



**Studi Identifikasi Penurunan Muka Air Tanah dan Pola Alirannya di
Wilayah Pasuruan Jawa Timur**

SKRIPSI

oleh

Nurul Komariyah

NIM 131910301024

PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK

JURUSAN TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS JEMBER

2019



**Studi Identifikasi Penurunan Muka Air Tanah dan Pola Alirannya di
Wilayah Pasuruan Jawa Timur**

SKRIPSI

diajukan guna melengkapi Tugas Akhir dan memenuhi salah satu syarat
untuk menyelesaikan Program Studi S1 Teknik Sipil
dan mencapai gelar Sarjana Teknik

oleh

Nurul Komariyah

NIM 131910301024

PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK

JURUSAN TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS JEMBER

2019

PERSEMBAHAN

Sebuah penantian yang tidak mudah untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini. Akhirnya, saya bisa menyelesaikan Tugas Akhir ini sesuai target. Tugas Akhir ini saya persembahkan kepada :

1. Kedua Orangtuaku, Ibuku tercinta Nur Hasanah yang telah senantiasa mendoakan anakmu ini. Bapakku tercinta Sugianto Ruju yang telah memberikan semangat, do'a dan dukungan finansial dan hal lain yang tak terhitung nilainya;
2. Kepada Pak kyai nafi' dan Ibu nyai yang telah mendukung saya dan mendidik saya layaknya kedua orang tua saya;
3. Dr. Gusfan Halik, ST., MT. dan Indra Nurtjahtjaningtyasyang ST., MT. telah membimbing saya dengan sabar dan penuh perhatian serta pemakluman;
4. Anakku tersayang Dzakira Elsyabiela Ar-rosi yang menyemangatiku dengan senyumannya yang manis;
5. Teman yang selalu membantu dikala susah serta memberi semangat selama kuliah Rahma Istiqomaria, Khusniatul Aini, Dewi Ayu Nuriana, Pretty Apriliana;
6. Sahabat tersayang Holisatul Muzayyanah yang selalu memberi dukungan serta semangat yang luar biasa;
7. Partner Air Tanah Mutiatul Istiqomah yang sudah membantu proses penyelesaian Tugas Akhir ini;
8. Teman KKN 018 Yendri, Prita, Roni, Ibnu, Monica yang telah mendukungku;
9. Kepada teman-teman santri pondok pesantren Raden Rahmat Sunan Ampel Fatih, Eka, Pipit, Fafa, Mas Bayu dan teman-teman yang lain yang tidak bisa saya sebut satu-satu, terimakasih karena telah membantu dan memberi semangat;
10. Kepada Pak Amin sekeluarga yang telah membantu saya dan keluarga saya selama di Jember;
11. Teman-teman Teknik Sipil Angkatan 2013 yang telah menjalin hubungan seperti layaknya keluarga, dukungan dan semangat yang tiada henti;

12. Dinas Energi dan Sumber Daya Mineral Provinsi Jawa Timur dan PT. Buana Megah Paper Mills yang telah memberikan banyak informasi;
13. Guru-guruku sejak Taman Kanak-Kanak sampai perguruan tinggi yang telah memberikan ilmu dan bimbingan dengan penuh sabar;
14. Almamater Jurusan Teknik Sipil Universitas Jember.



MOTTO

Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kadar kesanggupannya
(Q.S. Al-Baqarah: 286)^{*)}

Sesuatu akan terlihat tidak mungkin sampai saat semuanya selesai
(Nelson Mandela)^{**)}

Jangan pernah kau menunggu keajaiban dunia, bukalah satu tujuan “Pasti Kubisa
melakukannya”^{***)}



*) Q.S Al-Baqoroh : 286 . <http://motivasiajakislam.blogspot.co.id/2015/11/14-kutipan-ayat-alquran-paling.html>

***) Nelson Mandela. <https://www.kutipkata.com/kata-kata-mutiara-kehidupan/>

****) Sheila On 7, 2011. <https://lirik.kapanlagi.com/artis/sheila-on-7/pasti-ku-bisa/>

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Nurul Komariyah

NIM : 131910301024

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Studi Identifikasi Penurunan Muka Air Tanah dan Pola Alirannya di Wilayah Pasuruan Jawa Timur” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah saya ajukan kepada institusi manapun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab penuh atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapaun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata dikemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 23 Juli 2019

Yang menyatakan,

Nurul Komariyah

NIM 131910301024



**Studi Identifikasi Penurunan Muka Air Tanah dan Pola Alirannya di
Wilayah Pasuruan Jawa Timur**

SKRIPSI

oleh

Nurul Komariyah

NIM 131910301024

pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Indra Nurtjahjaningtyas S.T., M.T

Dosen Pembimbing Anggota : Dr Gusfan Halik, S.T., M.T

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Studi Identifikasi Penurunan Muka Air Tanah dan Pola Alirannya di Wilayah Pasuruan Jawa Timur” telah diuji dan disahkan pada :

hari, tanggal : Selasa, 23 Juli 2019

tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Tim Penguji :

Pembimbing Utama,



Indra Nurtjahjaningtyas, S.T., M.T
NIP. 19701024 199803 2 001

Pembimbing Anggota,



Dr. Gusfan Halik, S.T., M.T
NIP. 19710804 199803 1 002

Penguji Utama,

Dr. Ir. Entin Hidayah, M.UM.
NIP. 19661215 199503 2 001

Penguji Anggota,



Luthfi Amri Wicaksono, S.T., M.T
NIP. 760016771

Mengesahkan

Dekan,

Dr. Ir. Entin Hidayah, M.UM.
NIP. 19661215 199503 2 001

RINGKASAN

Studi Identifikasi Penurunan Muka Air Tanah dan Pola Alirannya di Wilayah Pasuruan Jawa Timur; Nurul Komariyah; 131910301024; 2019: 60 Halaman; Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Jember;

Sebagian besar air tanah digunakan untuk memenuhi kebutuhan air bersih dan kebutuhan industri. Hal ini dikarenakan sifat fisik air tanah sendiri langsung bisa dikonsumsi. Untuk mengambil air yang ada di dalam tanah dalam jumlah banyak, perlu adanya pemompaan. Salah satunya adalah industri Kertas PT. Buana Megah Paper Mills. Dampak dari adanya pemompaan adalah adanya penurunan muka air tanah.

Pabrik Kertas PT. Buana Megah Paper Mills memiliki 4 sumur produksi. Sumur produksi 1 terletak di koordinat LS $07^{\circ}34'53,85''$ dan BT $112^{\circ}44'17,32''$, sumur produksi 2 terletak pada LS $07^{\circ}34'52,90''$ dan BT $112^{\circ}44'18,92''$, sumur produksi 3 terletak pada LS $07^{\circ}34'52,39''$ dan BT $112^{\circ}44'21,27''$ sedangkan sumur produksi 4 terletak pada LS $07^{\circ}34'50,32''$ dan BT $112^{\circ}44'24,93''$.

Untuk mengetahui ketinggian muka air tanah, perlu adanya sumur pantau yang dapat memantau tinggian rata-rata muka air tanah perhari. Setelah data muka air tanah diperoleh kemudian dilakukan simulasi atau *running model* dengan menggunakan *Software Visual Modflow Flex 2015.1*. Dari hasil pemodelan dilakukan *time step* setiap hari sebanyak 7 *step*. Didapatkan nilai RMSE untuk mengkalibrasi hasil model dan hasil observasi.

Simulasi dilakukan selama 360 hari dari perbandingan *Time Step 1* hingga *Time Step 7*. Dari hasil perbandingan diperoleh hasil pada hari ke-184 hingga hari ke-190 telah terjadi penurunan muka air tanah akibat pemompaan pada sumur produksi. Rata-rata penurunan sebesar $-0,8571$ m dilihat pada sumur pantau.

Untuk pola aliran diperkirakan air tanah mengalir menuju kearah utara karena pada lokasi peneliti, daerah utara memiliki elevasi permukaan tanah lebih rendah dibandingkan dengan daerah selatan yang memiliki ketinggian elevasi permukaan tanah yang lebih tinggi. Selain itu juga factor cuaca dan pengambilan air bisa menjadi salah satu penyebabnya.

SUMMARY

Study of Identification of Decreases in Groundwater and Flow Patterns in the Pasuruan Region East Java ; Nurul Komariyah; 131910301024; 2019: 60 pages; Department of Civil Engineering, Engineering Faculty of Jember University;

Most of the ground water is used to meet clean water needs and industrial needs. This is because the physical nature of groundwater itself can be consumed directly. To extract large amounts of water in the soil, pumping is needed. One of them is the Paper industry of PT. Buana Megah Paper Mills. The impact of pumping is a decrease in ground water level.

PT. Paper Factory Buana Megah Paper Mills has 4 production wells. The first production well is located at coordinates LS $07^{\circ} 34'53.85''$ and BT $112^{\circ} 44'17.32''$, the second production well is located at LS $07^{\circ} 34'52.90''$ and BT $112^{\circ} 44'18.92''$, the third production well is located at LS $07^{\circ} 34'52.39''$ and BT $112^{\circ} 44'21.27''$ while the fourth is located at LS $07^{\circ} 34'50.32''$ and BT $112^{\circ} 44'24,93''$.

To find out the groundwater level, it is necessary to have monitoring wells that can monitor the average groundwater level per day. After the groundwater data is obtained, then a simulation or running model is carried out using Visual Modflow Flex Software 2015.1. From the modeling, 7-step is taken every day. RMSE value is obtained to calibrate the model results and observations.

The simulation was carried out for 360 days from the comparison of Time Step 1 to Time Step 7. From the results of the comparison obtained results on the 184th day until the 190th day there was a decrease in groundwater level due to pumping in the production wells. The average decline is -0.8571 m seen in monitoring wells.

For the flow pattern, it is estimated that groundwater flows towards the north because at the research location, the northern area has a lower land surface elevation compared to the southern region which has a higher elevation of the land surface. In addition, weather factors and water collection can be one of the causes.

PRAKATA

Alhamdulillah, Puji syukur kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Studi Identifikasi Penurunan Muka Air Tanah dan Pola Alirannya di Wilayah Pasuruan Jawa Timur”. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan program studi strata (S1) Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Jember

Selama penulisan skripsi ini penulis mendapat bantuan dari berbagai pihak, untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Ir. Entin Hidayah, M.UM., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember;
2. Indra Nurtjahjaningtyas, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Utama;
3. Dr. Gusfan Halik, S.T., M.T, selaku Dosen Pembimbing Anggota;
4. Dr. Ir. Entin Hidayah, M.UM., selaku Dosen Penguji Utama;
5. Luthfi Amri Wicaksono, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji Anggota;
6. Wiwik Yunarni Widiarti, S.T., M.T., Selaku Dosem Pembimbing Akademik;
7. Kedua orang tua saya yang telah memberi dukungan moril dan materil selama penyusunan skripsi ini;
8. Semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu persatu.

Segala kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi kesempurnaan skripsi ini. Akhirnya, semoga skripsi ini bisa bermanfaat bagi penulis maupun pembaca sekalian.

Jember, 30 Juli 2019

Penulis

DAFTAR ISI

| | Halaman |
|----------------------------------------------|---------|
| HALAMAN SAMPUL | i |
| HALAMAN JUDUL | ii |
| HALAMAN PERSEMBAHASAN | iii |
| HALAMAN MOTTO | v |
| HALAMAN PERNYATAAN | vi |
| HALAMAN PEMBIMBING | vii |
| HALAMAN PENGESAHAN | viii |
| RINGKASAN | ix |
| SUMMARY | x |
| PRAKATA | xi |
| DAFTAR ISI | xii |
| DAFTAR TABEL | xv |
| DAFTAR GAMBAR | xvi |
| DAFTAR LAMPIRAN | xviii |
| BAB 1. PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah | 2 |
| 1.3 Tujuan Penelitian | 3 |
| 1.4 Manfaat Penelitian | 3 |
| 1.5 Batasan Masalah | 3 |
| BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA | 4 |
| 2.1 Air Tanah | 4 |
| 2.1.1 Muka Air Tanah | 5 |
| 2.1.2 Penurunan Muka Air Tanah..... | 5 |
| 2.1.3 Uji Pompa | 5 |
| 2.1.3.1 Uji Akuifer..... | 7 |
| 2.1.3.2 Uji Sumur | 8 |
| 2.1.4 Persamaan Dasar Aliran Air Tanah | 9 |
| 2.1.5 Hidrolika Aliran Air Tanah..... | 10 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.2 Siklus Hidrolika | 12 |
| 2.3 Ketersediaan Air Tanah | 13 |
| 2.4 Model Air Tanah | 15 |
| 2.4.1 <i>Geographic Information System (GIS)</i> | 16 |
| 2.4.2 <i>A Modular Three Dimensional Finite Difference Ground Water Flow Model (MODFLOW)</i> | 16 |
| 2.4.2.1 Model Matematis | 16 |
| 2.4.2.2 Parameter Model | 18 |
| 2.4.2.3 Perancangan Model | 21 |
| BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN | 23 |
| 3.1 Konsep Penelitian | 23 |
| 3.2 Lokasi Penelitian | 23 |
| 3.3 Sistematika Penelitian | 23 |
| 3.3.1 Pengumpulan Data | 24 |
| 3.3.2 Tahap Penyiapan Data | 24 |
| 3.3.3 Tahap Pengelolaan Data dan Analisa Data | 25 |
| 3.3.4 Proses Pengerjaan Software MODFLOW1 | 25 |
| 3.4 Metodologi Penelitian | 31 |
| BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN | 34 |
| 4.1 Hasil Pengumpulan Data | 34 |
| 4.2 Data Hasil Uji Pemompaan | 35 |
| 4.2.1 Pengujian Sumur | 35 |
| 4.2.2 Pengujian Akuifer | 36 |
| 4.3 Deskripsi Sumur Produksi | 37 |
| 4.4 Kondisi Topografi Daerah | 38 |
| 4.5 Data Sumur Pantau | 40 |
| 4.6 Menentukan <i>Boundary Condition</i> | 40 |
| 4.7 Menentukan Data <i>Import Well</i> | 42 |
| 4.8 Pembahasan Simulasi Pemodelan Air Tanah | 44 |
| 4.8.1 Hasil Simulasi MODFLOW | 44 |
| 4.8.2 Kalibrasi Model | 55 |
| 4.8.3 Penurunan Muka Air Tanah | 55 |

| | |
|------------------------------------------|-----------|
| 4.8.4 Pola Aliran Air Tanah | 56 |
| BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN | 58 |
| 5.1 Kesimpulan..... | 58 |
| 5.2 Saran | 58 |
| DAFTAR PUSTAKA | 59 |
| DAFTAR LAMPIRAN | 60 |



DAFTAR TABEL

| | Halaman |
|------------------------------------------------------------------|---------|
| Tabel 2.1 Nilai Koefisien Well Loss Menurut Walton | 7 |
| Tabel 2.2 Nilai Konduktivitas Hidrologi | 19 |
| Tabel 2.3 Spesifik Yield (Sy) | 19 |
| Tabel 2.4 Nilai Porositas Efektif (n_e) | 20 |
| Tabel 2.5 Nilai Porositas Total (n_{total})..... | 21 |
| Tabel 4.1 Rekapitulasi Data Uji Pemompaan..... | 35 |
| Tabel 4.2 Penurunan Muka Air Tanah | 36 |
| Tabel 4.3 Nilai T dan K | 36 |
| Tabel 4.4 Debit Optimum dan Maksimum | 37 |
| Tabel 4.5 Kedalaman dan Kapasitas Produksi Sumur | 37 |
| Tabel 4.6 Kondisi Lithologi Sumur Produksi | 37 |
| Tabel 4.7 Koordinat Sumur pada <i>Surface Ground</i> | 39 |
| Tabel 4.8 Koordinat Sumur pada <i>Surface Layer Top</i> | 39 |
| Tabel 4.9 Koordinat Sumur pada <i>Surface Layer Bottom</i> | 39 |
| Tabel 4.10 <i>Observation Well</i> atau Sumur Pantau..... | 42 |
| Tabel 4.11 <i>Pumping Wells</i> Sumur Pompa..... | 43 |
| Tabel 4.12 Hasil Kalibrasi Model | 55 |

DAFTAR GAMBAR

| | Halaman |
|-------------------------------------------------------------------|---------|
| Gambar 2.1 Pemompaan Pada Akuifer Terkekang | 10 |
| Gambar 2.2 Pemompaan Pada Akuifer Bebas..... | 11 |
| Gambar 2.3 Pemompaan Pada Akuifer Setengah Terkekang..... | 12 |
| Gambar 2.4 Siklus Hidrologi..... | 13 |
| Gambar 2.5 Ilustrasi Diskritisasi Pada Sistem Akuifer | 17 |
| Gambar 3.1 Peta Lokasi Penelitian | 23 |
| Gambar 3.2 <i>Layout</i> merubah koordinat sistem..... | 26 |
| Gambar 3.3 <i>Layout</i> pemilihan <i>modeling</i> | 26 |
| Gambar 3.4 <i>Layout</i> input <i>model structure</i> | 27 |
| Gambar 3.5 <i>Layout Structural Zone</i> | 28 |
| Gambar 3.6 <i>Layout</i> input <i>Boundary condition</i> | 28 |
| Gambar 3.7 <i>Layout Numerical Grid</i> | 29 |
| Gambar 3.8 <i>Layout convert program</i> | 29 |
| Gambar 3.9 <i>Layout</i> input <i>initial head</i> | 30 |
| Gambar 3.10 <i>Layout</i> input <i>define finite</i> | 30 |
| Gambar 3.11 <i>Finite Element Mesh</i> | 31 |
| Gambar 3.12 <i>Run model</i> | 31 |
| Gambar 3.13 Diagram Alir | 32 |
| Gambar 4.1 Log Lithologi dan Konstruksi Sumur Bor | 34 |
| Gambar 4.2 <i>Surface</i> Lapangan .GRD | 38 |
| Gambar 4.3 <i>Boundary Condition</i> .SHP | 42 |
| Gambar 4.4 <i>Layout Head</i> Pemodelan 184 hari | 44 |
| Gambar 4.5 <i>Layout Drawdown</i> pemodelan 184 hari | 45 |
| Gambar 4.6 Perbandingan antara hasil observasi dan Pemodelan..... | 45 |
| Gambar 4.7 <i>Layout Head</i> pemodelan 185 hari..... | 46 |
| Gambar 4.8 <i>Layout Drawdown</i> pemodelan 185 hari | 46 |
| Gambar 4.9 Perbandingan antara hasil observasi dan Pemodelan..... | 47 |
| Gambar 4.10 <i>Layout Head</i> Pemodelan 186 hari | 47 |
| Gambar 4.11 <i>Layout Drawdown</i> pemodelan 186 hari | 48 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 4.12 Perbandingan antara hasil observasi dan Pemodelan..... | 48 |
| Gambar 4.13 <i>Layout Head</i> Pemodelan 187 hari | 49 |
| Gambar 4.14 <i>Layout Drawdown</i> pemodelan 187 hari | 49 |
| Gambar 4.15 Perbandingan antara hasil observasi dan Pemodelan | 50 |
| Gambar 4.16 <i>Layout Head</i> Pemodelan 188 hari | 50 |
| Gambar 4.17 <i>Layout Drawdown</i> pemodelan 188 hari | 51 |
| Gambar 4.18 Perbandingan antara hasil observasi dan Pemodelan | 51 |
| Gambar 4.19 <i>Layout Head</i> Pemodelan 189 hari | 52 |
| Gambar 4.20 <i>Layout Drawdown</i> pemodelan 189 hari | 52 |
| Gambar 4.21 Perbandingan antara hasil observasi dan Pemodelan | 53 |
| Gambar 4.22 <i>Layout Head</i> Pemodelan 190 hari | 53 |
| Gambar 4.23 <i>Layout Drawdown</i> pemodelan 190 hari | 54 |
| Gambar 4.24 Perbandingan antara hasil observasi dan Pemodelan | 54 |
| Gambar 4.25 <i>Run Model Simulation</i> | 56 |
| Gambar 4.26 <i>Pola aliran air tanah</i> | 57 |

DAFTAR LAMPIRAN

| | Halaman |
|-----------------------------------------|---------|
| A.1 <i>Setting Waktu</i> | 60 |
| A.2 <i>Conceptual Modeling</i> | 60 |
| A.3 <i>Model Structure Layers</i> | 61 |
| A.4 <i>Input Kx Ky Kz</i> | 61 |
| A.5 <i>Input River</i> | 62 |
| A.6 <i>Input Grid</i> | 62 |
| A.7 <i>Convert to Numerical</i> | 63 |
| A.8 <i>Translate Numerical</i> | 63 |
| A.9 <i>Define Structure</i> | 64 |
| A.10 <i>Penampang</i> | 64 |
| A.11 <i>Run Model</i> | 65 |
| A.12 <i>Mass Ballance</i> | 65 |

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Air tanah merupakan kebutuhan dasar bagi setiap manusia untuk menjaga kelangsungan hidup. Ketersediaan dan terjadinya air tanah tidak lepas dari fenomena alam yang disebut siklus hidrologi, yakni air laut mengalami penguapan dan mengembun sebagai air hujan yang kemudian meresap ke tanah hingga mencapai pada zona jenuh atau *stured zone* yang kemudian akan menjadi airtanah. Hampir disetiap segi kehidupan menggunakan airtanah, mulai dari rumah tangga biasa hingga pabrik industri komersial.

Kabupaten Pasuruan merupakan salah satu wilayah dimana sektor industrinya berkembang dengan pesat. Perkembangan industri yang tentunya diikuti dengan perkembangan pertumbuhan penduduk dan perkembangan sarana lainnya yang memerlukan ketersediaan air bersih yang cukup banyak. Hal ini juga yang mengakibatkan tingkat pengambilan airtanah cukup tinggi baik dari airtanah dangkal maupun airtanah dalam pada akuifer tertekan. Pengambilan airtanah dari tahun ketahun semakin meningkat. Di beberapa wilayah kecamatan di sekitar kota Pasuruan masih banyak terdapat sumber-sumber air atau sumur-sumur artesis dengan debit yang besar. Menurut data Badan Geologi pada tahun 2009, pemanfaatan atau eksploitasi air tanah telah mencapai 40%. Hal ini menunjukkan bahwa tingkat eksploitasi air tanah berada di atas ambang batas eksplorasi air tanah yang direkomendasikan yaitu hanya 20%. Oleh karena itu keberadaan air tanah perlu dijaga baik dari segi kuantitas maupun kualitasnya.

Dalam mengantisipasi terjadinya eksploitasi air tanah yang berlebihan pemerintah daerah kabupaten Pasuruan mengeluarkan peraturan daerah yang mengatur penggunaan atau pemanfaatan air tanah sebagai kebutuhan pokok sehari-hari, pertanian, sanitasi lingkungan, pertambangan dan pariwisata, dan industrial guna untuk memelihara kelestarian lingkungan dan keberadaan air tanah. Oleh sebab itu perlu adanya penelitian tentang kondisi muka air tanah akibat eksploitasi air tanah di Kabupaten Pasuruan. Hal ini penting dilakukan

untuk mengetahui pola aliran airtanah pada daerah kajian serta tekanan airtanah setelah dilakukan eksplorasi air tanah secara terus-terusan. Dan untuk mengetahui kondisi airtanah pada sumur-sumur dengan menggunakan program visual Modflow.

Modflow merupakan software yang berisi paket-paket yang dapat memanipulasi output dari model airtanah. Model yang dikembangkan dalam aplikasi ini merupakan model yang bersifat *finite-difference*. Pada pembahasan ini akan dilakukan penggambaran aliran airtanah dimana hasil akhirnya adalah model aliran airtanah yang digunakan untuk melihat kondisi airtanah pada daerah kajian. Hal ini dilakukan untuk memvisualisasikan pola aliran serta kondisi airtanah didaerah kajian.

Penelitian semacam ini pernah dilakukan pada tahun 2010 dan oleh mahasiswa Universitas Jember dalam skripsinya yang berjudul “Analisis Cadangan Air Tanah Sebagai Akibat Penggalan Gumuk di Wilayah Kecamatan Sumpalsari Kabupaten Jember” dalam skripsi tersebut untuk perhitungan ketersediaan air tanah dihitung dengan persamaan F.J Mock dan menggunakan program visual Modflow dalam menganalisis aliran air tanah beserta kontur muka air tanahnya untuk melihat kondisi air tanah pada daerah kajian sebelum dan sesudah gumuk digali.

Dalam tugas akhir ini dilakukan perhitungan untuk jumlah ketersediaan airtanah dalam jangka waktu yang lama dengan menggunakan gambaran aliran airtanah. Perhitungan ini dapat dilakukan dengan menggunakan model aliran airtanah yang terdapat pada visual Modflow. Dengan adanya model aliran airtanah ini dapat diketahui lokasi cadangan air maksimum yang dapat digunakan untuk kebutuhan pokok masyarakat Pasuruan dimasa yang akan datang.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun permasalahan dari latar belakang masalah yang diuraikan diatas adalah bagaimana pengaruh eksploitasi sumur produksi terhadap kondisi penurunan muka air tanah di daerah lokasi penelitian

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kondisi muka air tanah akibat eksploitasi sumur bor dan pola aliran air tanah disekitar sumur produksi di wilayah pabrik industri di Pasuruan menggunakan program Visual Modflow

1.4 Manfaat Penelitian

Dengan adanya penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran umum mengenai kondisi muka air tanah dan pola alirannya akibat dari eksploitasi sumur bor. Manfaat lainnya adalah:

1. Mengetahui upaya terbaik dalam mengoptimalkan pengendalian dan pemanfaatan air tanah;
2. Menjadikan bahan monitoring untuk menginventarisasi, mengeksplorasi dan mengeksploitasi air tanah;
3. Sebagai gambaran dalam mengkonservasi air tanah di wilayah penelitian dan sekitarnya.

1.5 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Tidak memperhitungkan kemungkinan terjadinya intrusi air laut;
2. Penelitian dilakukan terhadap muka air tanah tertekan;
3. Jenis sumur yang diteliti yakni sumur dalam;
4. Letak sumur pantau disekitar sumur produksi
5. Hanya meninjau empat sumur produksi milik PT Buana Megah Paper Mills

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Air Tanah

Menurut UU No 7 Tahun 2004 air tanah adalah air yang terdapat dalam lapisan tanah atau bebatuan di bawah permukaan tanah. Air tanah merupakan salah satu sumber daya air selain air sungai dan air hujan, air tanah juga mempunyai peranan yang sangat penting terutama dalam menjaga keseimbangan dan ketersediaan bahan baku air untuk kepentingan rumah tangga (domestik) maupun untuk kepentingan industri.

Secara umum keberadaan air tanah dibagi menjadi dua tipe yaitu air pada *vadose zone* dan air pada *phreatic zone*. Pada *vadose zone* air dibagi menjadi tiga bagian, yaitu air tanah (*soil water*), *intermediate vadose zone* dan air kapiler. Sedangkan pada tipe kedua yaitu pada *phreatic zone* atau *saturated zone* (zona jenuh) terdapat air tanah (*groundwater*).

Soil water dan *groundwater* dalam bahasa Inggris memiliki arti sama yakni air tanah. Namun keberadaannya yang menjadi pembeda di antara keduanya. *Soil water* berada pada kedalaman sekitar 0,91 – 9,1 m. Oleh karena itu pada daerah ini air tanah sebagian besar digunakan untuk keperluan pertanian dan sumber air untuk tanaman.

Suatu lapisan tanah yang pori-porinya berisi air terdapat pembatas dan kondisinya berbeda-beda dapat didefinisikan sebagai akuifer. Berdasarkan susunan lapisan geologi dan harga kelulusan air (K), akuifer dapat dibedakan menjadi empat macam (Bisri, 1991) diantaranya adalah:

1. Akuifer Bebas (*Unconfined Aquifer*), merupakan suatu akuifer dimana muka air tanah merupakan bidang batas sebelah atas dari daerah jenuh air.
2. Akuifer Terkekang (*Confined Aquifer*), ialah akuifer dimana air tanah terletak di bawah lapisan kedap air (*impermeable*) dan mempunyai tekanan yang lebih besar dari tekanan atmosfer.
3. Akuifer Bocor atau Akuifer Setengah Terkekang (*leakage/leaky-artesian Aquifer* atau *semiconfined Aquifer*), ialah suatu akuifer yang sepenuhnya jenuh air dengan bagian atas dibatasi oleh lapisan setengah kedap air (nilai

kelulusannya terletak antara akuifer dan akuitar) dan bagian bawah terletak pada suatu dasar kedap air.

4. Akuifer mengantung (Parched Aquifer), menggunakan akuifer yang mempunyai massa air tanahnya terpisah dari air tanah induk oleh suatu lapisan yang relatif kedap air yang begitu luas dan terletak diatas daerah jenuh air

2.1.1 Muka Air Tanah

Muka air tanah (*water table*) merupakan pemisah antara zona air tanah atau *phreatic water* dengan pipa kapiler. Muka air tanah (*water table*) secara teoritis merupakan perkiraan elevasi air permukaan pada sumur yang hanya merembes pada jarak yang pendek ke zona jenuh air. Jika air tanah mengalir horizontal, elevasi muka air pada sumur sangat berhubungan dengan muka air tanah. Dengan adanya sumur akan mengubah bentuk aliran dan elevasi muka air pada sumur.

2.1.2 Penurunan Muka Air Tanah

Pemanfaatan air untuk kebutuhan domestik, industri, dan irigasi pada kenyataannya mengandalkan air tanah. Eksploitasi air tanah secara berlebihan menimbulkan dampak negatif terhadap sumber daya air maupun lingkungan, salah satunya adalah penurunan muka air tanah. Penurunan muka air tanah dapat dilihat melalui sumur pantau atau cekungan pada suatu daerah.

Laju pertumbuhan manusia dan pembangunan infrastruktur yang meningkat serta banyaknya sumur bor mempercepat penurunan muka air tanah. Selain itu pemompaan air yang berlebihan juga menjadi salah satu penyebab turunnya muka air tanah.

2.1.3 Uji Pompa

Uji pompa dibedakan menjadi dua macam, yaitu uji akuifer dan uji sumur. Pada penelitian ini akan dibahas mengenai uji sumur dan uji akuifer: Menurut Jacob bahwa penurunan muka air disumur akibat pemompaan terdiri atas dua komponen, yaitu:

1. *Aquifer Loss (BQ)* adalah penurunan muka air di sumur akibat pemompaan yang disebabkan oleh aliran laminar pada akuifernya sendiri. Besarnya BQ sebanding dengan perubahan debit pemompaan dan sangat bergantung pada sifat hidrolika dari akuifernya dengan kata lain kondisi itu tidak dapat dirubah dan diperbaiki (bersifat alami)
2. *Well Loss (CQ²)* adalah penurunan muka air di sumur akibat pemompaan yang disebabkan oleh aliran turbulen didalam sumur. Besarnya harga CQ² ini bergerak secara kwadratis terhadap perubahan debit pemompaan dan sangat tergantung pada karakteristik dari sumur uji, misalnya pencucian sumur (development) kurang bersih akibat adanya hambatan-hambatan pada filter (gravel peck) dan pipa saringan (screen), berarti kondisi ini dapat diperbaiki untuk memperkecil harga Well Lossnya.

Besar total penurunan muka air di sumur (SW) dinyatakan sebagai berikut (Bisri,1991):

$$SW = BQ + CQ^2 \quad (2.1)$$

dengan :

SW = total penurunan muka air (m)

BQ = aquifer loss (m)

CQ² = well loss (m)

Sumur yang produktif menurut Walton dan Bierschenk adalah sumur yang

$$Fd = \frac{B}{C} \times 100 \quad (2.2)$$

dengan:

Fd = *factor development* (hari/m³)

mempunyai harga C dan Fd (faktor development) yang kecil.

B = koefisien aquifer loss (dt/m²)

C = koefisien well loss (dt²/m⁵)

Kondisi sumur berdasarkan nilai koefisien well loss menurut Walton dapat dilihat pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 Kondisi sumur berdasarkan nilai koefisien well loss menurut Walton

| Koefisien Well Lost (C) (menit ² /m ⁵) | Kodisi Sumur |
|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| < 0.5 | Baik |
| 0.5-1.0 | Mengalami sedikit penyumbatan |
| 1.0-4.0 | Penyumbatan dibeberapa tempat |
| >4.0 | Sulit dikembalikan seperti semula |

Sumber: Bisri, 1991 :110

2.1.3.1 Uji Akuifer

Uji akuifer dilaksanakan untuk mengevaluasi karakteristik akuifer dengan menstimulasi akuifer melalui observasi terhadap respon aquifer berupa penurunan MAT. Karakter akuifer yang dapat diperoleh dari pengujian ini adalah:

- Konduktivitas Hidrolik
- Transimivitas
- Storativitas

Metode yang digunakan pada uji akuifer ini adalah Metode Theis, dimana dalam metode theis anggapan-anggapan yang digunakan sebagai berikut:

- Aliran ke sumur adalah aliran tidak tunak
- Jenis akuifer terkekang
- Akuifer dianggap meluas tak terhingga dalam bidang horizontal, terletak pada suatu dasar lapisan yang kedap air serta mempunyai ketebalan yang seragam
- Akuifer adalah homogeny isotropis dalam daerah yang dipengaruhi oleh pemompaan
- Kehilangan tinggi tekan yang disebabkan oleh komponen aliran vertikal dalam akuifer diabaikan
- Pemompaan dilakukan dengan debit yang tetap

Theis menyederhanakan persamaan sebelumnya menjadi:

$$S = \frac{Q}{4\pi T} W(U) \quad \text{atau} \quad T = \frac{Q}{4\pi T} W(U) \quad (2.3)$$

$$U = \frac{r^2 S'}{4Tt} \quad \text{atau} \quad S' = \frac{4T}{r^2/t} U \quad (2.4)$$

dengan:

S = penurunan psiometer pada jarak r (m) dari sumur pompa

Q = debit tetap sumur yang dipompa (m³/det)

S' = koefisien tampungan (tidak berdimensi)

T = waktu sejak dimulai pemompaan (detik)

W(U) = integral eksponensial atau disebut fungsi sumur U atau juga disebut fungsi sumur Theis dan W(U) dapat dicari dengan menggunakan lengkung jenis normal yang dibuat dengan memplot nilai W(U) vs U atau lengkung jenis kebalikan yang dapat dibuat dengan memplot nilai W(U) vs 1/U pada grafik log-log dengan W(U) sebagai sumbu vertikalnya.

2.1.3.2 Uji Sumur

Pada pengujian sumur ini tujuannya adalah untuk menetapkan kemampuan sumur yang akan diproduksi. Dari debit Q dan penurunan muka air S yang diukur, dapat diperoleh kapasitas jenis sumur. Kapasitas jenis sumur merupakan ukuran kemampuan produksi suatu sumur.

Di Indonesia metode yang sering digunakan adalah Step Drawdown Test yaitu dengan melakukan pemompaan secara terus menerus dengan perubahan debit secara bertahap pada sumur-sumur yang telah ditetapkan. Kapasitas jenis sumur qs dinyatakan sebagai:

$$qs = \frac{Q}{s_w} \quad (2.5)$$

Q = debit pemompaan

Sw = penurunan muka air

2.1.4 Persamaan Dasar Aliran Air Tanah

Aliran dasar air tanah dalam keadaan sebenarnya gerakannya tidak berubah. Hukum Darcy dan persamaan kontinuitas merupakan dasar hukum yang berlaku terhadap aliran air tanah yang lewat akuifer.

a) Aliran Tak Tunak 3-D

Dapat dijabarkan rumus sebagai berikut:

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial^2 x} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial^2 y} + K_z \frac{\partial^2 h}{\partial^2 z} = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.6)$$

dengan :

K = Konduktivitas hidraulik

h = Tinggi tekanan

S = Koefisien tampungan

b) Aliran tunak 3-D

Dapat dijabarkan rumus sebagai berikut:

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial^2 x} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial^2 y} + K_z \frac{\partial^2 h}{\partial^2 z} = 0 \quad (2.7)$$

dengan :

K = Konduktivitas hidraulik

h = Tinggi tekanan

c) Aliran tunak 3-D homogen dan isotropik

Dapat dijabarkan rumus sebagai berikut:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 h}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 h}{\partial^2 z} = 0 \quad (\text{persamaan Laplace}) \quad (2.8)$$

d) Aliran tak tunak 3-D, akuifer homogen dan isotropik dengan koordinat radial

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.9)$$

dengan:

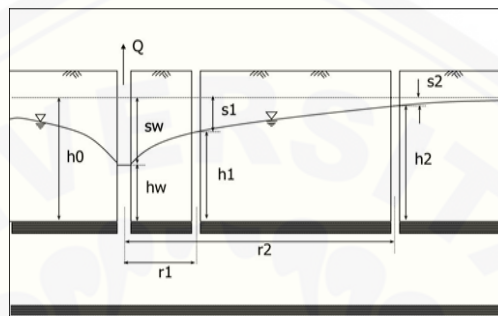
r = jarak dari sumbu koordinat

T = Transimivitas

2.1.5 Hidrolika Aliran Air Tanah

1. Pemompaan pada Akuifer Terkekang

Gambar 2.1 menunjukkan muka air tanah akibat pemompaan pada akuifer terkekang.



Gambar 2.1 Pemompaan pada akuifer terkekang

Sumber: <http://luk.staff.ugm.ac.id/aat/pdf/PelatihanDrainase.pdf>

Persamaannya:

$$Q = A \cdot V_r \quad (2.10)$$

$$Q = (2\pi \cdot r)D \times K \frac{\partial h}{\partial r} \quad (2.11)$$

$$\int_{h_0}^h dh = \frac{Q}{2\pi \cdot KD} \int_{r_0}^r \frac{1}{r} dr \quad (2.12)$$

$$h - h_0 = \frac{Q}{2\pi \cdot KD} \ln \frac{r}{r_0} \quad (2.12)$$

dengan:

A adalah luas penampang aliran

$$A = (2\pi \cdot r) D$$

V_r adalah kecepatan aliran

$$V_r = K \frac{\partial h}{\partial r}$$

D = Tebal akuifer

K = Konduktivitas hidraulis

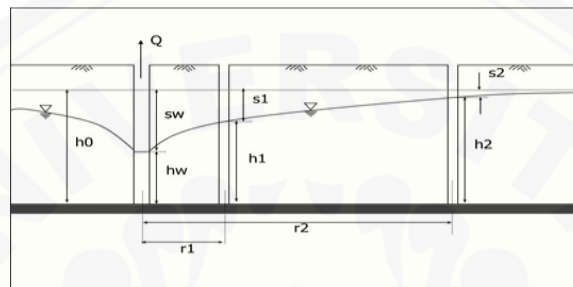
r = Radius pengamatan

Persamaan tinggi tekan aliran tunak pada akuifer terkekang

$$h = h_0 + \frac{Q}{2\pi \cdot KD} (\ln r - \ln r_0) \quad (2.14)$$

2. Pemompaan pada Akuifer Bebas

Gambar 2.2 menunjukkan muka air tanah akibat pemompaan pada akuifer bebas.



Gambar 2.2 Pemompaan Akuifer Bebas

Sumber: <http://luk.staff.ugm.ac.id/aat/pdf/PelatihanDrainase.pdf>

Persamaannya:

$$Q = A \cdot Vr \quad (2.15)$$

$$Q = (2\pi \cdot r)h \times K \frac{\partial h}{\partial r} \quad (2.16)$$

$$\int_{h_0}^h dh = \frac{Q}{2\pi \cdot K} \int_{r_0}^r \frac{1}{r} dr \quad (2.17)$$

$$h^2 - h_0^2 = \frac{Q}{2\pi \cdot K} \ln \frac{r}{r_0} \quad (2.18)$$

dengan:

A adalah luas penampang aliran

$$A = (2\pi \cdot r) h$$

Vr adalah kecepatan aliran

$$Vr = K \frac{\partial h}{\partial r}$$

D = Tebal akuifer

K = Konduktifitas hidraulis

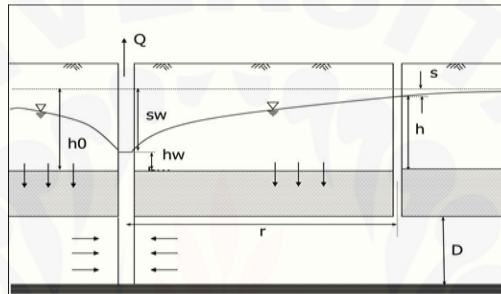
R = Radius pengamatan

dalam bentuk lain dapat dituliskan sebagai berikut: (Bisri, M. 1991)

$$h^2 = h_0^2 + \frac{Q}{2\pi \cdot K} (\ln r - \ln r_0) \quad (2.19)$$

3. Pemompaan pada Akuifer Setengah Terkekang

Pemompaan yang dilakukan pada lapisan atas akan berdampak pada muka air tanah pada lapisan tersebut, muka air tanah pada lapisan tersebut akan mengalami penurunan. Akibatnya sumur-sumur penduduk menjadi kering, oleh karena itu pemompaan sebaiknya dilakukan di bawah lapisan kedap air. Sehingga di lapisan atas muka air tanah hanya turun sedikit tetapi meliputi daerah yang luas. Gambar 2.3 menjelaskan pemompaan pada akuifer setengah terkekang.



Gambar 2.3 Pemompaan pada Akuifer Setengah Terkekang

Sumber: <http://luk.staff.ugm.ac.id/aat/pdf/PelatihanDrainase.pdf>

Persamaannya:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} - \frac{h-h_1}{KDC_1} - \frac{h-h_2}{KDC_2} = 0 \quad (2.20)$$

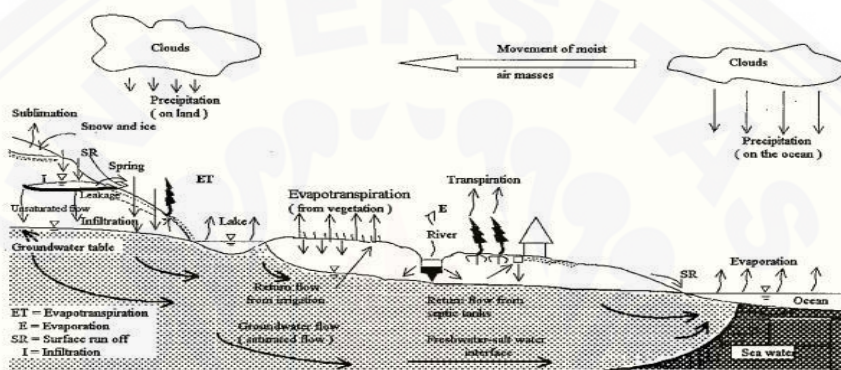
Untuk kebocoran dari satu arah saja maka persamaan dasar menjadi:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} - \frac{h-h_1}{KDC_1} = 0 \quad (2.21)$$

2.2 Siklus Hidrologi

Siklus hidrologi menjelaskan perjalanan air secara terus-menerus atau kontinyu. Proses siklus hidrologi dapat dimulai dari jatuhnya hujan ke muka tanah akibat dari evaporasi dan evapotranspirasi. Kemudian hujan yang jatuh ke permukaan tanah mengalami pergerakan yang berbeda, sebagian bergerak secara horizontal sebagai limpasan langsung (*run-off*). Sedangkan sebagian lagi tertahan di butiran-butiran tanah yang selanjutnya bergerak ke bawah sebagai infiltrasi,

sebagian kecil kembali ke atmosfer melalui penguapan. Air yang meresap ini selanjutnya menuju ke *vadose zone* (*soil water*) sebagai *soil water flow* dan juga mengalir menuju *phreatic zone* (*groundwater*) sebagai *ground water flow*. Gambar siklus hidrologi ditunjukkan pada gambar 2.4



Gambar 2.4 Siklus Hidrologi

2.3 Ketersediaan Air Tanah

Ketersediaan air tanah merupakan jumlah dari air yang tersimpan ke dalam tanah dan keluar dalam kurun waktu tertentu. Ketersediaan air tanah selisih dari infiltrasi dan kebutuhan air tanah. Perhitungan ketersediaan air di lapangan dilakukan secara empiris dengan mempertimbang nilai koefisien kandungan dan sistem akuifer pada lokasi penelitian, yang dinyatakan dengan rumus: (sumber :Kodoatie,R. J. 2012)

$$V = S \cdot V_s \quad (2.22)$$

dengan:

V = volume air yang disimpan di sistem akuifer

S = koefisien kandungan bawah tanah

V_s = volume zona jenuh air atau sistem akuifer

Nilai koefisien kandungan air (S) didapatkan dari data sekunder yang dilakukan pumping test pada sumur gali maupun sumur bor di daerah zona daerah penelitian. Perhitungan volume zona jenuh air di daerah penelitian secara numerik menggunakan rumus dasar: (sumber : Kodoatie,R. J. 2012)

$$V_s = A d_s \quad (2.23)$$

dengan:

V_s = volume zona jenuh air atau sistem akuifer

A = luas daerah yang ditinjau

D_s = tebal zona jenuh air dari sistem akuifer

a. Ketersediaan air tanah tertekan

Perhitungan ketersediaan air tanah tertekan berdasarkan jumlah air yang berasal dari aliran air bawah tanah dangkal secara horisontal yang melalui akuifer. Untuk menghitung besarnya cadangan air tanah tertekan tersebut menggunakan rumus dasar. (sumber : Kodoatie,R. J. 2012)

$$Q = T \times i \times L \quad (2.24)$$

dengan:

Q = debit aliran air tanah

T = transmisivitas

i = landaian hidrolika

L = lebar penampang daerah yang dihitung

b. Transimivitas

Adalah banyaknya air yang dapat mengalir melalui suatu bidang vertikal setebal akuifernya dan selebar satu unit panjang dengan landaian hidrolika satu unit. Dimensinya m^2/jam atau $m^2/hari$. Transmisivitas merupakan hasil kali konduktivitas hidrolik dengan tebal akuifer, dirumuskan :

$$T = K \cdot B \quad (2.25)$$

dengan:

T = transmisivitas (m^2 / detik)

K = koefisien permeabilitas (m / detik)

b = tebal akuifer (m)

c. Konduktifitas Hidrolik

Merupakan kecepatan aliran air melewati satu unit secara vertikal dari akuifer. Konduktifitas hidrolik dapat pula disebut sebagai koefisien permeabilitas, dipengaruhi oleh ukuran butir, susunan butir, porositas dan distribusinya.

d. Koefisien Penyimpanan

Merupakan volume air yang dapat disimpan oleh akuifer setiap satuan luas pada satu satuan perubahan kedudukan muka air tanah. Koefisien penyimpanan ditentukan di lapangan dengan uji pemompaan.

2. 4 Model Air Tanah

Model air tanah adalah representasi berbasis komputer dari fitur penting dari sistem hidrogeologi yang menggunakan dasar hukum sains dan matematika. Ada dua keutamaan dari sebuah model yaitu model konseptual dan model matematis. Model konseptual merepresentasikan klasifikasi ideal yaitu sebuah gambar yang dipahami dari pemahaman hidrogeologi sebagai kunci proses aliran dari suatu sistem. Model matematis adalah persamaan yang tunduk pada asumsi tertentu, mengkuantifikasi proses fisik aktif dari sistem akuifer yang dimodelkan. Sementara model itu sendiri tidak memiliki realitas rinci dari sistem air tanah. Model ini merupakan sistem air tanah yang memadai tingkat detail, dan menyediakan alat ilmiah prediktif untuk mengukur dampak pada sistem yang ditentukan oleh hidrologi, pemompaan atau irigasi tekanan.

Dalam mengembangkan model air tanah ada tiga tahap utama yakni konseptual model, kalibrasi model dan prediksi model. Setelah itu langkah penting dalam pemodelan yaitu pengembangan dari model konseptual yang valid. Asumsi

model juga dilakukan karena kompleksibilitas data atau data tidak layak dan sebagian karena data kurang cukup untuk menggambarkan sistem secara rinci.

Berikut ini model konseptuan berbasis komputer yang diintegrasikan untuk memprediksi kondisi muka air tanah:

2.4.1 *Geographic Information System (GIS)*

Sistem Informasi Geografis (SIG) atau dalam bahasa Inggris *Geographic Information System (GIS)* yang dikutip dari Wikipedia adalah sistem informasi khusus yang mengelola data yang memiliki informasi spasial (bereferensi keruangan). Atau dalam arti yang lebih sempit, adalah sistem komputer yang memiliki kemampuan untuk membangun, menyimpan, mengelola dan menampilkan informasi bereferensi geografis, misalnya data yang diidentifikasi menurut lokasinya, dalam sebuah database.

2.4.2. *A Modular Three-Dimensional Finite Difference Ground-Water Flow Model (MODFLOW)*

MODFLOW adalah aliran air tanah yang berbasis pada persamaan beda hingga yang mampu melakukan simulasi untuk semua jenis akuifer, seperti akuifer tertekan, akuifer tidak tertekan, akuifer semi tertekan bahkan akuifer campuran. Kelebihan MODFLOW yang lainnya adalah mampu menerima data masukan yang beragam, baik dari jenis akuifer, ketebalan lapisan maupun karakteristik transimivitasnya.

2.4.2.1 Model Matematis

Aliran air tanah kepadatan konstan melalui material berpori seperti tanah dinyatakan dalam bentuk persamaan diferensial parsial, pada saat akuifer tertekan, bentuk persamaannya adalah: (sumber : W. Mohd, Z. Ismail and I. Yussof. 2013)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial}{\partial z} \right) - w = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.26)$$

dengan:

K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} = Konduktivitas Hidrolik arah sumbu x,y,z

h = tinggi tekan potensial

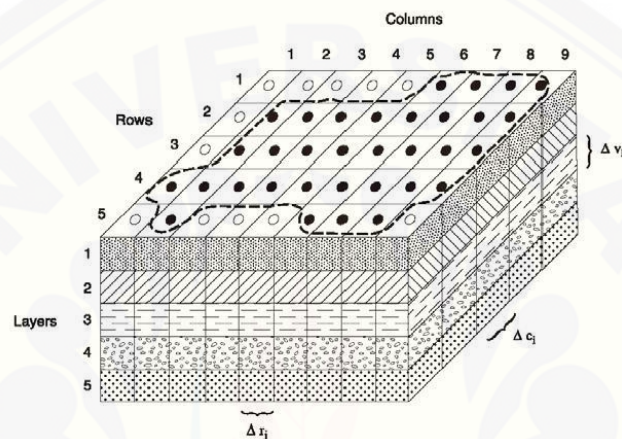
W = fluktuasi volume (Volume Flux per unit volume)

S_s = Koefisien simpanan

$S_s, K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}$ merupakan fungsi ruang.

h dan W = fungsi waktu

Jadi persamaan pengatur seperti di atas, menguraikan aliran air tanah dalam kondisi tak seimbang pada media heterogen dan anisotropik.



Gambar 2.5 Ilustrasi Diskritisasi Pada Sistem Akuifer (Harbaugh, 2005)

Keterangan:

- = Batas akuifer
- = Sel yang aktif
- = Sel yang tidak aktif
- r_j = Dimensi sel arah - j
- c_i = Dimensi sel arah - i
- v_k = Dimensi sel arah - k

Modflow memperhitungkan sistem tiga dimensi seperti pada rangkaian lapisan material yang porous. Pada grid arah horizontal, umumnya menggunakan grid arah sumbu X dan sumbu Y. sebagai grid beda hingga, grid horizontalnya harus sama pada setiap lapisnya. Model ini tidak memerlukan masukan , sebagai penggantinya adalah masukan berupa masing-masing transimivitas, yang

harganya sama dengan konduktivitas hidraulik pada elevasi atas (*top*) dan elevasi dasar (*bottom*) dari lapisan yang ada

Lapisan-lapisan yang ada didalam tanah dapat berupa akuifer tertekan, tidak tertekan atau diantara keduanya. Apabila akuifernya tertekan, membutuhkan masukan transimivitas dan koefisien simpanan. Lapisan atas dari sistem akuifernya didefinisikan sebagai lapisan tidak tertekan, maka akan membutuhkan masukan konduktivitas hidraulik dan koefisien tampungan spesifik (*specific yield*). Modflow akan melakukan perhitungan harga transimivitas dari lapisan tersebut dengan mengalikan antara konduktivitas hidraulik dengan ketebalan lapisan jenuhnya. Setiap akhir dari iterasi, ketebalan lapisan jenuhnya di koreksi dengan mempertimbangkan harga transimivitas yang baru, Modflow mengijinkan permukaan air memancar lebih tinggi dari elevasi permukaan lapis tidak tertekan. Pada kondisi ini, elevasi atas lapisannya dianggap sebagai ketebalan yang tak terbatas. Jika lapisannya dianggap dapat berubah, diberikan data masukan konduktivitas hidraulik dan tebal lapisan akuifer, maka Modflow akan menghitung harga transimivitasnya.

2.4.2.2 Parameter Model

1 Nilai K (Konduktivitas hidrolis)

Konduktivitas hidrolis atau permeabilitas adalah sebuah koefisien perbandingan yang menjelaskan tingkat dimana air dapat bergerak melalui media permeabel (Fetter, dalam Pasaribu, 2009). Besarnya nilai K (konduktivitas hidrolis) tergantung dari jenis tanah yang ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Nilai Konduktivitas Hidrolik (K)

| Rocks (Batuan) | | Unconsolidated deposits (Material sedimen) | | K (m/det) |
|---------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------|--------------|------------------------------------------|
| Karst Limestone permeable | fractured metamorphic & igneous | Limestone & dolomite | batuan pasir | kerikil |
| | | | | pasir |
| | | | | pasir lanau |
| | | | | silt loess |
| | | | | Glacial till |
| | | | | Lempung unweathered marine clay |
| | | | | shale |
| | | | | unfractured metamorphic & igneous |
| | | | | 1 |
| | | | | 10^{-1} |
| | | | | 10^{-2} |
| | | | | 10^{-3} |
| | | | | 10^{-4} |
| 10^{-5} | | | | |
| 10^{-6} | | | | |
| 10^{-7} | | | | |
| 10^{-8} | | | | |
| 10^{-9} | | | | |
| 10^{-10} | | | | |
| 10^{-11} | | | | |
| 10^{-12} | | | | |
| 10^{-13} | | | | |

Sumber : Freeze & Cherry, 1979 (Dalam Putra, 2010:6)

2 Nilai S_s (spesifik storage)

Besarnya nilai S_s (spesifik storage) adalah sebesar $1/\text{nilai } S_y$.

3 Nilai S_y (spesifik storage)

Nilai S_y (spesifik storage) ditentukan berdasarkan jenis tanah sesuai dengan Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Spesifik Yield (S_y)

| Material | Specific Yield (%) | | |
|--------------------------|--------------------|-----|-----|
| | Min | avg | Max |
| Unconsolidated deposits | | | |
| Clay | 0 | 2 | 5 |
| Sandy clay (mud) | 3 | 7 | 12 |
| Silt | 3 | 18 | 19 |
| Fine sand | 10 | 21 | 28 |
| Medium sand | 15 | 26 | 32 |
| Coarse sand | 20 | 27 | 35 |
| Gravelly sand | 20 | 25 | 35 |
| Fine gravel | 21 | 25 | 35 |
| Medium gravel | 13 | 23 | 26 |
| Coarse gravel | 12 | 22 | 26 |
| Consolidated deposits | | | |
| Fine-grained sandstone | 21 | | |
| Medium-grained sandstone | 27 | | |
| Limestone | 14 | | |
| Schist | 26 | | |

| | |
|----------------------------|----|
| Siltstone | 12 |
| Tuff | 21 |
| Other deposits | |
| Dune sand | 38 |
| Loess | 18 |
| Peat | 44 |
| Till, predominantly silt | 6 |
| Till, predominantly sand | 16 |
| Till, predominantly gravel | 16 |

Sumber : Johnson, 1976

(Dalam http://en.wikipedia.org/wiki/Specific_storage, 2017)

4 Nilai n_e (porositas efektif)

Untuk mengetahui besarnya nilai n_e (porositas efektif) berdasarkan jenis tanahnya dapat dilihat dari Tabel 2.4

Tabel 2.4 Nilai Porositas Efektif (n_e)

| Material | Total Porosity, pt | |
|----------------------|--------------------|-----------------|
| | Range | Arithmetic Mean |
| Sedimentary material | | |
| Sandstone (fine) | - | - |
| Sandstone (medium) | 0,14 - 0,49 | 0,34 |
| Siltstone | 0,21 - 0,41 | 0,35 |
| Sand (fine) | 0,25 - 0,53 | 0,43 |
| Sand (medium) | - | - |
| Sand (coarse) | 0,31 - 0,46 | 0,39 |
| Gravel (fine) | 0,25 - 0,38 | 0,34 |
| Gravel (medium) | - | - |
| Gravel (coarse) | 0,24 - 0,36 | 0,28 |
| Silt | 0,34 - 0,51 | 0,45 |
| Clay | 0,34 - 0,57 | 0,42 |
| Limestone | 0,07 - 0,56 | 0,3 |
| Wind-laid material | | |
| Loess | - | - |
| Eolian sand | - | - |
| Tuff | - | - |
| Igneous rock | | |
| Weathered granite | 0,34 - 0,57 | 0,45 |
| Weathered gabbro | 0,42 - 0,45 | 0,43 |
| Basalt | 0,03 - 0,35 | 0,17 |
| Metamorphic rock | | |
| Schist | 0,04 - 0,49 | 0,38 |

Sumber : Mc. Worter & Sunada, 1977

(Dalam <http://web.ead.anl.gov/resrad/datacoll/porosity.htm>, 2017)

5 Nilai n_{total} (porositas total)

Nilai n_{total} (porositas total) berdasarkan jenis tanah terdapat pada Tabel 2.5

Tabel 2.5 Nilai Porositas Total (n_{total})

| Material | Effective Porosity, n_e | |
|----------------------|---------------------------|-----------------|
| | Range | Arithmetic Mean |
| Sedimentary material | | |
| Sandstone (fine) | 0,02 - 0,40 | 0,21 |
| Sandstone (medium) | 0,12 - 0,41 | 0,34 |
| Siltstone | 0,01 - 0,33 | 0,35 |
| Sand (fine) | 0,01 - 0,46 | 0,43 |
| Sand (medium) | 0,16 - 0,46 | - |
| Sand (coarse) | 0,18 - 0,43 | 0,39 |
| Gravel (fine) | 0,13 - 0,40 | 0,34 |
| Gravel (medium) | 0,17 - 0,44 | - |
| Gravel (coarse) | 0,13 - 0,25 | 0,28 |
| Silt | 0,01 - 0,39 | 0,45 |
| Clay | 0,01 - 0,18 | 0,42 |
| Limestone | ~0 - 0,36 | 0,3 |
| Wind-laid material | | |
| Loess | 0,14 - 0,22 | 0,18 |
| Eolian sand | 0,32 - 0,47 | 0,38 |
| Tuff | 0,02 - 0,47 | 0,21 |
| Igneous rock | | |
| Weathered granite | - | - |
| weathered gabbro | - | - |
| Basalt | - | - |
| Metamorphic rock | | |
| Schist | 0,22 - 0,33 | 0,26 |

Sumber : Mc. Worter & Sunada, 1977

(Dalam <http://web.ead.anl.gov/resrad/datacoll/porosity.htm>, 2017)

2.4.2.3 Perancangan Model

Dalam perancangan model akan dibahas mengenai diskritisasi, parameter waktu, kondisi batas, kondisi awal serta penentuan parameter. Berikut ini penjelasan mengenai perancangan model:

1. Diskritisasi

Dalam proses ini daerah model dibagi menjadi beberapa grid atau beberapa elemen untuk dapat dihitung dan menghasilkan nilai pendekatan matematis.

2. Kondisi Batas / *Boundary Condition*

Pada kondisi batas dalam pemodelan air tanah yaitu ketinggian awal muka air pada masing-masing sumur yang dikaji.

3. Kondisi Awal / *initial Condition*

Kondisi awal merupakan suatu keadaan pada sistem aquifer yang mempunyai parameter-parameter dengan nilai tertentu pada waktu tertentu yang digunakan untuk memecahkan masalah pemodelan.

4. Input Data

Setiap masing-masing sumur memiliki perbedaan misalnya pada ketebalan aquifer, konduktivitas (K), debit pemompaan dan lamanya pemompaan. Data-data tersebut diinput ke program pada masing-masing sumur yang dikaji

5. Running Model

Running model dilakukan untuk mengetahui hasil dari pemodelan yang kemudian dibandingkan dengan hasil pengamatan, apabila faktor kesalahan relatif besar maka dilakukan kalibrasi.

6. Kalibrasi Model

Seperti halnya yang sudah dijelaskan diatas kalibrasi digunakan untuk membandingkan hasil pemodelan dan pengamatan untuk memperoleh hasil terbaik. Untuk memperbaiki faktor kesalahan dengan mengubah nilai parameter-parameter yang ditentukan pada tahap awal. Beberapa metode yang digunakan untuk kalibrasi model sebagai berikut :

a. MSE (*Mean Square Error*)

$$MSE = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n (y_j(t) - d_j(t))^2 \quad (2.27)$$

dengan : $y_j(t)$ = penjumlahan output hasil produksi

$d_j(t)$ = output aktual

b. RMSE (*Root Mean Square Error*)

$$RMSE(t) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{N}} \quad (2.28)$$

dengan : y_i = nilai hasil prediksi

x_i = nilai observasi / aktual

N = jumlah pola

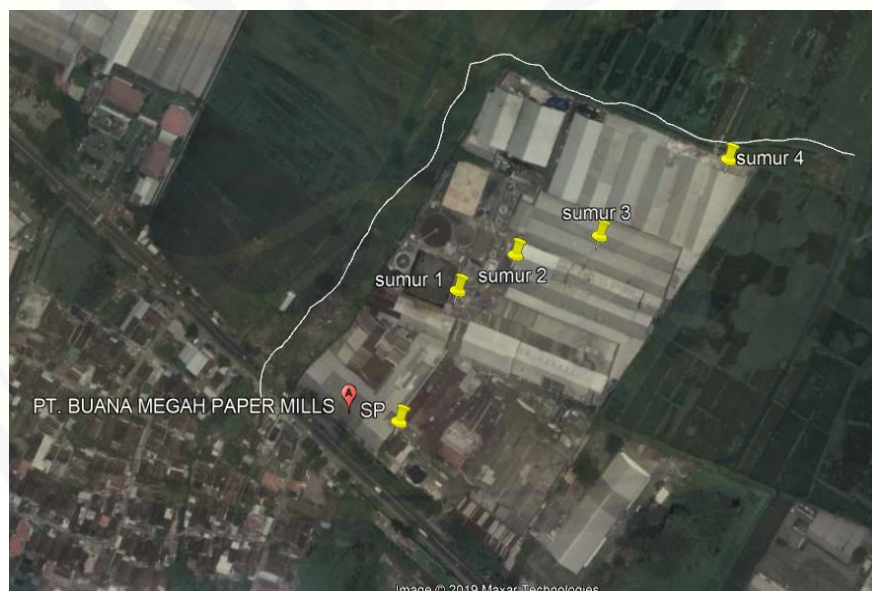
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Konsep penelitian

Dalam penelitian ini tahapan pertama yang dilakukan yaitu pengumpulan data, kemudian data yang diperoleh diolah sesuai dengan tahapan yang ditentukan. Program bantu yang digunakan adalah dengan Visual Modflow. Kemudian hasil dari pemodelan tersebut di kalibrasi untuk memperoleh perbandingan terbaik antara observasi dan simulasi. Konseptual model dibentuk dari kajian menyeluruh dari akuisisi data primer dan data sekunder serta analisis data.

3.2 Lokasi Penelitian.

Penelitian ini dilakukan di sumur produksi milik PT. Buana Megah Paper Mills yang secara administratif terletak di Jl. Cangkringanmalang km.40 Kec. Beji, Kab. Pasuruan Provinsi Jawa Timur. Industri ini berada diatas lahan seluas 17 ha dengan luas bangunan 5000 m².



Gambar 3.1. Peta Lokasi Penelitian Kec. Beji Kab. Pasuruan.
(Sumber: Google Maps, 2019)

3.3 Sistematika Penelitian

Sistematika penelitian merupakan langkah-langkah mulai dari pengumpulan data hingga pengolahan data yang nantinya hasilnya dijadikan sebagai dasar dalam menarik kesimpulan. Berikut ini sistematika penelitian:

3.3.1 Pengumpulan Data

Data yang dikumpulkan merupakan kebutuhan data dalam mengembangkan konseptual penelitian aliran air tanah dan dampak pemompaan terhadap penurunannya. Kebutuhan data yang kompleks sehingga dilakukan akuisisi data dan interpretasi untuk melengkapi konseptual model sehingga diperoleh *output* yang akurat. Disamping itu terdapat beberapa data yang juga diperlukan dalam penelitian ini diantaranya:

1. Lithologi

Keadaan geometri akuifer diperoleh melalui data logging pemboran yang diperoleh dari Dinas ESDM Provinsi Jawa Timur. Hasil dari data geometri akuifer dapat diperoleh kondisi bawah tanah pada sumur yang dianalisis.

2. Data Pemompaan

Data uji pemompaan dipakai dan dianggap sebagai data pengambilan air tanah pada sumur produksi. Data ini kemudian dijadikan sebagai kajian sampai sejauh mana pengaruhnya terhadap kondisi muka air tanah. Hasil dari data pemompaan dapat diperoleh debit (Q), dan waktu (t) selama satu tahun.

3. Data Konstruksi Sumur

Data konstruksi sumur dibutuhkan untuk mengetahui kondisi dari air tanah yang berkaitan dengan kondisi konstruksi sumur. Data konstruksi diperoleh kedalaman, tebal akuifer dan jari-jari sumur (r_w).

4. Data Spasial

Data spasial yang diperlukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Peta lokasi penelitian yaitu peta RBI Kota Pasuruan;
2. Data koordinat sumur yang didapat dari Dinas ESDM Provinsi Jawa Timur;
3. Data koordinat boundry condition dari Google Earth

3.3.2 Tahap Penyiapan Data

Dalam tahap ini, data-data yang digunakan berupa data perencanaan sumur yang diperoleh dari Dinas Energi dan Sumber Daya Mineral Provinsi Jawa Timur. Adapun data-data yang diperlukan dalam penelitian ini adalah : data log lithologi, data konstruksi sumur dan data uji pemompaan. Selain data-data tersebut data yang harus dipersiapkan yaitu koordinat sumur-sumur produksi dan sumur pantau.

3.3.3 Tahap Pengolahan Data dan Analisa Data

Pada tahapan ini adapun analisa yang dilakukan adalah sebagai berikut:

- 1) Proses penyiapan data *boundary condition* dan lokasi sumur produksi sesuai data koordinat sumur menggunakan ArcGIS
- 2) Menganalisa penurunan muka air tanah

3.3.4 Tahap running model

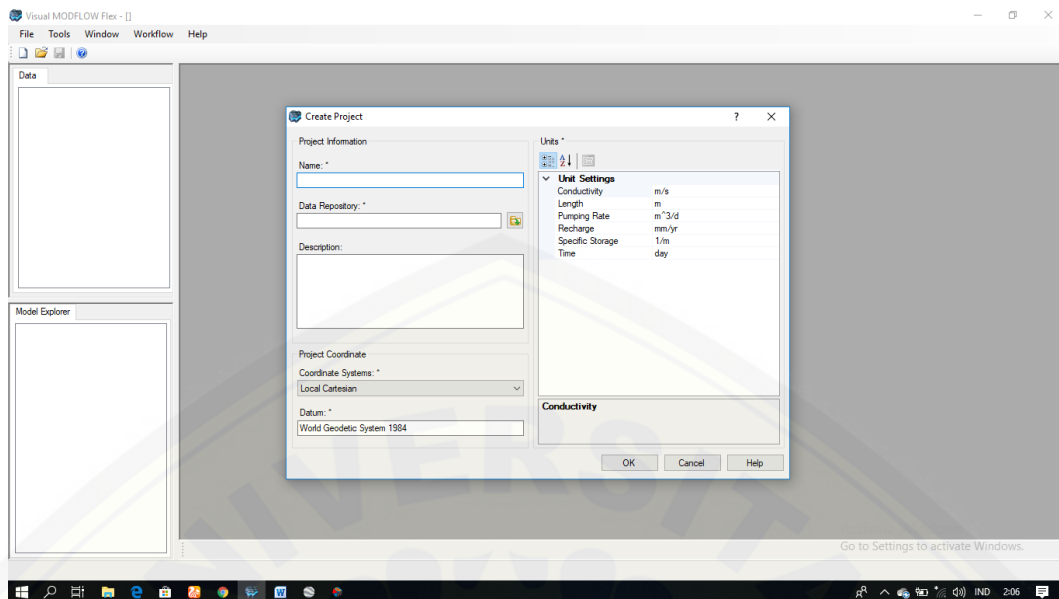
Tahap running model dengan menggunakan program bantu Visual Modflow untuk mengetahui profil penurunan muka air tanah meliputi:

- Import data *Boundary Condition shp*
- Menentukan parameter model yaitu *Initial Condition*
- Diskritisasi data
- Input data sumur produksi
- Membandingkan hasil simulasi dan hasil pengamatan
- Menentukan faktor toleransi program
- Kalibrasi model apabila faktor kesalahan relatif besar antara hasil perhitungan program dan hasil pengamatan
- Diperoleh hasil dan pembahasan serta kesimpulan

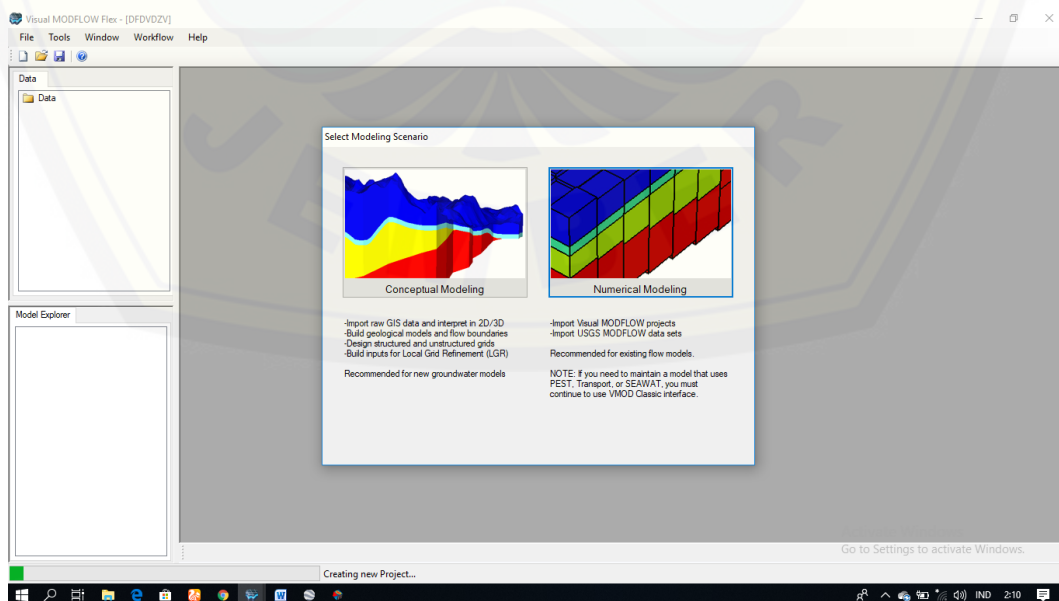
3.3.5 Proses Pengerjaan Software Visual Modflow

Adapun langkah-langkah pengerjaan software Visual Modflow adalah sebagai berikut:

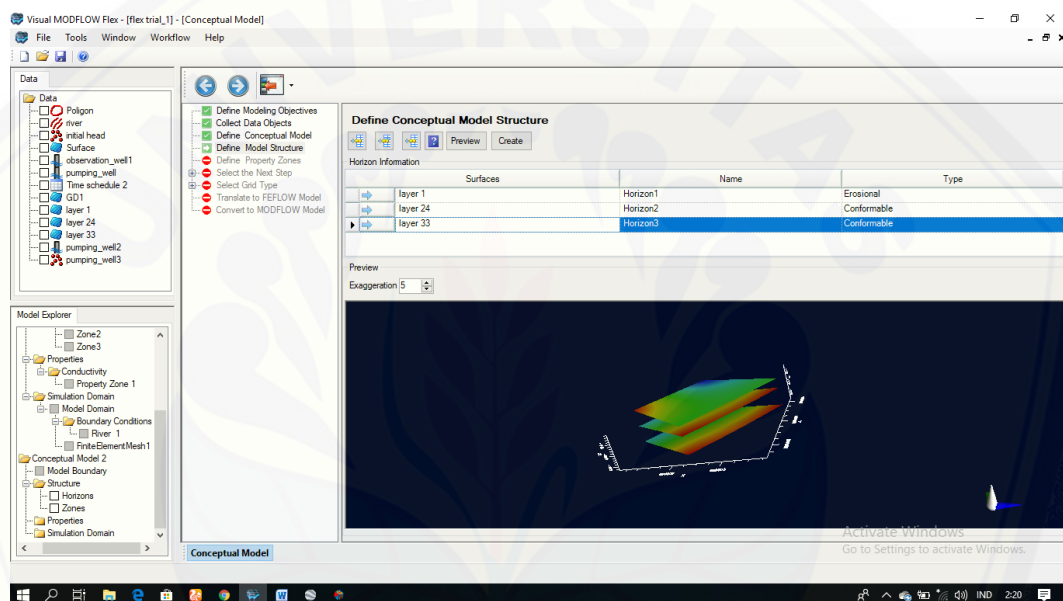
1. Buka software Visual Modflow
2. Pilih File, Project Baru. Setelah itu ubah system koordinat menjadi UTM Zone 49S (WGS 1984) disesuaikan dengan wilayah pengamatan

Gambar 3.2 *Layout* merubah koordinat sistem

- 3 Dalam pemodelan Visual Modflow terdapat 2 pilihan yaitu *conceptual modeling* serta *numerical modeling*. Jika *conceptual modeling* digunakan untuk memulai konsep pemodelan sedangkan pada *numerical modeling* pemodelan dibuat dengan konsep berbasis *numeric* sehingga lebih kompleks. Dari *conceptual modeling* bisa di *convert* menjadi *numerical modeling*. Namun jika *numerical* di *convert* menjadi *conceptual* tidak bisa.

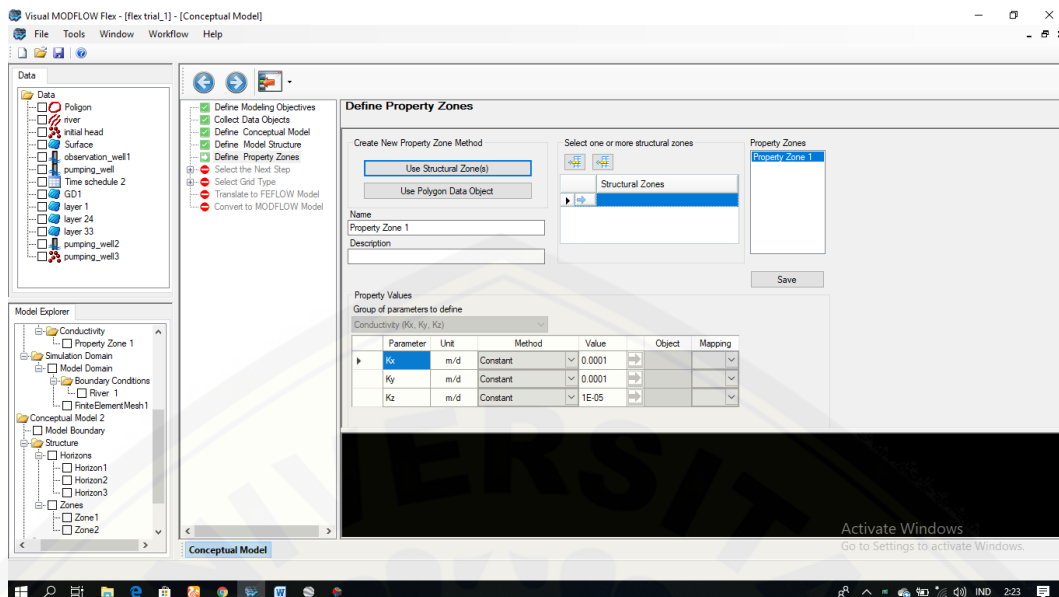
Gambar 3.3 *Layout* pemilihan *modeling*

- 4 Setelah itu masukkan tanggal memulai observasi atau pengamatan
- 5 Masukkan data *boundary*, *constant head west* dan *east*, *river* serta *surface* berdasarkan jenis data.
- 6 Langkah selanjutnya, membuat pemodelan struktur yaitu berupa susunan surface atau layer. Dalam pengamatan kali ini, layer 1 sedalam 50 meter sedangkan layer 2 sedalam 80 meter. Asumsi tersebut didapat berdasarkan data log lithologi. Struktur input model ditunjukkan pada Gambar 3.4



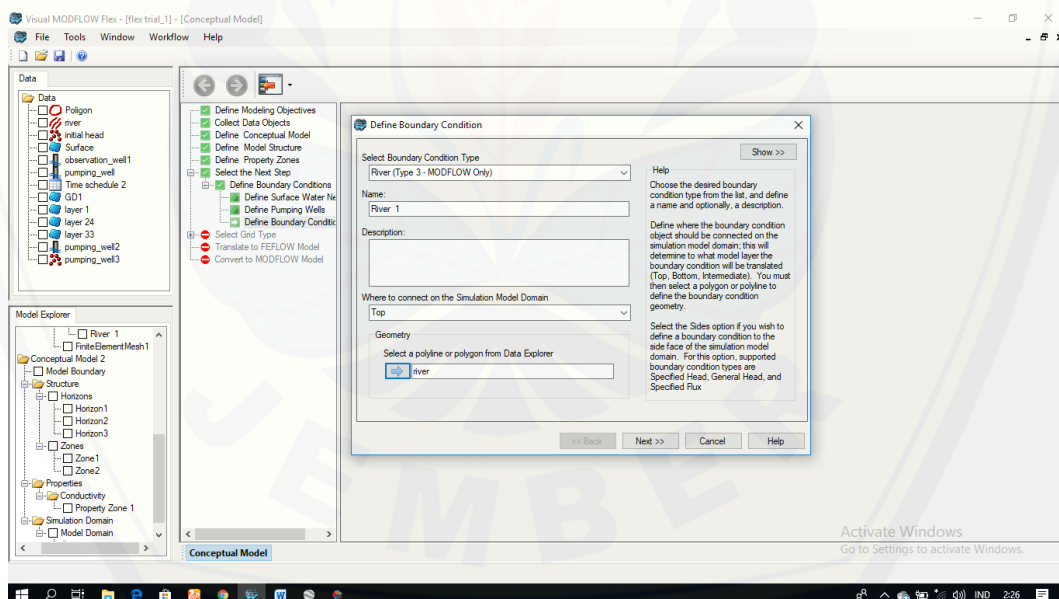
Gambar 3.4 Layout input model structure

- 7 Memasukkan nilai konduktivitas hidrolis berupa K_x , K_y dan K_z berdasarkan zona struktur. Yang dimaksud zona struktur adalah lithologi layer. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.5



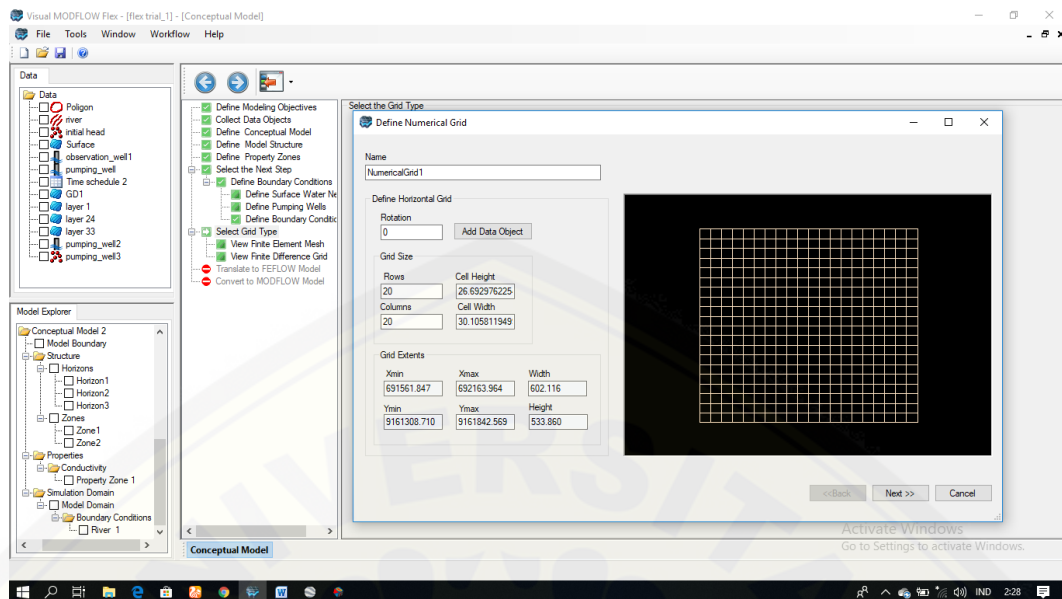
Gambar 3.5 Layout Structural Zone

- 8 Masukkan data boundary condition berupa *constant head east* dan *west* beserta *river*. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.6



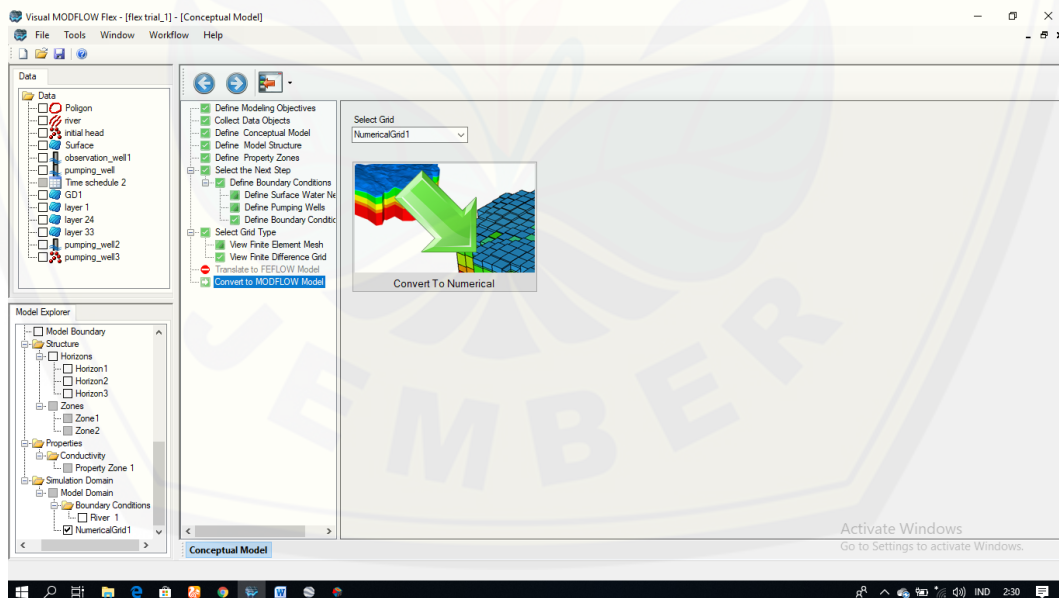
Gambar 3.6 Layout input Boundary condition

- 9 Menentukan tipe grid, yaitu menentukan kolom dan baris untuk penampang. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.7



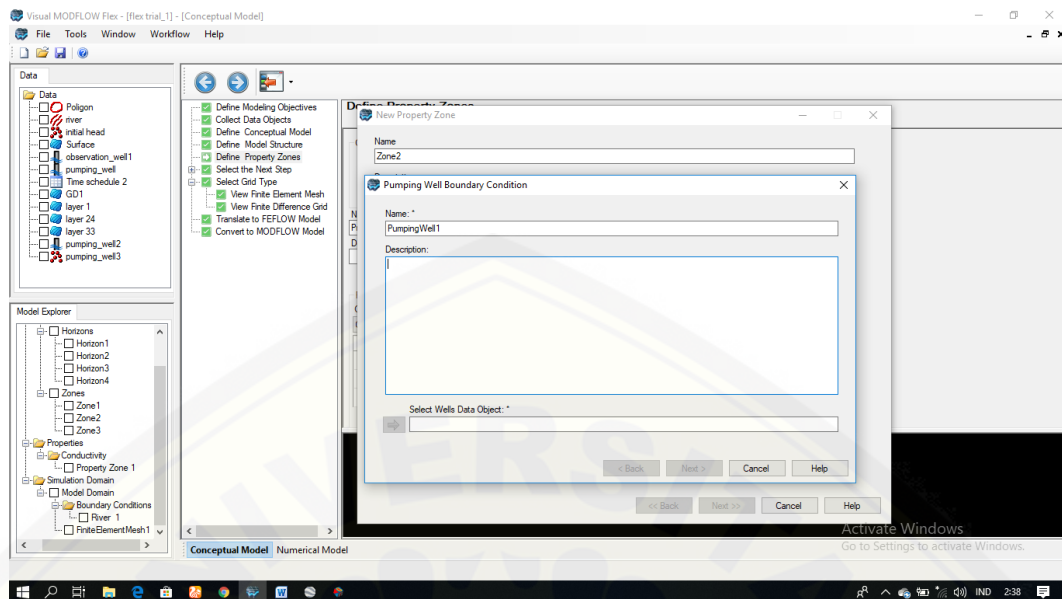
Gambar 3.7 Layout Numerical Grid

10 Convert ke numerical modeling. Tahap konvert ke numerical ditunjukkan pada Gambar 3.8



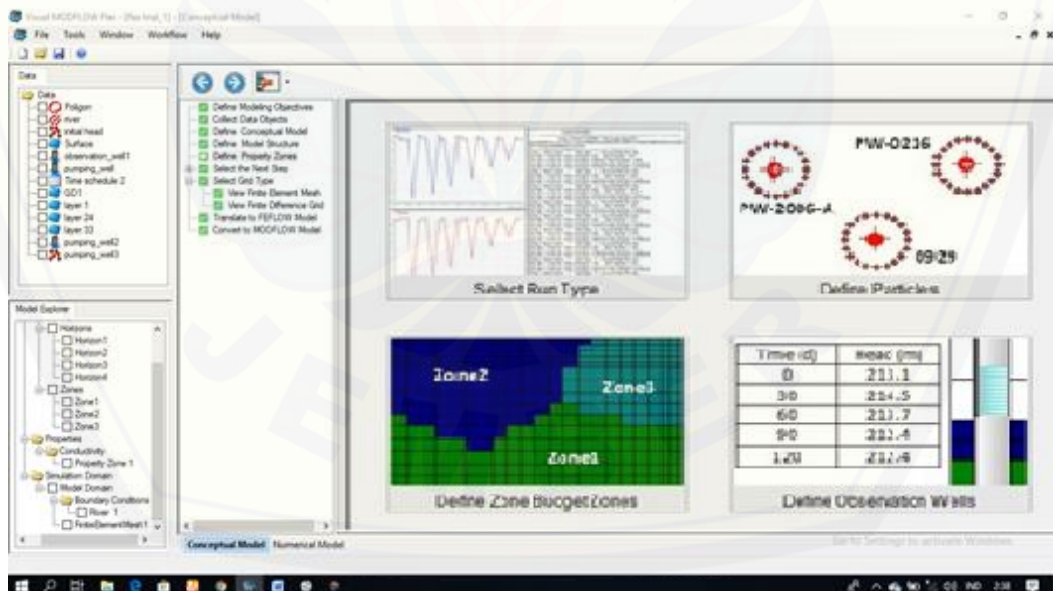
Gambar 3.8 Layout convert program

11 Selanjutnya masukkan data *initial head* di menu *define properties*. Nilai *initial head* didapat dari data ketinggian rata – rata kontur muka air selama 7 hari. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.9



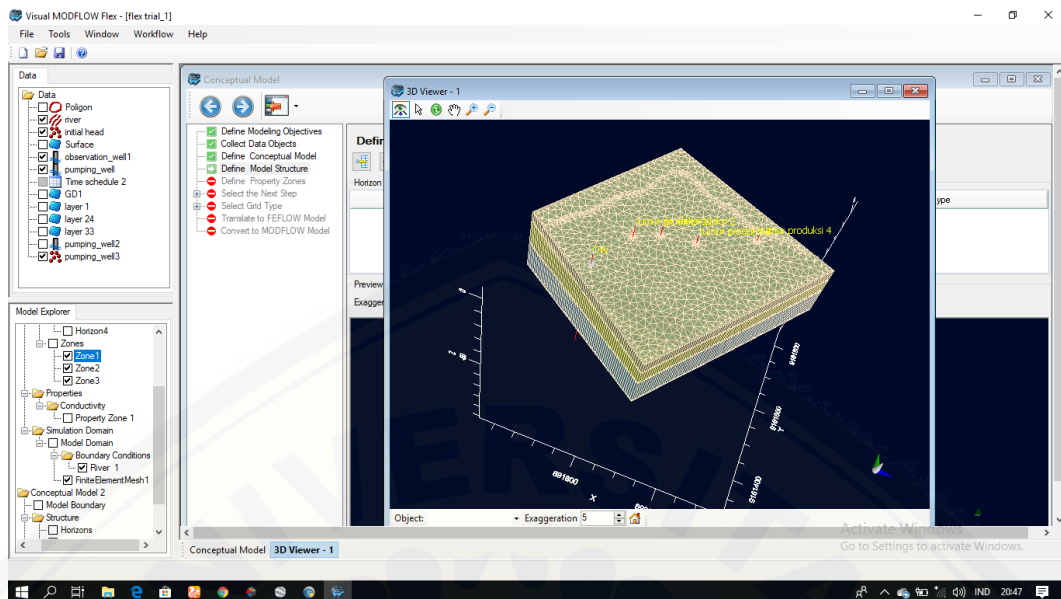
Gambar 3.9 Layout input initial head

12 Masukkan data observation wells yaitu data ketinggian muka air tanah selama 7 hari. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.10

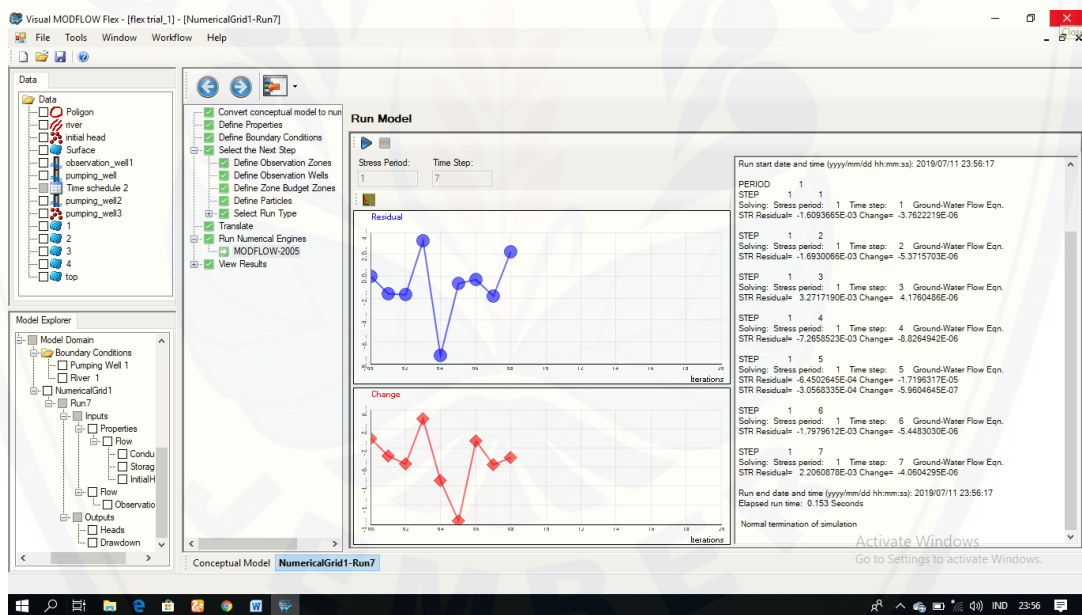


Gambar 3.10 Layout input define finite

13 Setelah memasukkan data, running pemodelan Visual Modflow dengan memilih *single Run*. Dapat dilihat pada Gambar 3.11 dan 3.12



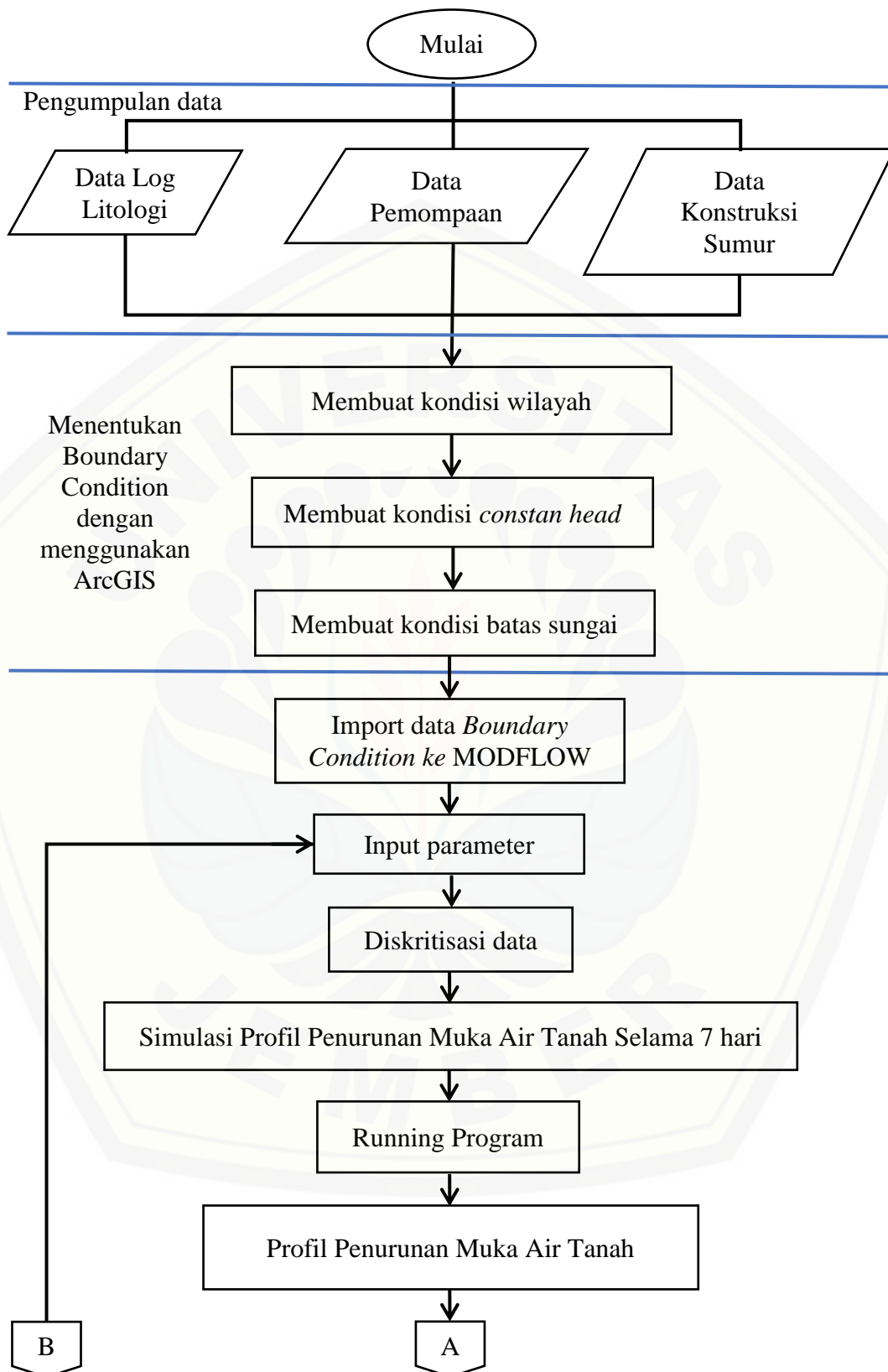
Gambar 3.11 Finite Element Mesh

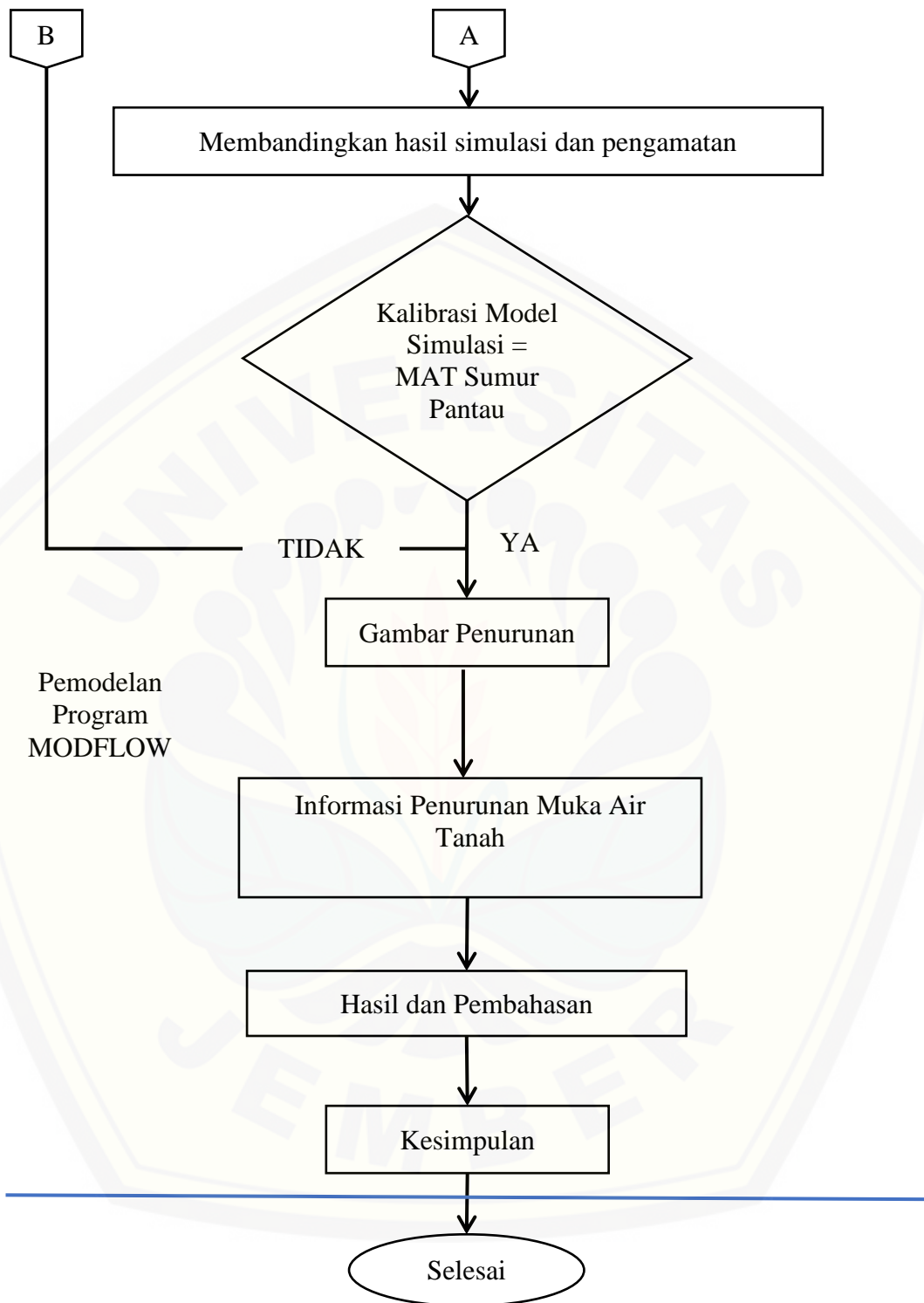


Gambar 3.12 Run model

3.4 Metodologi Penelitian

Tahapan penelitian dalam bentuk diagram alir selengkapnya ditunjukkan pada Gambar 3.13





Gambar 3.13 Diagram Alir Penyelesaian Penelitian

BAB 5 KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

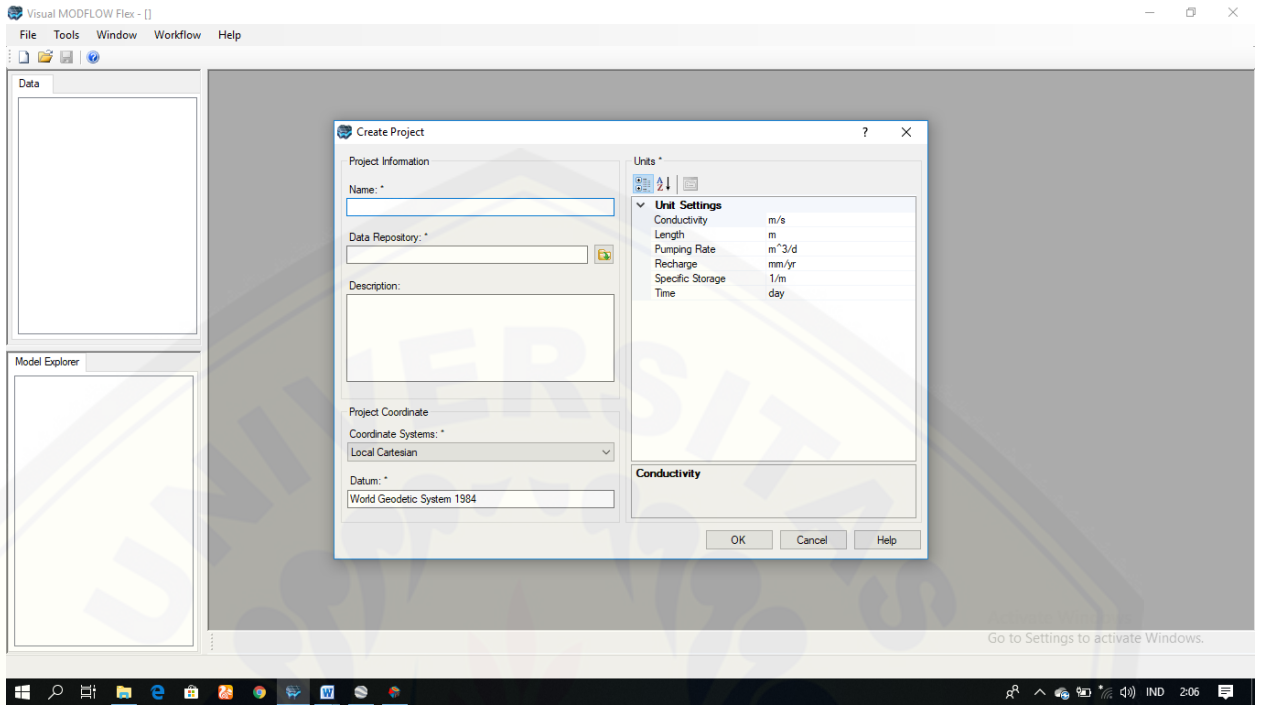
Pengaruh eksploitasi sumur produksi terhadap penurunan muka air tanah pada PT. Buana Megah Paper Mills dengan menggunakan *Visual Modflow* dari *running model* diperoleh hasil yang normal *Simulation* dan terjadi penurunan muka air tanah pada sumur produksi maupun sumur pantau rata-rata sebesar 1,8 m. Dan diperkirakan air tanah mengalir menuju kearah utara karena pada lokasi peneliti, daerah utara memiliki elevasi permukaan tanah lebih rendah dibandingkan dengan daerah selatan yang memiliki ketinggian elevasi permukaan tanah yang lebih tinggi. Selain itu faktor pengambilan air juga bisa menjadi salah satu penyebabnya.

5.2 Saran

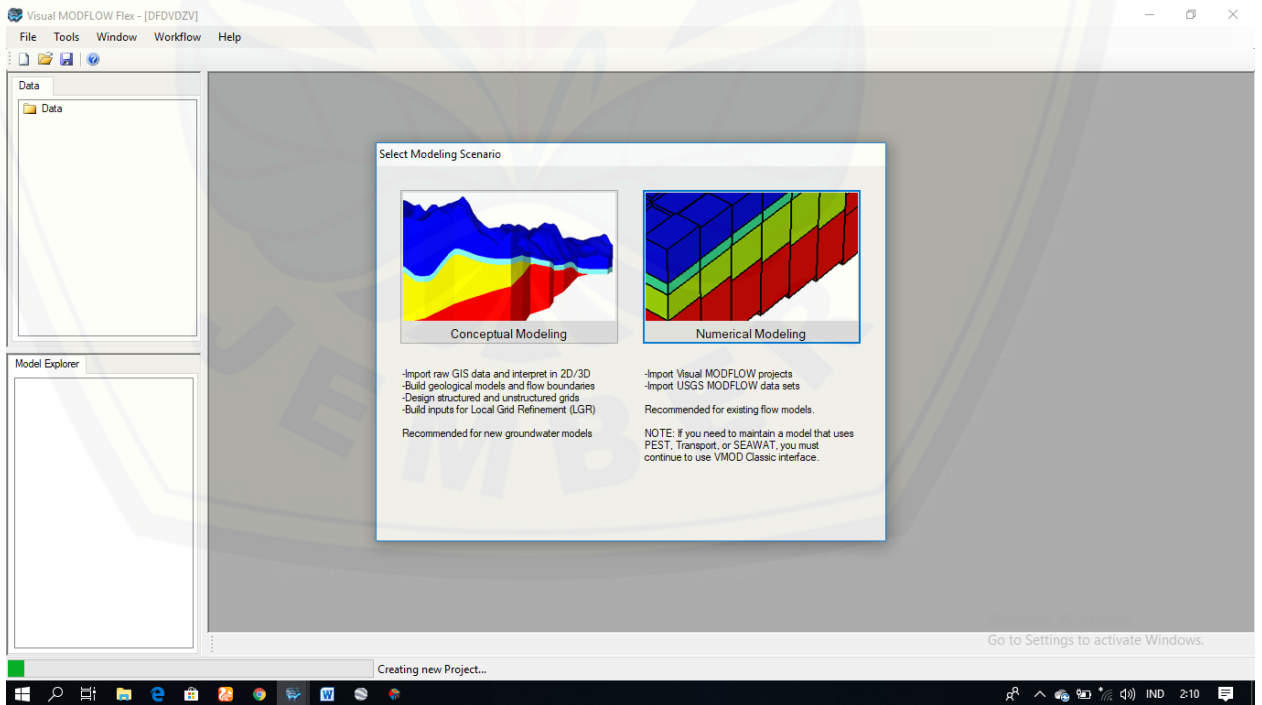
Pada penelitian ini menggunakan sungai sebagai *boundary condition* atau sebagai kondisi batas. Untuk memperoleh hasil yang berbeda atau hasil lebih baik dapat menggunakan kondisi batas yang lain misalnya *Recharge*, *Evapotranspirasi*, *Lake* dan *Specified Flux*. Selain itu pada penelitian selanjutnya dapat memperhitungkan instruksi air laut bagi lokasi yang dekat dengan pantai.

DAFTAR PUSTAKA

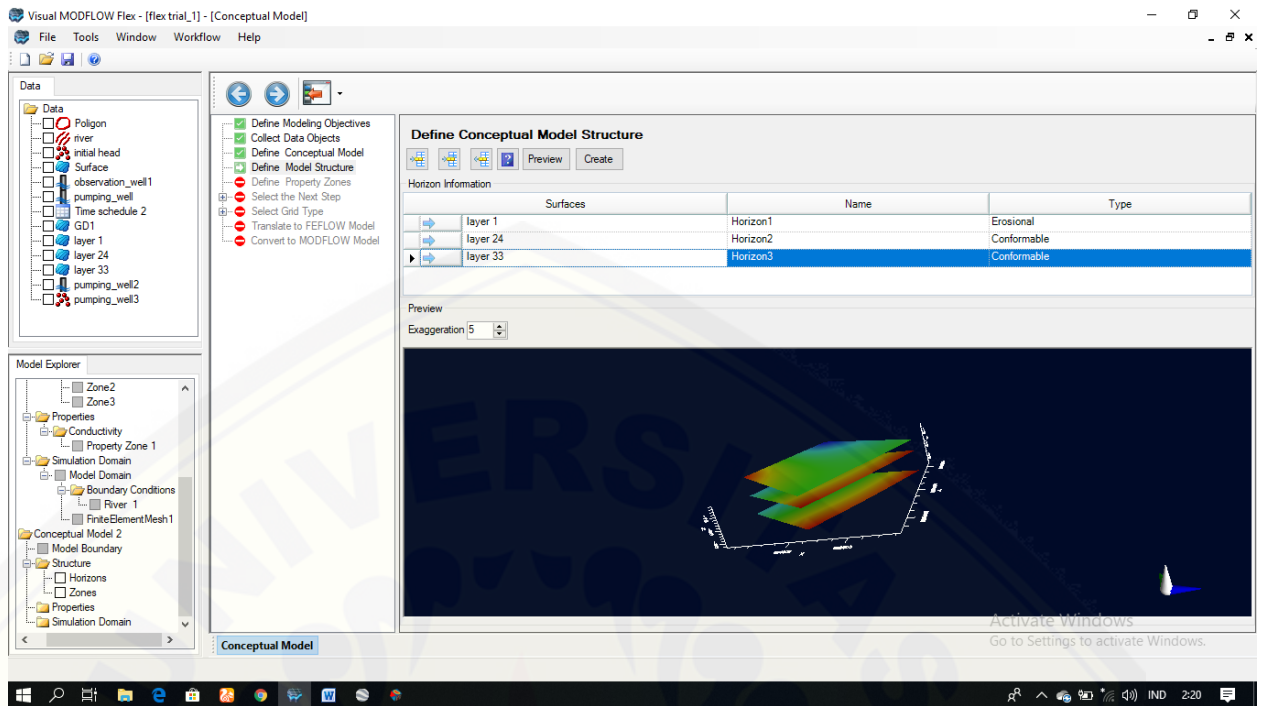
- Bisri, M. 1991. *Aliran Air Tanah*. Malang : Universitas Brawijaya.
- Boyce, S.E., Nishikawa, T. & Yeh, W.W.-G., 2015. "Reduced order modeling of the Newton formulation of MODFLOW to solve unconfined groundwater flow". *Journal of Advances in Water Resources* Vol 83 No. 1, June 2015.
- Ekarini, F.D. & Si, S., 1991. *Pemetaan Pola Aliran Air Tanah*.
- Kodoatie, R. J. 2012. *Tata Ruang Air Tanah*. Yogyakarta: Andi Offset.
- Pasaribu, J.M. 2009. *Simulasi Aliran Air Tanah Dengan Menggunakan Software Modflow Berdasarkan Curah Hujan*. Bandung. ITB.
- S. Korkmaz, 2013. "Transient Solutions to Groundwater Mounding". *Journal of NGWA* Vol 51 No. 3, June 2013.
- Samadi. 2007. *Geografi 1*. Bogor: Yudhistira
- Soemarto, CD, 1987. *Hidrologi Teknik*. Jakarta : Erlangga.
- Sosrodarsono, Suyono. 1999. *Hidrologi untuk Pengairan*. Jakarta : Pradnya Paramitha.
- Sudarto, L., 2012. *Prediksi Penurunan Muka Air Tanah Akibat Pemompaan*.
- Susilarini, R. 2010. *Analisa Cadangan Air Tanah Sebagai Akibat Penggalan Gumuk di Wilayah Kecamatan Summersari Kabupaten Jember*. *Skripsi*. Jember : Fakultas Teknik Universitas Jember.
- Todd, David Keith. 1980. *Groundwater hidrology*. New York: Jhon Wiley and Sons Ltd.
- Wijaya, M. 2012. *Pengaruh Pemompaan Sumur Produksi Terhadap Penurunan Muka Air Tanah dengan Menggunakan Program Aquifer Test dan Feflow*. *Skripsi*. Jember: Fakultas Teknik Universitas Jember.
- W. Mohd, Z. Ismail and I. Yussof. 2013. "Simulation of horizontal well performance using Visual". *Journal of Spring*, July 2013.



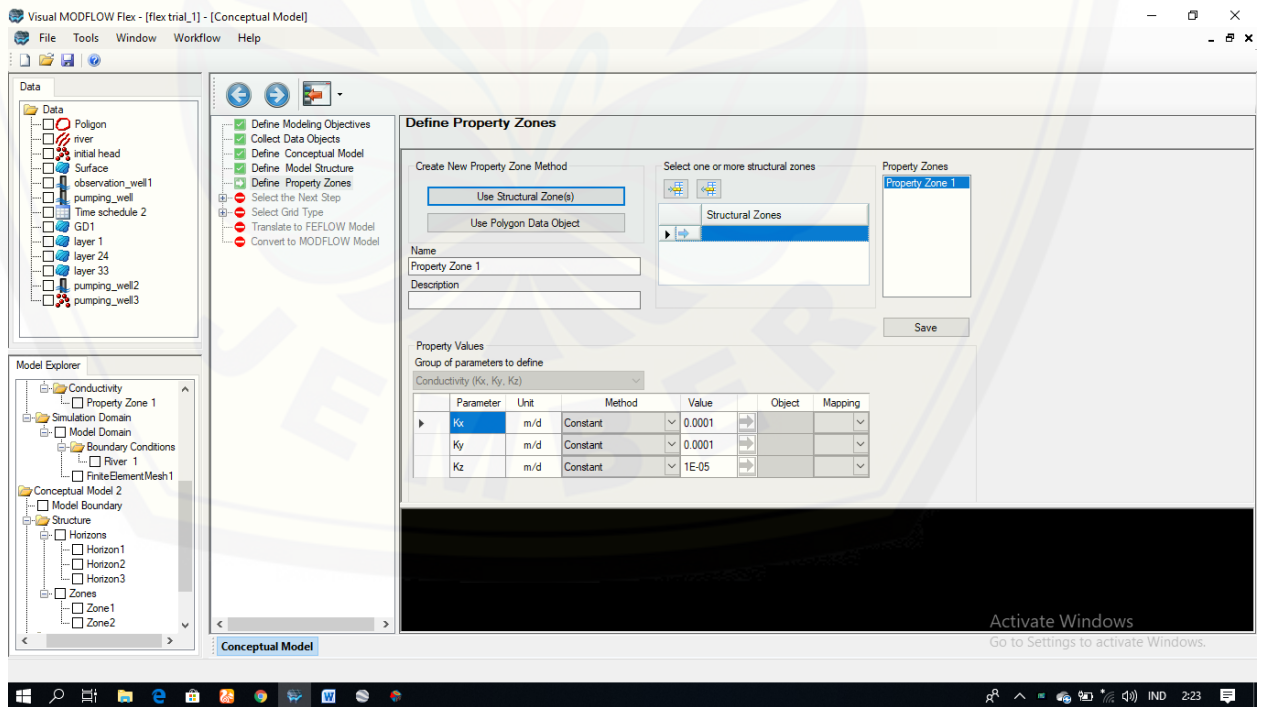
Lampiran A 1. Setting Waktu



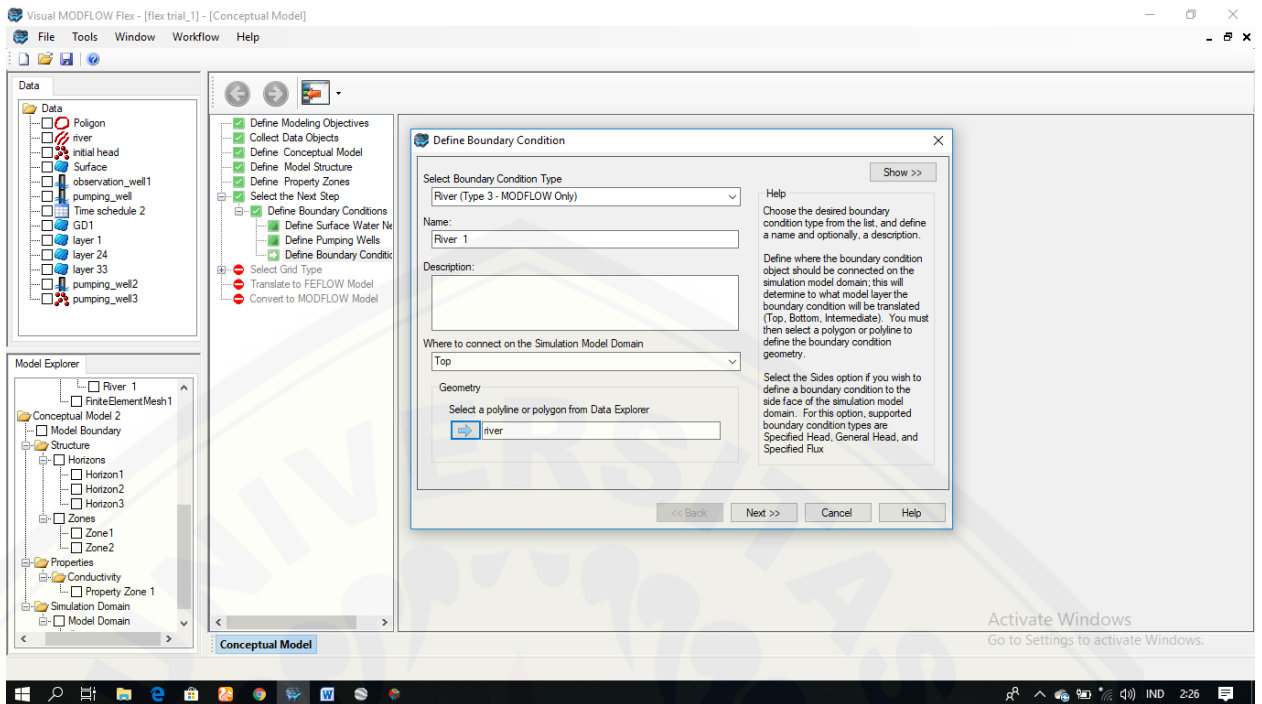
Lampiran A 2. Conceptual Modeling



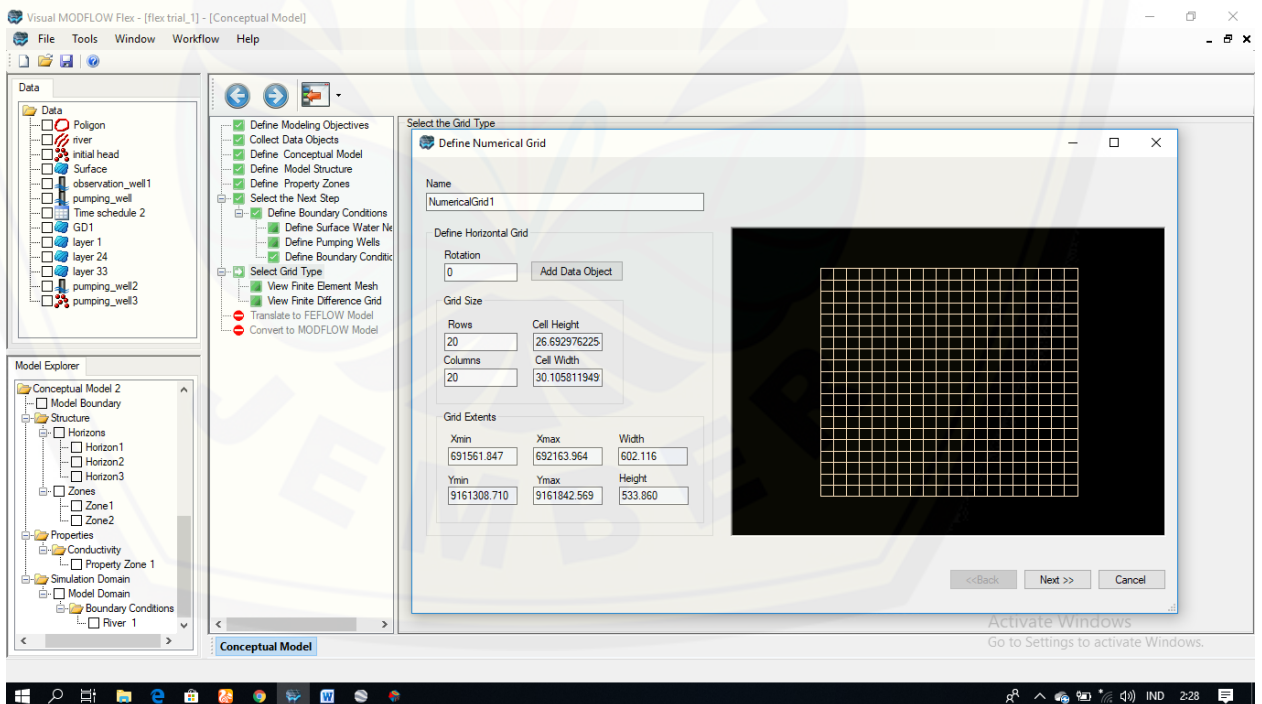
Lampiran A 3. Model Structure layers



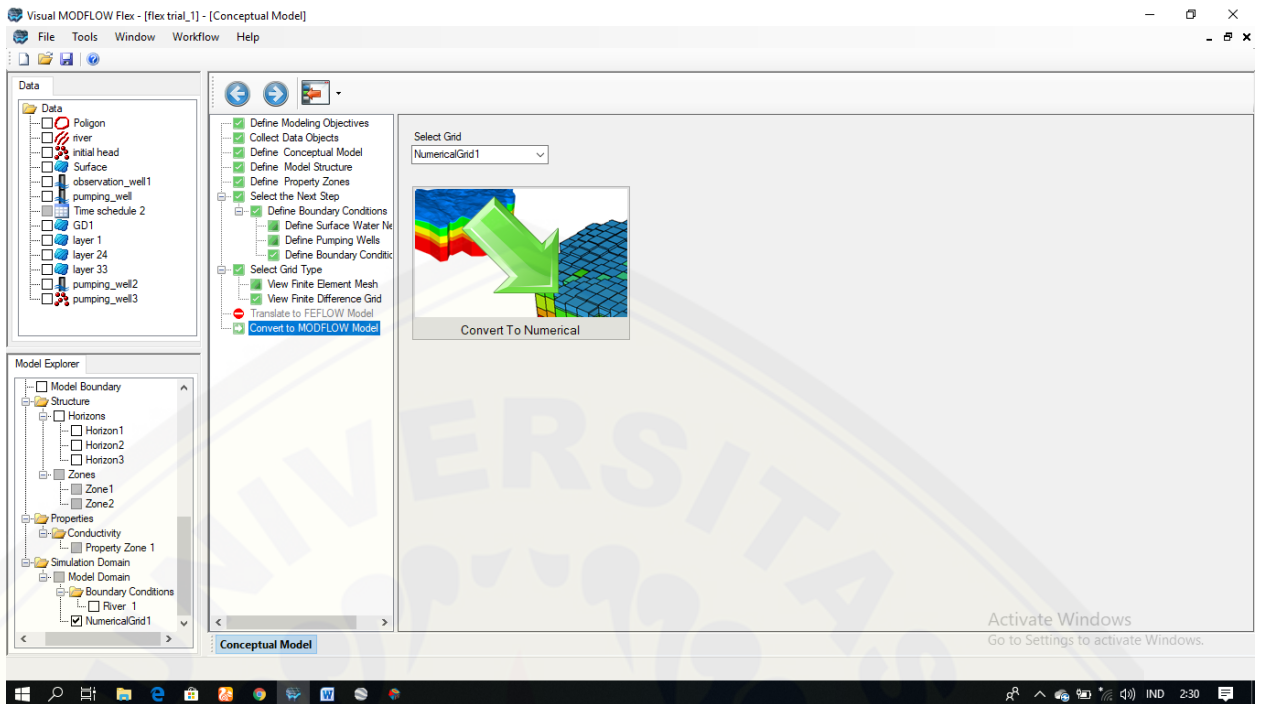
Lampiran A 4. Input Kx Ky Kz



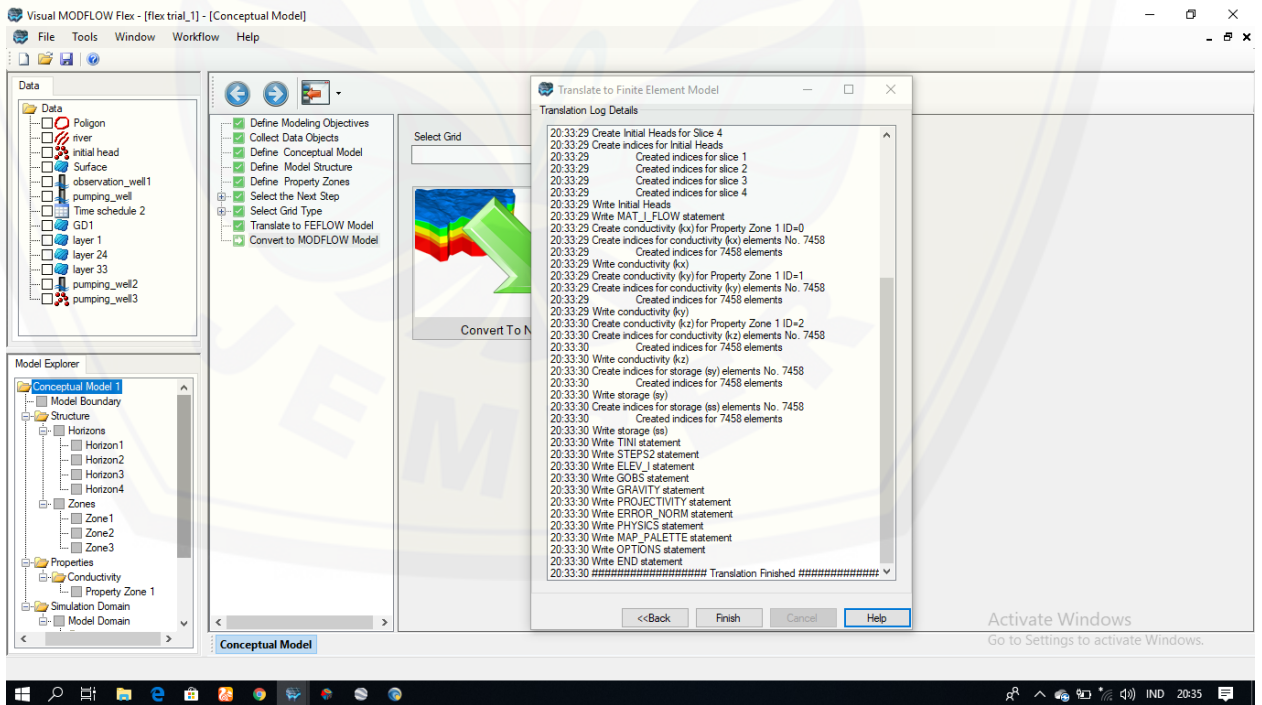
Lampiran A 5. Input River



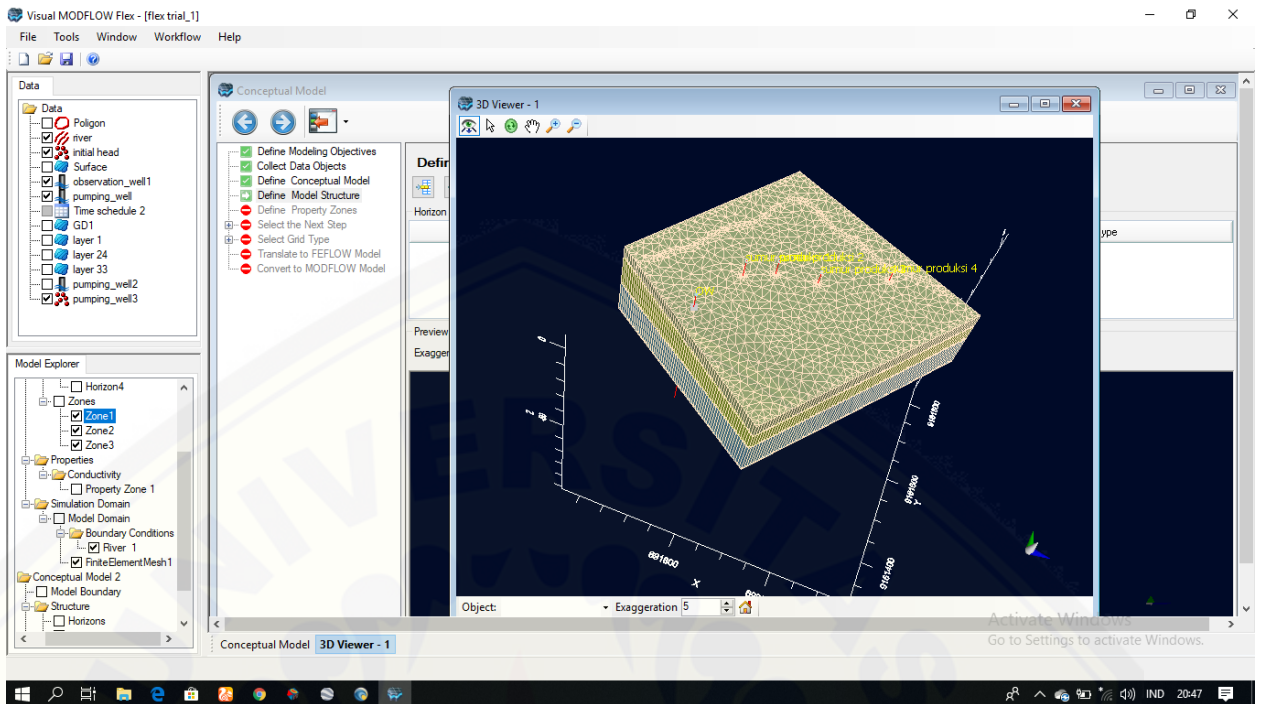
Lampiran A 6. Input Grid



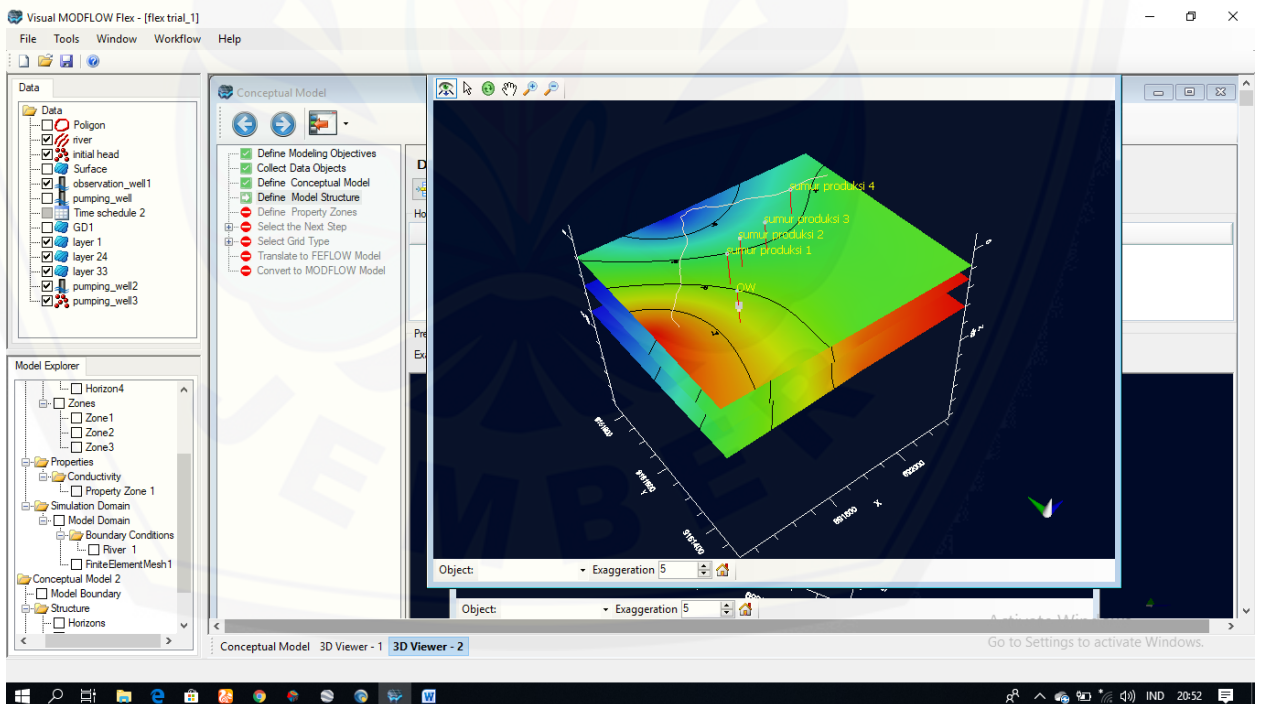
Lampiran A 7. Convert To Numerical



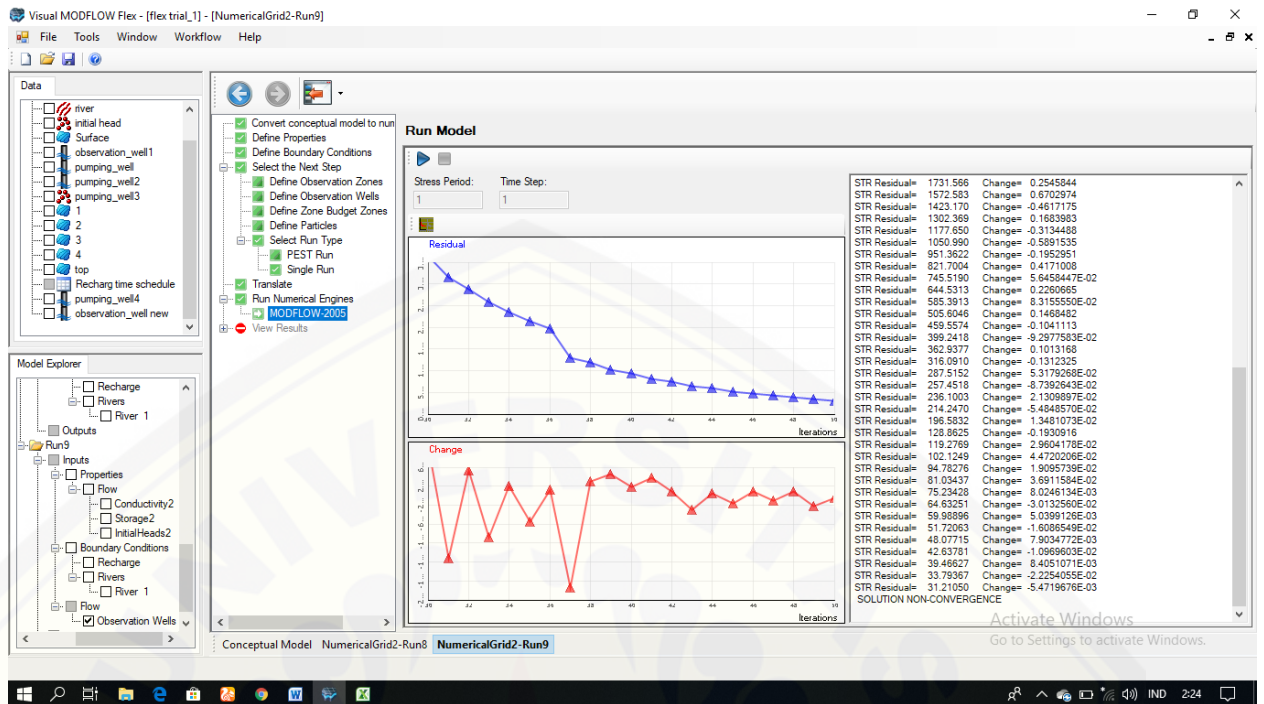
Lampiran A 8. Translate Numerical



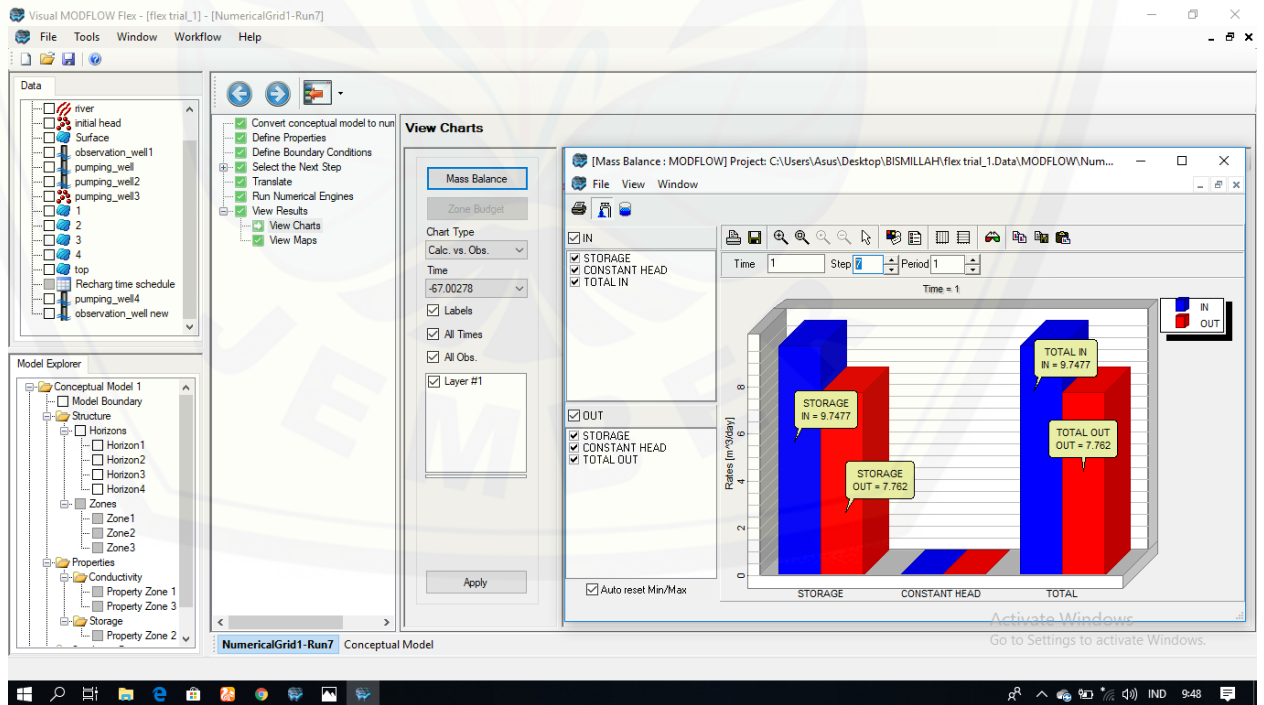
Lampiran A 9. Define Structure



Lampiran A 10. Penampang



Lampiran A 11. Run Model



Lampiran A 12. Mass Balance