

Analisis Dampak Pemompaan Terhadap Kondisi Muka Air Tanah Dengan *Finite Element Method*

Faizal Agung Riyadi

Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta
Jurusan Teknik Pertambangan, Fakultas Teknologi Mineral, UPN “Veteran” Yogyakarta,
Jl. SWK 104 (Lingkar Utara), Yogyakarta 55283 Indonesia
email: faizal.agung@upnyk.ac.id

ABSTRACT

Groundwater is part of natural resources and is an important and necessary element for the livelihood of many people. Management of the use of groundwater must pay attention to the sustainability of existing resources, to meet the people's need for water. In carrying out the management of groundwater resources, it is necessary to plan, implement, monitor, and evaluate the implementation of water resources conservation, utilization of groundwater resources, and control of the destructive power of water. In the framework of planning and implementing the utilization of groundwater resources, efforts to monitor and evaluate the management of water resources are required so that it can be carried out optimally. In addition, the impact caused by the utilization carried out can be minimized. In order to reduce the impact of groundwater utilization, it is necessary to conduct a study related to the impact of pumping towards groundwater level. Lowering and changing of the groundwater level can occur with certain patterns and distances. The decrease in the groundwater level occurs gradually forming a cone of depression with the location of the pumped well as the center of the cone. The area of the subsidence impact is correlated with the radius of influence of the decrease in the groundwater level and the extent of the drawdown in that radius. This research was conducted to model and evaluate the decrease in the groundwater table due to pumping, the radius of influence and cone of depression, as well as the potential for settlement due to pumping, as well as provide suggestions or recommendations for monitoring plans. Analysis of the groundwater conditions of groundwater was carried out using the transient groundwater finite element analysis (TGFEA) method using Rocscience: Slide software. Meanwhile, analysis of potential settlement (displacement) was carried out using the finite element method (FEM) using Rocscience: Phase 2 software. Keywords: cone of depression, drawdown, groundwater, pumping, radius of influence.

ABSTRAK

Air tanah merupakan bagian dari sumber daya alam dan merupakan unsur yang penting serta diperlukan untuk hajat hidup orang banyak. Pengelolaan terhadap pemanfaatan air tanah harus memperhatikan keberlangsungan sumberdaya yang ada, untuk memenuhi kebutuhan rakyat atas air. Dalam melaksanakan pengelolaan sumberdaya air tanah, perlu adanya upaya merencanakan, melaksanakan, memantau, dan mengevaluasi penyelenggaraan konservasi sumber daya air, pendayagunaan sumber daya air tanah, serta pengendalian daya rusak air. Dalam rangka perencanaan dan pelaksanaan pemanfaatan sumberdaya air tanah diperlukan suatu upaya pemantauan dan evaluasi pengelolaan sumber daya air supaya dapat terlaksana secara optimal. Selain itu, dampak yang ditimbulkan akibat pemanfaatan yang dilakukan dapat diminimalisir. Dalam rangka mengurangi dampak pemanfaatan air tanah perlu dilakukan kajian terkait dengan dampak pemompaan terhadap penurunan muka air tanah. Penurunan dan perubahan muka air tanah dapat terjadi dengan pola dan jarak tertentu. Penurunan muka air tanah terjadi secara bertahap membentuk suatu kerucut air tanah (*cone of depression*) dengan lokasi sumur yang dipompa sebagai pusat kerucut. Luas dampak penurunan berkorelasi dengan jarak radius pengaruh (*radius of influence*) penurunan muka air tanah serta seberapa besar penurunan muka air tanah (*drawdown*) pada radius tersebut. Penelitian ini dilakukan untuk memodelkan dan mengevaluasi penurunan muka air tanah akibat pemompaan, *radius of influence* dan *cone of depression*, serta potensi settlement akibat pemompaan, serta memberikan saran atau rekomendasi terhadap rencana pemantauan air tanah selama kegiatan pemompaan air tanah dilakukan. Analisis kondisi air tanah terhadap air tanah dilakukan dengan menggunakan metode *transient groundwater finite element analysis (TGFEA)* menggunakan perangkat lunak *Rocscience: Slide*. Sementara itu, analisis potensi settlement (*displacement*) dilakukan dengan *finite element method (FEM)* menggunakan perangkat lunak *Rocscience: Phase 2*.

Kata Kunci: air tanah, kerucut depresi, pemompaan, penurunan muka air tanah, radius pengaruh.

I. PENDAHULUAN

Air merupakan kebutuhan dasar hidup manusia yang menjadi bagian dari sumber daya air dan cabang produksi yang penting serta diperlukan untuk hajat hidup orang banyak. Sumberdaya air untuk dipergunakan untuk kemakmuran rakyat sesuai dengan amanat undang - undang. Dalam menghadapi ketidak seimbangan antara ketersediaan air yang cenderung menurun dan kebutuhan air yang semakin meningkat, sumber daya air perlu dikelola dengan memperhatikan fungsi sosial, lingkungan hidup, dan ekonomi secara selaras untuk mewujudkan sinergi dan keterpaduan antarwilayah, antarsektor, dan antargenerasi guna memenuhi kebutuhan rakyat atas air (Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 17 Tahun 2019).

Air tanah merupakan salah satu sumber daya air yang paling umum untuk dimanfaatkan karena mudah didapat, jumlahnya relatif besar, dan secara kualitas relatif lebih baik (Nace, 1976 dalam Volentino, 2013). Selain itu, sumberdaya air dapat berasal dari air hujan, air permukaan, desalinasi air laut, serta air hasil pengolahan air buangan. Dalam melakukan pemanfaatan air tanah, secara umum terdapat dua cara yang dapat dilakukan yaitu dengan sistem drainase (*flow to drain*) dan sistem sumuran (*flow to well*).

Pengelolaan sumber daya air adalah upaya merencanakan, melaksanakan, memantau, dan mengevaluasi penyelenggaraan konservasi sumber daya air, pendayagunaan sumber daya air, dan pengendalian daya rusak air. Pola pengelolaan sumber daya air adalah kerangka dasar dalam merencanakan, melaksanakan, memantau, dan mengevaluasi kegiatan konservasi sumber daya air, pendayagunaan sumber daya air, dan pengendalian daya rusak air. Rencana pengelolaan sumber daya air adalah hasil perencanaan secara menyeluruh dan terpadu yang diperlukan untuk menyelenggarakan pengelolaan sumber daya air Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 17 Tahun 2019.

Berdasarkan pada Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 6 Tahun 2023 dan Peraturan Pemerintah Pengganti Undang-Undang Nomor 2 Tahun 2022, Pasal 38 tahapan pengelolaan sumber daya air meliputi perencanaan pengelolaan sumber daya air; pelaksanaan konstruksi prasarana sumber daya air serta pelaksanaan nonkonstruksi maupun konstruksi sumber air; pelaksanaan operasi dan pemeliharaan sumber daya air; pemantauan dan evaluasi pengelolaan sumber daya air. Evaluasi pengelolaan sumber daya air dilakukan berdasarkan hasil pemantauan sumber daya air terhadap tujuan pengelolaan sumber daya air. Hasil evaluasi pengelolaan sumber daya air digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam melakukan perbaikan penyelenggaraan pengelolaan sumber daya air.

Pemantauan pengelolaan sumber daya air dilakukan terhadap proses perencanaan pengelolaan sumber daya air; pelaksanaan konstruksi prasarana sumber daya air dan pelaksanaan nonkonstruksi; serta pelaksanaan operasi dan pemeliharaan sumber daya air.

Akibat yang ditimbulkan oleh adanya eksploitasi yang berlebihan antara lain terjadinya penurunan muka air tanah, berkurangnya cadangan air tanah, perubahan arah aliran air tanah, penurunan daya dukung tanah, serta potensi kekeringan pada surnur-sumur penduduk disekitar pemompaan. intrusi air laut ke arah daratan dan lain-lain (Hendrayana, 1994 dalam Prawati dan Rolia, 2015). Penurunan dan perubahan muka air tanah dapat terjadi dengan pola tertentu. Daerah yang paling terdampak akibat pemompaan air tanah adalah daerah yang paling dekat dengan sumur berada karena terpengaruh langsung oleh pemompaan. Semakin jauh dari sumur, semakin sedikit efek pemompaan pada permukaan air tanah. Penurunan muka air tanah terjadi secara bertahap membentuk suatu kerucut air tanah (*cone of depression*) dengan lokasi sumur yang dipompa sebagai pusat kerucut. Pola penurunan muka air tanah ini biasa disebut sebagai kerucut penurunan muka air tanah (*cone of depression*) yang prosesnya berkaitan dengan oleh jarak radius pengaruh (*radius of influence*) penurunan muka air tanah serta seberapa besar penurunan muka air tanah (*drawdown*) pada radius pengaruh tersebut (Riyadi, 2013).

Secara fisik, pemompaan menyebabkan desaturasi pori-pori batuan karena penurunan muka air tanah. Hal ini menyebabkan pori-pori batuan yang awalnya jenuh terisi air menjadi kosong atau terisi udara. Desaturasi menyebabkan penurunan tekanan pori pada batuan yang secara mekanis berpengaruh terhadap kekuatan efektif material tanah atau batuan. Perubahan tersebut berpotensi menyebabkan resettlement dan penurunan permukaan tanah atau batuan apabila perubahan tekanan pori sangat besar dan kekuatan efektif material tanah atau batuan tidak mampu menahan pembebanan secara vertikal (Riyadi (2020); Supandi, dkk.(2018)).

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis perubahan muka air tanah akibat pemompaan, radius pengaruh (*radius of influence*) penurunan muka air tanah (*drawdown*), *cone of depression* sebagai manifestasi penurunan muka air tanah, serta potensi *settlement* akibat desaturasi yang disebabkan oleh penurunan muka air tanah oleh proses pemompaan air pada tiap sumur produksi. Penelitian dilakukan untuk memodelkan dan mengevaluasi penurunan muka air tanah akibat pemompaan, *radius of influence* dan *cone of depression*, serta potensi *settlement* akibat pemompaan, serta memberikan rekomendasi terhadap monitoring *cone of depression* dari hasil pemodelan dan analisis.

II. METODE

Pemodelan dan analisis pengaruh pemompaan terhadap air tanah dilakukan dengan menggunakan metode *transient groundwater finite element analysis (TGFEA)* berdasarkan dari data pemboran dan uji pemompaan pada suatu pemboran (**Gambar 1**) untuk memodelkan kondisi pemompaan secara transien untuk tahap waktu (*time stages*) tertentu. Stage waktu dalam analisis ini ditentukan dengan asumsi waktu kerja mingguan, bulanan, dan tahunan. Tahap waktu

yang ditentukan tercantum dalam **Tabel 1**. Sementara itu, analisis potensi settlement (*displacement*) dilakukan dengan metode *finite element (FEM)* dengan mengidentifikasi perubahan stress dan strain akibat perubahan kondisi hidrolik pada daerah penelitian. Perangkat lunak yang memiliki kemampuan untuk mengakomodasi metode analisis tersebut adalah dengan perangkat lunak *Rocscience: Slide dan Phase 2* (Rocscience, 2007, 2010).



Gambar 1. Gambaran kondisi spasial secara umum lokasi sumur sumur bor A-1 dan sekitarnya (*basemap: google earth*)

Dalam analisis material dianggap homogen dan akuifer berupa akuifer bebas (*unconfined*). Asumsi ini dibuat mengingat belum tersedianya model geologi yang detail pada daerah penelitian untuk memodelkan sistem akuifer konduktif, maupun sistem akuifer tertekan yang ada pada tiap lokasi. Kadar air maksimum ditentukan sebesar 25%, nilai ini diasumsikan untuk kondisi akuifer yang porositasnya < 25% pada batuan terkekarkan maupun batuan sedimen berbutir halus.

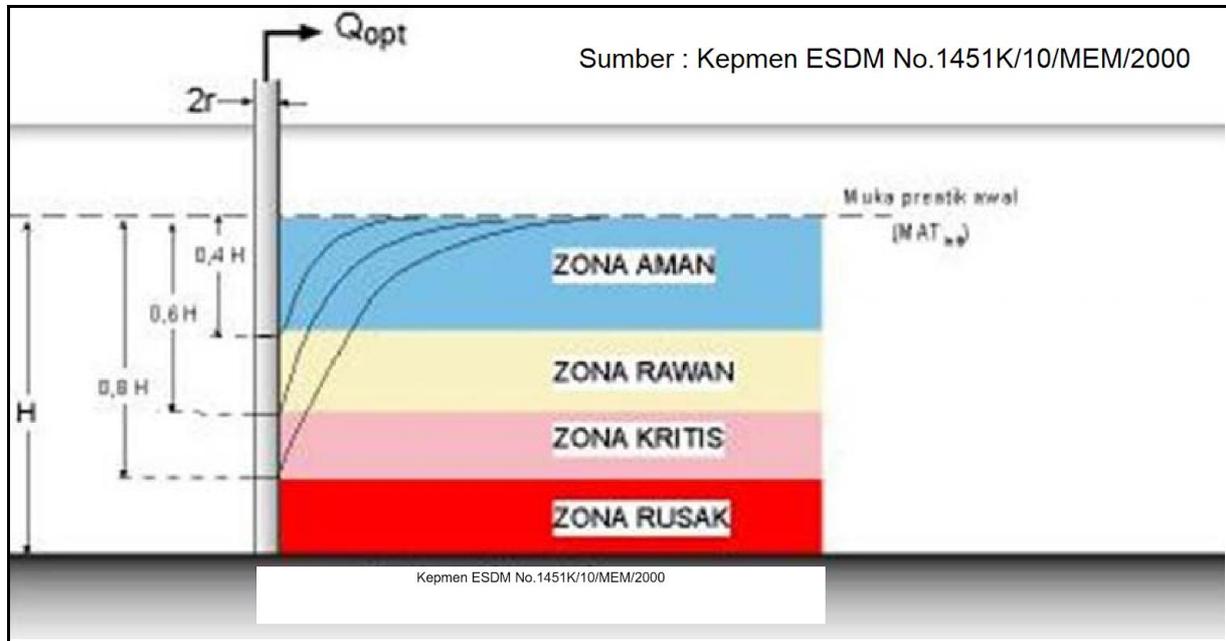
Dalam melakukan analisis radius pengaruh (*radius of influence*) penurunan muka air tanah akibat pemboran, perlu ditentukan radius perimeter yang didasarkan pada posisi spasial sumur bor serta infrastruktur yang berpotensi terdampak oleh penurunan muka air tanah. Jarak tersebut digunakan sebagai titik pengambilan data analisis (*query points*) yang diperlukan untuk membuat model korelasi kondisi muka air tanah dan tahap waktu (*time stages*) ketika perubahan terjadi. Selanjutnya dari model tersebut dapat ditarik

kesimpulan untuk membuat rekomendasi yang diperlukan dalam perencanaan pengelolaan pemanfaatan air tanah di daerah penelitian. Kriteria kondisi penurunan muka air tanah yang aman ditentukan berdasarkan pada Kepmen ESDM No.1451K/10/MEM/2000. Zona aman ditentukan sebesar 0,4 kali dari tinggi kolom air keseluruhan sebelum pemompaan dilakukan (**Gambar 2**).

Pada analisis ini, ekstraksi air tanah ke permukaan pada masing-masing bor disimulasikan melalui lubang sumur bor yang dilakukan pemompaan secara kontinu sepanjang tahap waktu yang ditentukan. Debit pemompaan yang digunakan untuk tiap sumur sebesar debit pemompaan optimum yang diperoleh dari hasil uji pemompaan terhadap sumur A-1. Dengan kriteria yang tercantum pada **Tabel 2** dan **Tabel 3**. Dengan demikian, analisis berikut sekaligus mensimulasikan debit pemompaan optimum (*Qopt.*) secara kontinu.

Tabel 1. Kriteria tahap waktu (*time stages*) dalam *transient groundwater finite element analysis (TGFEA)*

Stages	7	1/2	1	2	6	9	1	2	5	10
Days	Days	Month	Month	Months	Months	Months	Year	Years	Years	Years
Waktu (Hari)	7	15	30	60	180	270	360	720	1800	3600



Gambar 2. Kriteria zona keamanan penurunan muka air tanah berdasarkan pada Kepmen ESDM No.1451K/10/MEM/2000

Terdapat 2 perimeter utama untuk analisis sumur A-1 yaitu pada radius (R1) 1,5 km dan (R2) 4 km. Perimeter ditentukan berdasarkan jarak terhadap fasilitas umum atau pemukiman terdekat yaitu pada radius 1,5 km, dan daerah dengan infrastruktur mayor terdekat berada pada radius 4 km yaitu pada daerah dekat pantai (**Gambar 1**). Untuk keperluan pemodelan dan analisis, perimeter tambahan ditentukan pada jarak radius 0,5 km dan 1 km, sedangkan untuk daerah yang paling dekat dengan sumur bor ditentukan hingga jarak 25 m (**Gambar 3**). Analisis pengaruh pemompaan pada daerah sekitar sumur A-1 dilakukan pada kondisi dimana kegiatan

pemompaan dengan kriteria yang dicantumkan pada **Tabel 2** dan **Tabel 3**.

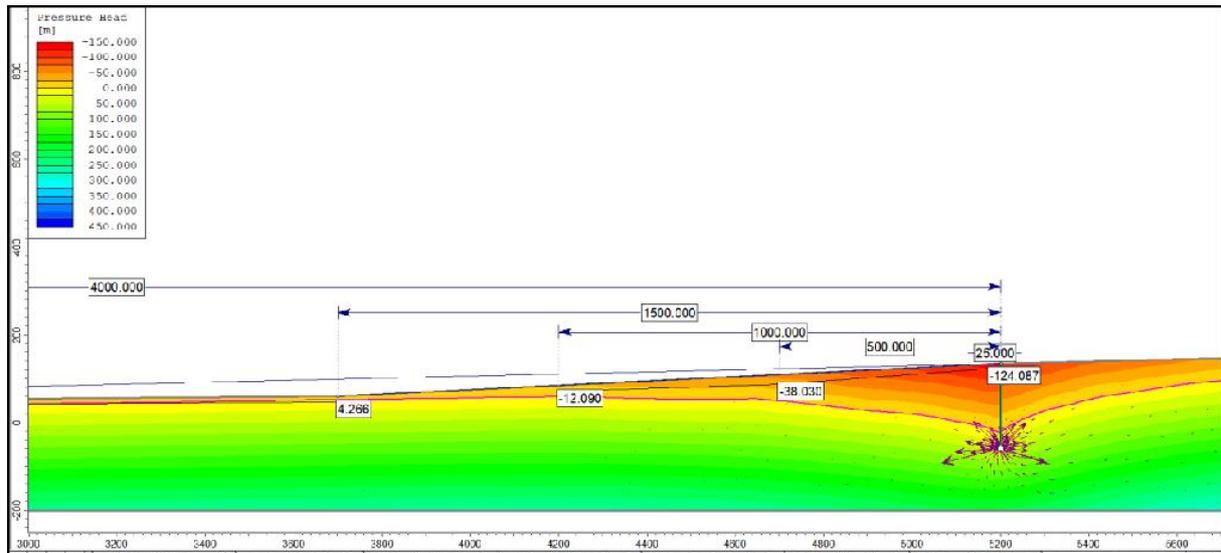
Jarak radius perimeter tersebut (Rx) diperlukan sebagai lokasi pengambilan data analisis (*query points*) yang diperlukan untuk membuat model korelasi pengaruh pemompaan terhadap penurunan air tanah. Kedudukan air tanah pada tiap jarak perimeter (Rx) diplot terhadap parameter waktu (*stages*) untuk memperoleh model perubahan muka air tanah (**Gambar 4**) dan penurunan muka air tanah (**Gambar 5**) akibat pemompaan pada sumur bor A-1.

Tabel 2. Ringkasan data uji pemompaan sumur A-1

Parameter	A1
Q opt (lt/s)	1,5
Opt. Pump. Drawdown (m)	51,8
Max. Pump. Water Level (m)	70,4
S W L (m)	12,11
Bottom of Aquifer (m)	188
High of SWL (H)	175,9

Tabel 3. Data hidrolik untuk analisis sumur B-1, E-1B, dan B-2

ID	X	Y	Elev. (m)	Depth (m)	Specific Capacity (Lt/sec/m)	Transmissivity (m ² /day)	k (m/s)	Swl	Aquifer
A-1	350065	9535595	147	200	0,035	0,974-1,47	5,66 x 10 ⁻⁷	12,11	Unconfined



Gambar 3. Penampang analisis sumur A-1 yang menunjukkan jarak radius dan pola *cone of depression* akibat pemompaan tertentu dari lokasi sumur bor

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada kajian ini, analisis dilakukan dengan mempertimbangkan lokasi sumur bor dan keterkaitan sumur bor satu dengan yang lainnya; jarak terhadap sarana prasarana di sekitar sumur; serta potensi gangguan yang dapat ditimbulkan oleh adanya pemompaan terhadap muka air tanah terhadap lokasi-lokasi tersebut. Penampang hasil analisis dan evaluasi terhadap pengaruh pemompaan, serta pembentukan *cone of depression* seiring dengan tahap waktu dapat dilihat pada **Lampiran A**.

Pengaruh Pemompaan Terhadap Muka Air Tanah

Setelah melakukan analisis menggunakan perangkat lunak, model korelasi dengan melakukan plotting nilai yang diperoleh pada tiap *query points* (**Gambar 4**). Dari analisis tersebut diperoleh (a) model korelasi antara *time stages* harian dan muka air tanah (*below ground level*). Demikian juga (b) model korelasi antara *time stages* harian dan penurunan muka air tanah (*drawdown*).

Penurunan muka air tanah secara signifikan terjadi setelah waktu 60 hari (2 Bulan) hingga 180 hari (6 bulan) hingga mencapai radius 2 km (R2000) dari Sumur E-1B. Setelah stage 180 Hari, penurunan MAT relatif terbatas hingga stage 10 tahun. Pada radius 3.1 km (R3100), muka air tanah relatif tetap tanpa perubahan hingga stage 10 tahun yang menandakan bahwa dampak pemompaan tidak berpengaruh pada jarak radius 3,1 km (R3100).

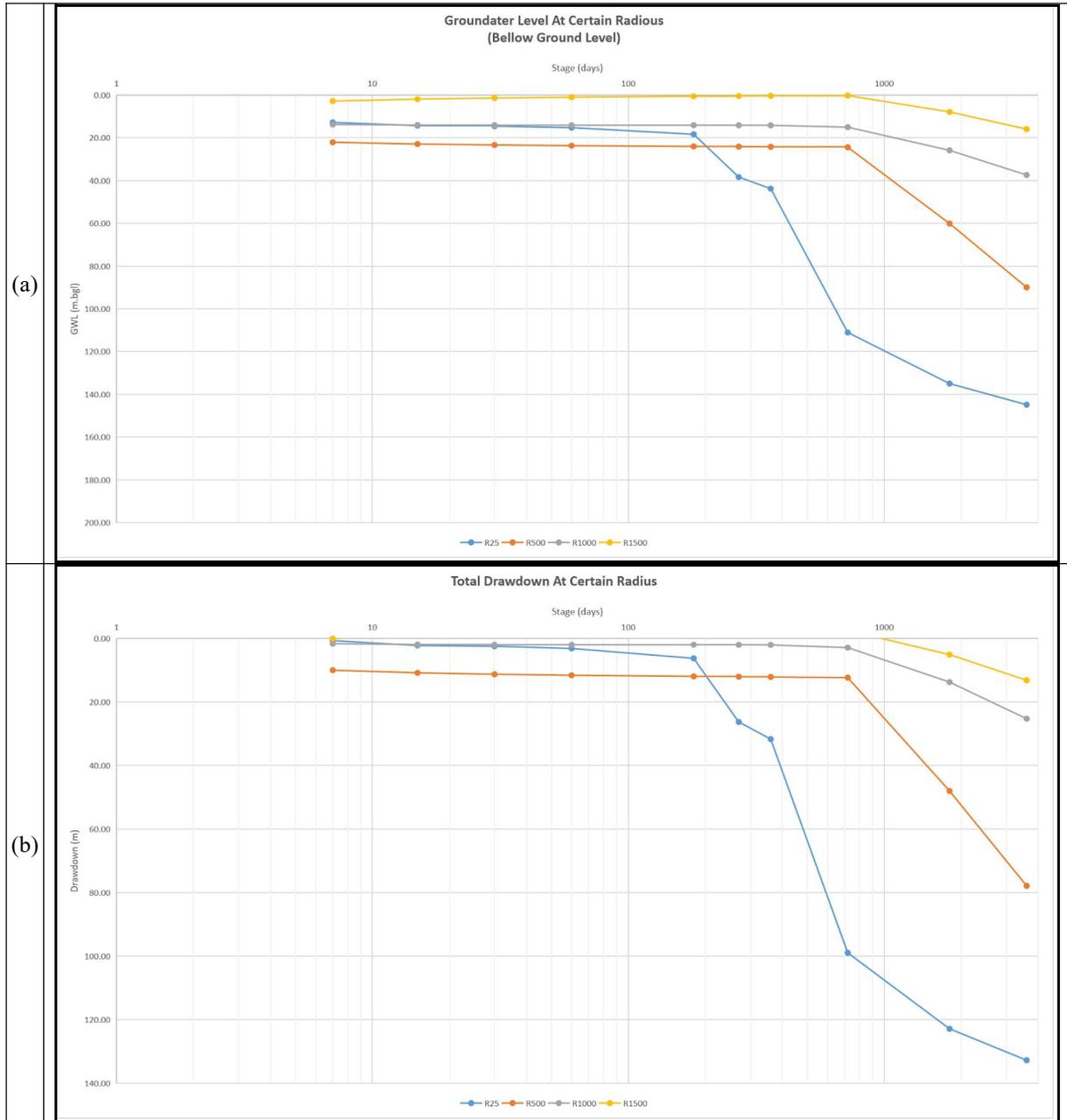
Muka air tanah pada radius jarak pengaruh 25 m (R25) menggambarkan kondisi muka air tanah pada daerah yang terdekat di sekitar sumur bor. Berdasarkan pada model di atas, ketika dilakukan pemompaan dengan debit 1,5 lt/detik secara terus menerus, terjadi penurunan muka air tanah dalam waktu < 30 hari. Untuk jarak radius pengaruh 25 m, model penurunan muka air tanah pada daerah sekitar A1 menunjukkan perubahan pola *drawdown* yang signifikan setelah waktu 180 hari (**Gambar 5**). Pada waktu ini, evaluasi kinerja sumur dan penyelidikan faktual radius pengaruh penurunan muka air tanah setidaknya dilakukan, meskipun demikian dianjurkan untuk melakukan pengamatan sejak awal pemompaan.

Untuk jarak radius pengaruh yang lebih jauh 0,5 km dan 1 km (R500 dan R1000) perubahan muka air tanah yang signifikan mulai terjadi pada waktu 720 hari (2 tahun). Sementara itu penurunan muka air tanah pada jarak radius pengaruh 1,5 km (R1500) terjadi setelah sekitar 1000 hari (2,7 Tahun). Berdasarkan kriteria zona aman pemompaan Kepmen ESDM No.1451K/10/MEM/2000 pada daerah lokasi sumur A-1 dan sekitarnya; untuk pemompaan optimal dengan debit 1,5 liter/detik *drawdown* harus dijaga tidak melebihi *drawdown* maksimum sebesar 58.2 m (yaitu pada 70.4 m.bgl) pada radius pengaruh 25 m (R25).

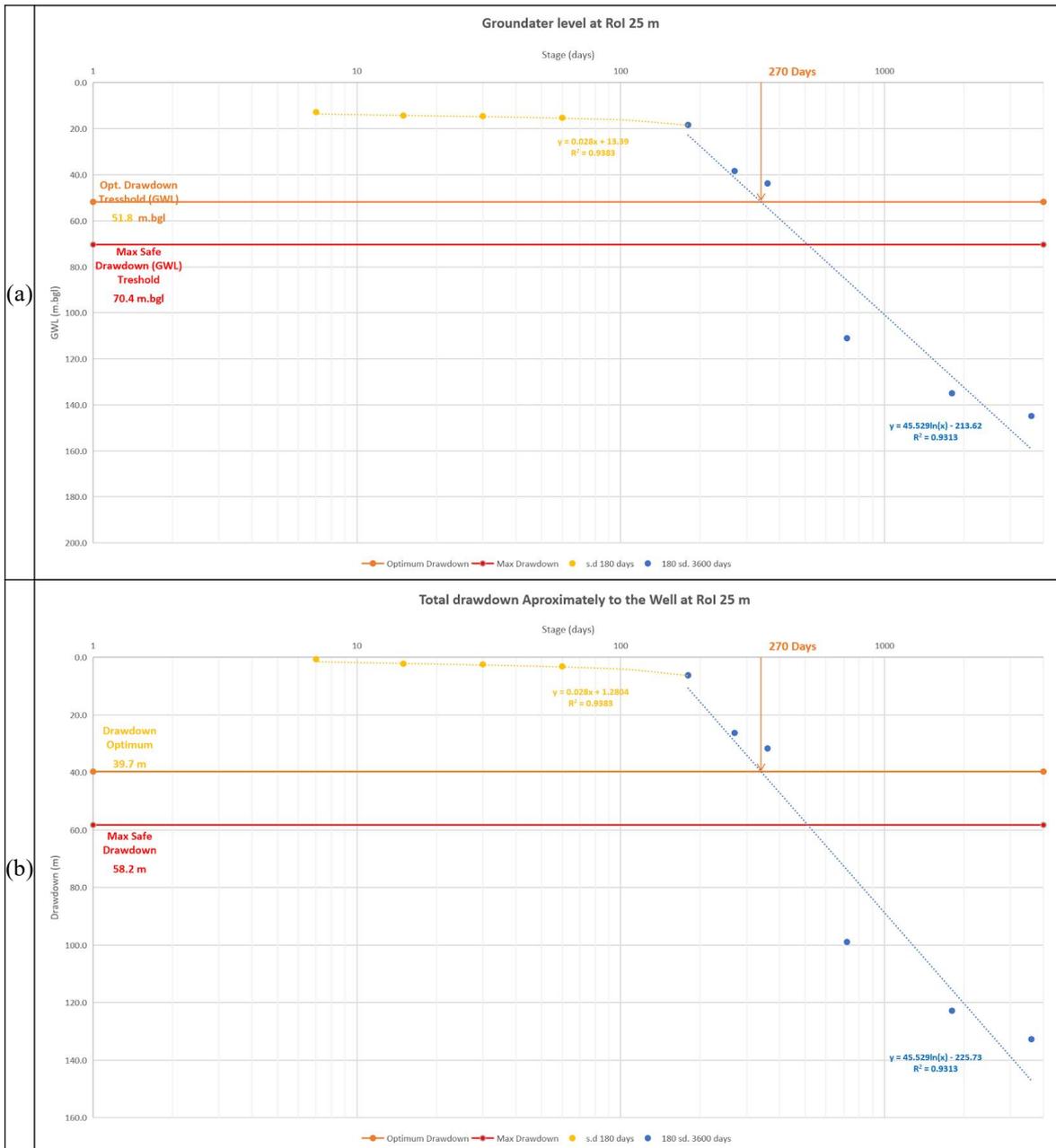
Berdasarkan pada model di atas ambang batas penurunan muka air tanah optimum (*optimum pumping drawdown*) yang direkomendasikan sebesar 39,7 m, (muka air tanah 51.8 m.bgl) telah tercapai pada waktu sekitar 270 hari. Untuk itu, evaluasi

kinerja sumur dan penyelidikan faktual radius pengaruh penurunan muka air tanah sudah harus dilakukan sehingga langkah perbaikan dapat dilakukan sebelum batas aman penurunan muka air tanah sebesar 58.29 m (muka air tanah 70.4 m.bgl)

terlampau. Titik pemantauan air tanah dapat dilakukan mengikuti kriteria radius pengaruh dalam ringkasan ini (R25, R500, R1000, dan R1500), khususnya pada arah infrastruktur terdekat.



Gambar 4. Model korelasi (a) perubahan muka air tanah (b) penurunan muka air tanah (drawdown) daerah lokasi sumur A-1 dan sekitarnya untuk tiap radius pengaruh



Gambar 5. Model korelasi (a) perubahan muka air tanah dan (b) penurunan muka air tanah (drawdown) pada jarak radius pengaruh 25 m pada daerah sekitar sumur A-1

Potensi Settlement Akibat Pemompaan

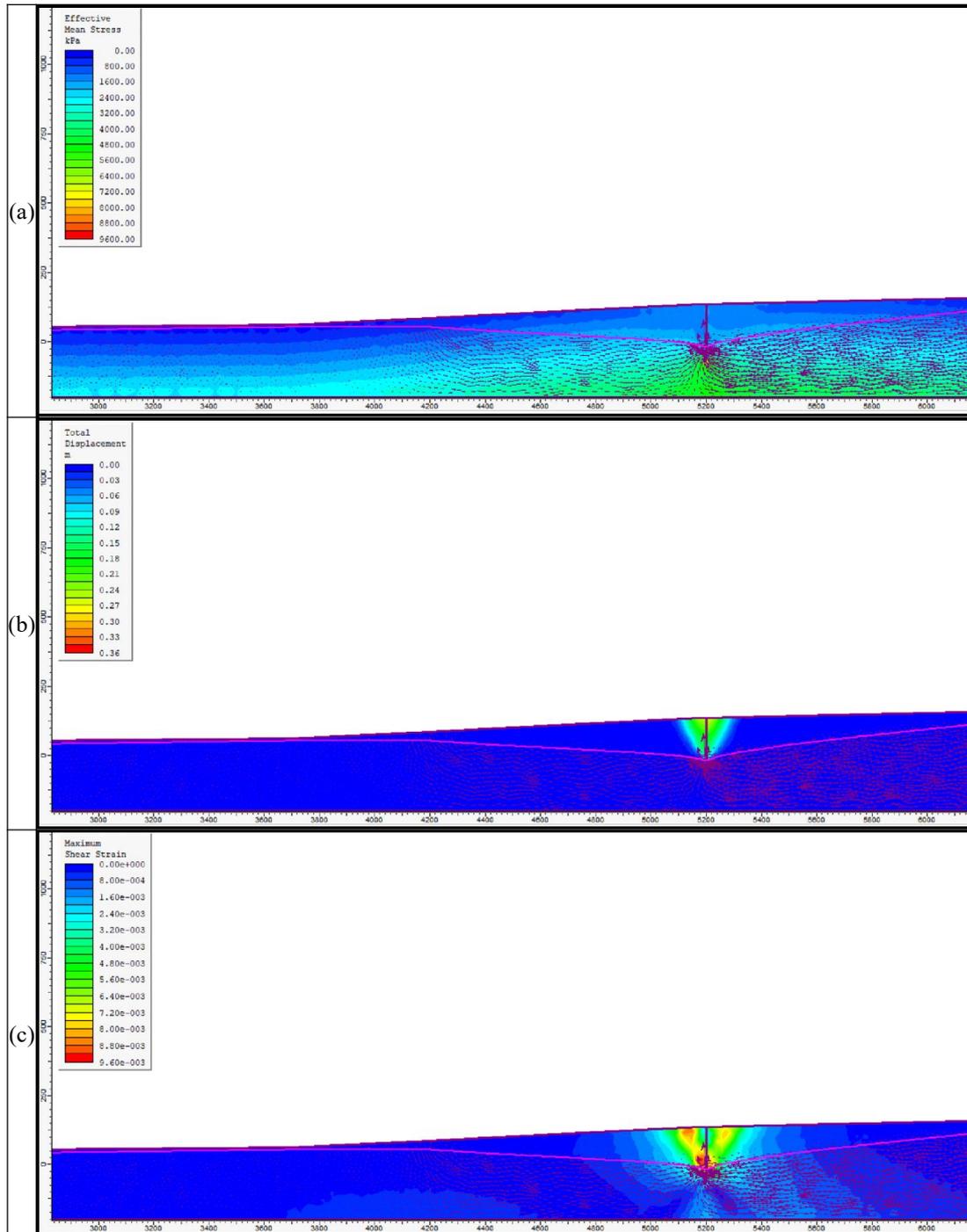
Analisis potensi *settlement* dilakukan dengan mempertimbangkan kondisi perubahan parameter-parameter hidrogeologi, yaitu air tanah yang mengalami penurunan (*drawdown*) yang meninggalkan rongga kosong di dalam batuan, melibatkan proses desaturasi dan depresurasi pori. Hal ini dapat berdampak terhadap kekuatan dan *stress* pada material akibat perubahan tekanan pori. Perubahan kekuatan dan distribusi *stress* material dapat menyebabkan ketidaksetimbangan yang

memicu adanya pergerakan (*displacement*) sebagai respon atas penurunan tekanan pori.

Analisis potensi *settlement* yang dilakukan mempertimbangkan penurunan muka air tanah akibat pemompaan pada sumur A-1 serta pengaruh penurunan muka air tanah terhadap desaturasi dan depresurasi (**Gambar 6**). Potensi *settlement* disebabkan oleh perubahan tekanan pori yang akibat proses *drawdown*. Perubahan distribusi *stress* yang sifatnya terbatas terjadi di sekitar sumur bor seiring dengan penurunan muka air tanah (a). Karena adanya

perubahan kekuatan material dan redistribusi stress menyebabkan adanya potensi deformasi yang terbatas di sekitar lubang bor. Hal ini ditunjukkan dengan total displacement (b) yang terjadi disekitar lubang bor hingga jarak 80 m, namun potensinya kecil yaitu <math><0.24\text{ m}</math>, demikian juga dengan nilai strain akibat

deformasi (c) yang nilainya <math><0,0088</math> atau sebesar <math><0,88\%</math>. Hal ini wajar mengingat material pada daerah tersebut adalah berupa batuan beku yang memiliki kekuatan relatif baik dan materialnya yang cenderung stabil terhadap perubahan tekanan pori di bawah permukaan.



Gambar 6. Hasil analisis potensi *settlement* untuk daerah lokasi sumur A1 dan sekitarnya

IV. KESIMPULAN

Hasil analisis dan pemodelan terhadap kondisi air tanah menunjukkan adanya pembentukan kerucut penurunan air tanah (*cone of depression*) dengan radius pengaruh (*radius of influence*) tertentu akibat

kegiatan pemompaan pada tiap lubang bor A-1. Kegiatan pemompaan menyebabkan penurunan muka air tanah dengan intensitas yang beragam seiring dengan tahap waktu. Semakin lama pemompaan dilakukan, semakin luas (radius) pengaruhnya;

demikian juga semakin besar penurunan muka air tanah (*drawdown*) yang terjadi pada lokasi (radius) yang sama. Tiap jarak tertentu dari lubang bor yang terdampak, yang merupakan radius pengaruh (*radius of influence*) akan mengalami penurunan muka air tanah yang semakin besar, seiring waktu pemompaan berjalan, sehingga muka air tanah akan semakin turun. Hal ini ditunjukkan dengan *cone of depression* yang semakin lebar dan semakin dalam. Oleh karena itu, dalam melakukan kegiatan pemompaan diperlukan upaya kontrol dan pengawasan, serta evaluasi terhadap kondisi real pemompaan produksi, sehingga kegiatan pemompaan yang dilakukan tidak melampaui batas aman yang telah ditentukan.

Berdasarkan hasil pemodelan dan analisis, pada daerah sekitar sumur A-1, monitoring dan evaluasi selambat-lambatnya dapat dimulai sekitar 180 hari sejak pemompaan mulai dilakukan. Evaluasi dan perbaikan terhadap kelebihan pemompaan (*overdraft*) air sudah harus dilaksanakan sebelum dilaksanakan sebelum 270 hari.

Penurunan muka air tanah yang terjadi akibat kegiatan pemompaan menyebabkan terjadinya perubahan kondisi hidrolis yaitu desaturasi pada pori yang menyebabkan terjadinya potensi *settlement* yang ada di sekitar lubang pemboran, meskipun demikian, potensi yang ada sangat kecil yaitu *displacement* sebesar <0.24 m, dan *strain* sebesar $<0,88\%$. Untuk itu, rekomendasi terkait hal ini adalah dengan melakukan monitoring dan evaluasi, serta melakukan langkah-langkah yang diperlukan untuk mencegah *overdraft* pemompaan. Hal ini diperlukan untuk meminimalisir luas sebaran *cone of depression* dan meminimalisir dampak pemompaan produksi.

Dalam kajian ini terdapat asumsi dalam melakukan analisis, misalnya heterogenitas batuan yang dalam analisis ini secara umum dianggap sebagai material yang homogen. Model geologi detail baik itu tentang stratigrafi, maupun distribusi dan orientasi bidang diskontinuitas perlu disusun dengan baik. Hal ini diperlukan untuk meningkatkan validitas dan reliabilitas dari analisis serta pemodelan yang telah dilakukan dalam kajian ini di kemudian hari.

Ketika kegiatan pemompaan mulai dilakukan, sistem monitoring dan pengelolaan data hidrogeologi perlu dijalankan untuk mendokumentasikan perubahan-perubahan kondisi hidrologi dan hidrogeologi dengan baik sejak dini. Monitoring perlu dilakukan secara berkala baik itu periode harian, mingguan, maupun bulanan, sesuai dengan produktivitas pemompaan dan potensi gangguan yang dapat timbul dari aktivitas pemboran terhadap air tanah dengan memastikan tidak terjadinya *overdraft* pemompaan.

V. UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih disampaikan kepada PT. AB Omah Geo, atas dukungannya sehingga penelitian ini dapat terlaksana.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- Cahyadi, T. A. (2018). Pengembangan model Optimasi Desain Lubang Penyaliran Horizontal Tambang. Studi Kasus Tambang terbuka Grassberg PT. Freeport Indonesia. Disertasi, Institut Teknologi Bandung, Program Studi Doktor Rekayasa Pertambangan, Bandung.
- Cahyadi, T. A., Widodo, L. E., Syihab, Z., Notosiswoyo, S., & Widijanto, E. (2017). Hydraulic Conductivity Modeling of Fractured Rock at Grasberg Surface Mine, Papua-Indonesia. *J. Eng. Technol. Sci.*, Vol. 49, No. 1, p. 37 - 56.
- Craig, R. F. (2004). *Craig's Soil Mechanics* (Seventh Edition ed.). Spon Press.
- DNRM. (2015). Department of Natural Resources and Mines. Dipetik September 28, 2018, dari DNRM: http://www.dnrm.qld.gov.au/_data/assets/pdf_file/0015/212424/guideline-watercourse-diversions.pdf
- Erskine, W. (1992). Channel Response to Large-scale Ricer Training Works: Hunter River, Australia. *Regulation Rivers Resource Mining*, 7, p. 261–278.
- Flatley, A., Rutherford, I. D., & Hardie, R. (2018). River Channel Relocation: Problems and Prospects. *Water*, 10, p. 1360.
- Fredlund, D., & Xing, A. (1994). Equations for The Soil-Water Characteristic Curve. *Can. Geotechn. J.*, 31, p. 521-532.
- Greensmith, J. T., & Tucker, E. V. (1986). Compaction and Consolidation. Dalam O. v. Plassche, *Sea-Level Research* (O. Plassche ed., hal. 591 - 592).
- Hsu, S.-M., Lo, H.-C., Chi, S.-Y., & Ku, C.-Y. (2011). Rock Mass Hydraulic Conductivity Estimated by Two Empirical Model. Dalam O. Dikinya (Penyunt.), *Developments in Hydraulic Conductivity Research* (hal. 133 -158). InTech.
- Iskandar, I., & Koike, A. (2011). Distinguishing Potential Sources of Arsenic Released to Groundwater Around a Fault zone Containing a Minesite. *Environmental Earth Science*, 63, p. 595 - 608.
- Leong, E. C., & Rahardjo, H. (1997). Permeability Function For Unsaturated Soil. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 123(12), p. 1118-1126. 79–85). Sevilla, Spain: IMWA Congress.
- Mulyanti, W. R., Yuliadi, & Maryanto. (2017). Analisa Teknis dan Ekonomis Strategi Short Distance Disposal West Block (Anoa South) Studi Kasus oleh Section Short Term Planning, Departemen Mines And Exploration Di PT Vale Indonesia, Tbk. Kecamatan Nuha, Kabupaten

- Luwu Timur. Prosiding Teknik Pertambangan. Vol. 1, No. 1, hal. 1-8. Bandung: UNISBA.
- Prawati, E., Rolia, E. (2015). Pengaruh Pemompaan Sumur Bor Terhadap Perubahan Muka Air Tanah. Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil (SeNaTS) 1, Sanur, Bali, 2015. Page HIDRO 1-7. Udayana University Press, Bali. ISBN: 978.602.294.052.4. <https://repository.ummetro.ac.id/files/artikel/3553.pdf>
- Riyadi, F. A. (2013). Geologi Dan Kajian Kestabilan Lereng Dengan Kontrol Muka Air Tanah Pada Lereng High Wall Pit Batulaki Utara, Kecamatan Satui, Kabupaten Tanah Bumbu, Provinsi Kalimantan Selatan. Studi Kasus Upaya Stabilisasi Lereng Dengan Pelandaian Lereng Dan Dewatering. Skripsi, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta, Program Studi Teknik Geologi, Yogyakarta.
- Riyadi, F. A., Cahyadi, T. A., Nurkhamim, & Supandi. (2019). Desain Saluran Terbuka Berbasis Microsoft Excel. Perhitungan dan Pemodelan yang Praktis dan Efisien. KURVATEK, h. 61-78.
- Riyadi, F. A., Cahyadi, T. A., Nurkhamim, & Supandi. (2019). Model Fungsi Konduktifitas Hidrolik Terhadap Resistivitas Timbunan Disposal dan Material Insitu. PIT PAI. Bandung: PAAI.
- Riyadi, F. A. (2020). Studi Hidrogeologi Untuk Penanggulangan Aliran Air Di Dalam Material Penyusun Alas Saluran. Thesis, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta
- Rocscience. (2007). Phase2 v8 Tutorials Manual. Rocscience.
- Rocscience. (2010). Slide 6.0 Tutorials Manual. Rocscience.
- Shao, X., & Wang, H. (2003). Interbasin transfer projects and their implications : A China case study. Intl. J. River Basin Management, 1, No. 1, p. 5-14.
- Supandi. (2013). Pemodelan Parameter Geoteknik dalam Merespon Perubahan Desain Tambang Batubara Dengan Sistem Tambang Terbuka. ReTTI, (hal. h. T1-T5). Yogyakarta.
- Supandi, S., Riyadi, F. A., & Purnomo, S. (2016). Study Geolistrik Untuk Mengidentifikasi Kedudukan Lumpur dan Air Dalam Rangka Optimalisasi Timbunan Lowwall. ReTTI, p. 352-356.
- Supandi, S., Zakaria, Z., Sukiyah, E., & Sudrajat, A. (2019). The Influence of Kaolinite- Illite Toward Mechanical Properties of Claystone. Open Geosci., 11, p. 440-446.
- Supandi, Zakaria, Z., Sukiyah, E., & Sudradjat, A. (2018, December). The Correlation Of Exposure Time And Claystone Properties At The Warukin Formation Indonesia. International Journal of GEOMATE, 15(52), p. 160-167.
- _____. (2019) Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 17 Tahun 2019 Tentang Sumber Daya Air.
- _____. (2000). Kep. Men. ESDM No: 1451 K/10/Mem/2000 Tentang Pedoman Teknis Penyelenggaraan Tugas Pemerintahan Di Bidang Pengelolaan Air Bawah Tanah
- _____. (2022). Peraturan Pemerintah Pengganti Undang-Undang Nomor 2 Tahun 2022 Tentang Cipta Kerja
- _____. (2023) Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 6 Tahun 2023 Tentang Penetapan Peraturan Pemerintah Pengganti Undang-Undang Nomor 2 Tahun 2022 Tentang Cipta Kerja Menjadi Undang-Undang.

VII. LAMPIRAN

Lampiran A - Penampang Analisis Transient Groundwater Finite Element Sumur A-1

<https://drive.google.com/drive/folders/1NecWE7kYNPcUTTeldJPqRgqKbcPAXtpW?usp=sharing>

Link To Pore Pressure Analysis Results Section

<https://drive.google.com/drive/folders/1wEFw7MK-T5ESojCdH2CAQNWArnUdwCph?usp=sharing>

Link To Pressure Head Analysis Results Section

<https://drive.google.com/drive/folders/1vD701PzXaWq0rX2wLEKLhyF17o0FGFwF?usp=sharing>

Link To Total Head Analysis Results Section

<https://drive.google.com/drive/folders/1YhHpZj9vgv7iIASBOcP5FTLAzq9u0-gh?usp=sharing>

Link To Volumetric Water Content Analysis Results Section

https://drive.google.com/drive/folders/1ADuS_6scYT Kfjh0infyYTrGvauodn150?usp=sharing