



FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG



Orasi ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung



LEBIH DEKAT DENGAN HIDROGEOLOGI REKAYASA

Prof. Lilik Eko Widodo

**Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan
Institut Teknologi Bandung**

**Aula Barat ITB
19 Agustus 2023**

Orasi ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

**LEBIH DEKAT
DENGAN HIDROGEOLOGI REKAYASA**

Orasi ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

LEBIH DEKAT DENGAN HIDROGEOLOGI REKAYASA

Prof. Lilik Eko Widodo

Tanggal 19 Agustus 2023
Aula Barat ITB



Hak cipta © pada penulis dan dilindungi Undang-Undang

Hak penerbitan pada ITB Press

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh bagian dari buku ini tanpa izin dari penerbit

Orasi ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung:

LEBIH DEKAT DENGAN HIDROGEOLOGI REKAYASA

Penulis : Prof. Lilik Eko Widodo

Reviewer : Prof. Komang Anggayana

Editor Bahasa : Rina Lestari

Cetakan I : 2023

ISBN : 978-623-297-320-6

ITB PRESS

📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

PRAKATA

Berkat rahmat Allah Subhanahu wa ta'ala, naskah Orasi Ilmiah ini dapat diselesaikan dengan baik. Buku ini berisi rekam jejak keilmuan penulis tentang karya-karya yang telah, sedang, serta akan dikerjakan menyangkut pengembangannya. Naskah Orasi Ilmiah ini diberi judul “**Lebih Dekat dengan Hidrogeologi Rekayasa**”.

Naskah Orasi Ilmiah ini diawali dengan pengenalan Hidrogeologi Rekayasa, menyangkut definisi, terminologi, serta ruang lingkupnya, selanjutnya menyusul penjelasan singkat tentang perencanaan dan desain rekayasa pada sistem airtanah, yaitu fokus utama Hidrogeologi Rekayasa, dan diakhiri dengan pengembangan Hidrogeologi Rekayasa.

Pada kesempatan ini saya menyampaikan terima kasih kepada Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung atas kesempatan yang diberikan untuk mempresentasikan naskah ini pada Sidang Terbuka Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung pada tanggal 19 Agustus 2023 di Aula Barat ITB. Mohon maaf atas segala kekurangan dalam penyusunan, penulisan, serta penyampaian buku ini. Semoga buku ini bermanfaat bagi masyarakat pada umumnya, komunitas Hidrogeologi serta rekayasawan kebumian pada khususnya.

Salam,

Lilik Eko Widodo

SINOPSIS

Hidrogeologi untuk Rekayasa atau Hidrogeologi Rekayasa adalah keilmuan dan keahlian yang menerapkan prinsip dan kerangka kerja rekayasa pada konteks airtanah atau lingkungan Hidrogeologi. Hidrogeologi Rekayasa menawarkan infrastruktur pengetahuan dan ketrampilan pada penyelesaian permasalahan dengan cara rekayasa (*problem solving*) akibat aspek negatif airtanah dalam Rekayasa Kebumihan atau Rekayasa Airtanah serta kegiatan manusia lainnya.

Pada Hidrogeologi Rekayasa, airtanah dipandang sebagai sistem alamiah sekaligus sistem rekayasa di mana pengelolaan, pengaturan kegiatan yang sistematis dan terukur, melalui perencanaan (*planning*) dan desain atau perancangan (*design*) serta implementasinya yang berulang dan berkelanjutan. Proses desain rekayasa sering digambarkan sebagai urutan pengambilan keputusan di antara beberapa alternatif desain rekayasa dalam kondisi ketidakpastian. Risiko kegagalan sistem airtanah dan sistem rekayasa umumnya diakibatkan oleh adanya ketidakpastian pada parameter-parameter sistem alamiah dan sistem rekayasa, yang dievaluasi secara teknis, lingkungan, ekonomi, hukum, sosial, dan politik.

Dengan infrastruktur keilmuan dan keahlian Hidrogeologi Rekayasa yang semakin mapan, dimungkinkan melakukan pengembangan keilmuan inti yang unggul relatif terhadap bidang lain, pengembangan tekno-ekonomi dengan titik berat pada risiko yang makin tinggi akibat ketidakpastian sumber daya bumi dan *volatility* perekonomian. Hidrogeologi Rekayasa terus berkembang mengantisipasi ciri-ciri permasalahan sistem airtanah atau geofluida lainnya di masa depan yang menuntut dilakukannya solusi masalah rekayasa melalui kerja sama dengan bidang lain, sebagai bentuk kontribusi Hidrogeologi Rekayasa.

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	V
SINOPSIS	VI
DAFTAR ISI	VII
DAFTAR GAMBAR.....	VIII
DAFTAR TABEL	VIII
1 PENGANTAR HIDROGEOLOGI REKAYASA	1
1.1 Definisi atau Terminologi Hidrogeologi Rekayasa.....	1
1.2 Ruang Lingkup Hidrogeologi Rekayasa.....	1
2 PERENCANAAN, DESAIN SISTEM AIRTANAH, DAN IMPLEMENTASI	4
2.1 Siklus Perencanaan, Desain, dan Implementasi.....	4
2.2 Identifikasi Masalah dan Formulasi Masalah	6
2.3 Airtanah Sebagai Sistem Alamiah dan Sistem Rekayasa	9
2.4 Kontrol, Perencanaan, dan Desain Sistem Airtanah	25
2.5 Analisis Ketidakpastian pada Sistem Rekayasa Airtanah	33
3 PENUTUP DAN PENGEMBANGAN.....	42
DAFTAR RUJUKAN	45
UCAPAN TERIMA KASIH	51
CURRICULUM VITAE	53

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Siklus Perencanaan, Desain, dan Implementasi [1].	5
Gambar 2	Skema Model <i>Trade-off</i> [1].	6
Gambar 3	Kerangka Kerja Desain Rekayasa Sistem Airtanah [2].	8
Gambar 4	Hierarki Sistem Krisis Airtanah di CAT Bandung.	13
Gambar 5	Model <i>Trade-off</i> [1] Krisis Airtanah di CAT Bandung.	14
Gambar 6	Penerapan <i>Multiple Need Statements</i> Berdasar Model <i>Trade-off</i> [1], pada Krisis Airtanah di CAT Bandung.	16
Gambar 7	Model Konseptual Lereng Tunggal Batugamping	27
Gambar 8	Lokasi <i>Drain Hole</i> dan Sumur Pantau (<i>Piezometer</i>).	33
Gambar 9	Klasifikasi Lumpur	34
Gambar 10	Skema Inferensi Fuzzy dengan FLO	37
Gambar 11	Distribusi Status <i>Drawpoint</i>	40
Gambar 12	Distribusi Spasial Perkiraan Jumlah Lumpur dalam <i>Drawbell</i>	41

DAFTAR TABEL

Tabel 1	Parameter Model Konseptual Lereng Tunggal [50]	28
---------	--	----

1 PENGANTAR HIDROGEOLOGI REKAYASA

1.1 Definisi atau Terminologi Hidrogeologi Rekayasa

Hidrogeologi untuk Rekayasa dan selanjutnya disebut dengan Hidrogeologi Rekayasa atau *Engineering Hydrogeology* dapat dipandang sebagai implementasi konsep, kaidah, prinsip, prosedur, dan kerangka kerja rekayasa pada konteks airtanah/ geofluida/ lingkungan Hidrogeologi. Hidrogeologi Rekayasa sudah lama menjadi bagian dalam Hidrogeologi, misal dalam kaitannya dengan Rekayasa Kebumihan (Rekayasa Pertambangan, Rekayasa Sipil, dan Rekayasa Perminyakan), serta masalah terkait dengan airtanah lainnya. Rekayasa Airtanah atau *Groundwater Engineering* dipandang sebagai keilmuan atau keahlian yang paling dekat dengan Hidrogeologi Rekayasa, namun dengan penelaahan yang lebih dalam, Rekayasa Airtanah disimpulkan hanya merupakan bagian, atau lebih tepatnya komponen utama di dalam Hidrogeologi Rekayasa, yang berfokus melakukan kegiatan rekayasa pada airtanah sebagai sistem alamiah dan sekaligus sistem rekayasa. Walaupun Hidrogeologi Rekayasa dapat digolongkan sebagai bagian dari Geologi Rekayasa, namun bila definisi Hidrogeologi dapat diperluas sebagai Geologi yang terkait dengan hidro atau geofluida, maka Hidrogeologi Rekayasa dapat dipandang sebagai keilmuan atau keahlian yang merupakan salah satu inti penting di dalam Geologi Rekayasa.

1.2 Ruang Lingkup Hidrogeologi Rekayasa

Hidrogeologi Rekayasa merupakan keilmuan atau keahlian yang merupakan bagian dari keilmuan atau keahlian Hidrogeologi, yang menerapkan konsep rekayasa ke dalam konteks sistem airtanah atau lingkungan Hidrogeologi. Hidrogeologi adalah keilmuan atau keahlian yang mempelajari airtanah, atau dapat diperluas dengan fluida dalam batuan (geofluida), terkait dengan sifat-sifatnya, di antaranya adalah sifat fisik atau sifat mekanik atau sifat hidrolis, sifat kimia dan sifat termal. Karena Hidrogeologi mempelajari geofluida atau fluida dalam batuan, maka batuan sebagai media aliran fluida, merupakan bagian utama dari Hidrogeologi, di samping fluida yang ada di dalam batuan itu sendiri. Keduanya berinteraksi membentuk perilaku yang khas.

Konsep Rekayasa secara umum adalah prinsip, kaidah, prosedur, elemen serta kerangka kerjanya yang sudah dipahami secara luas, terutama oleh rekayasawan secara umum. Keilmuan atau keahlian yang bercirikan rekayasa pada umumnya menerapkan pengetahuan dan matematika pada materi dan energi, yang merupakan sumber daya utama melalui pengelolaan yang efektif oleh rekayasawan untuk memenuhi kebutuhan, melengkapi kekurangan (*needs*), menyelesaikan masalah bagi kemaslahatan umat manusia atau komunitas. Oleh karena itu keilmuan atau keahlian Rekayasa merupakan aplikasi yang bertumpu kepada keilmuan matematika, fisika, kimia, biologi, dan keilmuan lainnya yang melibatkan materi dan energi.

Pada Hidrogeologi Rekayasa, sistem airtanah dipandang sebagai sistem alamiah (*natural system*) sekaligus sebagai sistem rekayasa (*engineering system*) yang merupakan fokus atau objek di mana pengelolaan, pengaturan, dan intervensi rekayasawan dilakukan melalui kegiatan yang sistematis dan terukur, yaitu perencanaan (*planning*) dan desain atau perancangan (*design*) serta implementasinya yang bersifat siklus, karena adanya kemungkinan perbaikan berkelanjutan (*continous improvement*) atas usulan solusi rekayasa sebelumnya. Proses desain rekayasa sering digambarkan sebagai urutan pengambilan keputusan di antara beberapa alternatif desain rekayasa dalam kondisi ketidakpastian. Oleh karena itu keilmuan dan keahlian bercirikan rekayasa membutuhkan pengetahuan tentang proses pengambilan keputusan (*decision making*). Risiko kegagalan sistem yang direkayasa umumnya diakibatkan oleh adanya ketidakpastian pada parameter-parameter sistem alamiah dan sistem rekayasa, yang dievaluasi dalam lingkup teknis, lingkungan, ekonomi, hukum, sosial, dan politik.

Ruang lingkup keilmuan atau keahlian Hidrogeologi Rekayasa dapat disusun terdiri atas ruang lingkup Hidrogeologi dan Rekayasa sebagai kedua pilar utamanya. Seorang rekayasawan bidang Hidrogeologi Rekayasa bertugas menyelesaikan masalah (*problem solving*) yang terjadi akibat adanya 'gangguan' atau aspek negatif airtanah akibat kegiatan Rekayasa Kebumihan, Rekayasa Airtanah serta kegiatan manusia lainnya pada sistem airtanah dan sistem rekayasa yang mengakibatkan beberapa perubahan atau ketidakseimbangan di dalam sistem airtanah. Aspek negatif airtanah umumnya diakibatkan, atau merespons adanya perubahan pada komponen utama (*major*) lingkungan Hidrogeologi, yaitu: (1) perubahan media aliran; dan (2) perubahan alirannya sendiri akibat injeksi (penambahan fluida ke

dalam sistem airtanah) atau pemompaan, misalnya akibat *dewatering* (pengurangan fluida dari dalam sistem airtanah); serta komponen *minor* lingkungan Hidrogeologi, yaitu: (3) perubahan tekanan di dalam sistem airtanah, misalnya akibat gempa; (4) perubahan kimia; dan (5) perubahan termal, akibat Rekayasa Kebumihan, Rekayasa Airtanah dan kegiatan manusia lainnya. Selain menyelesaikan masalah akibat timbulnya aspek negatif airtanah merespons kegiatan Rekayasa Kebumihan, maka seorang rekayasawan bidang Hidrogeologi Rekayasa juga dapat mencegah timbulnya aspek negatif ini dari awal, dalam kegiatan Rekayasa Airtanah secara langsung, misalnya dalam kegiatan pemboran airtanah untuk air bersih dan air irigasi atau lainnya.

Perencanaan dan desain dalam Hidrogeologi Rekayasa dapat dilakukan secara terpisah atau mandiri, yaitu dalam bentuk introduksi teknologi dalam Hidrogeologi Rekayasa yang terpisah dari Rekayasa Kebumihan dan kegiatan manusia lainnya yang memengaruhi sistem airtanah, demikian juga dapat diintegrasikan ke dalam perencanaan dan desain di dalam Rekayasa Kebumihan dan kegiatan manusia lainnya tersebut secara menyeluruh dan terintegrasi.

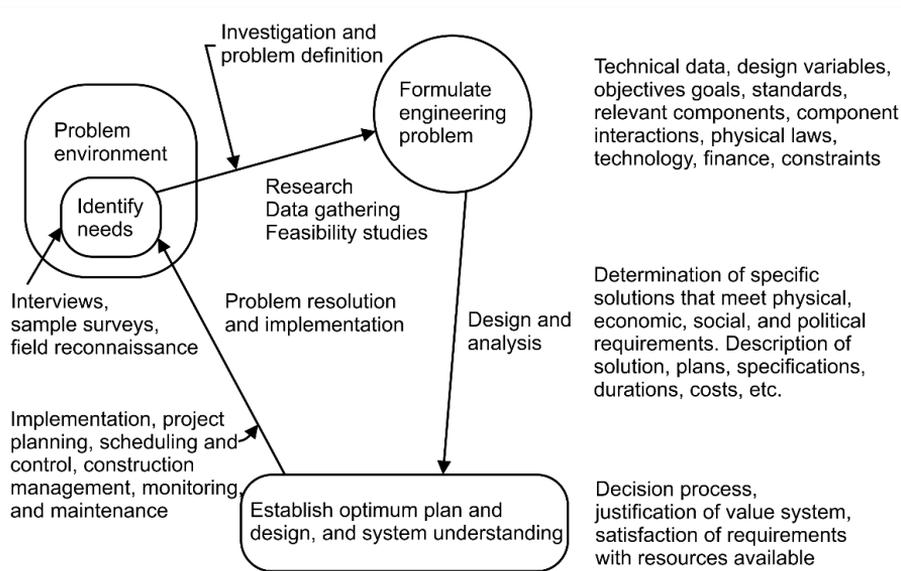
2 PERENCANAAN, DESAIN SISTEM AIR TANAH, DAN IMPLEMENTASI

Perencanaan, desain, dan implementasinya, bersama kegiatan manajerial, adalah proses yang dilakukan dalam penyelesaian masalah rekayasa (*engineering problem solving*) mulai dari tahap definisi masalah hingga implementasi usulan penyelesaian masalah. Perencanaan adalah proses kreasi pemikiran yang dilakukan untuk memastikan, bahwa tindakan yang diusulkan akan berhasil dan diperkirakan menyelesaikan permasalahan yang dihadapi. Perencanaan melibatkan penentuan tujuan (*goal*) dan/atau (*objective*) yang ingin dicapai dan kemudian melakukan langkah-langkah yang diperlukan untuk mencapai tujuan tersebut. Langkah-langkah ini, jika dirumuskan dengan jelas dan sistematis, merupakan sebuah rencana. Perencanaan memainkan peran penting dalam setiap penyelesaian masalah rekayasa. Desain adalah kegiatan menyangkut aspek dan spesifikasi teknis yang dilakukan agar menghasilkan informasi yang dibutuhkan untuk membuat sistem atau proses baru, demikian juga untuk modifikasi dan perbaikan sistem atau proses yang ada. Manajemen dilakukan melalui penggunaan sumber daya tersedia yang efektif untuk mencapai tujuan, dengannya hasil perencanaan dan desain rekayasa dibawa ke tahap implementasi.

2.1 Siklus Perencanaan, Desain, dan Implementasi

Gambar 1 menunjukkan kegiatan rekayasa dan peran rekayasawan dalam menyelesaikan masalah rekayasa [1], di mana dapat dipandang sebagai siklus kerangka kerja umum perencanaan, desain, dan implementasi dalam penyelesaian masalah rekayasa, di mana menyiratkan perbaikan berkelanjutan (*continous improvement*), karena adanya perbaikan atau modifikasi atas solusi masalah yang diusulkan sebelumnya. Berdasarkan Gambar 1, ada tiga tonggak capaian (*milestone*), yaitu: (A) identifikasi masalah; (B) formulasi masalah; dan (C) penetapan solusi masalah terbaik. Di antara tiga tonggak capaian tersebut terdapat tiga tahap perencanaan, desain serta implementasi, yaitu: (1) tahap definisi masalah; (2) tahap desain dan analisis; serta (3) tahap penetapan solusi masalah terbaik. Pada tahap desain dan analisis, dimungkinkan adanya beberapa desain alternatif solusi masalah.

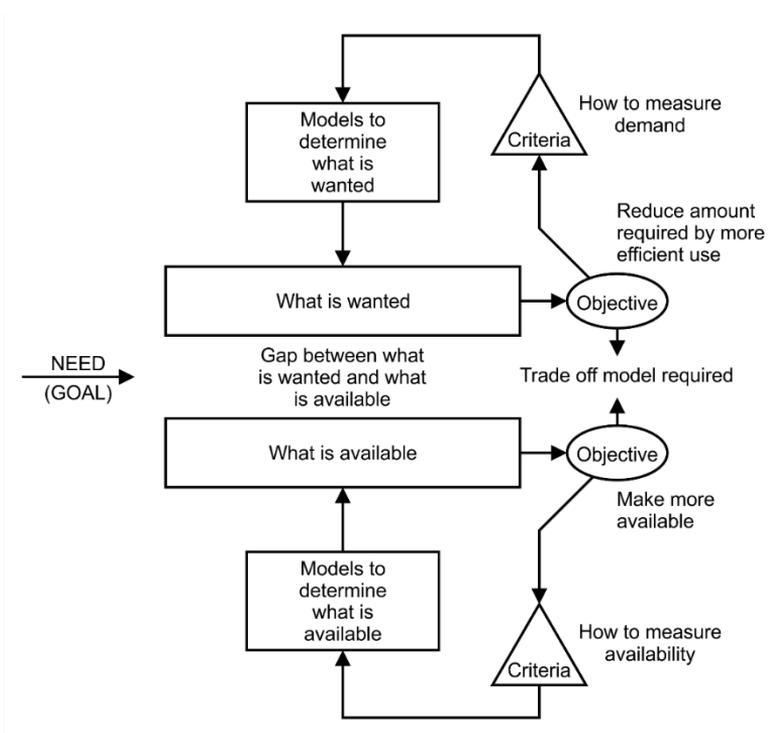
Perencanaan, dalam lingkup luas, didefinisikan sebagai kegiatan yang melibatkan penetapan tujuan (*goal*) yang dicapai dengan bantuan fungsi-fungsi manajerial, sedangkan dalam lingkup khusus, perencanaan merupakan elemen manajemen yang melibatkan penetapan tujuan (*objective*). *Goal* biasanya bersifat kualitatif dan umum, sedangkan *objective* bersifat kuantitatif dan khusus. Jika kedua definisi ini diaplikasikan pada konsep menurut Meredith et al. [1], maka perencanaan dalam lingkup luas adalah kegiatan yang mencakup siklus dari A-B-C-A, sedangkan perencanaan dalam lingkup khusus adalah kegiatan manajerial yang dilakukan pada tahap tiga atau implementasi, yaitu kegiatan C-A. Berdasarkan konsep sistem, maka perencanaan dalam lingkup khusus dipandang sebagai sub-sistem perencanaan dalam lingkup luas, di mana beberapa *objective* merupakan elemen yang mendukung *goal*. Desain adalah kegiatan yang mencakup penentuan aspek dan spesifikasi teknis produk akhir, properti dan penekanan khusus elemen perencanaan yang relevan dengan situasi. Desain rekayasa lebih sering berkaitan dengan spesifikasi teknis rinci komponen sistem rekayasa dan keterkaitannya satu sama lain. Namun, dalam banyak kasus, produk akhir desain rekayasa dapat berupa rancangan khusus, seperti: rancangan *drain hole*; rancangan sumur *dewatering*, rancangan sumur injeksi atau sumur pantau; rancangan skema operasi pemompaan, rancangan *sub-surface drainage gallery* dan lainnya.



Gambar 1 Siklus Perencanaan, Desain, dan Implementasi [1].

2.2 Identifikasi Masalah dan Formulasi Masalah

Identifikasi dan formulasi masalah (*problem definition and formulation*) menggabungkan kegiatan mulai dari tonggak capaian A (*identify need*), tahap satu (*problem definition*), dan tonggak capaian B (*problem formulation*). Definisi masalah dipandang lebih bersifat kualitatif, sedangkan formulasi masalah menindaklanjuti definisi masalah secara lebih kuantitatif. Identifikasi masalah, salah satunya dapat menggunakan metode *trade-off* [1] seperti diilustrasikan pada Gambar 2 berikut ini.



Gambar 2 Skema Model *Trade-off* [1].

Suatu masalah dapat dinyatakan dengan pernyataan kebutuhan (*need statement*), yaitu ekspresi akibat adanya kebutuhan yang belum terpenuhi atau adanya masalah yang belum terselesaikan. Secara awal, pernyataan ini memberi gambaran tentang solusi yang diharapkan. *Need statement* menggambarkan kesenjangan antara apa yang diinginkan (*what is wanted*) dan apa yang tersedia (*what is available*) atau kondisi yang ada pada saat masalah tersebut muncul. Realokasi sumber daya secara tersirat merupakan solusi yang diharapkan dapat menyelesaikan masalah, sehingga apa yang diinginkan dapat mendekati atau menjadi mungkin.

2.2.1 Desain Rekayasa dan Analisis Solusi Masalah Terbaik

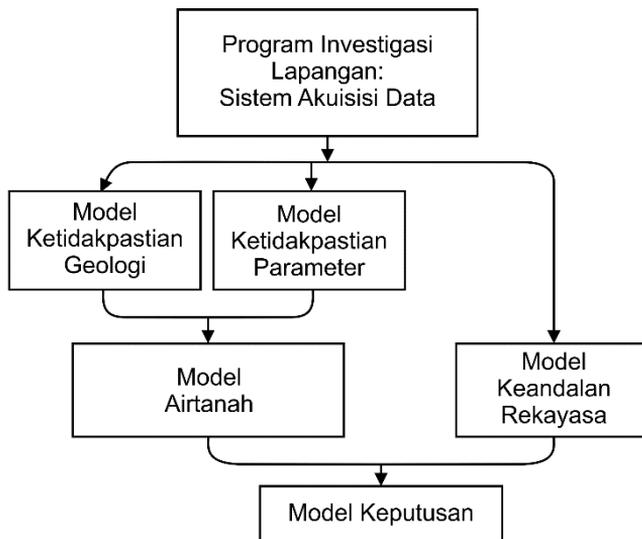
Desain dan analisis keputusan (*design and decision analysis*) penetapan solusi masalah terbaik menggabungkan kegiatan pada Gambar 1, mulai dari tonggak capaian B (*formulate engineering problem*), tahap dua (*decision analysis*), dan tonggak capaian C (*establish optimum plan and design*). Desain dan analisis keputusan penetapan solusi masalah terbaik hidrogeologi (sistem airtanah) dapat mengacu pada [2], di mana proses desain rekayasa sering digambarkan sebagai urutan pengambilan keputusan di antara beberapa alternatif desain rekayasa dalam kondisi ketidakpastian. Definisi ini sesuai dengan jenis masalah rekayasa yang terjadi pada konteks lingkungan hidrogeologi, di mana ketidakpastian parameter sistem alamiah dan sistem rekayasa jauh lebih besar dibanding ketidakpastian pada masalah rekayasa pada umumnya. Ketidakpastian bukan hanya terjadi pada parameter sistem saja, namun juga pada geometri media geologi, misalnya ketidakpastian pada litologi, stratigrafi, dan struktur geologi, yang menyebabkan kerumitan analisis hidrogeologi, yang tidak dikenal dalam masalah rekayasa lainnya.

Pengambil keputusan mendasarkan keputusannya pada analisis dan evaluasi ekonomi atas beberapa alternatif desain rekayasa. Analisis ini tidak hanya memperhitungkan biaya (*cost*) dan manfaat (*benefit*) dari setiap alternatif desain rekayasa, tetapi juga harus mempertimbangkan bobot risiko terkait. Risiko mencerminkan ketidakpastian, dan pada banyak kasus dalam konteks lingkungan hidrogeologi, risiko yang terkait dengan pengambilan keputusan sangat tinggi. Analisis keputusan memungkinkan adanya kaitan antara kerangka ekonomi di mana keputusan tersebut dibuat dan hasil analisis rekayasa yang menjadi dasar keputusan. Metode ini sangat cocok untuk sistem rekayasa dengan ketidakpastian besar dan risiko tinggi. Penerapan metode ini dalam konteks lingkungan hidrogeologi berpotensi efisien dan efektif.

2.2.2 Kerangka Kerja Desain Rekayasa dan Solusi Masalah Terbaik

Kerangka kerja (*frame work*) desain rekayasa mengacu pada [2] menggunakan enam komponen, yaitu: (1) model keputusan (*decision model*), (2) model hidrogeologi atau airtanah (*groundwater model*), (3) model keandalan rekayasa (*engineering reliability model*), (4) model ketidakpastian geologi (*geological uncertainty model*), (5) model ketidakpastian parameter hidrogeologi

(*parameter uncertainty model*), dan (6) program investigasi lapangan (*site investigation program*) yang secara skematik diilustrasikan pada Gambar 3 berikut ini.



Gambar 3 Kerangka Kerja Desain Rekayasa Sistem Airtanah [2].

Model keputusan memungkinkan adanya perbandingan antar-beberapa alternatif desain rekayasa, di mana evaluasi masing-masing desain rekayasa didasarkan pada fungsi tujuan (*objective function*) yang merupakan kombinasi risiko-biaya-manfaat (*risk-cost-benefit*). Model keandalan rekayasa digunakan untuk merepresentasikan kinerja komponen sistem rekayasa. Model airtanah digunakan untuk mengetahui kinerja komponen sistem airtanah (hidrogeologi). Model airtanah dan model keandalan rekayasa digunakan dalam model stokastik, dengan tujuan, agar dapat digunakan untuk memprediksi kemungkinan kegagalan (*probability of failure*) yang merupakan komponen risiko dalam model keputusan. Simulasi model airtanah harus bersifat stokastik agar dapat memperhitungkan ketidakpastian pada sistem airtanah, karena bersifat heterogen. Ketidakpastian batas geologi dinyatakan oleh model ketidakpastian geologi, dan ketidakpastian parameter hidrogeologi dinyatakan oleh model ketidakpastian parameter. Model ketidakpastian dan nilai parameternya ditentukan berdasar data yang diperoleh dari program investigasi lapangan.

2.3 Airtanah Sebagai Sistem Alamiah dan Sistem Rekayasa

Sistem didefinisikan sebagai kumpulan komponen yang saling bekerja sama, berhubungan dan berinteraksi satu dengan yang lain secara terorganisasi untuk memenuhi tujuan atau fungsi tertentu [3,4]. Contoh, sebuah sistem akuifer tertekan (*confined aquifer system*) terdiri atas beberapa komponen, yaitu: lapisan akuiklud atas dan bawah yang impermeabel, lapisan akuifer, airtanah atau geofluida di dalam lapisan akuifer. Beberapa komponen ini bekerja sama dan berinteraksi satu dengan yang lain, sehingga membentuk perilaku yang sangat khas, padamana tekanan dari sistem akuifer tertekan umumnya cukup tinggi. Bila lapisan akuiklud atas dan bawah diganti dengan lapisan aquitard atas dan bawah yang bersifat lebih semi-permeabel dan memungkinkan transfer (aliran) airtanah melewati keduanya, sehingga mengakibatkan pengurangan tekanan (*stress release*) di dalam lapisan akuifer, maka kita mendapatkan sebuah sistem akuifer semi-tertekan (*semi-confined aquifer system*), umumnya mempunyai perilaku yang ditunjukkan oleh tekanan akuifer yang lebih rendah dari tekanan sistem akuifer tertekan. Bila kedua lapisan aquitard diganti dengan lapisan akuifer yang bersifat permeabel, maka kita mendapatkan sebuah akuifer tak tertekan (*unconfined aquifer system*), dengan perilaku yang ditunjukkan oleh tekanan akuifer yang umumnya lebih rendah dari tekanan sistem akuifer semi-tertekan. Berdasar contoh tiga sistem akuifer berbeda ini, dapat dipelajari bahwa sifat komponen yang berbeda-beda akan bekerja sama dan berinteraksi membentuk perilaku sistem yang berbeda pula. Contoh lain, sistem airtanah yang lebih kompleks dari ketiga contoh di atas adalah sistem multi-aquifer semi-tertekan (*multi-semi-confined aquifer system*) atau sistem multi-leaky aquifer (*multi-leaky aquifer system*). Sistem multi-aquifer ini terdiri dari kumpulan sistem akuifer yang dapat dipandang sebagai beberapa sub-sistem. Antar-beberapa komponen yang berupa sub-sistem akuifer terjadi interaksi dan kerjasama dalam bentuk transfer airtanah antar sub-sistem akuifer yang kemudian akan mewarnai perilaku akhir (kombinasi) sistem multi-aquifer semi-tertekan. Konsep sistem digunakan oleh penulis untuk mendefinisi, mengidentifikasi serta menyelesaikan masalah pada airtanah atau lingkungan hidrogeologi, sebagai sistem alamiah dan sistem rekayasa.

Contoh, sistem multi-aquifer (airtanah) bergabung dengan sistem air permukaan serta sistem lainnya di dalam lingkup pertambangan, berdasarkan konsep sistem, merupakan anggota sistem yang lebih tinggi,

dalam konteks pengelolaan sumber daya air di dalam wilayah pertambangan [5], di mana permasalahan airtanah di muka kerja (*work front*) penambangan berkait secara komprehensif dengan permasalahan pertambangan lainnya. Penambangan emas untuk tipe urat (*vein*) bawah permukaan (*underground mining*) hampir selalu bermasalah dengan airtanah, karena tipe endapan urat atau endapan mineral (*mineral deposit*) umumnya berkoneksi secara hidrolik dengan air permukaan [6,7,8,9,10,11]. Contoh selanjutnya, sistem airtanah bergabung dengan sistem air permukaan dan sumberdaya air lainnya merupakan anggota sistem yang lebih tinggi dalam konteks pengelolaan sumber daya air dalam wilayah perkotaan [12].

Berdasar definisinya, sistem mempunyai tujuan atau fungsi tertentu yang disebut dengan *goal* atau *objective*. Di dalam sistem yang berhierarki, maka *objective* pada sub-sistem (hierarki lebih rendah) akan mendukung *goal* pada sistem (hierarki lebih tinggi). Contoh, analisis kestabilan lereng biasanya melibatkan dua sistem, yaitu airtanah di dalam lereng sebagai sub-sistem dan lereng sebagai sistem, di mana sistem lereng mempunyai hierarki yang lebih tinggi daripada sistem airtanah. *Objective* sub-sistem airtanah adalah menurunkan tekanan pori atau *head* airtanah di dalam lereng sampai pada tinggi (*level*) tertentu yang dikehendaki (kuantitatif) agar lereng menjadi stabil, sedangkan *goal* sistem lereng adalah menurunkan tekanan pori airtanah sebanyak mungkin, sehingga kestabilan lereng dapat dijaga [13,14].

Pada contoh kasus pengelolaan sumber daya air dalam wilayah perkotaan [12], kita harus dapat membedakan antara masalah yang sebenarnya dan/atau gejala dari suatu masalah. Contoh, laju penurunan muka airtanah (MAT) di kota atau di cekungan Bandung yang cukup signifikan, dipandang bukan merupakan masalah sebenarnya, namun merupakan gejala adanya suatu masalah pada sistem airtanah di cekungan airtanah (CAT) Bandung. Selanjutnya, bisa jadi masalah pada sistem airtanah CAT Bandung tersebut bukan merupakan masalah sebenarnya, namun merupakan gejala dari masalah yang lebih besar lagi pada sistem yang lebih tinggi [12].

Model *trade-off* [1] sangat mungkin dan sesuai digunakan untuk mendefinisikan masalah atau krisis airtanah di CAT Bandung. Sebagai hipotesis, dapat dikemukakan di sini bahwa krisis airtanah di CAT Bandung diduga disebabkan oleh adanya kesenjangan antara kebutuhan air bersih dan sumberdaya air bersih yang tersedia, terutama oleh sistem airtanah di CAT

Bandung, sebagai pemasok utama air bersih, karena sistem air permukaan tidak dapat diharapkan ketersediaannya, akibat kualitasnya yang tidak memadai, sehingga kebutuhan air bersih di cekungan Bandung disandarkan utamanya pada sistem airtanah. Krisis airtanah di CAT Bandung dapat diselesaikan, salah satunya dengan cara mempersempit kesenjangan antara kebutuhan dan ketersediaan air bersih, dengan cara meminimumkan (optimasi) apa yang diinginkan, dalam hal ini adalah kebutuhan air bersih, sebaliknya memaksimumkan (optimasi) apa yang tersedia, dalam hal ini sistem airtanah di CAT Bandung. Sebagai alternatifnya, dapat dilakukan dengan cara memaksimumkan (optimasi) kuantitas dan kualitas air permukaan. Kedua tujuan optimasi (meminimumkan dan memaksimumkan) dapat dipandang sebagai *objective function* di dalam masalah optimasi berdasar model *trade-off* [1] sebagai *objective* masing-masing komponen *need statement* yang diilustrasikan pada Gambar 2.

Kebutuhan air bersih Kota Bandung dapat dinyatakan menggunakan model, yang besarnya merupakan jumlah perkalian antara semua entitas atau elemen yang membutuhkan air bersih dan satuan kebutuhan air bersih masing-masing entitas atau elemen yang membutuhkan air bersih persatuan waktu, yang dapat dipandang sebagai kriteria kebutuhan air bersih. Selanjutnya optimasi dilakukan pada model kebutuhan air bersih, di mana *objective function* merupakan *objective* dari komponen apa yang diinginkan.

Ketersediaan sumberdaya air bersih dari sistem airtanah, dan mungkin sistem air permukaan sebagai alternatifnya, juga dinyatakan menggunakan model sistem airtanah dan model sistem air permukaan. Sedangkan kriteria sistem airtanah untuk mengukur ketersediaan airtanah dapat disandarkan pada status airtanah dalam zona konservasi airtanah, yaitu aman, rawan, kritis, atau rusak. Sedangkan kriteria air permukaan dapat disandarkan pada baku mutu air bersih. Misalkan ditetapkan, bahwa eksploitasi airtanah didasarkan pada kriteria aman atau rawan, maka dengan kriteria ini, bersama dengan model sistem airtanah, kemudian dilakukan optimasi untuk memaksimumkan ketersediaan bersih yang dipasok oleh sistem airtanah, dengan *objective function* merupakan *objective* dari komponen apa yang tersedia.

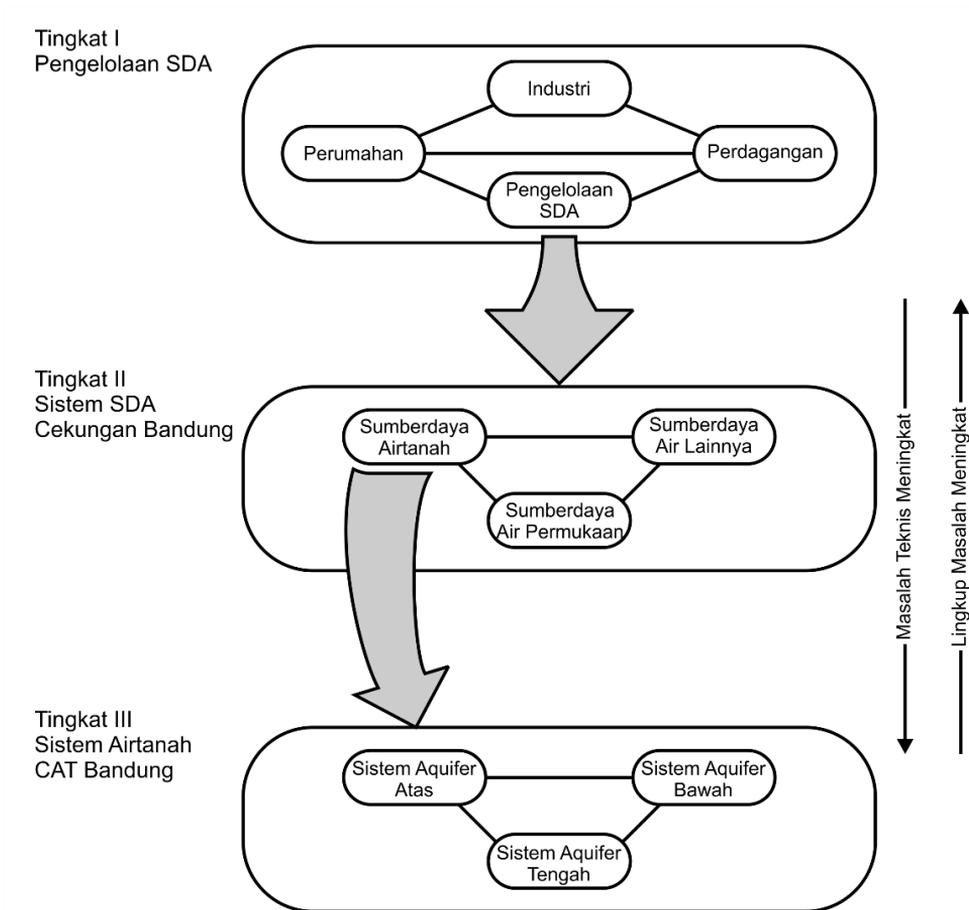
Kesenjangan yang masih ada dapat diukur dari selisih antara kedua *objective function* yang mewakili kebutuhan air bersih (apa yang diinginkan)

dan yang mewakili ketersediaan sumber daya air bersih (apa yang tersedia). Penyelesaian krisis airtanah di CAT Bandung secara teoretis dapat disandarkan pada bagaimana mengatasi kesenjangan atau selisih kedua *objective function* ini. Jika masih dimungkinkan untuk mempersempit kesenjangan, maka dilakukan re-desain sistem rekayasa airtanah atau rekayasa sistem air permukaan. Namun jika kedua re-desain sistem rekayasa ini tidak memungkinkan, maka krisis airtanah di CAT Bandung harus diselesaikan dengan transfer air bersih dari luar Kota Bandung, dengan asumsi tidak dimungkinkan memperkecil kebutuhan air bersih (apa yang diinginkan), demikian juga tidak mungkin meningkatkan kuantitas dan kualitas air permukaan (apa yang tersedia). Berdasar konsep sistem, krisis airtanah di CAT Bandung dapat dipetakan berdasarkan konsep hierarki sistem seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.

2.3.1 Hiredarki Sistem Airtanah

Sistem airtanah di CAT Bandung (sistem tingkat III) dapat dirinci berupa sistem multi-aquifer semi-tertekan, yang terdiri dari sub-sistem aquifer tak tertekan di bagian atas atau disebut *upper (most) aquifer*, sub-sistem aquifer semi-tertekan di bagian tengah atau disebut *middle aquifer*, dan sub-sistem aquifer semi-tertekan di bagian bawah atau disebut *lower (most) aquifer* [15,16]. Pada saat ini terjadi laju penurunan MAT yang signifikan terutama di dalam sub-sistem aquifer semi-tertekan di bagian tengah [15,16,17] akibat ekstraksi airtanah yang cukup besar.

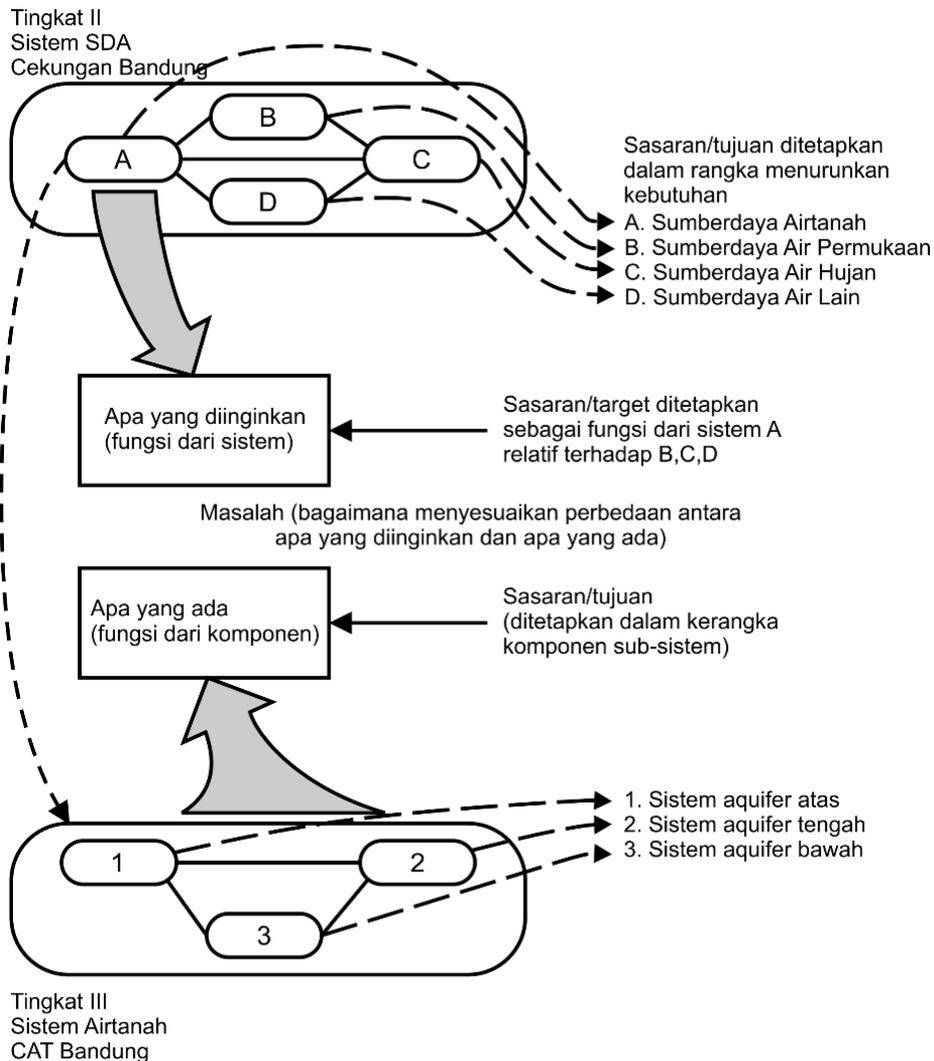
Bila dilihat dari perspektif sistem airtanah di CAT Bandung (sistem tingkat III), maka penurunan MAT yang signifikan pada sub-sistem aquifer tengah merupakan gejala yang menunjukkan adanya masalah (krisis) pada sistem airtanah di CAT Bandung. Namun dengan melihat ke arah sistem tingkat II yang lebih tinggi, maka krisis sistem airtanah di CAT Bandung dapat dipandang sebagai gejala yang menunjukkan adanya masalah pada sub-sistem sumber daya airtanah pada sistem tingkat II dan selanjutnya, dari perspektif sistem tingkat I, krisis sistem airtanah di CAT Bandung mengindikasikan adanya masalah pada pengelolaan sumber daya air di cekungan Bandung. Rincian tentang hal ini cukup banyak dan tidak diberikan di dalam buku ini.



Gambar 4 Hierarki Sistem Krisis Airtanah di CAT Bandung.

Konsep *need statement* juga dapat dikaitkan dengan hierarki sistem menggunakan model *trade-off* [1]. Ketika diterapkan pada hierarki sistem, maka *need statement* dapat dinyatakan dalam bentuk fungsi sistem. Apa yang tersedia dapat dikaitkan dengan *objective* komponen-komponen pada sistem tingkat tersebut (sistem yang ditinjau), sedangkan apa yang dibutuhkan/diinginkan dapat dikaitkan dengan *goal* komponen-komponen pada sistem tingkat yang lebih tinggi hierarkinya.

Contoh, pada krisis air tanah di CAT Bandung, Gambar 5 menunjukkan, bahwa *goal* (kualitatif) komponen sistem pengelolaan sumber daya air pada sistem tingkat I, yaitu “dapat memenuhi kebutuhan air bersih Kota Bandung”, yang sebenarnya adalah merupakan perwujudan dari apa yang diinginkan (tak terbatas).



Gambar 5 Model *Trade-off* [1] Krisis Airtanah di CAT Bandung

Sedangkan *objective* (kuantitatif) dari masing-masing komponen sistem pada sistem tingkat II adalah ‘kombinasi jumlah pasokan air bersih dari beberapa sistem sumber daya air (airtanah, air permukaan dan sumber daya air lainnya) di dalam cekungan Bandung, yang sebenarnya merupakan perwujudan dari apa yang tersedia (terbatas). Kesenjangan terjadi antara *goal* sub-sistem pengelolaan sumber daya air pada sistem tingkat I, yaitu “memenuhi kebutuhan air bersih (tak terbatas)” dengan “jumlah pasokan air bersih (terbatas)” dari beberapa komponen sistem sumber daya air pada sistem tingkat II. Penyelesaian krisis airtanah di CAT Bandung dapat

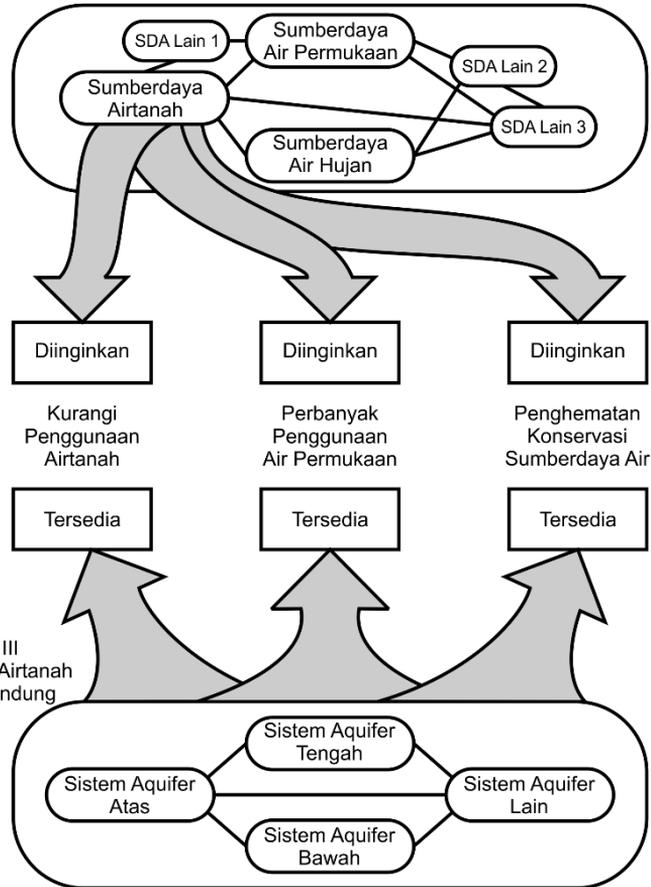
dilakukan dengan cara mempersempit kesenjangan yang terjadi antara sistem tingkat I dan sistem tingkat II ini.

Pentingnya *need statement* dalam proses perencanaan dan desain, yaitu bahwa tantangannya tidak hanya pada mengkaji bagaimana memenuhi kebutuhan, tetapi juga mempertimbangkan alternatif untuk mengurangi atau bahkan mencegah kebutuhan berlebih. Dengan cara ini, definisi masalah rekayasa dapat dilakukan secara komprehensif.

Contoh, kebutuhan air bersih di Kota Bandung yang disandarkan pada sub-sistem airtanah pada sistem tingkat II (Gambar 4), pada Gambar 6, diterjemahkan/dirinci menjadi atau dengan tiga alternatif apa yang diinginkan. Sebagai pasangannya, yaitu apa yang tersedia, juga diterjemahkan/dirinci menjadi atau dengan tiga alternatif juga yang disediakan secara kombinasi oleh sistem sumber daya airtanah, sistem sumber daya air permukaan, dan sistem sumber daya air lainnya. Kesenjangan di antara tiga pasangan apa yang diinginkan dan apa yang tersedia, terdapat tiga *need statements (multiple need statements)*, yang merupakan masalah, yaitu: (1) bagaimana caranya memperbanyak alokasi air bersih dari sistem sumber daya air permukaan; (2) bagaimana caranya mengurangi alokasi air bersih dari sistem sumber daya airtanah; (3) bagaimana caranya melakukan kegiatan penghematan air bersih, melalui kegiatan *re-use, re-cycle, rain haversting* serta lainnya.

Dengan penerapan *multiple need statements* pada krisis airtanah di CAT Bandung, maka diharapkan dapat mendefinisikan, memformulasikan dan menyelesaikan krisis airtanah di CAT Bandung secara komprehensif, yaitu dengan cara mengurangi kebutuhan air bersih yang disandarkan pada sistem sumber daya airtanah. Proses pemodelan, optimasi dan perhitungan *objective function* dengan penetapan kriteria masing-masing komponen *multiple need statements* dapat dilakukan menggunakan model *trade-off* [1] dengan cara yang sama seperti yang telah diilustrasikan pada Gambar 2, 4, dan 5.

Tingkat II
Sistem SDA
Cekungan Bandung



Gambar 6 Penerapan *Multiple Need Statements* Berdasar Model *Trade-off* [1], pada Krisis Airtanah di CAT Bandung.

2.3.2 Batas Sistem Airtanah

Dalam banyak sistem alamiah dan rekayasa, berbagai komponen dapat dibedakan satu sama lain, karena terdapat batas fisik yang jelas, di mana komponen tertentu tidak berinteraksi dengan komponen lainnya. Jika ini terjadi pada komponen-komponen sistem yang bertetangga dan umumnya sudah cukup jauh dari pusat sistem, maka batas sistem (*system boundary*) dapat ditetapkan diantara komponen-komponen sistem bertetangga yang tidak saling berinteraksi tersebut.

Contoh, batas sistem airtanah Cekungan Bandung atau dikenal dengan CAT Bandung, ditetapkan oleh [18] dengan kriteria tidak ada transfer airtanah

(*no flow boundary*) di antara komponen-komponen sistem yang bertetangga, padamana di antara keduanya terdapat akuiklud atau batas aliran (*water divide*) yang menyebabkan keduanya tidak dapat berinteraksi dalam bentuk transfer airtanah.

2.3.3 Keadaan (*State*) dan Kestimbangan Sistem Airtanah

Keadaan (*state*) sistem airtanah dapat direpresentasikan oleh sekumpulan variabel kunci, yang disebut dengan variabel keadaan (*state variables*). Nilai variabel keadaan pada setiap saat menunjukkan perilaku sistem airtanah dan dengan demikian pada waktu-waktu tertentu perlu dipantau sebagai dasar untuk mengevaluasi kinerja sistem airtanah. Nilai variabel keadaan pada saat tertentu tergantung pada nilai keadaan sebelumnya (*initial state*) dan semua *input*, stimulus, atau beban hingga yang ada pada saat ini.

Contoh, pada sistem airtanah, yang bertindak sebagai variabel keadaan utama biasanya adalah *head* airtanah (H) atau tekanan airtanah (*groundwater pressure*), dapat berupa konsentrasi kimia fasies tertentu di dalam airtanah (C), demikian dapat berupa suhu airtanah (T) dalam sistem reservoir geotermal dan juga dalam sistem airtanah pada kasus *underground coal gasification* (UCG). Seringkali terdapat kombinasi dari beberapa variabel keadaan, misalnya, terjadi kombinasi variabel keadaan *head*, konsentrasi kimia, suhu serta tegangan massa batuan.

Keadaan setimbang sistem airtanah ditunjukkan oleh keadaan tunak (*steady state*). Keadaan sistem airtanah yang tidak tunak (*unsteady state*) sering kali disebabkan oleh gangguan, yang umumnya berupa *sink and source*, keduanya dapat terjadi di dalam atau dari luar sistem airtanah. Bila terjadi di dalam sistem airtanah, maka *sink and source* terjadi karena peristiwa kimia, sedangkan jika terjadi di luar dan memengaruhi sistem airtanah, maka *sink and source* dapat dianggap sebagai *input* atau *output* sistem airtanah. *Sink* adalah gangguan yang menyebabkan variabel keadaan sistem airtanah mengalami penurunan nilai, dan sebaliknya *source* menyebabkan variabel keadaan sistem airtanah mengalami peningkatan nilai. Bila *sink and source* dihilangkan, maka sistem airtanah akan mengalami kestimbangan. Sistem airtanah berada dalam kestimbangan netral (*neutral equilibrium*), jika sistem airtanah tersebut mencapai kestimbangannya yang baru akibat adanya gangguan kepada sistem tersebut sebelumnya.

2.3.4 *Input dan Output Sistem Airtanah*

Tidak ada sistem, baik alamiah maupun rekayasa, yang benar-benar mandiri, dan / atau terputus (terisolasi) dari sistem atau sub-sistem lainnya. Pada pengamatan yang lebih rinci, suatu sistem selalu ditemukan berinteraksi dengan berbagai cara dengan sistem tetangganya dan kemudian menjadi sub-sistem yang lebih luas atau lebih tinggi hierarkinya. Oleh karena itu perlu tinjauan yang lebih luas dan tidak hanya berfokus pada sistem tertentu, atau dalam hal ini sub-sistem tertentu saja, tetapi juga perlu diperhatikan cara sistem atau sub-sistem berinteraksi dengan tetangganya. Suatu sistem berinteraksi dengan sistem lainnya yang bertetangga melalui *input* dan *output*, biasanya (tetapi tidak selalu, dapat juga berupa kombinasi) berbentuk aliran materi, energi, melalui batas sistem.

Contoh, transfer airtanah terjadi antar sub-sistem akuifer pada sistem multi-aquifer semi-tertekan di dalam CAT Bandung [12]. Contoh lain, pada penambangan *block caving*, terjadi transfer airtanah antar beberapa *draw bell* yang bertetangga, sehingga terjadi *cluster of wet draw bells* [19,20,21]. Contoh selanjutnya, transfer airtanah terjadi dari sub-sistem akuifer tertekan ke dalam sub-sistem akuifer di atas sub-sistem akuifer tertekan pada sistem multi-aquifer semi-tertekan di Kota Palu pada saat terjadi gempa Palu 2018, yang mengakibatkan *groundwater expulsion* yang memperparah likuifaksi tanah (*soil liquefaction*) di Balaroa, Petobo, dan Jono Oge di daerah Palu [22].

Pada beberapa contoh yang disebutkan sebelumnya, interaksi antar sub-sistem hanya melibatkan materi, dalam hal ini berupa transfer (aliran) airtanah antar sub-sistem. Interaksi melalui batas sistem, atau *input* sistem dapat berupa materi maupun energi, atau kombinasi keduanya, misalnya *input* pada sistem *reservoir* geotermal, yaitu panas batuan (energi) dan imbuhan reservoir, baik alami maupun buatan melalui injeksi air ke dalam *reservoir* geotermal (materi). Contoh lainnya, kombinasi *input* berupa panas (energi) dan air injeksi (materi) terjadi pada sistem airtanah dalam kasus gasifikasi batubara bawah tanah atau UCG, yang selanjutnya menyebabkan adanya transfer airtanah antar sub-sistem (akuifer) di dalam sistem multi-aquifer semi-tertekan. Pada kasus *groundwater expulsion* akibat gempa Palu 2018 [22], *input* yang terjadi pada sub-sistem akuifer tertekan dalam sistem multi-aquifer semi-tertekan sendiri berupa energi gelombang gempa Palu 2018 yang menyebabkan meningkatnya tekanan di dalam sub-sistem akuifer

tertekan berkali-kali lipat dari tekanan awalnya [22]. Karena sangat jarang terjadi, berikut ini diberikan model matematik *input* gelombang gempa yang menyebabkan transfer airtanah antar sub-sistem akuifer [22].

Massa tanah diasumsikan tersusun atas media fluida (airtanah) dan fluida linier, isotropik, dan isothermal [23]. Interaksi antara tegangan, regangan dan tekanan pori dapat dinyatakan [24,25]:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2G} \sigma_{ij} - \frac{\vartheta}{2G(1+\vartheta)} \sigma_{kk} \delta_{ij} + \frac{\alpha}{3K} \sigma_p \delta_{ij} \quad (1)$$

padamana ε_{ij} adalah regangan total, σ_{ij} adalah tegangan, σ_{kk} adalah tegangan rata-rata, σ_p adalah tegangan pori, G adalah modulus geser, ϑ adalah *drained* Poisson's ratio, K adalah *drained bulk modulus*, α adalah Biot-Willis coefficient, serta δ_{ij} adalah Kronecker delta. Suku pertama dan kedua di sebelah kanan persamaan (1) adalah regangan poroelastik, dan suku ketiga adalah regangan bebas. Koefisien Biot-Willis menyatakan rasio peningkatan massa fluida terhadap regangan volumetrik dalam kondisi *drained* atau pada tekanan fluida konstan, dengan nilai $0 \leq \alpha \leq 1$ [26], padamana α adalah porositas. Peningkatan massa fluida per satuan volume pada keadaan referensi diberikan sebagai berikut [25]:

$$\zeta = \frac{\alpha}{3K} \sigma_{kk} + \frac{\alpha}{KB} \sigma_p \quad (2)$$

di mana B adalah koefisien Skempton, yang merupakan ukuran tentang bagaimana tegangan didistribusikan antara padatan (matriks) dan cairan (fluida); untuk tanah jenuh nilainya satu [24]. Pada kondisi *undrained*, tekanan pori dari persamaan (2) berdasarkan [25] adalah:

$$\sigma_p = -\frac{B}{3} \sigma_{kk} \quad (3)$$

Karena melibatkan tekanan pori berlebih akibat beban seismik, tekanan pori dianggap terdiri dari dua komponen, yaitu:

$$\sigma_p = \sigma_s + p \quad (4)$$

padamana σ_s dan p adalah tekanan hidrostatis fluida pori (airtanah) dan tekanan pori berlebih akibat beban seismik. Tegangan efektif dinyatakan sebagai berikut:

$$\sigma'_{kk} = \sigma_{kk} + 3\alpha(\sigma_s + p) \quad (5)$$

Ambang batas likuifaksi didasarkan pada kriteria berbasis tekanan pori ternormalisasi (NPWP), yaitu perbandingan antara kelebihan tekanan air pori dengan tegangan efektif awal sebagai berikut:

$$NPWP = -\frac{3p}{\sigma'_{kk0}} \quad (6)$$

Likuifaksi secara teoretis terjadi, jika nilai absolut NPWP sama dengan satu. Perubahan massa fluida akibat kelebihan tekanan pori yang didorong oleh beban seismik dinyatakan sebagai:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\alpha}{KB} \left\{ \frac{B}{3} \frac{\sigma_{kk}}{\partial t} + \left(\frac{\partial \sigma_s}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial t} \right) \right\} = \frac{k}{\mu} \nabla^2 p \quad (7)$$

padamana k dan μ adalah permeabilitas matriks dan viskositas airtanah. Pada kasus vertikal satu dimensi (1D) dekat permukaan tanah, tegangan rata-rata total dan tekanan hidrostatik konstan dan dapat diabaikan dari persamaan (7), karena tidak dapat diturunkan, sehingga:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{KB}{\alpha} \frac{k}{\mu} \nabla^2 p \quad (8)$$

Persamaan (8) digunakan sebagai dasar formulasi disipasi tekanan air pori berlebih. Fluks *groundwater expulsion* akibat disipasi tekanan air pori berlebih dianggap mencapai permukaan tanah hanya melalui akuifer tak tertekan dengan laju per satuan luas permukaan tanah yang dinyatakan sesuai dengan hukum Darcy sebagai berikut:

$$q = -\frac{k}{\mu} \nabla p \quad (9)$$

Kondisi batas model aliran 1D vertikal yaitu: (1) tidak ada aliran melintasi bagian bawah model (Neumann); (2) tekanan relatif atmosfer ditetapkan sebagai kondisi batas di permukaan tanah (Dirichlet); dan (3) batas tanpa aliran ditetapkan sebagai batas kanan dan kiri model (Neumann). Dalam kasus ini, *input* pertama kali ke dalam sistem airtanah memang adalah gelombang gempa (energi) dan *output* dari sistem airtanah adalah *groundwater expulsion* (materi) menuju permukaan tanah, namun dalam proses menuju kesetimbangannya yang baru, terjadi *input* berupa transfer airtanah dari sub-sistem airtanah sekitar ke dalam sub-sistem airtanah darimana *groundwater expulsion* berasal atau terjadi.

2.3.5 Parameter (Koefisien) Sistem Airtanah

Variabel sistem terdiri dari variabel *input*, variabel *output* serta variabel keadaan. Yang terakhir sudah dijelaskan sebelumnya di atas, yang menggambarkan perilaku progresif sistem tersebut terhadap waktu. Besaran atau parameter lain diperlukan untuk membangun model sistem. Parameter atau koefisien sistem mewakili sifat-sifat sistem (*system properties*) dan komponennya.

Contoh, pada model sistem airtanah, maka sifat-sifat model sistem diwakili oleh parameter hidrolik, di antaranya adalah: *transmissivity* (T) atau *hydraulic conductivity* (K) serta *storage coefficient* (S) atau *specific storage coefficient* (Ss). Pada rekayasa sistem, parameter sistem perlu diketahui dan biasanya diperoleh melalui pengujian langsung atas sistem tersebut.

Contoh, pada sistem airtanah, pengujian dapat dilakukan dengan uji pemompaan (*pumping test*), uji slug (*slug test*), uji packer (*packer test*) atau pengujian lainnya. Orang pertama yang merumuskan kuantifikasi parameter sistem airtanah melalui pengujian, dalam hal ini uji pemompaan adalah Theis [27]. Tidak lama setelah Theis [27], Jacob dan de Wiest [28,29] menjelaskan, bahwa *specific storage coefficient* dipengaruhi oleh kompresibilitas media aliran fluida, kompresibilitas fluida dan parameter media aliran lainnya. Berdasar pendapat [28,29], dimungkinkan parameter hidrolik bersifat non-linier atau berubah (tak konstan) terhadap ruang dan waktu.

Pada rekayasa sistem airtanah, parameter hidrolik dan parameter geologi sangat berpengaruh pada hasil prediksi perilaku sistem airtanah melalui simulasi model sistem airtanah. Hal ini disebabkan oleh ketidakpastian keduanya yang sangat signifikan. Ketidakpastian parameter hidrolik dan parameter geologi, terutama konduktivitas hidrolik, dapat terjadi di suatu titik dan di dalam ruang (spasial), demikian juga dengan anisotropi 3D. Pemodelan ketidakpastian parameter hidrolik dan parameter geologi sangat diperlukan untuk memprediksi perilaku sistem airtanah yang direkayasa, resiko dan kelayakan desain rekayasa sistem airtanah, mengacu kepada kerangka kerja desain rekayasa sistem airtanah [2], dengan skema pada Gambar 3. Berikut ini dipaparkan secara singkat beberapa hasil penelitian penulis dan tim terkait dengan pemodelan parameter hidrolik, utamanya adalah konduktivitas hidrolik.

Konduktivitas hidrolik media aliran airtanah terkekarkan (*fractured media*) di dalam blok 2D (dalam bidang XY) dapat dimodelkan ekivalen sebagai / dengan konduktivitas hidrolik media aliran berpori (*porous media*) 2D yang anisotrop [30,31,32,33] berdasar *equivalent fractured network* [34,35], dengan syarat jumlah kekar di dalam blok 2D yang dimodel lebih besar dari jumlah atau kepadatan kekar minimal yang disyaratkan. Demikian juga, orientasi kekar di dalam blok 2D yang dimodel tidak mempunyai kecenderungan tertentu. Kekar di dalam blok 2D dimodelkan sebagai garis, sehingga jurus (*strike*) kekar 2D diharapkan bersifat acak (*random*). Keuntungan dari model ini adalah, media aliran terkekarkan dapat diekivalensi sebagai / dengan media aliran berpori anisotrop. Model ini kemudian dikembangkan menjadi model blok 3D, padamana kekar di dalam media aliran bersifat vertikal atau sub-vertikal, dengan dip berkisar antara 80°-90° [36]. Bila kepadatan kekar cukup rendah, demikian juga orientasi kekar mempunyai kecenderungan tertentu, maka media aliran airtanah terkekarkan harus dimodelkan berdasar *discrete fractured network* [37], padamana aliran pada masing-masing kekar menjadi fokus utama. Contoh aplikasi model *discrete fractured network* yang diterapkan pada kasus intrusi air laut oleh [38] dengan kasus prediksi intrusi air laut ke dalam tambang batu granit.

Model *equivalent fractured network* [34,35] maupun model *discrete fractured network* [37] mengasumsikan, bahwa konduktivitas hidrolik masing-masing dan keseluruhan blok (total) media aliran bersifat anisotrop. Sedangkan berdasar [39] konduktivitas hidrolik di dalam masing-masing blok media aliran dianggap bersifat isotrop, namun konduktivitas hidrolik keseluruhan blok (total) media aliran bersifat anisotrop. Model konduktivitas hidrolik yang didasarkan pada [39] cukup mudah dikembangkan karena didasarkan pada data-data investigasi geoteknik. Oleh sebab itu pengolahan data-data investigasi geoteknik, seperti *rock quality designation* (RQD), indeks litologi, kedalaman serta material pengisi kekar, dapat digunakan untuk mengembangkan model konduktivitas hidrolik dengan cara ini [40].

Pengembangan model distribusi konduktivitas hidrolik berdasar [39] dilakukan oleh penulis beserta tim dan dipublikasikan melalui [41,42,43,44], di mana pemetaan data-data geoteknik kepada distribusi konduktivitas hidrolik didasarkan pada relasi stokastik, menggunakan geostatistik. Sedangkan pengembangan model distribusi konduktivitas hidrolik berdasarkan *artificial intelligence* (AI) dipublikasikan melalui [45,46,47,48,49].

Pemodelan menggunakan AI mempunyai keunggulan dibanding pemodelan menggunakan geostatistik, karena pemetaan yang sifatnya empirik atas semua parameter yang kemungkinan memengaruhi model distribusi konduktivitas hidrolik dapat dilakukan dengan mudah, fleksibel, dan memadai.

2.3.6 Pemodelan, Analisis, dan Evaluasi Sistem Airtanah

Masalah kompleksitas sistem pada pemodelan sistem airtanah sebaiknya dapat ditangani berdasar konsep sistem dan hierarki sistem. Perlu dilakukan pemilihan, pemilahan, dan penapisan informasi yang memiliki pengaruh penting pada perilaku sistem airtanah atas informasi yang sifatnya marjinal.

Contoh, beberapa penapisan dan pemilahan informasi berikut ini seringkali membantu: media aliran airtanah berumur tua (Tersier) atau muda (Quarter) atau bahkan lebih muda lagi; batuan jenis apa yang menyusun media aliran airtanah; apakah aliran airtanah terjadi di dalam media berpori atau berkekar; apakah aliran airtanah terjadi karena *head* saja atau ada energi lain; apakah airtanah berinteraksi langsung dengan air permukaan atau tidak; bila berinteraksi secara langsung, apakah batas-batas interaksi keduanya bisa diidentifikasi lebih lanjut; apakah ada intervensi langsung manusia ke dalam sistem airtanah atau tidak, misalnya melalui pemompaan dan injeksi, demikian juga aktivitas manusia yang merubah media aliran, apakah ada proses fisika dan kimia lain selain proses hidrolik yang terjadi di dalam sistem airtanah dan seterusnya yang bisa dikembangkan oleh pembuat model. Hal ini akan memberi warna pada model konseptual sistem airtanah.

Meskipun model sederhana biasanya bersifat tidak atau kurang akurat, namun dapat memberikan gambaran umum awal yang cepat tentang fungsi (perilaku) sistem airtanah. Model awal sederhana biasanya digunakan untuk membangun model konseptual, sedangkan model kompleks dari hasil pengembangan model sederhana digunakan untuk melakukan analisis perilaku dan evaluasi sistem airtanah nyata.

Perubahan perilaku sistem airtanah ditunjukkan oleh perubahan *head* yang cepat di awal waktu, menyusul aplikasi gangguan pada sistem airtanah tersebut, misalnya akibat pemompaan, injeksi atau gangguan lainnya. Demikian juga setelah gangguan pada sistem airtanah dihentikan, maka terjadi perubahan perilaku sistem airtanah yang cepat di awal waktu. Setelah

waktu yang panjang sejak aplikasi atau berhentinya gangguan, perilaku sistem airtanah akan kembali pada kesetimbangannya, termasuk kemungkinan kepada kesetimbangannya yang baru. Analisis dan evaluasi atas perilaku yang berubah cepat menyusul gangguan yang diaplikasikan atau dihentikan, seringkali digunakan untuk mengetahui sifat fisik asli dari sistem airtanah seperti dilakukan pada uji pemompaan untuk menentukan parameter hidrolis media aliran airtanah.

Jika sistem airtanah menampilkan variasi yang signifikan pada respons (*output*)-nya terhadap *input* berulang (bervariasi) yang identik, maka perlu dilakukan analisis probabilistik, sebagai alternatifnya adalah analisis statistik. Kemungkinan lain adalah menggunakan model deterministik, tetapi berikut analisis sensitivitas yang dilakukan dengan cara melakukan sejumlah besar komputasi dengan nilai *input* sistem yang bervariasi secara sistematis. Analisis sensitivitas juga dapat digunakan ketika parameter (koefisien) sistem airtanah, demikian juga jika *input* tidak diketahui secara pasti, tetapi hanya diketahui sebagai kuantitas (secara) statistik. Dalam hal ini terdapat masalah ketidakpastian, padamana nilai parameter dan *input* sistem airtanah bervariasi dalam rentang (*range*) tertentu yang tidak pasti. Sebaliknya, variasi mungkin diabaikan untuk analisis *input-output* deterministik yang disederhanakan untuk keseluruhan sistem airtanah. Cara ini tepat ketika hanya perkiraan perilaku yang sangat mendekati yang diperlukan. Analisis *input-output* dapat dilakukan dengan menyatakan *output* sebagai fungsi dari *input*, yang dapat dianggap sebagai cara mengungkapkan hubungan kausal dengan *input* sebagai sebab dan *output* sebagai akibat.

Analisis Monte-Carlo dapat digunakan untuk menggambarkan analisis berulang dengan variasi parameter dan *input* sistem airtanah yang dipilih secara acak dan pengaruhnya pada kinerja sistem airtanah. Metode Monte-Carlo menyediakan sarana untuk mempelajari efek stokastik pada kinerja sistem airtanah. Nilai parameter dan *input* sistem ditentukan dengan pengambilan sampel acak dari distribusi frekuensi yang mewakili nilai parameter dan *input* sistem airtanah. Hasil dari sejumlah besar analisis berulang kemudian dapat digunakan untuk membuat distribusi frekuensi yang merepresentasikan perilaku sistem airtanah, yang memungkinkan aplikasi penanganan probabilistik pada masalah tersebut. Berdasar distribusi kinerja sistem airtanah dan sistem rekayasa terhadap masing-masing variasi parameter *input*, maka dapat dilakukan analisis kemungkinan kegagalan

sistem, sehingga didapatkan informasi tentang keandalan sistem airtanah dan sistem rekayasa.

2.4 Kontrol, Perencanaan, dan Desain Sistem Airtanah

Sistem rekayasa airtanah biasanya dikembangkan dengan maksud untuk mencapai tujuan tertentu (*objective*), yang jika dapat dikuantifikasi, dimungkinkan untuk memasang perangkat kontrol sistem sebagai sub- sistem airtanah terkait untuk mengontrol kinerja sistem airtanah, sehingga memudahkan pencapaian tujuan dari sistem rekayasa airtanah.

Contoh, penurunan *head* airtanah pada sistem lereng dalam konteks kestabilan lereng merupakan *objective*-nya, sehingga *head* airtanah perlu dikontrol. Pengontrolan *head* airtanah dapat dilakukan melalui proses *dewatering*, salah satunya menggunakan *drain hole* [13,14,50] atau metode lainnya, seperti *dewatering well*, *subsurface drainage gallery* atau lainnya. Perangkat kontrol sistem airtanah perlu direncanakan dan didesain untuk mencapai kinerja sistem airtanah yang diinginkan dengan efisien dan efektif. Contoh kasus optimasi penentuan parameter desain *drain hole* diberikan oleh [50], berikut ini.

Tujuan dari contoh kasus yang dikutip dari [50] ini adalah memberi ilustrasi penerapan analisis pengambilan keputusan tentang penetapan solusi terbaik di antara beberapa alternatif desain rekayasa *drain hole* pada lereng tambang terbuka untuk mengurangi airtanah dalam tubuh lereng, dan akhirnya bertujuan menjaga stabilitas lereng. Penetapan solusi terbaik, dalam hal ini adalah desain terbaik *drain hole* menggunakan optimasi dengan salah satu teknologi kecerdasan buatan (*artificial intelligence*), yaitu *genetic algorithm* (GA).

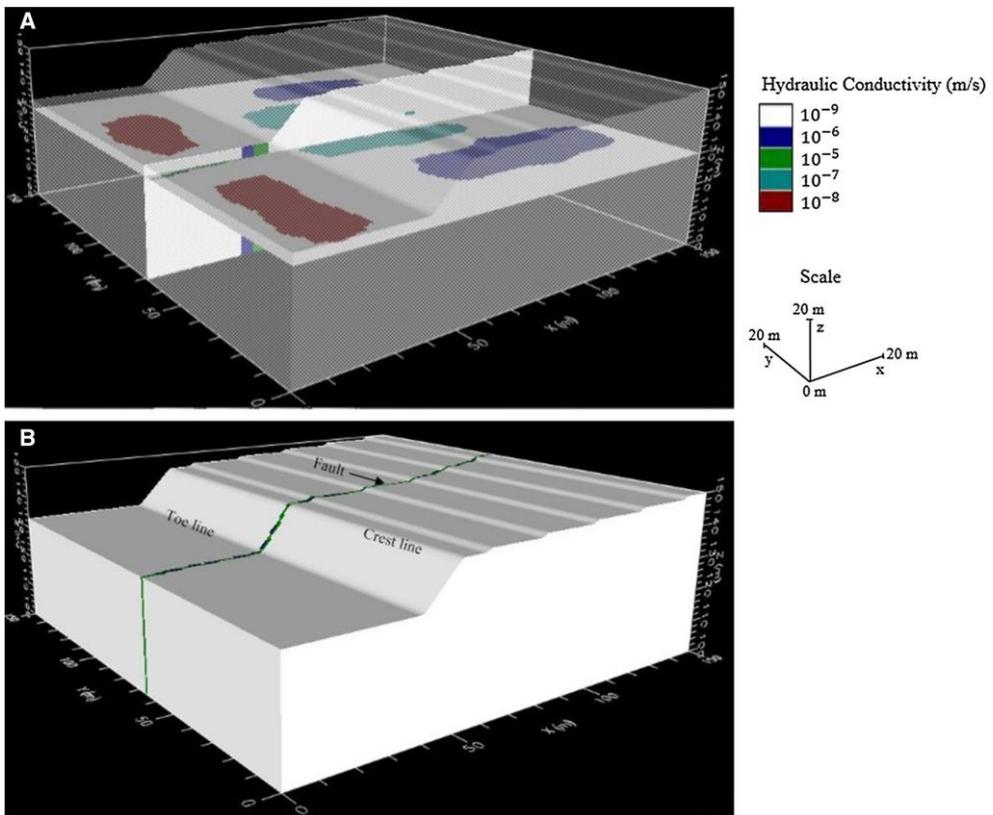
2.4.1 Deskripsi dan Definisi Masalah

Optimasi menggunakan GA dikombinasi dengan simulasi model airtanah digunakan untuk menyelesaikan masalah drainase lereng tambang terbuka, melalui desain *drain hole* yang optimal, yang direpresentasikan dalam bentuk variabel keputusan atau variabel desain *drain hole*, di antaranya adalah: jumlah, lokasi, dan panjang *drain hole*. Kriteria optimal dalam hal ini adalah efisiensi dan efektivitas desain yang dinyatakan oleh fungsi tujuan optimasi

berganda, yaitu memaksimalkan jumlah airtanah yang dapat dibuang dan sekaligus minimumkan panjang total *drain hole*. Optimasi desain *drain hole* ini dikembangkan dan diterapkan pada kasus sederhana, yaitu lereng tunggal tambang terbuka dengan kemiringan tunggal (*bench*) dengan patahan vertikal di tengah lereng yang membagi lereng dengan arah tegak lurus ke arah jurus (*strike*) lereng. Lokasi studi berada di Tambang Terbuka Grasberg, padamana aliran airtanah terjadi di dalam media berkekar. Optimasi desain *drain hole* sangat tergantung pada keakuratan model distribusi spasial parameter hidrolis media aliran berkekar pada lereng, yang tidak dijelaskan secara khusus di sini, namun dapat dirujuk di dalam [44,49,50]. Optimasi desain *drain hole* menggunakan GA dua tahap dikombinasi dengan simulasi airtanah dilakukan pada sebuah model konseptual. Penerapan GA dua tahap dimaksudkan untuk mengurangi komputasi. Model konseptual yang dikembangkan dirinci sebagai berikut.

Model berupa lereng batugamping tunggal (*bench*) dengan patahan vertikal (Gambar 7) berdimensi: tinggi 10 m dengan sudut kemiringan lereng 45°; jurus lereng ke arah utara; elevasi topografi menurun dari Timur ke Barat; patahan vertikal berarah timur-barat membelah lereng persis di tengah-tengah; media aliran airtanah bersifat terkekarkan, blok/ sel/ *model grid* mewakili media berkekar; distribusi spasial parameter hidrolis media aliran dan evapotranspirasi berdasar [44,48,49,51,52]; *drain hole* mempunyai konduktansi tertentu.

Model konseptual lereng tunggal berdimensi 150 m sepanjang sumbu X (timur-barat), 150 m sepanjang sumbu Y (utara-selatan) dan 50 m sepanjang sumbu Z (arah vertikal). Ukuran *model grid* adalah 1 m × 1 m × 1 m, sehingga model konseptual terdiri dari 150 baris, 150 kolom, dan 50 lapisan dengan 1.125.000 *model grid*. *Head* airtanah di ujung paling timur adalah 148 m dari permukaan laut (mdpl), dan di ujung paling barat adalah 143 mdpl. Airtanah mengalir dari timur ke barat. Distribusi curah hujan, imbuhan dan evapotranspirasi mengikuti [51,52]. Parameter model konseptual diberikan dalam Tabel 1. Arah *drain hole* terhadap bidang horisontal dianggap konstan, karena dipasang tegak lurus terhadap garis kaki lereng tunggal (*toe line*) dengan jurus ke utara. Kemiringan *drain hole* vertikal diatur 5° terhadap bidang horisontal. Diameter *drain hole* dianggap konstan. Dengan demikian, hanya tiga parameter *drain hole* yang dipertimbangkan sebagai variabel keputusan atau variabel desain, yaitu: jumlah, lokasi, dan panjang.



Gambar 7 Model Konseptual Lereng Tunggal Batugamping

2.4.2 Desain Rekayasa sebagai Solusi Masalah

Desain dan implementasi rekayasa dimaksudkan sebagai solusi masalah, dengan variabel keputusan, di antaranya adalah: jumlah, lokasi, dan panjang *drain hole*. Tujuan desain rekayasa adalah memaksimalkan penurunan tekanan air pori atau muka airtanah (MAT) dalam tubuh lereng tunggal melalui *drain hole*, yang dicapai dengan meminimumkan biaya yang diekivalensi terhadap panjang *drain hole* total.

Pendekatan yang digunakan pada kasus ini didasarkan pada filosofi desain rekayasa berbasis biaya-manfaat. Parameter hidrolis sistem airtanah, utamanya konduktivitas hidrolis, sebagai parameter yang paling sensitif mempengaruhi respons sistem airtanah, distribusinya secara spasial dimodelkan secara khusus dengan mempertimbangkan ketidakpastiannya. Evaluasi rekayasa sistem airtanah dilakukan dengan cara analisis teknis dan ekonomis berbasis biaya-manfaat. Manfaat diukur dari jumlah airtanah

(maksimum) yang bisa diekstraksi, dibuang atau MAT yang bisa diturunkan, sedangkan biaya diukur dari panjang *drain hole* total (minimum) yang digunakan.

Tabel 1 Parameter Model Konseptual Lereng Tunggal [50]

Parameter	Nilai dan Keterangan
Konduktivitas hidrolik massa batugamping dengan RQD > 75%	10 ⁻⁹ m/det
Konduktivitas hidrolik massa batugamping dengan RQD 50-75%	10 ⁻⁸ m/det
Konduktivitas hidrolik massa batugamping dengan RQD 25-50%	10 ⁻⁷ m/det
Konduktivitas hidrolik massa batugamping dengan RQD < 25%	10 ⁻⁶ m/det
Konduktivitas hidrolik massa batuan di dalam patahan	10 ⁻⁵ m/det
Koefisien simpanan media aliran (<i>storage coefficient</i>)	0,01
Koefisien hasil spesifik (<i>specific yield</i>)	0,2
Curah hujan	4000 mm/tahun
Imbuan	600 mm/tahun
Evapo-transpirasi	200 mm/tahun
<i>Head</i> awal	148 di Timur, 143 di Barat
Durasi simulasi	360 hari
Konduktansi lubang pembuangan	0.8 m/hari
Sumur pantau	7 buah

2.4.3 Kerangka Kerja Desain Rekayasa – Model Keputusan

Pendekatan pengambilan keputusan juga didasarkan pada aspek biaya-manfaat. Dari perspektif pemilik proyek, manfaat pada kasus ini adalah penurunan tekanan air pori di dalam tubuh lereng, sedangkan biaya terkait dengan realisasi atau implementasi *drain hole* yang diekivalensi dengan panjang *drain hole* total.

Pada kasus ini, lokasi, jumlah dan panjang *drain hole* adalah variabel keputusan yang akan dioptimasi dan masing-masing dinyatakan sebagai gen di dalam kromosom, yang merupakan solusi optimasi dalam prosedur optimasi menggunakan GA. Tujuan pertama adalah memaksimalkan manfaat, yaitu penurunan MAT atau penurunan tekanan airtanah (ΔH_{ij}) dan selanjutnya secara kuantitatif diterjemahkan ke dalam maksimalisasi fungsi tujuan pertama, yang dinyatakan sebagai:

$$Z_1 = \sum_{ij=1}^{DH_n} (h_0 - h_{ij}) \quad (10)$$

padamana h_0 , h_{ij} , dan DH_n masing-masing adalah: *head* airtanah awal, *head* airtanah setelah mengalami penurunan, dan *drain hole* ke n . Tujuan kedua berkaitan dengan aspek ekonomi, yaitu biaya pemasangan *drain hole* total

$\sum C_{ij} \cdot L_{ij}$, yang sebanding dengan panjang *drain hole* total. Tujuan kedua adalah meminimalkan biaya pemasangan *drain hole* total yang dinyatakan sebagai:

$$Z_2 = \sum_{ij}^{ij=DH_n} C_{ij} \cdot L_{ij} \quad (11)$$

padamana C_{ij} dan L_{ij} masing-masing adalah biaya satuan atau biaya pemasangan *drain hole* persatuan panjang *drain hole*. Agar proses optimasi menjadi lebih mudah dilakukan, maka fungsi tujuan dalam persamaan (11) disederhanakan dengan cara mengeluarkan (menormalisasi) biaya satuan C_{ij} dari persamaan (11) yang dianggap konstan, sehingga:

$$Z_2 = \sum_{ij}^{ij=DH_n} L_{ij} \quad (12)$$

Dengan demikian, fungsi tujuan kedua adalah meminimisasi panjang *drain hole* total. Persamaan (11) dan (12) dibatasi oleh lima kendala, yaitu lokasi *drain hole*, penurunan MAT, jumlah *drain hole*, panjang *drain hole* individu dan jarak antar *drain hole*, yang dinyatakan:

- (a) Kandidat *drain hole* terletak di sepanjang garis kaki lereng dengan jurus ke utara sepanjang sumbu Y, dengan X (absis) dan Z (level) konstan. *Drain hole* individu Y_{ij} berada pada lokasi, mulai dari $Y_{min} = 0 \text{ m}$ hingga $Y_{max} = 150 \text{ m}$, atau secara umum dinyatakan sebagai:

$$Y_{ij} = \text{integer} [Y_{min}, Y_{max}] \quad (13)$$

- (b) Ekstraksi airtanah harus mengakibatkan penurunan MAT signifikan yang diamati pada sumur pantau, dengan penurunan MAT yang disyaratkan (Δh_{aij}) minimum 3 m, yang dinyatakan sebagai:

$$\Delta h_{ij} > \Delta h_{aij} \quad (14)$$

- (c) Jumlah *drain hole* harus kurang dari jumlah *drain hole* total yang diizinkan (DH_{tot}), yaitu 5 buah, yang dinyatakan sebagai:

$$DH_n < DH_{tot} \quad (15)$$

- (d) Panjang *drain hole* individu dibatasi antara panjang minimal ($L_{min} = 10 \text{ m}$) dan ($L_{max} = 100 \text{ m}$), yang dinyatakan sebagai:

$$L_{min} < L_{ij} < L_{max} \quad (16)$$

(e) Jarak antar *drain hole* harus lebih besar dari jarak minimum yang diperbolehkan ($S_{min} = 40 \text{ m}$), agar *drain hole* tidak mengelompok dalam lokasi tertentu, yang dinyatakan:

$$S_{ij} > S_{min} \quad (17)$$

Prosedur optimasi dengan GA dan kombinasinya dengan simulasi model airtanah secara rinci dijelaskan oleh [50].

2.4.4 Kerangka Kerja Desain Rekayasa – Model Aliran Airtanah

Aliran airtanah di dalam media berkekar dinyatakan:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) \mp W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (18)$$

di mana K_{xx} , K_{yy} , dan K_{zz} adalah konduktivitas hidrolik [$L.T^{-1}$], dalam arah X , Y , dan Z ; h adalah *head* airtanah [L]; W adalah *sink / source flux* [T^{-1}]; S_s adalah koefisien penyimpanan spesifik [L^{-1}] dan t adalah waktu [T]. Persamaan (18) berlaku untuk aliran 3D anisotropik dalam masing-masing blok atau *model grid*. Pada kasus ini, konduktivitas hidrolik dianggap isotropis di masing-masing blok mengikuti [39,50], namun bersifat anisotropis dalam *model domain*, jadi persamaan (18) dimodifikasi dengan mempertimbangkan [39,50] menjadi:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \mp W = \frac{S_s}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (19)$$

Formula debit dari *drain hole* yang digunakan dalam kasus ini mengikuti [53] dan dinyatakan sebagai berikut:

$$QD_{i,j,k} = CD_{i,j,k}(h_{i,j,k} - d_{i,j,k}), h_{i,j,k} > d_{i,j,k} \quad (20)$$

$$QD_{i,j,k} = 0, h_{i,j,k} < d_{i,j,k} \quad (21)$$

di mana $QD_{i,j,k}$; $CD_{i,j,k}$; $h_{i,j,k}$; dan $d_{i,j,k}$ masing-masing adalah parameter *drain hole* terkait dengan: debit [$L.T^{-1}$], konduktansi [$L^2.T^{-1}$], *head* [L], dan elevasi [L]. Simulasi model airtanah dan optimasi dengan GA (GWSim-GA SO) dilakukan secara multi-tahap, simultan dan berulang kali. Penjelasan yang lebih rinci diberikan dalam [50].

2.4.5 Kerangka Kerja Desain Rekayasa – Model Ketidakpastian

Pemodelan distribusi spasial konduktivitas hidrolik serta parameter hidrolik lainnya dilakukan untuk memberi nilai parameter hidrolik pada setiap *model grid* dalam *model domain*. Pemodelan rinci tidak dijelaskan di sini, namun dapat dirujuk pada [44,48,49].

2.4.6 Kerangka Kerja Desain Rekayasa – Model Keandalan

Pada kasus ini tidak dilakukan pemodelan keandalan sistem *drain hole* sebagai sistem rekayasa, padamana dianggap bahwa sistem *drain hole* akan selalu dapat bekerja, bila posisi MAT alamiah selalu lebih tinggi dari posisi *drain hole*, dan sebaliknya, karena sistem *drain hole* bekerja secara gravitasi. Memang aliran airtanah dalam media berkekar sering kali tidak kontinu, masalah ini akan dikembangkan dalam riset selanjutnya.

2.4.7 Desain Rekayasa sebagai Solusi Masalah Terbaik

Kandidat lokasi *drain hole* terletak di sepanjang garis kaki lereng, memanjang dari Selatan ke Utara, dari $Y_{min} = 0 \text{ m}$ sampai $Y_{max} = 150 \text{ m}$, dengan nilai X dan Z yang sama. Oleh karena itu, setiap titik di sumbu Y dari *model grid* sepanjang garis kaki lereng adalah lokasi yang memungkinkan sebagai kandidat lokasi *drain hole* yang ditentukan menggunakan metode GWSim-GA SO muti-tahap.

Tahap pertama GWSim-GA SO multi-tahap dilakukan untuk mencari solusi variabel keputusan optimal, di antaranya adalah: jumlah *drain hole* (minimum), jarak antar *drain hole* (optimum) dan lokasi *drain hole* (optimum) yang menghasilkan penurunan MAT atau tekanan pori (maksimum), sedangkan pada tahap kedua, variabel keputusan yang dicari adalah panjang *drain hole* total (minimum).

Pada tahap pertama dilakukan optimasi untuk memenuhi fungsi tujuan pertama, yang dikerjakan dalam beberapa generasi populasi sampai dengan diperoleh lokasi *drain hole* yang optimal. Lokasi kandidat *drain hole* dinyatakan dalam bentuk kromosom, yang selalu muncul pada masing-masing generasi populasi, dan mewakili kandidat lokasi *drain hole* yang optimal pada generasi tersebut. Proses GWSim-GA SO tahap pertama dengan lima generasi populasi, menghasilkan tiga kandidat lokasi *drain hole* optimal

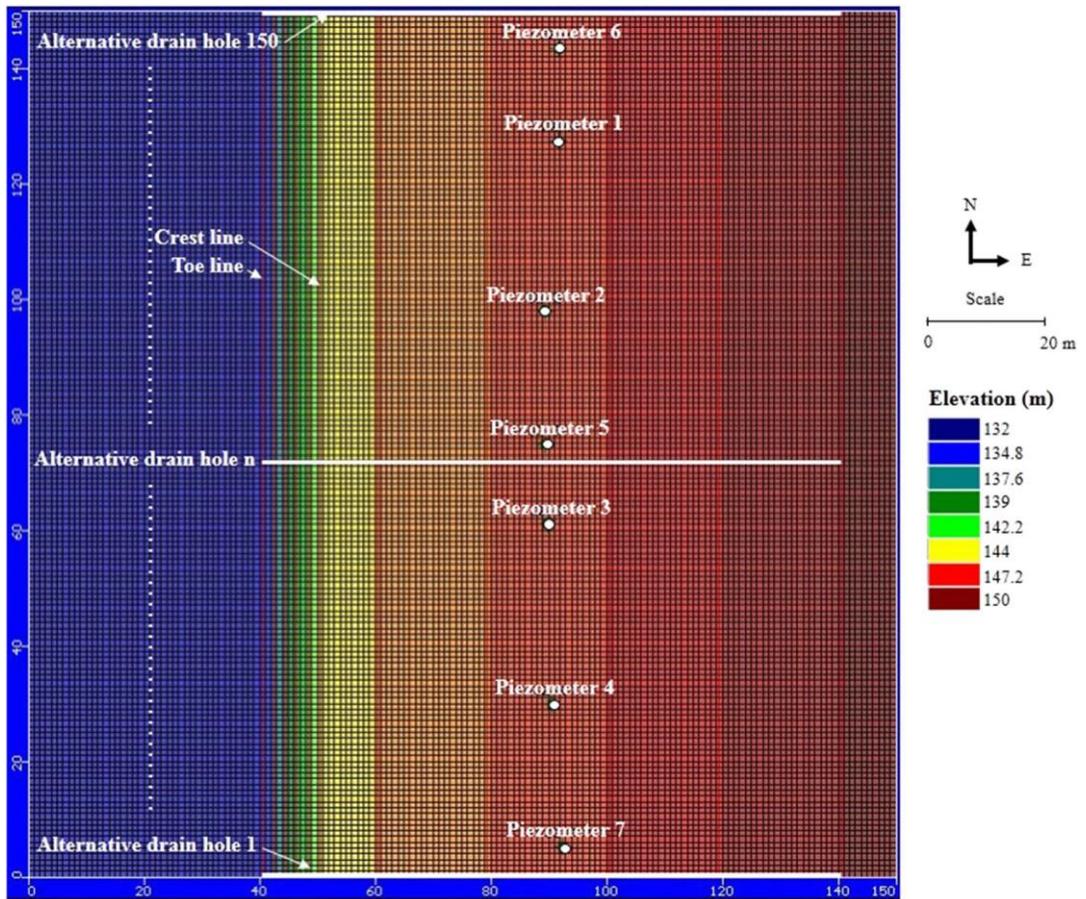
dengan koordinat masing-masing adalah: (40,126,133), (40,75,133) dan (40,26,133), yang mengakibatkan ekstraksi airtanah maksimum dan menyebabkan penurunan MAT maksimum, yang dipantau pada sumur pantau 2, 4 dan 5 (Gambar 8). Tiga *drain hole* optimal yang menyebabkan penurunan MAT maksimum akhirnya dipilih sebagai hasil dari tahap pertama GWSim-GA SO multi-tahap.

Tahap kedua GWSim-GA SO multi-tahap adalah menentukan panjang *drain hole* individu berdasarkan fungsi tujuan kedua, yang dibatasi oleh kendala panjang masing-masing *drain hole*. Jika tahap pertama dikaitkan dengan kromosom yang mengandung informasi genetik untuk lokasi (atau koordinat) kandidat *drain hole* dan terkait ekstraksi airtanah, maka pada tahap kedua, kromosom dikaitkan dengan informasi genetik, yaitu panjang kandidat *drain hole* individu.

Pada tahap pertama, kromosom (X, Y_n, Z) disimulasikan menggunakan Visual ModFlow untuk menghasilkan penurunan MAT maksimum dengan kromosom berikut $[\Delta H_{ns1}, (X, Y_n, Z)]$. Pada tahap kedua, ketiga kromosom berikut: $[(40,126,133), L_1]$, $[(40,75,133), L_2]$, dan $[(40,26,133), L_3]$, dengan masing-masing panjang *drain hole*-nya, disimulasikan menggunakan Visual ModFlow untuk menghasilkan ekstraksi airtanah dengan kromosom $[\Delta H_{ns2}, (X, Y_n, Z), L_n]$ pada tiga kandidat *drain hole*: $[\Delta H_{ns2}, (40,126,133), L_1]$, $[\Delta H_{ns2}, (40,75,133), L_2]$, dan $[\Delta H_{ns2}, (40,26,133), L_3]$. Akhirnya diperoleh kromosom yang mengandung variabel keputusan desain rekayasa optimal, yaitu masing-masing adalah (Gambar 8): *drain hole* 1: $[\Delta H_{ns2} = 8.9 \text{ m}, (40,126,133), L_1 = 98 \text{ m}]$, *drain hole* 2: $[\Delta H_{ns2} = 7.2 \text{ m}, (40,75,133), L_2 = 80 \text{ m}]$, *drain hole* 3: $[\Delta H_{ns2} = 6.7 \text{ m}, (40,26,133), L_3 = 83 \text{ m}]$. Pada solusi optimal, maka variabel keputusan optimal yang dihasilkan adalah sebagai berikut:

- Jumlah *drain hole* : 3 buah
- Lokasi *drain hole* : (40,126,133), (40,75,133) dan (40,26,133)
- Panjang *drain hole* total : 98 m + 80 m + 83 m = 261 m (minimal)
- Penurunan MAT : 8.9 m; 7.2 m; dan 6.7 m (maksimal)

Penurunan MAT merupakan capaian dari fungsi tujuan pertama, yaitu memaksimalkan manfaat. Sedangkan panjang *drain hole* total merupakan capaian dari fungsi tujuan kedua, yaitu meminimalkan biaya.



Gambar 8 Lokasi *Drain Hole* dan Sumur Pantau (*Piezometer*).

2.5 Analisis Ketidakpastian pada Sistem Rekayasa Airtanah

Variasi parameter *input* akan mengakibatkan variasi respons sistem rekayasa airtanah. Hal ini berakibat kepada ketidakpastian kinerja dan kemudian ketidakpastian keandalan sistem rekayasa airtanah.

Contoh, luncuran lumpur (*mud rush*) pada tambang *block caving* disebabkan oleh akumulasi material halus dan air di dalam *drawbell* dengan *drawpoint* terkait. Untuk mendeteksi bahaya luncuran lumpur, dalam kaitannya dengan masalah keselamatan kerja (*safety*), PT Freeport Indonesia (PTFI) saat ini menggunakan klasifikasi lumpur yang dikembangkan oleh [54] untuk menentukan status *drawpoint* (Gambar 9). Klasifikasi lumpur menurut [54] terdiri atas sembilan kombinasi *input*, masing-masing dari tiga kelas material halus (ukuran butir) dan tiga kelas air (kandungan air) untuk

mengidentifikasi salah satu dari tiga status prediksi *drawpoint*, yaitu: risiko rendah/tidak ada masalah, risiko sedang/perlu perhatian, atau risiko/bahaya tinggi.

Tujuan dari contoh kasus yang dikutip dari [21] ini adalah memberi ilustrasi penerapan analisis ketidakpastian respons sistem rekayasa airtanah akibat variasi parameter *input*, dalam hal ini adalah ukuran butir material halus dan kandungan air atau kadar air yang nilainya masing-masing diberikan dalam rentang tertentu, yang akan mengakibatkan variasi respons sistem rekayasa airtanah, dalam hal ini adalah karakter dan jumlah lumpur di dalam *drawbell*.

Wetness / Water Content		Grain size ≥ 5 cm		
		$M \geq 70\%$ (coarser grain)	$30\% < M \leq 70\%$ (medium grain)	$M \leq 30\%$ (finer grain)
Dry	< 8.5 %	A1	B1	C1
Moist	8.5 % - 11.0 %	A2	B2	C2
Wet	> 11 %	A3	B3	C3

Low risk	: mucking is operated using any loader
Medium risk	: mucking is operated using any loader with close supervision
High risk	: mucking has to be operated using a remote loader

Gambar 9 Klasifikasi Lumpur

2.5.1 Deskripsi dan Definisi Masalah

Inti masalah di dalam kasus ini adalah bagaimana memperkirakan karakter lumpur dan jumlahnya pada waktu tertentu di dalam *drawbell* berdasar *input* yang sifatnya bervariasi atau tidak pasti.

Drawbell dengan *drawpoint* terkait biasanya cukup banyak dan terdistribusi secara spasial pada level produksi tambang *block caving*. Pemodelan spasial karakter lumpur di dalam semua *drawbell* dilakukan dengan menggunakan operasi logika *fuzzy* atau *fuzzy logic operation* (FLO) berdasarkan dugaan faktor penyebab terjadinya lumpur yang kemudian ditetapkan sebagai *input*. FLO memungkinkan untuk menggabungkan penilaian atau pendapat ahli dengan ketidakpastian untuk memetakan/mengkorelasi hubungan antara faktor yang dianggap berkontribusi kepada karakter lumpur. Model FLO spasial digunakan untuk memperkirakan distribusi karakter lumpur di dalam *drawbell* pada waktu tertentu untuk menentukan status *drawpoint* terkait, yang pada dasarnya memberikan

ukuran kualitatif dari *drawpoint* tersebut yang menunjukkan kondisi yang diperlukan untuk terjadinya luncuran lumpur (*safety status*).

Pemodelan temporal dilakukan berdasar prinsip neraca massa, yang menyatakan perbedaan antara massa yang masuk ke dalam *drawbell* dan massa yang ditarik atau keluar dari *drawbell* melalui *drawpoint* terkait dalam interval waktu tertentu. Prinsip neraca massa dapat dijelaskan menggunakan ekspresi matematis yang melibatkan operasi bilangan *fuzzy* atau *fuzzy number operation* (FNO), yang digunakan pada *ordinary differential equation* (ODE) membentuk *fuzzy ordinary differential equation* (FODE). Persamaan ini cocok digunakan untuk memodelkan variabel dengan ketidakpastian, seperti klasifikasi lumpur yang dikembangkan oleh [54], yang menyatakan variasi ukuran butir material halus dan data kadar air yang diamati pada *drawpoint*. Dengan menyelesaikan FODE, jumlah endapan lumpur di dalam *drawbell* dalam interval waktu tertentu dapat diperkirakan. Prosedur ini dapat diterapkan untuk semua *drawbell*, yang mengarah kepada distribusi spasial perkiraan endapan lumpur di semua *drawbell* dalam interval waktu tertentu, yang pada dasarnya memberikan ukuran kuantitatif *drawpoint* yang menunjukkan kondisi yang cukup untuk terjadinya luncuran lumpur.

Di dalam kasus ini dapat disimpulkan, bahwa prediksi karakter lumpur dengan ketidakpastian bersifat kualitatif dan diselesaikan menggunakan FLO, sedangkan prediksi jumlah lumpur dengan ketidakpastian bersifat kuantitatif dan diselesaikan menggunakan FNO.

2.5.2 Desain Rekayasa sebagai Solusi Masalah

Kasus ini hanya memberi contoh prediksi dengan ketidakpastian, yang selanjutnya akan digunakan untuk mendesain langkah mitigasi bahaya luncuran lumpur dalam kaitannya dengan *safety*. Rincian desain langkah mitigasi, yang biasanya sekaligus merupakan penjadwalan produksi tidak diberikan disini.

2.5.3 Kerangka Kerja Desain Rekayasa – Model Ketidakpastian

Komponen kerangka kerja desain rekayasa terdiri dari: model keputusan, model aliran aliran airtanah, model ketidakpastian, dan model keandalan. Dalam kaitannya dengan kasus ini, hanya diberikan contoh terkait kerangka

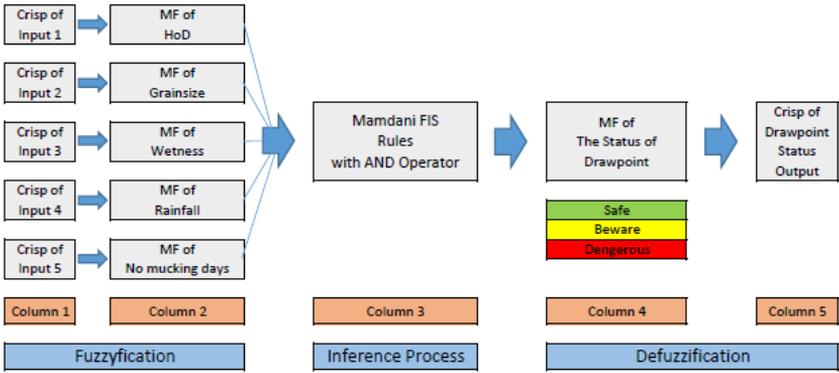
model ketidakpastian, dalam hal ini analisis ketidakpastian yang dilakukan menggunakan metode berbasis *fuzzy*.

Penentuan status *drawpoint* di PTFI mengikuti rekomendasi [54], hanya mempertimbangkan dua faktor kontribusi lumpur (*input*), yaitu (a) material halus, dan (b) air. Menurut [21] beberapa faktor tambahan juga diduga berkontribusi pada lumpur, yaitu: (c) tidak ada atau kurangnya produksi (*mucking*), (d) curah hujan, dan (e) ketinggian penarikan atau *height of draw* (HoD). Untuk menentukan hubungan antara faktor penyebab, karakter dan jumlah lumpur, dilakukan analisis komponen utama, analisis korelasi, dan survei pendapat ahli. Dengan demikian, dapat diduga ada lima faktor utama (*input*) yang memengaruhi karakter dan jumlah lumpur, yaitu: (a) material halus, (b) air, (c) HoD, (d) curah hujan, dan (e) jumlah hari tanpa produksi. Lima faktor yang berkontribusi ditetapkan sebagai *input* sedangkan *output*-nya adalah status *drawpoint* yang menyatakan tingkat bahaya atau risiko luncuran lumpur secara kualitatif, yaitu: risiko rendah, sedang, atau tinggi, yang menunjukkan kondisi yang diperlukan untuk terjadinya luncuran lumpur.

Satu set *fuzzy* (FS) dan satu *fuzzy membership function* (FMF) dibuat untuk masing-masing dari lima faktor yang berkontribusi pada karakter lumpur di dalam *drawbell* yang dipandang sebagai parameter *input*. Pemetaan ruang (parameter) *input* kepada ruang (parameter) *output* dilakukan menggunakan inferensi *fuzzy* seperti yang diilustrasikan secara skematik oleh Gambar 10. Proses inferensi dilakukan menggunakan FLO melalui serangkaian aturan yang menggabungkan FMF dari setiap himpunan *fuzzy* menggunakan operator AND, sehingga menghasilkan ruang *output* dalam bentuk FMF dari status *drawpoint*. Distribusi lumpur di dalam *drawbell* pada waktu tertentu dapat dianalisis menghasilkan distribusi spasial status *drawpoint*.

Proses akumulasi endapan lumpur dan air dalam *drawbell* secara konseptual dapat dideskripsikan sebagai berikut. Lumpur didefinisikan sebagai campuran yang terbentuk oleh material halus dan air di dalam tambang *block caving*. Material halus menyerap air hingga mencapai batas cairnya [19,21]. Dengan bertambahnya jumlah hari tanpa produksi dan curah hujan yang meningkat menyebabkan campuran tersebut kemudian mulai menumpuk di dalam *drawbell*, membentuk endapan lumpur dan air, yang dapat menyumbat *drawpoint* terkait dan oleh karenanya mencegah endapan

lumpur dan air melewati *drawpoint* tersebut, sehingga dapat mengakibatkan peningkatan endapan lumpur dan air lebih banyak lagi. Hal ini menyebabkan material dan endapan lumpur di *drawbell* terkonsolidasi dan karenanya cenderung meningkatkan derajat kejenuhan. Pada akhirnya, hal ini dapat mengubah status *drawpoint* dari lembap menjadi basah. Jika kejenuhan terlampaui, maka material halus berhenti menyerap air. Selanjutnya, bahan yang lebih halus dapat terencerkan di dalam air, membentuk padatan tersuspensi di dalam air di bagian atas endapan lumpur. Padatan tersuspensi yang kurang terkonsentrasi dalam air dapat mengapung lebih tinggi karena efek apung. Karena lebih banyak air dengan konsentrasi padatan tersuspensi rendah atau air jernih di bagian atas, endapan lumpur terus berkembang, karena tidak ada atau sedikit produksi dalam masa dengan curah hujan sedang hingga tinggi, air dapat melimpah ke dalam beberapa *drawbell* di dekatnya, membentuk sekelompok *drawbell* jenuh yang saling terhubung.



Gambar 10 Skema Inferensi Fuzzy dengan FLO

Potensi luncuran lumpur ditentukan berdasarkan [19] dan didefinisikan sebagai kekuatan pendorong (*driving force*) yang dapat menyebabkan endapan lumpur dan air di dalam *drawbell* mengalir deras atau meluncur melalui *drawpoint* terkait. Jumlah endapan lumpur dan air di dalam *drawbell* dapat dinyatakan berdasar neraca massa di dalam *drawbell* pada waktu tertentu, yaitu perubahan sementara antara massa yang masuk ke dalam *drawbell* dan massa yang keluar dari *drawpoint* terkait. Ini mencakup perubahan sementara antara air yang masuk ke dalam *drawbell* dan air yang mengalir keluar dari *drawpoint* terkait serta air yang melimpah ke dalam *drawbell* terdekat. Tidak ada atau kurangnya produksi akan menyebabkan akumulasi massa, yaitu endapan lumpur dan air di dalam *drawbell*, dan oleh karenanya, akan meningkatkan potensi luncuran lumpur.

Kuantitas endapan lumpur dan air di dalam *drawbell* atau di atas *drawpoint* terkait dapat ditetapkan secara eksak, baik dengan maupun tanpa mengandung ketidakpastian. Oleh karena itu, semua perhitungan neraca massa di dalam *drawbell* dilakukan dengan menggunakan semua informasi dan data yang diukur pada *drawpoint* dan dikumpulkan pada *drawpoint* terkait.

Berikut ini diberikan contoh pemodelan matematis variasi lumpur mengikuti [19,21] berdasarkan prinsip neraca massa, yang menyatakan akumulasi massa di dalam *drawbell* dalam interval waktu tertentu. Neraca massa material (batuan) dinyatakan sebagai:

$$\frac{\partial M_f}{\partial t} = M_{in} \cdot C_{in} - M_{out} \cdot C_{out} \quad (22)$$

Padamana M_{in} , M_{out} , C_{in} dan C_{out} masing-masing adalah perkiraan massa material total, termasuk material halus masuk ke dalam *drawbell* (ton/hari); massa material total terukur, termasuk material halus keluar dari dalam *drawbell* (ton/hari); perkiraan fraksi massa material halus (%) masuk ke dalam *drawbell*; dan fraksi massa material halus (%) berdasar observasi pada *drawpoint*. Jika C_{in} diasumsikan sama dengan C_{out} , maka persamaan (22) dapat disederhanakan menjadi :

$$\frac{\partial M_f}{\partial t} = (M_{in} - M_{out}) \cdot C_{out} \quad (23)$$

Untuk menyatakan neraca massa air di dalam *drawbell*, perlu diasumsikan bahwa: (1) material halus adalah satu-satunya material yang menyerap air, (2) air yang terserap dalam bongkahan batu dan massa batuan dapat diabaikan, dan (3) kehilangan air karena penguapan dapat diabaikan. Dengan demikian, neraca massa air yang terserap oleh material dalam *drawbell* kering atau lembab dapat dinyatakan sebagai:

$$\rho_w \frac{\partial V_{aw}}{\partial t} = (M_{in} - M_{out}) \cdot C_{out} \cdot \theta_{out} \quad (24)$$

di mana V_{aw} , ρ_w dan θ_{out} masing-masing adalah volume air terserap (m^3); massa jenis air (ton/m^3) dan kadar air dalam material (%). Pada kondisi ini tidak ada air di atas endapan lumpur, yaitu untuk *drawbell* yang kering dan lembab, selanjutnya diperlukan pemodelan yang lebih rinci pada kondisi di mana terdapat air di atas endapan lumpur di dalam *drawbell* untuk jenis *drawbell* basah dan kelompok *drawbell* basah, dan ini tidak diberikan disini, namun dapat dirujuk pada [21].

Kedua persamaan ODE di atas bersifat deterministik dengan solusi tunggal tanpa ketidakpastian. Bila beberapa parameter yang terlibat di dalam persamaan di atas mengandung ketidakpastian, maka kedua persamaan ODE di atas dapat dinyatakan menggunakan FNO menjadi FODE sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \widehat{M}_f}{\partial t} &= \{\widehat{M}_{in}[a_1, b_1, c_1] - \widehat{M}_{out}[a_2, b_2, c_2]\} \cdot \widehat{C}_{out}[a_3, b_3, c_3] \\ \frac{\partial \widehat{M}_f}{\partial t} &= \Delta \widehat{M}_f[a_m, b_m, c_m]\end{aligned}\quad (25)$$

Persamaan (25) menyatakan model neraca massa batuan di dalam *drawbell* dengan ketidakpastian, yang berasosiasi dengan persamaan (23). Padamana a, b, c di dalam kurung [] masing-masing menyatakan nilai batas bawah (nilai minimum), nilai yang paling mungkin (nilai rata-rata atau modus) dan nilai batas atas (nilai maksimum). Berikut ini adalah model neraca massa air di dalam *drawbell* dengan ketidakpastian yang berasosiasi dengan persamaan (24).

$$\begin{aligned}\rho_w \frac{\partial \widehat{V}_{aw}}{\partial t} &= \{\widehat{M}_{in}[a_1, b_1, c_1] - \widehat{M}_{out}[a_2, b_2, c_2]\} \cdot \widehat{C}_{out}[a_3, b_3, c_3] \cdot \\ &\quad \widehat{\theta}_{out}[a_4, b_4, c_4]. \\ \rho_w \frac{\partial \widehat{V}_{aw}}{\partial t} &= \Delta \widehat{M}_w[a_n, b_n, c_n]\end{aligned}\quad (26)$$

FODE (25) dan (26) menggunakan fungsi segitiga untuk menyatakan FMF. Semua parameter input pada FODE (25) dan (26) bervariasi, atau mengandung ketidakpastian, sedangkan masa jenis air (ρ_w) merupakan parameter input yang nilainya dianggap konstan atau pasti, atau tidak bervariasi secara signifikan. FODE (25) dan (26) berlaku untuk *drawbell* kering dan lembap. FODE untuk *drawbell* basah dan kelompok *drawbell* basah tidak diberikan di sini dan dapat dirujuk pada [21].

2.5.4 Verifikasi Model

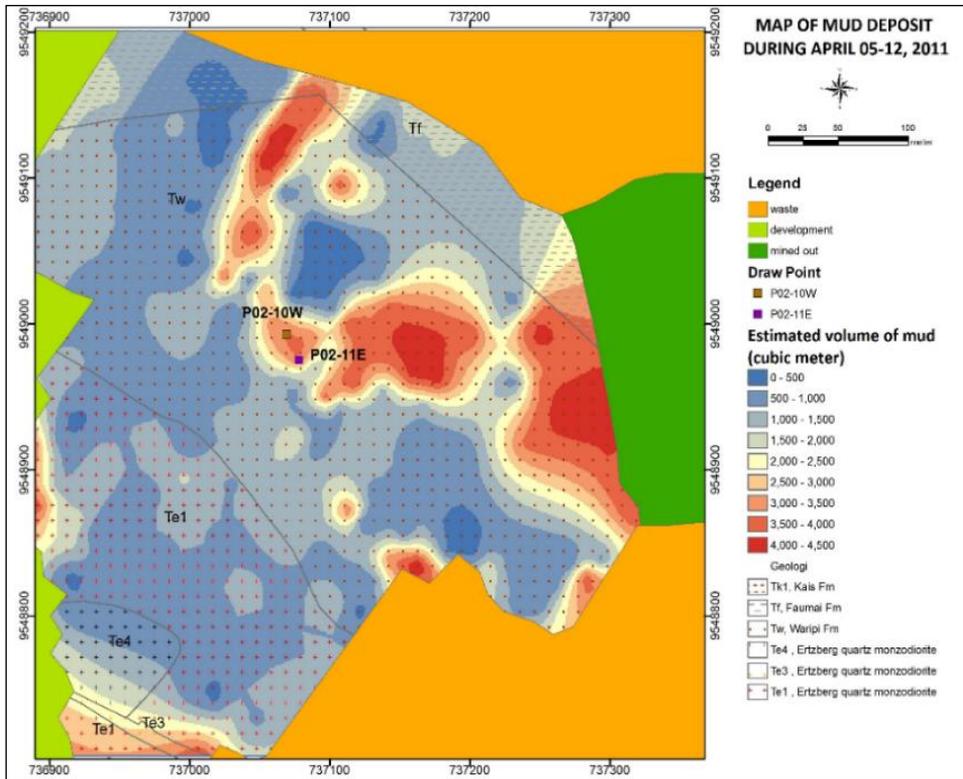
Model ketidakpastian diverifikasi dengan cara membandingkan kinerjanya kepada luncuran lumpur yang terjadi pada salah satu tambang PTFI, yaitu tambang *deep ore zone* (DOZ). Hasil verifikasi menunjukkan bahwa model cenderung bersifat *underestimate* dalam memprediksi jumlah lumpur di dalam *drawbell*. Namun secara keseluruhan akurasi model ketidakpastian dapat diterima.

2.5.5 Hasil Prediksi dengan Ketidakpastian

Gambar 11 menggambarkan distribusi karakter lumpur secara kualitatif di dalam *drawbell* yang menyatakan status *drawpoint* terkait, dan dihasilkan menggunakan FLO. Sedangkan Gambar 12 menggambarkan distribusi spasial perkiraan jumlah lumpur di dalam *drawbell* yang dihasilkan menggunakan FNO.

Panel	P #1F	P #1E	P #1D	P #1C	P #1B	P #1A	P #1	P #2	P #3	P #4	P #5	P #6	P #7	P #8	P #9	P #10	P #11	Panel	
D/P	W	E	W	E	W	E	W	E	W	E	W	E	W	E	W	E	W	E	D/P
0	Y	Y	Y		R					Y									0
1	Y	Y	Y	Y	Y	Y	R	Y	R	Y	R	Y	R	Y					1
2	G	Y	Y	Y	R	Y	Y	Y	R	R		G							2
3	Y	Y	Y	R	Y	Y	Y	R	R	Y									3
4	G		Y	Y	Y	Y	Y	R	R	R	Y	R							4
5	G			Y	Y	Y	R		R	G	G								5
6					Y	Y	R		R	G	G								6
7					Y	Y	Y		R										7
8					Y	Y	Y		R										8
9		G			Y	Y	Y	Y	R	G		G	R	R	Y	Y	Y	Y	9
10					Y	Y		Y	G	G	R	R	R	G	Y	Y	Y		10
11			G	G	G			Y	Y	R	R	R	G	Y	Y	Y			11
12				G	G			Y	Y	R	R	R	R	G	Y	Y			12
13				Y	Y			Y	Y		R	Y	R	Y	Y				13
14					Y			Y	Y		Y	R	R	Y	Y				14
15								Y	Y		Y	R	R	Y	Y				15
16					G			G	G	Y	Y		Y	Y	Y	R	Y		16
17					G	G		Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	R	Y	Y	17
18					G			G	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	R	Y	Y	18
19					G	G	G	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	19
20					G	G	G	G	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	20
21								G	Y	Y	Y		Y	Y	Y	Y	Y	Y	21
22									Y				Y	Y	Y	Y	Y	Y	22
23									G	G									23
24									G	G				G					24
25										G									25
26																			26
27	Note				G														27
28					Y														28
29					R														29
30																			30
31																			31
D/P	W	E	W	E	W	E	W	E	W	E	W	E	W	E	W	E	W	E	D/P
Panel	P #1F	P #1E	P #1D	P #1C	P #1B	P #1A	P #1	P #2	P #3	P #4	P #5	P #6	P #7	P #8	P #9	P #10	P #11	Panel	

Gambar 11 Distribusi Status *Drawpoint*



Gambar 12 Distribusi Spasial Perkiraan Jumlah Lumpur dalam *Drawbell*

3 PENUTUP DAN PENGEMBANGAN

Hidrogeologi untuk Rekayasa atau disebut Hidrogeologi Rekayasa dan diterjemahkan sebagai *Engineering Hydrogeology* dapat dipandang sebagai implementasi dari konsep, kaidah, prinsip, prosedur, dan kerangka kerja rekayasa pada konteks sistem airtanah atau sistem geofluida (lingkungan Hidrogeologi), sebagai sebuah sistem alamiah (*natural system*) sekaligus sistem rekayasa (*engineering system*). Hidrogeologi Rekayasa menawarkan infrastruktur pengetahuan dan ketrampilan bagi calon rekayasawan tentang bagaimana menyelesaikan permasalahan sistem airtanah dengan rekayasa (*problem solving*). Permasalahan sistem airtanah itu sendiri timbul umumnya akibat aspek negatif sistem airtanah, merespons kegiatan Rekayasa Kebumihan atau kegiatan manusia lainnya yang dilakukan pada sistem airtanah. Aspek negatif airtanah umumnya diakibatkan adanya perubahan komponen utama (*major*) lingkungan Hidrogeologi, yaitu: (1) perubahan media aliran dan (2) perubahan alirannya sendiri, serta komponen minor lingkungan Hidrogeologi, yaitu: (3) perubahan tekanan di dalam sistem airtanah; (4) perubahan kimia dan (5) perubahan termal, akibat Rekayasa Kebumihan dan Rekayasa Airtanah dan lainnya.

Pada Hidrogeologi Rekayasa, lingkungan Hidrogeologi atau lebih tepatnya airtanah, dipandang merupakan sistem alamiah sekaligus sistem rekayasa padamana pengelolaan, pengaturan dan intervensi rekayasawan dilakukan melalui kegiatan yang sistematis dan terukur, melalui perencanaan (*planning*) dan desain atau perancangan (*design*) serta implementasinya yang bersifat siklus, karena adanya kemungkinan perbaikan berkelanjutan (*continuous improvement*) atas usulan solusi rekayasa sebelumnya. Perencanaan dan desain dalam Hidrogeologi Rekayasa dapat berdiri sendiri atau mandiri, dalam bentuk introduksi teknologi dalam Hidrogeologi Rekayasa yang terpisah dari Rekayasa Kebumihan, Rekayasa Airtanah dan kegiatan manusia lainnya, demikian juga dapat diintegrasikan ke dalam perencanaan dan desain di dalam Rekayasa Kebumihan, Rekayasa Airtanah dan kegiatan manusia lainnya secara menyeluruh. Proses desain rekayasa sering digambarkan sebagai urutan pengambilan keputusan diantara beberapa alternatif desain rekayasa dalam kondisi ketidakpastian. Oleh karena itu keilmuan dan keahlian yang bercirikan rekayasa membutuhkan pengetahuan tentang proses pengambilan keputusan (*decision making*). Risiko kegagalan

sistem rekayasa umumnya diakibatkan oleh adanya ketidakpastian pada parameter-parameter sistem alamiah dan sistem rekayasa, yang dievaluasi secara teknis, lingkungan, ekonomi, hukum, sosial, dan politik.

Dengan infrastruktur keilmuan dan keahlian Hidrogeologi Rekayasa yang semakin mapan, dimungkinkan melakukan pengembangan keilmuan inti yang unggul relatif terhadap bidang lain, pengembangan tekno-ekonomi dengan titik berat pada risiko yang makin tinggi akibat ketidakpastian dan *volatility* perekonomian. Pengembangan dilakukan karena sifat solusi masalah (dengan) rekayasa atau *problem solving* dalam kaitannya dengan perolehan sumber daya bumi, Rekayasa Kebumihan serta penanganan masalah lingkungan di masa depan dengan ciri-ciri: (1) akses sumber daya bumi akan semakin dalam dan hanya dapat dilakukan melalui pemboran; (2) ketidakpastian yang semakin besar, dengan kadar (*grade, content, resource*) yang semakin kecil atau marjinal dalam perolehan sumberdaya bumi; (3) kegiatan perolehan sumberdaya bumi semakin bersifat *high risk, capital-science-skill intensive*; (4) Rekayasa Kebumihan yang menyebabkan perubahan media aliran masif; (5) penanganan masalah lingkungan dengan penempatan material sisa, sampah beracun dan beradioaktif ke dalam media geofluida. Beberapa ciri masalah di masa depan ini menyebabkan solusi masalah rekayasa di masa depan harus dikerjakan secara bersama, sehingga semakin membuka ruang multi-disiplin, kerja sama dengan bidang lainnya sebagai bentuk kontribusi Hidrogeologi Rekayasa.

Sebagai contoh, perolehan gas alam dari sumber daya hidrokarbon non-konvensional, misalnya dari ekstraksi *coal bed methane* (CBM) dan gasifikasi batubara bawah tanah (UCG) serta lainnya. Dalam masalah Rekayasa Kebumihan, penambangan bawah tanah skala besar, infrastruktur bawah tanah skala besar yang merubah media aliran secara masif. Terkait masalah lingkungan, misalnya injeksi karbon dioksida melalui kegiatan *carbon captured and sequestration* (CCS), injeksi material toksik ke dalam media aliran geofluida, penempatan sampah beradioaktif bawah tanah. Beberapa contoh ini sangat membutuhkan kontribusi Hidrogeologi Rekayasa, sehingga Hidrogeologi Rekayasa harus mengembangkan keilmuan yang menjadi keunggulan komparatifnya yang tidak menjadi fokus bidang keilmuan dan keahlian lainnya.

DAFTAR RUJUKAN

- [01] Meredith, D.D.; Wong, K.W.; Woodhead, R.W.; Wortman R.H. (1985). "Design and Planning of Engineering System". Prentice-Hall Inc, Englewood Clifts, New Jersey.
- [02] Freeze, R.A.; Massmann, J.; Smith, L.; Sperlinga, T.; and James, B. (1990). "Hydrogeological Decision Analysis: 1. A Framework". Groundwater, Vol. 28, No. 5, pp. 738-766.
- [03] Dandy, G.;Walker, D.; Daniell, T. and Warner R. (2008). "Planning and Design of Engineering Systems 2nd Edition". Taylor and Francis Group, London and New York.
- [04] NASA (2007). "NASA Systems Engineering Handbook". NASA/SP-2007-6105.
- [05] **Widodo, L.E.** (2013). "Introduction to The Concept of System Approach to Mining Hydrogeological Problems". Prosiding Seminar Temu Profesi Tahunan XXII Perhimpunan Ahli Pertambangan Indonesia, halaman 17-23.
- [06] **Widodo, L.E.** (2015). "Mining Hydrogeological Problems in Underground Excavation of Vein-Typed Gold Deposit under Hydraulic Inter-Connection with Surface Water Body – 1. The Concept and Frame Work". Prosiding TPT XXIV PERHAPI, Jakarta, halaman 348-354.
- [07] **Widodo, L.E.** (2016). "Mining Hydrogeological Problems in Underground Excavation of Vein-Typed Gold Deposit under Hydraulic Inter-Connection with Surface Water Body – 2. Review of Resource Estimation Principles". Prosiding TPT XXV PERHAPI, Bandung, halaman 48-62.
- [08] **Widodo, L.E.**; Nurcahya,D.T.; Iskandar, I. (2017). "Mining Hydrogeological Problems in Underground Excavation of Vein-Typed Gold Deposit under Hydraulic Inter-Connection with Surface Water Body – 3. Analysis of Groundwater Inflow and Preliminary Scheme of Decision Making Process". Prosiding PIT II PAAI, Yogyakarta, halaman 416-423.
- [09] Nurcahya, D.T.; **Widodo, L.E.**; Iskandar,I. (2017). "Analisis Aliran Airtanah ke dalam Infrastruktur Tambang Bawah Tanah dari Badan Bijih yang Terhubung Hidraulik dengan Air Permukaan dengan Metode

- Elemen Hingga”. Prosiding Seminar Nasional Kebumihan XII, Yogyakarta, halaman 536-544.
- [10] **Widodo, L.E.** (2018), “Conceptual Modeling of Cut off Grade Optimization due to Groundwater Problem in the Underground Mining of Kubang Cicau Vein – Pongkor”. Proceeding of Mining in Asia International Symposium”, tidak dipublikasikan.
- [11] Nurcahya, D.T. dan **Widodo, L.E.** (2021). “Modelling groundwater inflow into an underground mining from ore bodies hydraulically interconnected with surface water”. Proceeding of International Conference on Earth Mineral and Energy Resources 2020, AIP Conference Proceedings 2363, 030013.
- [12] **Widodo, L.E.** (2016), “Pendekatan Rekayasa Sistem pada Pengelolaan Airtanah Kota-kota Besar Indonesia – Sebuah Alternatif – 1. Konsep dan Kerangka Kerja”. Prosiding Seminar PIT I PAAI, Bandung, halaman 430-441.
- [13] Cahyadi, T.A.; **Widodo, L.E.**; Fajar, R.A.; Baiquni, A. (2018). “Influence of Drain Hole Inclination on Drainage Effectiveness of Coal Open Pit Mine Slope”. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 212, 012060.
- [14] Fadhilah, R.; **Widodo, L.E.**; Iskandar, I. (2020). “Pengaruh Jarak Antar Drain Hole Terhadap Penurunan Muka Air Tanah pada Lereng Tambang Terbuka Batubara”. Journal of Science and Applicative Technology, Vol. 4 (2), halaman 116-120.
- [15] Tirtomihardjo, H. (2016). “Groundwater Environment in Bandung, Indonesia” – in S. Shresta, V.P. Pandey, S. Thatikonda (Eds.) “Groundwater Environment in Asian Cities – Concepts, Methods and Case Studies”. Elsevier Inc., pp. 193-228.
- [16] Hutasoit, L.M. (2009). “Groundwater Table Conditions with and without Artificial Infiltration in The Bandung Area: Numerical Simulation Results”. Journal of Indonesian Geology, Vol. 4, No. 3, pp. 177-188.
- [17] Taufiq, A.; Hosono, H.; Ide, K.; Kagabu, M.; Iskandar, I.; Effendi, A.J.; Hutasoit, L.M.; Shimada, J. (2018). “Impact of excessive groundwater pumping on rejuvenation processes in the Bandung basin (Indonesia) as determined by hydrogeochemistry and modeling”. Hydrogeology Journal, 26, pp. 1263-1279.
- [18] Menteri ESDM RI (2017). ”Peraturan Menteri ESDM RI tentang Cekungan Airtanah di Indonesia”.

- [19] **Widodo, L.E.**; Widijanto, E; Iskandar, I.; Notosiswoyo, S (2014). "Modeling Development of Mud Deposit for Assessment of Mud Rush Potential in Block Cave Mine". Proceedings of International Symposium on Earth Science and Technology, Kyushu University, Japan.
- [20] Faadhilah, I; **Widodo, L.E.**; Widijanto, E. (2015). "Modeling Spatial Distribution of Wet Muck Potential Using Fuzzy Logic Case Study - DOZ Mine PT. Freeport Indonesia". Proceedings of International Symposium on Earth Science and Technology, Kyushu University, Japan, pp. 211-216.
- [21] **Widodo, L.E.**; Widijanto, E.; Faadhilah, I.; Sunyoto, W. (2018). "Fuzzy Based Prediction of Spatio-Temporal Distribution of Wet Muck in Block Cave of PT. Freeport Indonesia". Journal of Engineering and Technological Sciences; Vol. 50, No. 2 (2018), pp. 291-313.
- [22] **Widodo, L.E.**; Prasetyo, S.H.; Simangunsong, G.M.; Iskandar, I. (2022). "Role of the confined aquifer in the mechanism of soil liquefaction due to the 7.5 Mw earthquake in Palu (Indonesia) on 28 September 2018". Hydrogeol. J., 30, pp. 1877–1898.
- [23] Biot, M.A. (1941). "General theory of three-dimensional consolidation". Journal of Applied Physics 12, pp.155–164.
- [24] Wang, H.F. (2000). "Theory of linear poroelasticity with applications to Geomechanics and Hydrogeology". Princeton Series in Geophysics, Princeton University Press, Princeton and Oxford.
- [25] Manga, M.; Wang, C.Y. (2015). "Earthquake hydrology". University of California Berkeley, Berkeley, CA, USA.
- [26] Berryman, J.G. (1992). "Effective stress for transport properties of inhomogeneous porous rock". J. Geophys. Res. 97, pp.17409-17424.
- [27] Theis, C.V. (1935). "The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage". Eos, Transactions American Geophysical Union, Vol 16, Issue 2, pp. 519-524.
- [28] Jacob, C.E. (1940). "On The Flow of Water in an Elastic Artesian Aquifer". Eos, Transactions American Geophysical Union, Vol 21, Issue 2, pp. 574-586.
- [29] De Wiest, R.J.M. (1966). "On the Storage Coefficient and The Equations of Groundwater Flow". Journal of Geophysical Research, Vol. 71, No. 4.
- [30] **Widodo, L.E.** (2001). "Modeling Two-Dimensional Fracture Network in Fractured Aquifer using Spreadsheet EXCEL, Proceeding of 10th PERHAPI's Annual Conference.

- [31] **Widodo, L.E.** and Notosiswoyo, S. (2001). "Two-Phase Relative Permeability and Capillary Pressure of Two-Dimensional Fracture Network in Geological Media". JTM, Vol.VIII,No.4.
- [32] Hutasoit, L.M.; Daryono, M.R.; **Widodo, L.E.**; Syaifullah, T. (2010). "Distribusi Vektor Aliran Airtanah Dua Dimensi dalam Media Rekahan di Big Gossan, Tembagapura, Papua". Jurnal Teknik Sipil Vol. 17 No.2.
- [33] Notosiswoyo, S.; Suyono, S.; and **Widodo, L.E.** (2002). "Prediction of Fractured Rock Permeability in Pasir Impun, Bandung, Indonesia (Case: Pasir Impun Sanitary Landfill, Bandung, Indonesia)". Proceeding of Second International Conference on Geotechnical and Geoenvironmental Engineering in Arid Lands, Riyadh, A.A. Balkema, Lisse.
- [34] Oda, M. (1985). "Permeability Tensor for Discontinuous Rock Masses.-Geo-technique". Vol. 35(4), p. 483-495.
- [35] Oda, M.; Kanamaru, M.; Iwashita, K. (1996). "The Effect of Crack Geometry in Hydrodynamic Dispersion in Cracked Media". Soil and Foundations, Vol. 36(2), p. 69-80.
- [36] **Widodo, L.E.** and Indriati, T. (2002). "On The Characterization Of Flow In Three-Dimensional Geological Fractured Media". JTM Volume IX No.3.
- [37] Priest, S.D. (1993). "Discontinuity Analysis for Rock Engineering". First Eddition, Chapman & Hall, London.
- [38] **Widodo, L.E.** and Notosiswoyo, S. (2002). "Prediction of Sea Water Intrusion Potential into The Granite Quarry in Pasir Panjang – Karimun Besar Island". Proceeding of National Seminar on Mining and Energy 2002 at UPN Jogjakarta.
- [39] Hsu, S.; Lo, H.; Chi, S. Ku, C. (2011). "Rock mass hydraulic conductivity estimated by two empirical models". In: Dikinya O (ed). "Developments in hydraulic conductivity research". InTech, New York, pp. 134–158.
- [40] **Widodo, L.E.**; Cahyadi, T.A.; Notosiswojo, S.; Widijanto, E. (2016). "Application of Clustering System to Analyze Geological, Geotechnical and Hydrogeological Data Base according to HC-System Approach". ARMS, 9th Asian Rock Mechanics Sysposium, The Stones Hotel - Bali, A Marriott Autograph Collection Hotel.
- [41] Cahyadi, T.A.; Notosiswoyo, S.; **Widodo, L.E.**; Iskandar, I.; Suyono, S. (2104). "Distribusi Sebaran konduktivitas Hidraulik dari Hasil Uji

- Akuifer – Constant Head Permeability pada Batuan Sedimen Secara Heterogen”. Prosiding TPT XXIII PERHAPI, Makassar, halaman 352-360.
- [42] Cahyadi, T.A.; Iskandar, I.; Notosiswoyo, S.; **Widodo, L.E.** (2015).” Studi Literatur Pendugaan Nilai Konduktivitas Hidraulik dengan Menggunakan Data Uji Hidraulik Lapangan dan Data Logging Geoteknik”. Prosiding Seminar Nasional Kebumihan X, – UPN Veteran Yogyakarta, Yogyakarta, halaman 498-504.
- [43] Iskandar, I.; Wibowo, A.; **Widodo, L.E.**; Casanova, B.; Notosiswoyo, S. (2014). “A 3D Model of Hydraulic Conductivity Distribution of Fractured Rocks using Packer Test Result and Geotechnical Log”. Proceedings of International Symposium on Earth Science and Technology, Kyushu University, Japan.
- [44] Cahyadi, T.A.; **Widodo, L.E.**; Iskandar, I.; Sukaerang, S.; Suyono, S. (2015). “Modeling Spatial Distribution of 3D Isotropic Hydraulic Conductivity based on HC-System for Fractured Groundwater Flow Media using Neural Network Case Study Grasberg Open Pit of PTFI”. Proceedings of International Symposium on Earth Science and Technology, Kyushu University, Japan, pp. 59-64.
- [45] Mabururi, H.; Cahyadi, T.A., **Widodo, L.E.**; Iskandar, I. (2015). “Modeling of 3D Isotropic Distribution of Hydraulic Conductivity Using Neural Network”. Proceeding of 10th International Student Conference on Advanced Science and Technology, ITS, Surabaya, pp. 37-38.
- [46] Putra, A.V.; Cahyadi, T.A.; **Widodo, L.E.**; Widijanto, E. (2015). “Modeling Spatial Distribution of 2D Anisotropic Hydraulic Conductivity Tensor of Fractured Groundwater Flow Media using Neural Network Case Study Grasberg Open Pit of PTFI and Surrounding”. Proceeding of 10th International Student Conference on Advanced Science and Technology, ITS, Surabaya, pp. 47-48.
- [47] Cahyadi, T.A.; **Widodo, L.E.**; Syihab, Z.; Notosiswoyo, S. (2016). “Conceptual model of groundwater depressurization in different permeability caused by drain hole installation”. Proceedings of annual conference of association of groundwater expert of Indonesia.
- [48] Cahyadi, T.A.; **Widodo, L.E.**; Zuhher Syihab, Z.; Notosiswoyo, S.; Widijanto, E. (2017): Hydraulic Conductivity Modeling of Fractured Rock at Grasberg Surface Mine, Papua-Indonesia”. J. Eng. Sci. Technol., Vol. 49, pp. 37-57.

- [49] Cahyadi, T.A.; Syihab, Z.; **Widodo, L.E.**; Notosiswoyo, S.; Widijanto, E. (2021). "Analysis of hydraulic conductivity of fractured groundwater flow media using artificial neural network back propagation". *Neural Computing and Applications*; 33, (2021); pp. 159–179.
- [50] **Widodo, L.E.**; Cahyadi, T.A.; Syihab, Z.; Notosiswoyo, S.; Iskandar, I.; Rustamaji, H.C. (2018). "Development of drain hole design optimization: a conceptual model for open pit mine slope drainage system with fractured media using a multi-stage genetic algorithm". *Environmental Earth Sciences*; 77, 721 (2018); pp. 721-738.
- [51] Antoro, B.; Margotomo, W.; Perdana, A.; Widijanto, E.; Wiwoho, N.; Ginting, A.P.; Santosa, R.G.I.; Pramuji, Silaen, H.; Setyadi, H.; Iribaram, F.; Mundu, S.; Garjito, W.; Sumarwan, F; Rohmadi, A.; Setiadi, T.; Afwan, A.; Asrizal; Pahala, A.R.; Prasety, N. (2011). "Geology and geotechnics of Grasberg open pit mining". PT Freeport Indonesia, Aksara Buana, Jakarta.
- [52] Silaen, H.; Pramuji, Ginting, A.P.; Widijanto, E.; Waromi, I. (2011). "Hydrogeological and pore water pressure characterization at south west sector of Grasberg open pit, Papua". *Proceedings JCM Makassar, the 365th HAGI and 40th IAGI annual convention and exhibition.*
- [53] McDonald, M.G. dan Harbaugh, A.W. (1988). "A modular three-dimensional finite difference groundwater flow model". *Techniques of water resources investigations book, vol 6. U.S. Geological Survey, Washington DC.*
- [54] Samosir, E.; Basuni, J.; Widijanto, E.; Syaifullah, T. (2008). "The Management of Wet Muck at PT. Freeport Indonesia's Deep Ore Zone Mine". *5th International Conference and Exhibition on Mass Mining, Luleå, Sweden.*

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih saya sampaikan kepada:

1. Segenap anggota KK Eksplorasi Sumber Daya Bumi: Prof. Sudarto Notosiswoyo; Dr. Gatot Hari Priowirjanto; Prof. Totok Darijanto (alm.); Prof. Komang Anggayana; Ir. Teti Indriati, MT.; Dr. Budi Sulistijo; Prof. Syafrizal; Prof. Mohamad Nur Heriawan; Dr. Irwan Iskandar; Dr. Agus Haris Widayat; Dr. Arie Naftali Hawu Hede; Dr. Andy Yahya Al Hakim, atas kerja samanya selama ini dalam tugas akademik, pengembangan institusi, riset dan pengabdian kepada masyarakat.
2. Para Pembimbing pada Program Studi Sarjana Teknik Sipil ITB dan Magister Geoteknik, Teknik Sipil ITB: Prof. Sosrowinarso (alm.); Prof. Aziz Djajaputra (alm.); Dr. F.X. Toha; Prof. Suhardjito Pradoto (alm.); Prof. H.R. Langguth dari RWTH Aachen – Jerman.
3. Para Guru Besar yang telah merekomendasikan usulan jabatan Guru Besar saya, yaitu: Prof. Komang Anggayana; Prof. Ridho Kresna Wattimena; Prof. Sri Widiyantoro; Prof. Lambok Hutasoit; Prof. Hendarmawan dari Universitas Padjadjaran; Prof. Hideki Shimada dari *Department of Earth Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kyushu University, Japan* serta Prof. Tada-nori Goto dari *Graduate School of Science, University of Hyogo, Japan*.
4. Dekan, Wakil Dekan Bidang Akademik, Wakil Dekan Bidang Sumber Daya, Senat Fakultas, serta Para Tenaga Kependidikan Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan yang telah membantu dalam proses usulan Guru Besar.
5. Para Mantan Mahasiswa Doktor al bimbingan saya, terutama: Dr. Harman Setyadi; Dr. Tedy Agung Cahyadi; dan Dr. Reza Adhi Fajar yang telah bekerja sama, membantu riset dan publikasi hasil riset.
6. Para Mantan Mahasiswa Magister bimbingan saya, yang telah bekerja sama, membantu riset, dan publikasi hasil riset.
7. Para Ketua dan Anggota Kelompok Keahlian Teknik Pertambangan dan Kelompok Keahlian Teknik Metalurgi atas kerja samanya selama ini dalam tugas akademik, pengembangan institusi, riset dan pengabdian kepada masyarakat.

Ucapan Terimakasih yang sangat khusus saya sampaikan kepada:

1. Siska Munir, istri yang penuh pengertian dan setia mendampingi saya dalam perjuangan, serta Hanif Mukhlis Hibatullah Widodo, anak yang memberikan dukungan untuk kedua orang tuanya.
2. Muhammad Nasroen Moelyohadiwinoto (alm.) dan Koenmarjati (alm.), yaitu kedua orang tua saya, yang telah merawat, membesarkan dan mendidik saya.

CURRICULUM VITAE



Nama : Lilik Eko Widodo
Tempat/Tgl. Lahir : Cepu, 6 Desember 1959
Kel. Keahlian : Hidrogeologi Rekayasa
Nama Istri : Siska Munir
Nama Anak : Hanif Mukhlis Hibatullah
Widodo

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

1. SD Katolik Cepu, 1972
2. SMP Negeri Cepu, 1976
3. SMA Negeri Cepu , 1979
4. Sarjana Teknik Sipil ITB, 1987
5. Magister Geoteknik, Teknik Sipil ITB, 1990
6. Doktor rer.nat., Lehrstuhl fuer Hydrogeologie, RWTH Aachen, 1998

II. RIWAYAT KERJA DI ITB

1. Dari Tahun 1987 s.d. sekarang : Staf Pengajar Program Studi Sarjana Teknik Pertambangan – FTTM – ITB.
2. Dari Tahun 2007 s.d. 2009 : Sekretaris Program Studi Magister Teknik Airtanah – FITB – ITB.
3. Dari Tahun 2010 s.d. 2012 : Ketua Program Studi Magister dan Doktor Rekayasa Pertambangan – FTTM – ITB.

III. PENGHARGAAN

1. *The 2022 Editors' Choice Articles*, 2023, dari *Hydrogeology Journal*, <https://doi.org/10.1007/s10040-023-02615-8>.
2. Pengabdian 25 Tahun ITB, 2017, dari Institut Teknologi Bandung.
3. Satyalencana Karya Satya 20, 2015, dari Pemerintah Indonesia, KepPres RI No. 96/TK/2015.
4. Satyalencana Karya Satya 10, 2006, dari Pemerintah Indonesia, KepPres RI No. 20/TK/2006.

IV. KEANGGOTAAN DALAM ORGANISASI PROFESI

1. *International Association of Hydrogeologist* (IAH)
2. Perhimpunan Ahli Pertambangan Indonesia (PERHAPI)
3. Ikatan Ahli Geologi Indonesia (IAGI)
4. Persatuan Insinyur Indonesia (PII)
5. Perhimpunan Ahli Airtanah Indonesia (PAAI)



📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎️ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉️ office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung

Jalan Dipati Ukur No. 4, Bandung 40132
E-mail: sekretariat-fgb@itb.ac.id
Telp. (022) 2512532

🌐 fgb.itb.ac.id [FgbItb](#) [FGB_ITB](#)
📸 [@fgbitb_1920](#) [Forum Guru Besar ITB](#)

ISBN 978-623-297-320-6

