pada Gambar 18. Sedangkan untuk skenario IV sampai dengan skenario VI dapat dilihat pada Gambar 19. Berdasarkan Gambar tersebut maka dapat dilihat bahwa pergeseran muka air tanah tidak terlalu besar bila dibandingkan dengan Gambar 15.

Selain dari peta kontur muka air tanah yang terjadi dapat juga dilihat melalui surutan yang terjadi pada setiap grid untuk masing-masing skenario. Berdasarkan skenario I diperoleh hasil surutan dengan kriteria seperti diatas adalah sekitar 0 cm sampai dengan 74 cm dan dengan rata-rata surutan yang terjadi diseluruh grid yang aktif sekitar 22 cm. Sedangkan untuk skenario II diperoleh hasil sekitar 0 cm sampai dengan 126 cm dengan rata-rata surutan yang terjadi di seluruh grid yang aktif sekitar 41,5 cm. Sementara untuk skenario III diperoleh hasil surutan sekitar 0 cm sampai dengan 170 cm dengan rata-rata surutan yang terjadi di seluruh grid yang aktif sekitar 59,5 cm. Berbeda halnya yang terjadi dengan skenario IV sampai dengan skenario VI. Berdasarkan hasil skenario IV diperoleh hasil surutan sekitar 0 cm sampai dengan 22 cm dengan rata-rata surutan yang terjadi di seluruh grid yang aktif sekitar 7,8 cm. Sedangkan skenario V diperoleh hasil surutan sekitar 0 cm sampai dengan 41 cm dengan rata-rata surutan yang terjadi di seluruh grid yang aktif sekitar 15,2 cm.

Selain dari peta kontur muka air tanah yang terjadi dapat juga dilihat melalui surutan yang terjadi pada setiap grid untuk masing-masing skenario. Berdasarkan skenario I diperoleh hasil surutan dengan kriteria seperti diatas adalah sekitar 0 cm sampai dengan 30 cm dan dengan rata-rata surutan yang terjadi diseluruh grid yang aktif sekitar 22 cm. Sedangkan untuk skenario II diperoleh hasil sekitar 0 cm sampai dengan 126 cm dengan rata-rata surutan yang terjadi di seluruh grid yang aktif sekitar 41,5 cm. Sementara untuk skenario III diperoleh hasil surutan sekitar 0 cm sampai dengan 170 cm dengan rata-rata surutan yang terjadi di seluruh grid yang aktif sekitar 59,5 cm. Berbeda halnya yang terjadi dengan skenario IV sampai dengan skenario VI. Berdasarkan hasil skenario IV diperoleh hasil surutan sekitar 0 cm sampai dengan 22 cm dengan rata-rata surutan yang terjadi di seluruh grid yang aktif sekitar 7,8 cm. Sedangkan skenario V diperoleh hasil surutan sekitar 0 cm sampai dengan 41 cm dengan rata-rata surutan yang terjadi di seluruh grid yang aktif sekitar 15,2 cm.

Sementara untuk skenario VI diperoleh hasil surutan sekitar 0 cm sampai dengan 57 cm dengan rata-rata surutan yang terjadi di seluruh grid yang aktif sekitar 22,1 cm. Berdasarkan hasil tersebut terlihat jelas bahwa untuk skenario I sampai dengan skenario III memiliki surutan yang lebih besar bila dibandingkan dengan skenario IV sampai dengan skenario IV. Dengan hasil yang diperoleh tersebut maka dapat dinyatakan bahwa pengambilan air tanah yang tidak terkontrol dilakukan pada daerah hilir dari mata air Singaraja akan menyebabkan surutan muka air tanah yang lebih besar terjadi di daerah perkotaan (hilir) apabila dibandingkan dengan pengambilan air tanah yang tidak terkontrol pengambilannya dilakukan di hulu dari mata air Singaraja

SIMPULAN

Dari hasil pemodelan yang dilakukan maka dapat diberikan kesimpulan bahwa pengambilan air tanah yang tidak terkontrol yang dilakukan pada pemodelan menunjukkan terjadinya perubahan muka air tanah serta terjadinya surutan pada CAT Singaraja, perubahan muka air yang terjadi dengan meningkatnya laju pengambilan air tanah mulai dari Selatan menuju Utara, perubahan kontur muka air tanah yang lebih besar terjadi pada skenario I sampai dengan skenario III dibandingkan dengan skenario IV sampai dengan skenario VI, dan surutan muka air tanah yang terjadi berkisar antara 0 cm sampai dengan 150 cm dengan rata – rata 65,3 cm yang terjadi pada skenario III.

DAFTAR PUSTAKA

- Harbaugh, Arlen W., Edward R. Banta, Mary C. Hill, and Michael G. McDonald. 2000. MODFLOW-2000, The U.S. Geological Survey Modular Ground –Water Model: User Guide to Modularization Concepts and The Ground Water Flow Process. United State: U.S. Geological Survey.
- Illman, Walter A., Junfeng Zhu, Andrew J. Craig, and Danting Yin. 2010. Comparison of aquifer characterization approaches through steady state groundwater model validation: A controlled laboratory sandbox study. *Journal of Geophysical Research*, vol. 46.
- Jica (1990), THE STUDY ON Urban Drainage and waste water disposal project in the city of Jakarta.
- Karmadi, 2020, Study of Groundwater and Intrusion Zonation Conservation in North Bali Sea. Volume: 12 Nomor: 4 Published: 2020, April
- Straface, S., Enzo Rizzo, and Francesco Chidichimo. 2010. Estimation of hydraulic conductivity and water table map in a large-scale laboratory model by means of the self-potential method. *Journal of Geophysical Research*, vol. 115.