



TUGAS AKHIR - TF 181801

**OPTIMISASI DAN KONTROL PADA OPERASI *DRILLING*
DENGAN *DISTURBANCE* PENGARUH PERUBAHAN
KEDALAMAN MENGGUNAKAN KONSEP *PLANT WIDE*
CONTROL DAN *GENETIC ALGORITHM***

YUAVIL LAVAYEKI
NRP. 02311640000131

Dosen Pembimbing:
Totok Ruki Biyanto, S.T., M.T., Ph.D.

Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

Halaman ini sengaja dikosongkan



TUGAS AKHIR - TF 181801

**OPTIMISASI DAN KONTROL PADA OPERASI *DRILLING*
DENGAN *DISTURBANCE* PENGARUH PERUBAHAN
KEDALAMAN MENGGUNAKAN KONSEP *PLANT WIDE*
CONTROL DAN *GENETIC ALGORITHM***

YUAVIL LAVAYEKI
NRP. 02311640000131

Dosen Pembimbing:
Totok Ruki Biyanto, S.T., M.T., Ph.D.

Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT - TF 181801

**OPTIMIZATION AND CONTROL OF DRILLING
OPERATION WITH DISTURBANCE INFLUENCE OF
DEPTH CHANGES USING THE CONCEPT OF PLANT WIDE
CONTROL AND GENETIC ALGORITHM**

**YUAVIL LAVAYEKI
NRP. 02311640000131**

**Supervisors:
Totok Ruki Biyanto, S.T., M.T., Ph.D.**

***Department of Engineering Physics
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020***

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama : Yuavil Lavayeki
NRP : 02311640000131
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FTIRS)
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “**OPTIMISASI DAN KONTROL PADA OPERASI DRILLING DENGAN DISTURBANCE PENGARUH PERUBAHAN KEDALAMAN MENGGUNAKAN KONSEP PLANT WIDE CONTROL DAN GENETIC ALGORITHM**” adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya-benarnya.

Surabaya, 2 Agustus 2020

Yang membuat pernyataan,



Yuavil Lavayeki
NRP. 0231640000131

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR

**OPTIMISASI DAN KONTROL PADA OPERASI *DRILLING* DENGAN
DISTURBANCE PENGARUH PERUBAHAN KEDALAMAN
MENGUNAKAN KONSEP *PLANT WIDE CONTROL* DAN *GENETIC
ALGORITHM***

Oleh:

Yuavil Lavayeki

NRP. 02311640000131

Surabaya, 2 Agustus 2020

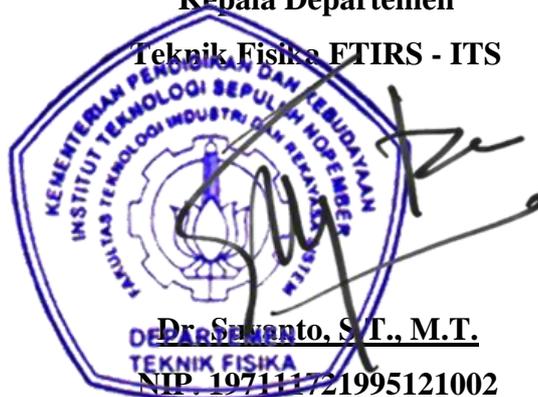
**Menyetujui,
Pembimbing I**



Totok Ruki Biyanto, S.T., M.T., Ph.D.

NIP. 19710702 199802 1 001

**Mengetahui,
Kepala Departemen
Teknik Fisika FTIRS - ITS**



Dr. Suvento, S.T., M.T.

NIP. 197111721995121002

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

OPTIMISASI DAN KONTROL PADA OPERASI *DRILLING* DENGAN *DISTURBANCE* PENGARUH PERUBAHAN KEDALAMAN MENGUNAKAN KONSEP *PLANT WIDE CONTROL* DAN *GENETIC* *ALGORITHM*

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FTIRS)
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Oleh:

YUAVIL LAVAYEKI

NRP. 02311640000131

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Totok Ruki Biyanto, S.T., M.T., Ph.D.  (Pembimbing I)
2. Ir. Matradji, M.Kom.  (Ketua Penguji)
3. Harsono Hadi, S.T., M.T., Ph.D.  (Penguji I)
4. Dyah Sawitri, S.T., M.T.  (Penguji II)
5. Iwan Cony Setiadi, S.T., M.T.  (Penguji III)

SURABAYA

2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

**OPTIMISASI DAN KONTROL PADA OPERASI *DRILLING*
DENGAN *DISTURBANCE* PENGARUH PERUBAHAN
KEDALAMAN MENGGUNAKAN KONSEP *PLANT WIDE*
CONTROL DAN *GENETIC ALGORITHM***

Nama : Yuavil Lavayeki
NRP : 02311640000131
Departemen : Teknik Fisika FTIRS - ITS
Dosen Pembimbing : Totok Ruki Biyanto, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRAK

Pemilihan lokasi pengeboran akan mendapatkan lebih banyak tantangan, seperti kedalaman yang lebih ekstrim, keadaan lingkungan dan kondisi formasi lapisan batuan yang beragam. Dengan tantangan tersebut tentunya akan berpengaruh terhadap performa *drilling* secara keseluruhan. Performa *drilling* dapat dilihat dari nilai *rate of penetration* dan pada penelitian ini akan dilakukan analisis terhadap operasi *drilling* dengan metode *plant wide control*. Penambahan kedalaman operasi tiap 250 m akan menghasilkan kenaikan tekanan dasar sumur dengan nilai rata-rata 36,84 bar, berdasarkan hasil perhitungan dengan teknik optimisasi dengan algoritma genetik, didapatkan nilai laju penetrasi paling optimal di tiap kedalaman operasi *drilling*. Dengan pengaruh faktor *weight on bit* didapatkan nilai *rate of penetration* di tiap kedalaman. Hasil optimisasi pada kedalaman operasi 3000 m dengan ROP 10,4 m/jam, kedalaman 3250 m dengan ROP 7,14 m/jam, kedalaman 3500 m dengan ROP 4,75 m/jam, kedalaman 3750 m dengan ROP 3,05 m/jam dan kedalaman 4000 m dengan ROP 1,90 m/jam. Seiring dengan penambahan kedalaman akan diiringi pengurangan ROP, oleh sebab itu dilakukan pengendalian menggunakan kontrol PID terhadap variabel yang dipengaruhi oleh *disturbance* perubahan nilai kedalaman. Dengan adanya *disturbance* tersebut, dirancang pengendalian *plant wide* untuk mengendalikan perubahan *pressure bottom hole*. Ketika kenaikan *pressure bottom hole*, laju injeksi *main pump* akan diturunkan, lalu bukaan *choke valve* diperbesar, memungkinkan penurunan *pressure choke*, lalu injeksi *backpump* akan diturunkan karena aliran keluar melalui saluran *choke* meningkat.

Kata Kunci: Optimisasi, *weight on bit*, tekanan, *rate of penetration*, *plant wide control*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

**OPTIMIZATION AND CONTROL OF DRILLING OPERATION
WITH DISTURBANCE INFLUENCE OF DEPTH CHANGES
USING THE CONCEPT OF PLANT WIDE CONTROL AND
GENETIC ALGORITHM**

Name : Yuavil Lavayeki
NRP : 02311640000131
Department : Engineering Physics FTIRS - ITS
Supervisors : Totok Ruki Biyanto, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRACT

The choice of drilling location will get more challenges, such as more extreme depths, environmental conditions, and diverse conditions of rock formation. These challenges will certainly affect the overall drilling performance. Drilling performance can be seen from the rate of penetration value and in this study, an analysis of drilling operations using the plant-wide control method is conducted. The addition of operating depth per 250 m will increase bottom well pressure with an average value of 36.84 bar, based on the results of calculations with optimization techniques with genetic algorithms, the optimal penetration rate is obtained at each depth of the drilling operation. With the influence of the weight on bit factor, the rate of penetration value is obtained at each depth. Optimization results at an operating depth of 3000 m with ROP 10,4 m / hour, depth of 3250 m with ROP 7,14 m / hour, depth of 3500 m with ROP 4,75 m / hour, depth of 3750 m with ROP 3,05 m / hour and depth of 4000 m / hour with ROP 1.90 m / hour. Along with the addition of depth will be accompanied by a reduction in ROP, therefore control is used using the PID control of variables that are affected by disturbance changes in the value of depth. With this disturbance, plant wide control is designed to control changes in pressure bottom hole. When the bottom hole pressure rises, the main pump injection rate will be reduced, then the choke valve opening is enlarged, allowing a decrease in the pressure choke, then the back pump injection will be reduced because of the outflow through the choke channel increases.

Keywords: *Optimization, weight on bit, pressure, rate of penetration, plant wide control.*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya, serta shalawat serta salam kepada Nabi Muhammad SAW, hingga terselesaikannya tugas akhir beserta laporan tugas akhir yang berjudul **“OPTIMISASI DAN KONTROL PADA OPERASI *DRILLING* DENGAN *DISTURBANCE* PENGARUH PERUBAHAN KEDALAMAN MENGGUNAKAN KONSEP *PLANT WIDE CONTROL* DAN *GENETIC ALGORITHM*”**

Penulis telah banyak memperoleh bantuan dari berbagai pihak dalam penyelesaian Tugas Akhir dan laporan Tugas Akhir ini. Penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Dr. Suyanto, S.T., M.T selaku Kepala Departemen Teknik Fisika dan juga selaku dosen wali yang telah memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan selama menempuh pendidikan di Departemen Teknik Fisika.
2. Kedua orang tua, kedua saudara kandung dan partner yang selalu mendukung, membantu dan mendoakan yang terbaik demi kelancaran pendidikan hingga kelulusan penulis.
3. Totok Ruki Biyanto, S.T.,M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing dan selaku kepala laboratorium Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol yang telah dengan sabar memberikan petunjuk, ilmu, nasihat, serta bimbingan yang sangat bermanfaat.
4. Seluruh teman-teman angkatan F51, yang telah mendukung saya dalam susah maupun senang.
5. Seluruh teman teman pengurus Laboratorium Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol yang memberi saya bantuan dan semangat dalam mengerjakan TA.
6. Dhiaz Rafilianza dan M. Ghofur Rahmatullah selaku teman seperjuangan dalam pengerjaan tugas akhir yang telah memberi arahan dan pemahaman.

7. Seluruh individu yang tidak dapat disebutkan satu persatu, yang turut membantu baik secara moral dan materi selama penulis mengerjakan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa penulisan laporan tugas akhir ini tidak sempurna, namun semoga laporan ini dapat memberikan kontribusi yang berarti dan menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembaca, keluarga besar Teknik Fisika khususnya, dan civitas akademik ITS pada umumnya. Semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat sebagai referensi pengerjaan laporan tugas akhir bagi mahasiswa yang lain.

Surabaya, 2 Agustus 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
COVER PAGE.....	v
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI.....	vii
LEMBAR PENGESAHAN	ix
LEMBAR PENGESAHAN	xi
ABSTRAK	xiii
ABSTRACT.....	xv
KATA PENGANTAR	xvii
DAFTAR ISI.....	xix
DAFTAR GAMBAR	xxi
DAFTAR TABEL.....	xxiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Lingkup Kajian.....	3
1.5 Sistematika Laporan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	5
2.1 Konstruksi Sumur Minyak	5
2.2 Kedalaman Vertikal (TVD).....	13
2.3 <i>Weight On Bit</i>	14
2.4 <i>Bottom Hole Pressure</i> dan <i>Choke Pressure</i>	15
2.5 <i>Rate of Penetration</i>	16
2.6 Optimisasi dengan <i>Genetic Algorithm</i>	20

2.7	<i>Controller</i> PID	23
2.8	Strategi Pengendalian <i>Feedforward</i>	24
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		27
3.1	Pengumpulan Data dan Parameter <i>Drilling</i>	28
3.2	Pemodelan Operasi <i>Drilling</i>	29
3.3	Penentuan Fungsi Objektif.....	30
3.4	Optimisasi dengan Algoritma Stokastik	31
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		33
4.1	Perancangan Sistem Pengendalian.....	33
4.2	Perhitungan <i>Weight on Bit</i> dan <i>Pressure Bit</i> terhadap Kedalaman.....	34
4.3	Hasil Optimisasi dengan <i>Genetic Algorithm</i>	36
4.4	Hasil Simulasi Pengendalian Tekanan Dasar Sumur.....	43
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		49
5.1	Kesimpulan	49
5.2	Saran	50
Daftar Pustaka.....		51
LAMPIRAN		53
BIODATA PENULIS.....		63

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Contoh sistem <i>drilling</i>	6
Gambar 2. 2 Sirkulasi lumpur pengeboran	8
Gambar 2. 3 <i>Well test</i> pada sumur pengeboran	10
Gambar 2. 4 Susunan <i>valve</i> pada <i>christmas tree</i>	11
Gambar 2. 5 Tipe <i>casing</i> pada sumur	12
Gambar 2. 6 Skematik TVD	13
Gambar 2. 7 Diagram alir <i>Genetic Algorithm</i>	21
Gambar 2. 8 Mekanisme <i>crossover</i>	22
Gambar 2. 9 Mekanisme mutasi	23
Gambar 2. 10 Diagram blok <i>feedforward control</i>	25
Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian.....	27
Gambar 4. 1 Desain sistem pengendalian <i>drilling</i>	33
Gambar 4. 2 Hubungan perubahan kedalaman dengan WOB.....	35
Gambar 4. 3 Nilai <i>pbit</i> saat perubahan kedalaman.....	36
Gambar 4. 4 Grafik nilai optimisasi fungsi objektif <i>rate of penetration</i> pada kedalaman 3000 m.....	38
Gambar 4. 5 Grafik nilai optimisasi fungsi objektif <i>rate of penetration</i> pada kedalaman 3250 m.....	38
Gambar 4. 6 Grafik nilai optimisasi fungsi objektif <i>rate of penetration</i> pada kedalaman 3500 m.....	39
Gambar 4. 7 Grafik nilai optimisasi fungsi objektif <i>rate of penetration</i> pada kedalaman 3750 m.....	40
Gambar 4. 8 Grafik nilai optimisasi fungsi objektif <i>rate of penetration</i> pada kedalaman 4000 m.....	40
Gambar 4. 9 Perubahan ROP pada masing-masing kedalaman.....	42
Gambar 4. 10 Perubahan kedalaman operasi.....	44
Gambar 4. 11 Perubahan nilai <i>pbit</i> dan <i>pc</i>	44
Gambar 4. 12 Volume injeksi <i>mud</i>	45
Gambar 4. 13 Perubahan laju aliran <i>choke valve</i> dan <i>backpump</i>	46

Gambar 4. 14 Respon bukaan *choke valve*..... 47

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Parameter Pemodelan Tekanan Dinamik	28
Tabel 3. 2 Parameter Pemodelan Tekanan <i>Steady-State</i>	29
Tabel 3. 3 Parameter <i>Rate of Penetration</i>	30
Tabel 3. 4 Variabel Optimisasi	32
Tabel 4. 1 Data Kedalaman terhadap Nilai WOB dan <i>Pbit</i>	34
Tabel 4. 2 Parameter Optimisasi GA.....	37
Tabel 4. 3 Hasil Optimisasi pada Masing-Masing Variabel	41

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Peradaban manusia akan diiringi dengan perkembangan dan aplikasi teknologi yang semakin berkembang pesat. Penelitian dan rancangan teknologi baru di berbagai bidang terus dikembangkan untuk menciptakan lingkungan yang lebih baik, namun seiring dengan perkembangan teknologi tersebut, kebutuhan energi juga diprediksi akan terus meningkat tak terkecuali energi yang telah lama digunakan sejak revolusi industri pertama, yakni sumber energi hidrokarbon. Tidak bisa dipungkiri, minyak dan gas merupakan tulang punggung manusia dalam menciptakan dan mengembangkan teknologi, selain sebagai sumber energi untuk kebutuhan sehari-hari. Energi minyak dan gas sudah terbukti keandalannya dan intensitas penggunaannya jauh lebih superior dibanding sumber energi lain. Mengacu pada prediksi yang telah dilakukan, kebutuhan energi hidrokarbon dunia akan meningkat 38% dari tahun 2018 hingga 2050 (Nyquist, Scott, 2018).

Namun eksplorasi sumber minyak dalam skala besar telah dilakukan manusia sejak waktu yang lama, sehingga secara bersamaan titik sumber minyak dan gas yang tersedia dan mudah dieksploitasi akan berkurang, berimbas *oil reservoir* yang tersisa berada di wilayah yang tidak mudah dijangkau untuk diproduksi. Pemilihan lokasi pengeboran akan mendapatkan lebih banyak tantangan, seperti kedalaman yang lebih ekstrim, keadaan lingkungan dan kondisi formasi lapisan batuan yang beragam. Beberapa tantangan inilah yang mendorong manusia untuk menemukan dan menciptakan teknik *drilling* yang lebih baik dari teknik *drilling* konvensional dalam segi waktu dan biaya (Mitchell & Miska, 2011). Dalam teknik pengeboran sumur minyak, *drillability* dari sebuah lapisan batuan akan berkurang seiring dengan bertambahnya kedalaman lubang pengeboran (van Lingen & Garnier, 1959).

Peningkatan kompleksitas pada operasi *drilling* akan memperbanyak timbulnya masalah yang dihadapi, dikarenakan faktor pertimbangan biaya dimana, hal ini dapat mempengaruhi proses *drilling rate* secara signifikan. Salah satu faktor

utama yang mempengaruhi besar laju pengeboran atau *drill rate* adalah karena perubahan nilai perbedaan tekanan (Vidrine & Benit, 1968). Dalam penelitian yang diambil, pengendalian tekanan didalam lubang pengeboran memiliki peran yang sangat sangat krusial, antara lain untuk menjaga stabilitas produksi sumur, menjaga aliran dan siklus lumpur pengeboran, dan menjamin kewanatan selama operasi pengeboran. Jika gagal dikendalikan, dampak dan efek yang ditimbulkan sangatlah berbahaya, seperti membahayakan jiwa operator, merusak lapisan *reservoir*, beserta peralatan yang mahal dan lingkungan disekitarnya. Salah satu contoh kejadian dimana kegagalan rig dalam mengendalikan tekanan seperti yang terjadi pada kasus ledakan *Oilrig Deepwater Horizon* di perairan Macondo, Teluk Meksiko akibat terjadinya *blowout* dari dasar sumur.

Berbagai metode terbaru telah diaplikasikan pada aktivitas *drilling* untuk menciptakan konstruksi sumur yang aman, ramah lingkungan, biaya yang lebih murah dan jauh lebih efektif, terutama pada proses pengendalian kegiatan *drilling*. Dalam penelitian kali ini akan digunakan metode *manage pressure drilling* dengan konsep *plant wide control* sebagai acuan untuk mengendalikan perubahan tekanan didalam sumur. Dalam peningkatan kinerja *drilling*, dilakukan optimisasi terhadap beberapa variabel yang berpengaruh dalam proses *drilling*, seperti gaya berat pada *bit* (*weight on bit*), lumpur pengeboran dan rotasi *drill bit*. Optimisasi pada operasi *drilling* dapat dilakukan dengan meningkatkan kecepatan operasi *drilling* (Moses & Egbon, 2011). Dengan adanya metode baru dalam optimisasi operasi *drilling*, diharapkan dapat mengatasi jenis *disturbance* yang sering ditemui di lapangan. Dalam kasus ini adalah perubahan nilai kedalaman sumur yang dapat mempengaruhi laju penetrasi saat kegiatan pengeboran.

Perkembangan teknologi, terutama dalam kegiatan *drilling*, diharapkan dapat mendorong produktivitas perusahaan minyak dan gas dengan tingkat efisiensi yang lebih tinggi. Hal ini dikarenakan proses *drilling* pada sumur minyak membutuhkan biaya yang sangat mahal dan memerlukan beberapa kru dan operator untuk mengoperasikan alat di lapangan. Oleh sebab itu, lingkungan, keselamatan dan profit adalah alasan utama mengapa metode optimisasi terhadap teknik pengambilan minyak dari dasar lapisan kulit bumi sangat diperlukan. Dalam proses optimisasi ini dipilih metode *genetic algorithm*, karena mengacu pada hasil ulasan

studi literatur (Lim & Haron, 2013) didapatkan hasil perbandingan metode GA lebih baik dalam hal kecepatan dan rata-rata *fitness* dibanding algoritma stokastik yang lain.

1.2 Rumusan Masalah

Dari perumusan masalah tersebut didapatkan tujuan penelitian yang akan dilakukan, yaitu sebagai berikut:

- a) Bagaimana perubahan variabel *weight on bit* di tiap kedalaman dan pengaruhnya terhadap perubahan *pressure bottom hole*?
- b) Bagaimana pengaruh perubahan kedalaman *drilling* terhadap fungsi objektif optimisasi yaitu nilai *rate of penetration* (ROP) ?
- c) Bagaimana simulasi operasi *drilling* menggunakan metode pengendali PID ?

1.3 Tujuan

Dari perumusan masalah tersebut didapatkan tujuan penelitian yang akan dilakukan, yaitu sebagai berikut:

- a) Mengetahui perubahan variabel *weight on bit* di tiap kedalaman dan pengaruhnya terhadap perubahan *pressure bottom hole*.
- b) Menganalisa pengaruh perubahan kedalaman *drilling* terhadap fungsi objektif optimisasi yaitu *rate of penetration* (ROP).
- c) Menguji simulasi operasi *drilling* menggunakan metode pengendali PID.

1.4 Lingkup Kajian

Adapun lingkup kajian yang ditentukan dalam tugas akhir kali ini adalah sebagai berikut:

- a) Pada penelitian ini optimisasi yang dilakukan dengan menggunakan metode *genetic algorithm*
- b) Penelitian ini dilakukan optimisasi nilai *rate of penetration* akibat variabel *disturbance* kedalaman operasi

- c) Analisa pengendalian akibat perubahan kedalaman operasi, *weight on bit* dan perubahan *pressure battom hole*, dengan variabel lain dianggap konstan

1.5 Sistematika Laporan

Dalam laporan tugas akhir ini akan tersusun dalam lima bab yang terdiri dari sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan, lingkup kerja, dan sistematika laporan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi tentang tinjauan pustaka yang digunakan dalam tugas akhir ini yang berupa proses *drilling* sumur minyak, parameter tekanan, kontrol PID, pemodelan sistem *drilling*, dan teknik optimasi dengan metode stokastik *genetic algorithm*.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini berisi tentang metode dan langkah-langkah yang dilakukan dalam pengerjaan tugas akhir yang terdiri dari pengambilan data sekunder, penentuan parameter *drilling*, penentuan fungsi objektif, pemodelan sistem *drilling*, dan variabel teknik optimisasi menggunakan metode stokastik *genetic algorithm*.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyediakan hasil pengolahan data optimisasi, analisa pengendalian operasi *drilling*, dan pembahasan dari hasil simulasi pada penelitian ini.

BAB V PENUTUP

Bab ini menyediakan kesimpulan dari tujuan dilakukannya penelitian ini dan saran yang didapatkan setelah pengerjaan tugas akhir ini selesai.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

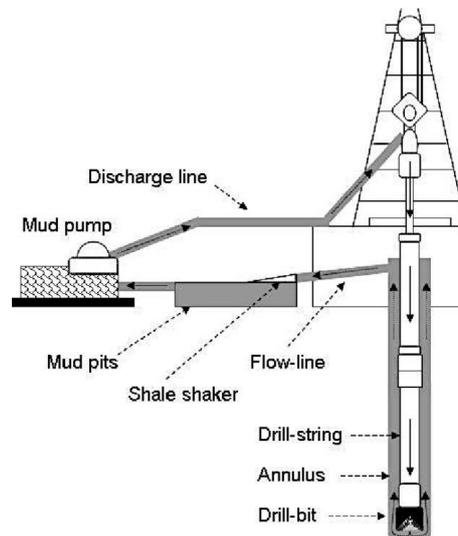
2.1 Konstruksi Sumur Minyak

Konstruksi sumur minyak merupakan aspek utama dalam industri hulu minyak dan gas. Dalam pembuatan sumur minyak terdapat tahapan yang harus dilalui untuk menghasilkan produksi dengan kualitas dan kuantitas yang baik. Sebelum konstruksi dilakukan, terdapat beberapa tahap persiapan kompleks yang dilakukan seperti pemilihan lokasi dan suvey seismik di sekitar area rencana pengeboran. Setelah itu tahap tahap yang dilakukan selama konstruksi sumur minyak akan dijelaskan pada sub-bab berikut:

2.1.1 *Drilling*

Proses *drilling* pada industri minyak dan gas merupakan serangkaian kegiatan atau tahap-tahap untuk membuat lubang dengan ukuran tertentu yang menembus lapisan kulit bumi untuk dapat menghasilkan minyak atau gas bumi. Komponen utama dalam proses *drilling* antara lain seperti lumpur pengeboran (*mud*), sambungan pipa bor (*drill string*) dan mata bor (*drill bit*). Pada awal proses ini akan melibatkan pembuatan lubang dengan diameter besar terlebih dahulu yang akan dilapisi sebuah *casing* konduktor berukuran besar. Proses pengeboran dilakukan dengan memberikan gaya tekan kebawah disertai dengan putaran mata bor (*bit*). Selanjutnya ukuran lubang pengeboran akan semakin mengecil sebagai pengaruh dari nilai *bottom hole pressure*. Setelah operasi *drilling* berlangsung pada kedalaman tertentu, *casing* akan secara bertahap dimasukkan dan ukuran lubang pengeboran akan semakin mengecil ukurannya dan kekuatannya semakin bertambah (Bourgoyne, Chenevert, Millheim, & Young, 1986). Dalam pemasangan satu *casing* akan dilakukan sirkulasi penggantian lumpur, dan penambahan lapisan *cementing* pada *casing*. Untuk sirkulasi lumpur dimulai pada tahap injeksi yang dilakukan *main pump*, dimana lumpur dengan densitas tertentu

disalurkan melalui saluran *drill string*, lumpur tersebut akan dikeluarkan dengan lajuran aliran tertentu melalui *jet nozzle drill bit*. Khusus pada operasi bawah laut, terdapat pemasangan pipa *riser* untuk menyambungkan saluran dari *wellhead* menuju *platform oilrig* di permukaan air laut. Sehingga *drillstring* yang digunakan akan lebih panjang sesuai dengan nilai kedalaman air laut.



Gambar 2. 1 Contoh sistem *drilling* (Sakkaki, 2018)

Selama proses pengeboran, serpihan batuan yang telah dihancurkan (*cutting*) akan mengendap dibawah apabila tidak diberi suatu gaya untuk mengangkat batuan keatas. Apabila serpihan batu ini mengendap dan menyumbat bagian bawah bit, dapat menyebabkan kenaikan tekanan. Oleh sebab itu dilakukan injeksi lumpur melewati *drillstring* dan dikeluarkan melalui *jet nozzle drill bit*. Setelah lumpur diinjeksi serpihan batuan dapat diangkat keatas. Serpihan *cutting* yang terangkat kemudian dianalisis oleh tim geologi untuk menentukan karakteristik lapisan tanah dan mengalirkan lumpur ke *mud pit* untuk dialirkan kembali ke sumur. penyaringan dan pengaliran lumpur kembali disebut dengan *mud circulation system*.

2.1.2 Well Control

Well control dilakukan dengan menciptakan sebuah penahan untuk mencegah aliran atau cairan formasi yang tidak diinginkan masuk kedalam lubang pengeboran. Penghalang dasar yang kebanyakan digunakan adalah dengan

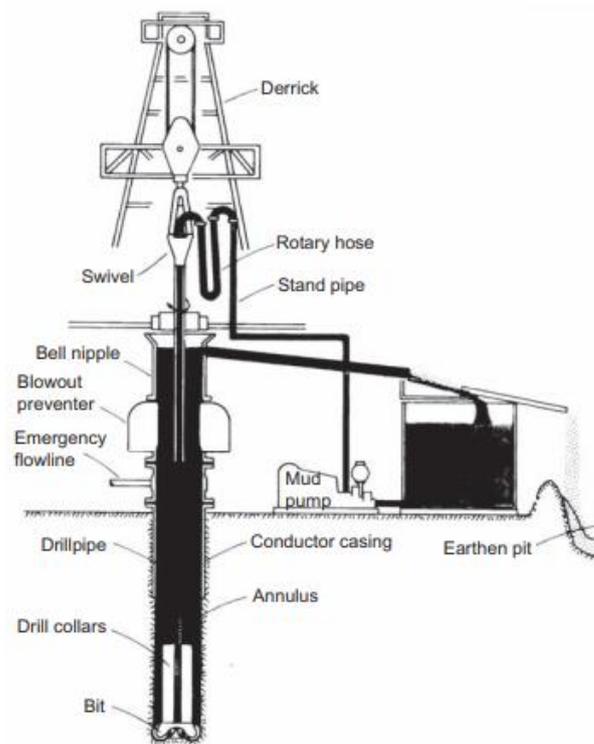
menggunakan lumpur pengeboran dengan densitas yang sesuai dengan tekanan hidrostatik untuk mencegah masuknya cairan *subsurface*. *Mud* yang digunakan sebagai media pengendali tekanan biasanya memiliki densitas lebih dari dua kali dari air laut. Namun jika lumpur pengeboran terlalu berat, atau formasi disekitar sumur terlalu lemah, maka bisa menyebabkan keretakan lapisan batuan yang mengganggu sirkulasi lumpur pengeboran, karena cairan injeksi dan ekstraksi bisa merambat keluar kearah formasi bawah tanah.

2.1.2.1 Lumpur Pengeboran

Lumpur pengeboran atau *drilling mud* memiliki beberapa karakteristik yang harus diperhatikan dalam pemilihan jenis dan performansinya, seperti kemudahan aplikasi, harga dan ramah lingkungan. Lumpur pengeboran memiliki fungsi sebagai berikut :

- a. Kontrol tekanan sumur dan formasi
- b. Sebagai pembersih sumur dan pengangkat *cutting* batuan.
- c. Pendingin dan pelumas *drill bit*

Proses injeksi dan keluarnya lumpur pada proses *drilling* disebut dengan *mud drilling recycle*. Proses siklus lumpur tersebut dapat dilihat pada gambar 2.2 berikut:



Gambar 2. 2 Sirkulasi lumpur pengeboran (Bourgoyne, 1991)

Skema mengenai sistem sirkulasi lumpur pada proses *drilling* diperlihatkan pada gambar 2.2. Lumpur dipompa dan diinjeksi oleh *main pump* dari atas agar masuk ke *drill pipe* dan keluar melalui *bit*. Selanjutnya Lumpur pengeboran tersebut masuk menuruni *drill pipe*, *drill collar*, dan menuju *bit* (mata bor) sampai bawah, setelah itu lumpur akan kembali keatas melewati *choke valve*. Ketika lumpur keluar, lumpur tersebut akan membawa *cutting* batuan yang terpecah akibat putaran mata bor. Lumpur yang membawa batuan tersebut akan melewati *annulus* yang terletak di antara *drill pipe*, *drill collar*, dan dinding *borehole*. Kemudian fluida masuk ke dalam *fluid cleaning system (shale shaker)* untuk dibersihkan, dipersiapkan kembali dan dikumpulkan ke *mud pit* yang nantinya akan diinjeksikan kembali ke dalam sumur sehingga membentuk sirkulasi yang berulang (Transocean, 2009).

2.1.2.2 Kontrol Tekanan *Drilling*

Kontrol tekanan *drilling* atau disebut *managed pressure drilling (MPD)* adalah penerapan teknologi cukup umum digunakan dalam operasi *drilling* untuk

menggantikan metode konvensional, dimana struktur kontrol bersifat terintegrasi untuk menciptakan proses *drilling* yang lebih efisien dan aman (Erik-Halgestad, 2010). tekanan di dalam sumur harus berada di atas batas tekanan kolaps pada lubang bor, untuk mencegah keruntuhan lubang bor akibat dari nilai perbedaan tekanan yang terjadi dari luar ke dalam sumur. Sangat penting juga untuk menjaga tekanan tetap di bawah tekanan fraktur lubang bor, untuk mencegah keretakan hidrolik pada formasi batuan. Salah satu aspek penting lain dari pengendalian tekanan sumur adalah untuk mencegah aliran *reservoir* yang tidak terkendali atau hilangnya lumpur pengeboran ke dalam formasi. Dalam suatu kasus apabila tekanan terlalu rendah, fluida formasi dapat mengalir ke *annulus* dan didorong ke permukaan oleh gradien tekanan. Fenomena ini disebut *drilling kick* yang sering ditemui saat pengeboran. Pada kejadian terburuk *kick* dapat menyebabkan ledakan dan kebakaran pada permukaan, menyebabkan kerugian finansial yang besar dan kemungkinan kerusakan pada lingkungan dan kehidupan manusia. Jika tekanan sumur lebih tinggi daripada tekanan formasi, lumpur pengeboran akan mengalir ke *reservoir* berpori dan dapat menyumbat pori-pori. Hal ini harus dicegah untuk menghindari kerugian finansial dikarenakan harga lumpur pengeboran yang cukup mahal

Dengan pengontrolan tekanan di bagian atas *annulus* akan didapatkan tekanan yang ideal untuk meningkatkan *rate of penetration*, mencegah kerusakan formasi akibat lumpur yang masuk, mencegah pengurangan lumpur, dan mengatasi *density* lapisan batuan yang tidak menentu di tiap kedalaman. Prosedur pengeboran yang tidak tepat dapat mengakibatkan berhentinya sirkulasi, sehingga memerlukan penggantian jenis *bit* atau pencabutan *drill string* dari sumur secara keseluruhan. Hal ini tentunya akan berlawanan dengan tujuan *drilling* yang efisien dalam segi waktu dan biaya

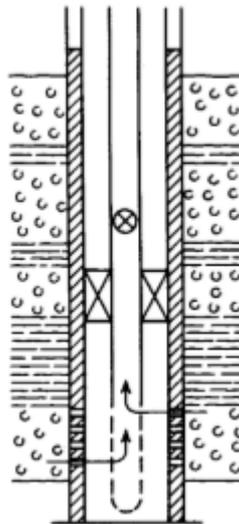
2.1.3 Well Logging

Well logging adalah kegiatan pengukuran properti fisik dibawah permukaan formasi bumi secara *in situ*. Kegiatan ini melibatkan *logging tool* yaitu alat elektronik sensitif, berbentuk pipa pejal yang berisi alat pengirim sensor dan *receiver* sinyal. *Logging tool* akan menghasilkan sinyal elektronik yang akan

memberikan informasi mengenai informasi dan catatan detail mengenai batuan dan sifat cairan formasi geologi.

2.1.4 *Well Testing*

Well testing adalah proses pengumpulan data untuk mengetahui properti hidrokarbon dan karakteristiknya pada *reservoir* bawah tanah. dengan cara dimana lapisan yang diperkirakan mengandung minyak dan gas bumi di tembak dengan bahan eksplosif. Kemudian minyak akan bergerak menuju daerah dengan tekanan rendah. *Well testing* akan dilakukan pada saat tahap eksplorasi dan produksi minyak.



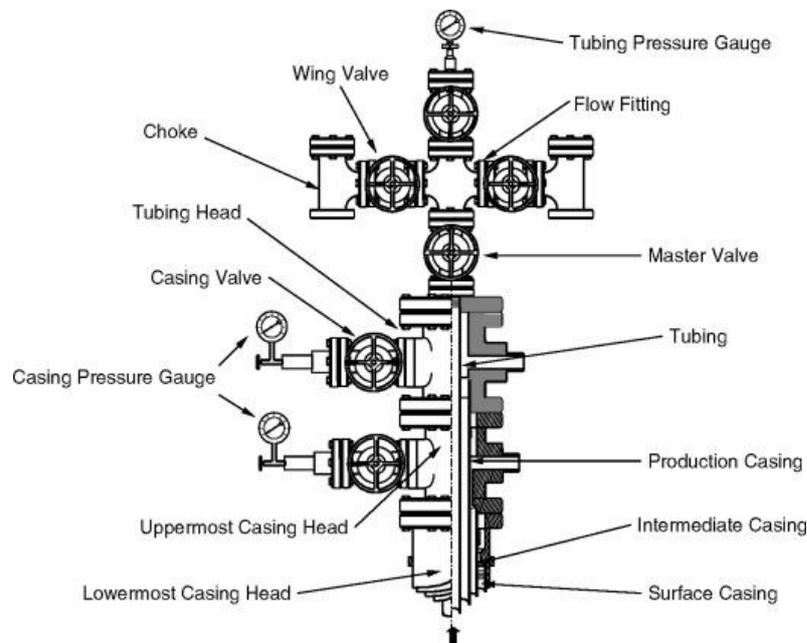
Gambar 2. 3 *Well test* pada sumur pengeboran (Gatlin, 1960)

2.1.5 *Well Completions*

Well completions adalah serangkaian proses penyelesaian untuk menghubungkan *reservoir* dengan permukaan produksi. Desain *well completion* yang baik akan membuat sumur yang telah selesai dibor menjadi lebih aman dan efisien untuk diproduksi dan dijadikan saluran injeksi (Bellarby, 2009). Setelah serangkaian tahap pengeboran selesai dilakukan, sumur harus dilengkapi dengan instalasi *tubing* dan beragam alat lainnya untuk memungkinkan minyak dapat diproduksi. Dalam *well completion* akan melibatkan pemasangan *casing*, *cementing* dan *perforation*.

2.1.5.1 Pemasangan *Christmas Tree*

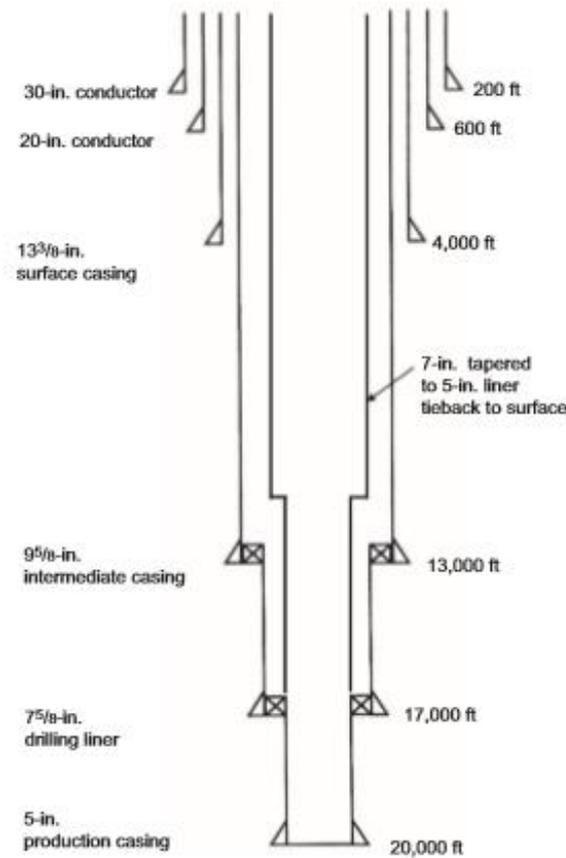
Christmas tree susunan *valve* yang dipasang pada bagian atas *well head*, yang berfungsi sebagai pengatur dan meregulasi aliran minyak dengan cara menutup atau membuka *valve* tersebut selama proses produksi (Guo, Lyons , & Ghalambor, 2007).



Gambar 2. 4 Susunan *valve* pada *christmas tree* (Guo, Lyons , & Ghalambor, 2007)

2.1.5.2 Pemasangan *Casing*

Casing adalah lapisan silinder yang terbuat dari baja tertentu yang memiliki diameter dan panjang yang lebih besar dibanding *drillpipe* dan digunakan untuk menopang lubang sumur dan mengantisipasi akan perbedaan tekanan pada lapisan formasi disekitar lokasi *drilling* yang membahayakan dinding sumur pengeboran. pemasangan *casing* digunakan untuk melindungi sumur selama kegiatan pengeboran dan produksi dengan tahapan yang dilakukan tiap trayek dan secara berkala dimulai dengan *surface casing*, *intermediate casing*, berakhir di *production casing* dan *tubing* pada *well completion* (Guo, Lyons , & Ghalambor, 2007).



Gambar 2. 5 Tipe casing pada sumur (Mitchell & Miska, 2011)

2.1.5.2 Cementing

Cementing atau penyemenan merupakan proses pencampuran bubuk semen dengan bahan kimia, dan air untuk di pompa kedalam casing hingga memenuhi titik kritis pada *annulus* disekitar casing (Bellarby, 2009). Fungsi utama proses penyemenan adalah :

- Untuk membatasi pergerakan cairan diantara formasi
- Untuk mengikat dan menopang casing
- Menutup bagian yang kosong pada sumur

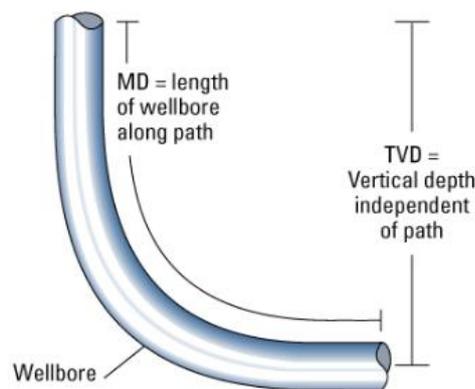
2.1.5.3 Perforation

Perforation adalah proses pembuatan lubang saluran dari sumur pengeboran melewati dinding casing dan lapisan semen hingga terus kearah zona produksi *reservoir* (Transocean, 2009). Lubang perforasi ini akan menyediakan jalan yang

akan digunakan pengambilan cairan formasi dan juga saluran injeksi gas, semen dan substansi lainnya kedalam formasi. Proses *perforation* menggunakan metode *shaped charge* menggunakan WCP *gun* dengan bahan ledak berintensitas tinggi dalam jumlah kecil.

2.2 Kedalaman Vertikal (TVD)

Kedalaman vertikal (True Vertical Depth atau TVD) adalah nilai dari jarak antara titik akhir pengeboran, dengan salah satu titik pada *well head*. Terdapat dua tipe variabel jarak yang digunakan operator *drilling* yaitu kedalaman vertikal dan kedalaman terukur. Yang membedakan adalah kedalaman terukur adalah jarak/panjang total lintasan yang akan dilalui pipa batang bor karena biasanya arah pengeboran bisa berbelok, sedangkan Kedalaman vertikal adalah jarak tegak lurus dari ujung ke ujung. Oleh sebab itu, kedalaman terukur cenderung lebih besar dibanding TVD. Kedalaman vertikal ini sangat krusial dalam penentuan nilai *bottom hole pressure*, dikarenakan pengaruh tekanan hidrostatik pada *wellbore*.



Gambar 2. 6 Skematik TVD (Schlumberger, 2020)

Tiap lapangan pengeboran akan memiliki karakteristik formasinya sendiri, hal ini akan berhubungan dengan nilai *bottom hole pressure*. Pada kedalaman operasi yang sama, pada lapangan pengeboran yang berbeda maka nilai *bottom hole pressure* berbeda pula.

2.3 *Weight On Bit*

Weight on bit atau WOB adalah total gaya tekan ke bawah pada *drillstring* kepada mata bor untuk memberikan tekanan yang sesuai pada formasi batuan agar dapat dihancurkan. Sebagai contoh perhitungan WOB pada pengeboran vertikal. Jika pengukuran di permukaan menunjukkan bahwa berat *drill string* 1000 kg lebih berat dibandingkan dengan berat *bit* di dasar, maka terdapat gaya sebesar 1000 kg yang ditransferkan ke *bit*. Pengukuran tersebut dibaca menggunakan *hydraulic gauge* di permukaan yang langsung disambungkan ke peralatan agar didapatkan akurasi maksimum. *Weight transfer control* dari WOB dapat mengurangi biaya dan waktu operasi sehingga memperpanjang umur dari *bit* (Erik-Halgstad, 2010).

Dengan pemilihan nilai WOB dan *rotary speed* yang tepat akan menghasilkan operasi *drilling* yang optimal, meminimalisir biaya, dan memperpanjang umur *bit*. *rotary speed* dan WOB dapat mengontrol getaran dan *rate of penetration* dengan tujuan untuk menjaga kehalusan kontak antara *bit* dengan bebatuan, mencegah terjadinya kerusakan, dan memaksimalkan efisiensi energi dengan mengurangi energi yang terbuang sia-sia. *Rotary speed* dan WOB yang ditambahkan terus menerus karena dapat menyebabkan kelelahan ekstrim pada *drill string* dan *bit*. Begitu juga dengan kelebihan penambahan berat dan tekanan dapat menyebabkan *drill pipe* bengkok. Nilai WOB dipengaruhi oleh tekanan *drilling mud* dan berat peralatan yang ada diatas *bottom hole* seperti peralatan diatas *rig*, *drill string*, dan *drill bit* itu sendiri. Adapun persamaan (2.1) untuk mendapatkan nilai WOB sebagai berikut.

$$WOB = (\rho_a * g * D) + (W_{alat} + (D * k)) \quad (2.1)$$

- ρ_a = Densitas lumpur
- g = Kecepatan gravitasi
- D = Kedalaman vertikal
- W_{alat} = Berat alat total
- k = Konstanta *bit* (10 kg/m)

2.4 *Bottom Hole Pressure dan Choke Pressure*

Dalam proses *drilling* informasi mengenai *bottom hole pressure* pada sumur pengeboran sangatlah penting. Dengan mengetahui tekanan didasar sumur maka dapat ditentukan metode paling efisien untuk pengangkatan dan pengumpulan cairan formasi, baik gas maupun minyak. *Bottom hole pressure* sendiri adalah tekanan pada dasar sumur pengeboran di kedalaman tertentu, semakin dalam maka nilai tekanan cenderung semakin besar. Dalam proses pengukurannya digunakan instrumen seperti *pressure gauges* dan *flowmeter* dengan titik pengukuran dari *well head* hingga dasar lubang pengeboran. Nilai *bottom hole pressure* ini akan berhubungan dengan nilai densitas formasi batuan yang hancur akibat pengeboran. Semakin besar nilai densitas formasi batuan maka nilai *bottom hole pressure* akan semakin besar. Oleh sebab itu perlu dilakukan injeksi *mud* untuk mengangkat serpihan batuan akibat pengeboran (Irawan, Rahman, & Tunio, 2012).

Pada sub bab sebelumnya telah dibahas mengenai *managed pressure drilling*. Dengan adanya MPD lumpur yang kembali dari bawah sumur harus keluar melalui *choke valve* yang dapat dikendalikan oleh *controller*. *Choke valve* adalah *valve* untuk mengatur tekanan di bagian atas *annulus* dengan memanipulasi bukaan *choke valve*. Saluran disisi atas *annulus* juga dihubungkan ke pompa *back pressure*. Pompa ini disertakan untuk membantu *choke valve* memberikan tekanan yang dibutuhkan, karena aksi *choke valve* hanyas terbatas pada posisi tertutup dan terbuka sepenuhnya. Sistem MPD ini menyediakan sarana untuk mengendalikan profil tekanan di *annulus* sumur, yang merupakan faktor yang sangat penting dalam mencapai pengeboran yang efektif. Tekanan di *bottom hole* merupakan variabel yang sangat penting untuk dijaga, karena nilainya dapat berubah bergantung pada karakteristik formasi (Erik-Halgstad, 2010).

Dengan menjaga nilai tekanan tersebut maka secara langsung akan mempengaruhi kestabilan lubang pengeboran. Yang dimaksud menjaga adalah tekanan pada lubang pengeboran harus seimbang atau kurang lebih sama dengan tekanan lapisan formasi disekitarnya. Apabila nilai *bottom hole pressure* melebihi (*overbalance*) atau kurang dari formasi di sekitarnya (*underbalance*), maka keruntuhan dinding lubang pengeboran dapat terjadi. Menerapkan persamaan dasar tekanan hidrostatik nilai tekanan pada bagian bawah sumur (*bottom hole pressure*)

dan tekanan pada *choke valve* dapat ditentukan menggunakan persamaan (2.2) dan (2.3) berikut.

$$Pbh = p_c + \theta_1 q_{Bit} + WOB \quad (2.2)$$

$$q_c = K_c Z_c \sqrt{\frac{2}{\rho_m} (p_c - p_0)} \quad (2.3)$$

Dimana,

p_c	= Tekanan <i>choke valve</i> (bar)
p_0	= Tekanan atmosfer (bar)
θ_1	= Parameter gesekan (kg/m^4s)
q_{bit}	= aliran <i>mud</i> pada <i>bit</i> (liter/s)
q_c	= <i>Flow choke</i>
z_c	= Bukaan <i>valve</i> (%)
ρ	= <i>Fluid density</i> (kg/m^3)
K_c	= Konstanta <i>valve</i> (m^2)

2.5 Rate of Penetration

Rate of penetration (ROP) merupakan kecepatan dimana bor akan mendorong formasi batuan. Nilai ROP dapat bergantung pada beberapa faktor, seperti *weight on bit* (WOB), kecepatan rotasi dari *bit* tersebut, gradien tekanan dibawah sumur, dan gaya hidrolik dari *drilling fluid*. *Rate of penetration* pada suatu pengeboran dapat dimodelkan dengan persamaan sebagai berikut (Bourgoyne Jr. & Young Jr., 1974).

$$ROP = f_1 * f_2 * f_3 * f_4 * f_5 * f_6 * f_7 * f_8 \quad (2.4)$$

Terdapat nilai faktor f_1 - f_8 yang merupakan *rate of penetration* seperti kekuatan formasi , kedalaman, WOB, rotasi *drill* , perbedaan tekanan, gaya dari *mud* , dll. $f_1 - f_8$ dapat dijelaskan sebagai berikut :

f_1	= efek dari kekuatan formasi dan tipe <i>bit</i>
f_2	= efek dari kepadatan dan kedalaman

- f_3 = efek tekanan pori-pori
 f_4 = efek tekanan diferensial
 f_5 = efek diameter *bit* dan WOB
 f_6 = efek *rotary speed*
 f_7 = efek mahkota *bit*
 f_8 = efek gaya tubrukan *bit hydraulic*

Dimana, masing masing faktor tersebut dapat dimodelkan dari persamaan (2.5) hingga (2.11) sebagai berikut :

$$f_1 = e^{a1} = K \quad (2.5)$$

$$f_2 = e^{a2(10000-D)} \quad (2.6)$$

$$f_3 = e^{a3D^{0.09}} \quad (2.7)$$

$$f_4 = e^{a4(pf-pbh)} \quad (2.8)$$

$$f_5 = \left[\frac{\left(\frac{W}{db}\right) - \left(\frac{W}{db}\right) t}{71.4 - \left(\frac{W}{db}\right) t} \right]^{a5} \quad (2.9)$$

$$f_6 = \left(\frac{N}{60}\right)^{a6} \quad (2.10)$$

$$f_8 = \left(\frac{f_j}{4482}\right)^{a8} \quad (2.11)$$

dimana:

p_f = *Pore pressure gradient (lbm/gal)*

e^{a4} = Parameter laju penetrasi

p_f = *Formation pressure*

p_{bh} = *Pressure bottom hole*

f_j = *Hidraulic jet impact force*

d_b = *Drill bit diameter*

N = *Drill speed rotation*

W = *Weight on bit*

2.5.1 Pemodelan Pengendalian Tekanan Dinamik

Untuk menguji kinerja kontrol tekanan pada sumur dilakukan pemodelan pengendalian tekanan secara dinamik. Model ini menggunakan persamaan momentum dan kontinuitas dengan asumsi aliran satu dimensi dengan *density* dan luas penampang total yang konstan.

$$\frac{V_a}{\beta_a} p_c = q_{bit} \dot{} q_c + q_{bck} \quad (2.12)$$

$$\frac{V_d}{\beta_d} p_p = q_p - q_{bit} \quad (2.13)$$

$$M \dot{q}_{bit} = p_p - p_c - \theta_1 q_{bit} - \theta_2 |q_{bit}| q_{bit} \quad (2.14)$$

Dimana:

V_a = Volume *annulus* (m^3)

V_d = Volume *drill string* (m^3)

M = Koefisien massa (kg/m^4)

θ_1 = Parameter gesek *annulus* (kg/m^4s)

θ_2 = Parameter gesek *drill string* (kg/m^7)

Tekanan lumpur injeksi ke *drill string* dimodelkan dengan pencarian nilai p_p yang nilainya dipengaruhi oleh selisih laju aliran pada pompa (q_p) dengan laju aliran yang keluar dari *drillbit* (q_{bit}). Dengan nilai tekanan lumpur keluar melalui saluran *choke* p_c . Dua persamaan tersebut akan digunakan untuk mendapatkan nilai \dot{q}_{bit} total dengan penurunan tekanan akibat parameter gesekan θ_1 dan θ_2 . Dan nilai M merupakan notasi dari jumlah koefisien massa pada *drill bit* (M_d) dan *annulus* (M_a) yang dapat dimodelkan pada persamaan (2.15) dan (2.16) sebagai berikut:.

$$M_a = \frac{\rho D}{A_a} \quad (2.15)$$

$$M_d = \frac{\rho D}{A_d} \quad (2.16)$$

Dimana :

ρ = Mud density (kg/m^3)

A_a = luas penampang *annulus* (m^2)

A_d = Luas penampang *drill string* (m^2)

2.5.2 Pemodelan Pengendalian Tekanan *Steady-State*

Pemodelan ini berdasarkan saat proses injeksi pengeboran dengan memodelkan tekanan dari *main pump*, tekanan akibat penambahan massa oleh *cutting* atau serpihan batuan, nilai tekanan hidrostatik lumpur pada *drill pipe*. Lalu terdapat pemodelan untuk tekanan *back pump*, tekanan pada ruang *annulus* dan tekanan akibat bukaan *choke valve*. Dengan prinsip persamaan kestimbangan massa maka nilai *input* sama dengan *output*, sehingga model diatas dapat digambarkan dengan persamaan (2.17) berikut.

$$\theta q_{in} + Pbh + \rho gD + \theta qb_{ck} = \left(\frac{qc}{kc \cdot zc} \right)^2 \rho m \quad (2.17)$$

$$\theta q_{in} + Pbh + \rho gD + \theta qb_{ck} = pc \quad (2.18)$$

Pada persamaan (2.17), kesetimbangan massa pada pemodelan tekanan sistem *drilling steady state* menunjukkan ketika tekanan pada *input* naik dan tekanan pada *bit* konstan maka tekanan pada *back pump* naik. Penjumlahan seluruh titik diatas akan menghasilkan nilai setimbang pada tekanan di *choke*. Notasi θ pada persamaan (2.18) merupakan parameter *friction* dari *drill string*. Dari rumus tersebut dapat dilihat bahwa ketika *density main pump* mengecil maka tekanan pada *bit* juga mengecil namun jika tekanan pada *bit* membesar maka akan mengakibatkan bukaan pada *pressure choke* membesar sehingga tekanannya mengecil.

Nilai tekanan dan *flowrate* pada *main pump* bergantung dari putaran mata bor sedangkan nilai ρgD pada *drill pipe* bergantung pada kedalaman sumur. Tekanan pada *bit* bergantung pada tingkat *density* dan kecepatan putar *bit* itu sendiri, sedangkan nilai pada *annulus* bergantung pada prinsip yang sama dengan *drill pipe*. Pada *pressure choke* nilainya bergantung pada bukaan *valve* yang diatur untuk

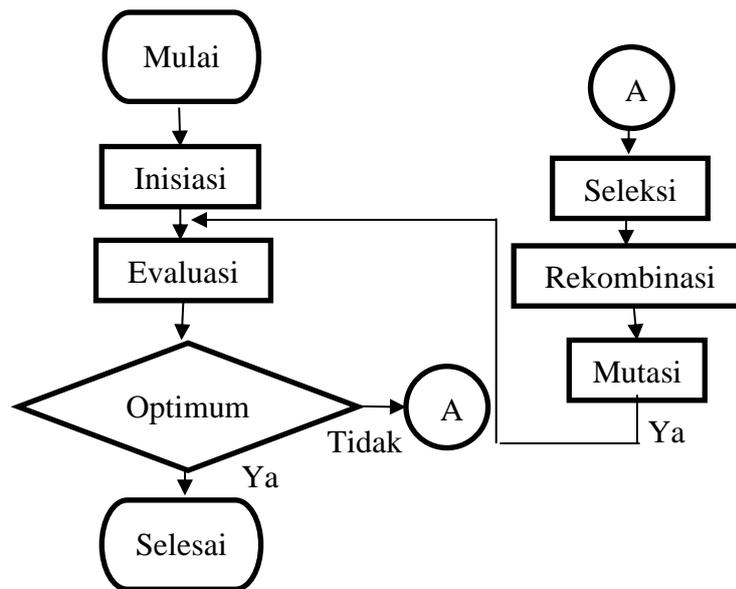
mengatur tekanan dan aliran, sedangkan pada *back pump* bergantung dari kecepatan putar pompa dikarenakan tugasnya sebagai *maintenance*.

2.6 Optimisasi dengan *Genetic Algorithm*

Genetic algorithm pertama kali diusulkan oleh John Holland pada tahun 1975, merupakan algoritma optimisasi dan pencarian metaheuristik yang terinspirasi dari teori Darwin mengenai seleksi alam. Sebagaimana fungsi dari metode optimisasi yang lain, metode GA digunakan untuk memaksimalkan atau meminimumkan dari fungsi objektif. Didalam GA periode kromosom diproses menggunakan tiga operator yaitu seleksi, reproduksi dan mutasi. Sebelum dirancang terdapat dua hal yang harus didefinisikan dalam program GA yaitu *genetic representation* dari sebuah *solution domain* (domain solusi) dan fungsi *fitness* (Goldberg, 1989).

Iterasi GAs diulang terus sampai kondisi berhenti tercapai. Beberapa kriteria dapat digunakan untuk hal ini sebagai berikut:

- Iterasi berhenti sampai generasi n . Nilai n ditentukan sebelumnya berdasarkan beberapa eksperimen pendahuluan. Semakin tinggi ukuran dan kompleksitas masalah maka nilai n semakin besar. Nilai n ditentukan sedemikian rupa sehingga konvergensi populasi tercapai dan akan sulit didapatkan solusi yang lebih baik setelah n iterasi.
- Iterasi berhenti setelah n generasi berurutan tidak dijumpai solusi yang lebih baik. Kondisi ini menunjukkan bahwa GAs sulit mendapatkan solusi yang lebih baik dan penambahan iterasi hanya membuang waktu.
- Iterasi berhenti setelah t satuan waktu tercapai. Ini biasa digunakan jika diinginkan untuk membandingkan performa dari beberapa algoritma.



Gambar 2. 7 Diagram alir *genetic algorithm* (Biyanto, 2016)

Dari Gambar 2. 7 Diagram alir *genetic algorithm* dapat dijelaskan mengenai tahapan *genetic algorithm* diantaranya adalah:

1. Inisiasi

Inisiasi dilakukan untuk membangkitkan himpunan solusi baru secara acak/random yang terdiri atas sejumlah string kromosom dan ditempatkan pada penampungan yang disebut populasi. Dalam tahap ini harus ditentukan ukuran populasi (*popSize*). Nilai ini menyatakan banyaknya individu/kromosom yang ditampung dalam populasi

2. Pengkodean Kromosom

Kromosom pada GA merupakan solusi dari satu variabel. Dalam penelitian ini variabel keputusan (0 dan 1) dikodekan dalam string kromosom biner. Panjang setiap string *chromosome* (*stringLen*) dihitung berdasarkan presisi variabel solusi yang kita cari.

3. Evaluasi

Evaluasi digunakan untuk menghitung kebugaran (*fitness*) setiap kromosom. Semakin besar *fitness* maka semakin baik kromosom tersebut untuk dijadikan calon solusi, pada tahap ini akan dihitung nilai dari fungsi objektif untuk keseluruhan individu.

4. Seleksi

Seleksi dilakukan untuk memilih individu dari himpunan populasi dan *offspring* yang dipertahankan hidup pada generasi berikutnya. Semakin besar nilai *fitness* sebuah kromosom maka semakin besar peluangnya untuk terpilih. Hal ini dilakukan agar terbentuk generasi berikutnya yang lebih baik dari generasi sekarang. Metode seleksi yang digunakan pada penelitian ini adalah *elitism*.

5. Rekombinasi

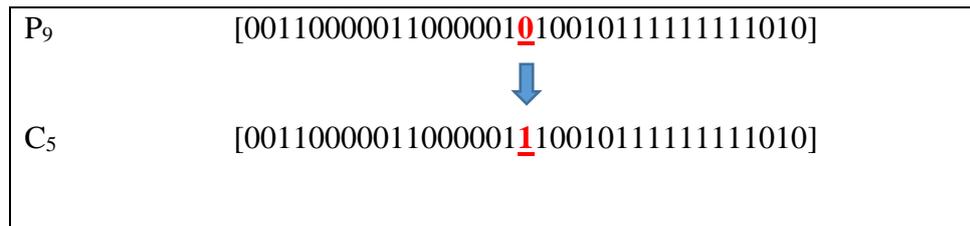
Metode rekombinasi yang digunakan adalah *crossover*, dimana . *crossover* dilakukan dengan memilih dua induk (*parent*) secara acak dari populasi untuk menghasilkan *off-spring*. Metode *crossover* yang digunakan adalah metode *one-cut-point*, yang secara acak memilih satu titik potong dan menukarkan bagian kanan dari tiap induk untuk menghasilkan *offspring*.

P9	[00110000011 00000101001011111111010]
P7	[10101101000 110011100011010001011101]
C3	[00110000011 110011100011010001011101]
C4	[10101101000 00000101001011111111010]

Gambar 2. 8 Mekanisme *crossover*

6. Mutasi

Mutasi dilakukan dengan memilih satu induk secara acak dari populasi. Metode mutasi yang digunakan adalah dengan memilih satu titik acak kemudian mengubah nilai gen pada titik tersebut.



Gambar 2. 9 Mekanisme mutasi

2.7 Controller PID

Controller Proportional Integrated Derivative (PID) merupakan *controller* yang memiliki tiga parameter untyk penggunaannya, yaitu *controller* proporsional dengan error (e), *controller* proporsional dengan integral *error*, dan *controller* proporsional dengan derivatif dari *error*. Hasil *output* dari *controller* PID adalah nilai input yang telah dimanipulasi terhadap variabel waktu $u(t)$. Persamaan dari *controller* PID ditunjukkan pada persamaan (2.19) berikut.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.19)$$

Dimana,

$e(t)$ = *Error*

K_p = *Proportional gain*

K_i = *Integral gain*

K_d = *derivative gain*

Pada penelitian ini penggunaan *controller* ditetapkan menggunakan *controller* PI karena dianggap memiliki respon dari pengendalian tekanan yang cukup cepat (Erik-Halgstad, 2010). Persamaan *controller* untuk PI dapat diperoleh dengan menyederhanakan persamaan (2.19) dengan menghilangkan parameter *controller* derivatif, sehingga menghasilkan perssamaan (2.20).

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) d\tau \quad (2.20)$$

2.8 Strategi Pengendalian *Feedforward*

Salah satu bentuk strategi kontrol yang digunakan untuk mengatasi dan mencegah adanya variabel *disturbance* adalah *feedforward control*. *Feedforward control* biasa dikombinasikan dengan pengendali *feedback* yang berbeda. sebuah *controller* yang membedakan dengan metode kontrol umpan balik adalah *feedforward control* mampu membaca gangguan sebelum variabel tersebut mempengaruhi variabel kontrol atau variabel proses. Untuk mendapatkan pengendalian *feedforward* yang akurat, perlu dilakukan sebuah analisis kondisi saat *steady-state* dan dinamik sebagai model dasar terhadap hubungan dari pengaruh variabel manipulasi dan variabel *disturbance* pada variabel kontrol atau proses. Dikarenakan model memiliki suatu batasan dan tidak semua variabel *disturbance* dapat diukur maka *feedforward control* selalu dikombinasikan dengan pengendalian *feedback*. Adapun persamaan (2.21) untuk kontrol *feedforward* adalah sebagai berikut:

$$G_{ff}(s) = -\frac{G_d(s)}{G_p(s)} \quad (2.21)$$

Dimana,

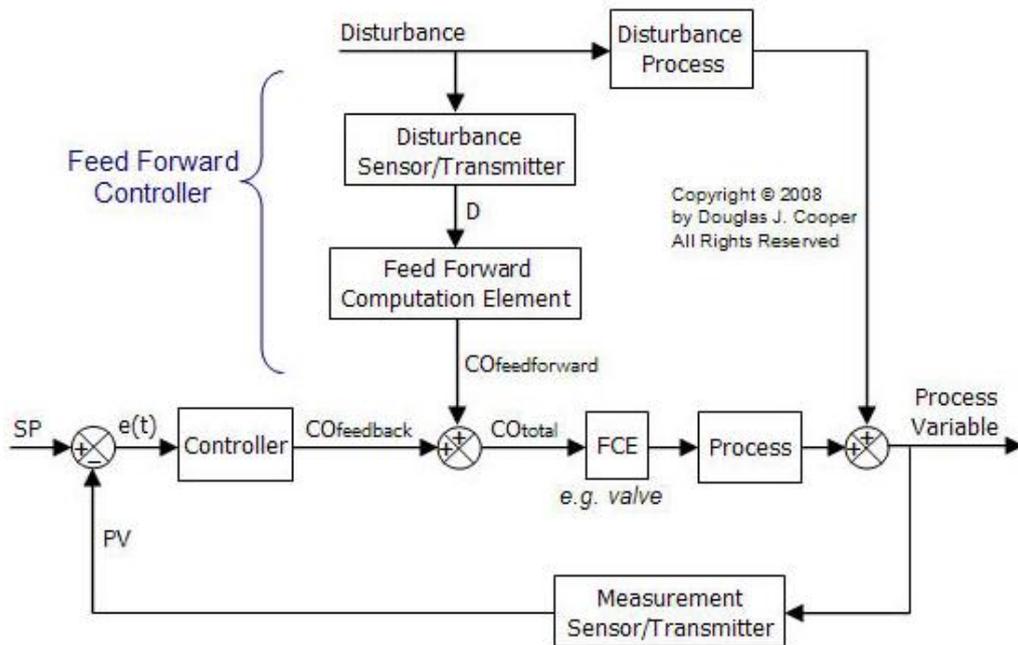
$G_{ff}(s)$ = Gain *feedforward*

$G_d(s)$ = Gain *disturbance*

$G_p(s)$ = Gain *process*

Dari persamaan (2.21) dapat dijabarkan bahwa tipe pengendalian ini mampu memberikan nilai *gain* ke *control feedback* dari hasil pembagian *input gain disturbance* dan *gain process*. Hal ini memungkinkan *controller* menghasilkan sinyal untuk mengubah variabel manipulasi yang dapat mempengaruhi nilai dari output *plant* yang diinginkan. Tipe pengendalian ini memerlukan instrumen tambahan untuk mengukur variabel distorbancenya seperti sensor atau transmitter

sehingga dapat diberikan gambaran mengenai diagram pengendalian sebagai berikut:



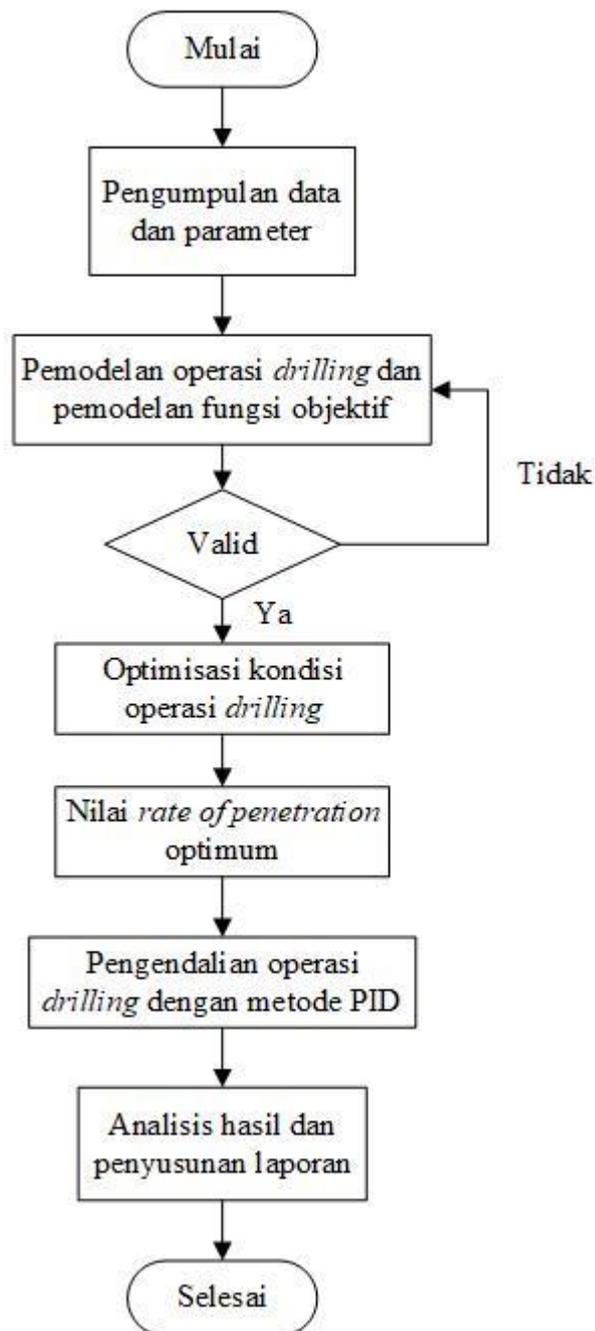
Gambar 2. 10 Diagram blok *feedforward control* (Cooper, 2008)

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Beberapa Tahap yang dilakukan dalam pengerjaan dan penyusunan penelitian tugas akhir ini dapat digambarkan pada gambar 3.1 diagram alir penelitian di bawah ini.



Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian

3.1 Pengumpulan Data dan Parameter *Drilling*

Data yang digunakan pada penelitian kali ini diambil dari hasil studi literatur. Setelah pengumpulan data akan digunakan beberapa parameter untuk masing masing kondisi operasi untuk digunakan pada pemodelan sistem *drilling*. Pada pemodelan tersebut akan diberikan perubahan nilai *disturbance* berupa kedalaman operasi.

Data pengukuran yang digunakan pada sistem ini bertujuan untuk menanggulangi gangguan atau perbedaan parameter agar tidak terjadi kerugian atau gangguan yang lebih fatal. Terdapat parameter dua kondisi operasi yang digunakan sebagai data dalam penelitian ini yaitu parameter *steady state pressure* dan parameter tekanan dinamik.. untuk nilai parameter-prameter tersebut disebutkan pada tabel 3.1 dan tabel 3.2:

Tabel 3. 1 Parameter Pemodelan Tekanan Dinamik (Erik-Halgstad, 2010)

Parameter	Deskripsi	Nilai	Unit
d_b	<i>Drill bit diameter</i>	0.254	m
V_a	Volume <i>annulus</i>	128.45	m ³
V_d	Volume <i>Internal drill String</i>	17.02	m ³
θ_1	Koefisien gesek <i>Annulus</i>	900	Kg/m ⁴ s
θ_2	Koefisien gesek <i>drill string</i>	18000	Kg/m ⁷
β	<i>Bulk modulus</i>	20000	bar
ρ	<i>Mud density</i>	1400	Kg/m ³
K_c	Konstanta <i>choke flow</i>	0.025	m ²
M	<i>Mass coefficient</i>	8384	10 ⁵ kg/m ⁴

Tabel 3. 2 Parameter Pemodelan Tekanan *Steady-State* (Erik-Halgestad, 2010)

Parameter	Deskripsi	Nilai	Unit
d_b	<i>Drill bit diameter</i>	0.254	M
$\left(\frac{W}{d_b}\right)t$	<i>Threshold WOB per diameter</i>	12.6	Ton/m
D_s	<i>Drill string diameter</i>	0.10	M
d_p	<i>Drilled particle diameter</i>	0.005	M
θ	<i>Annulus friction parameter</i>	900	Kg/m ⁴ s
ρ_m	<i>Drilling mud density</i>	1400	Kg/m ³
ρ_s	<i>Cutting density</i>	2700	Kg/m ³
R_0	<i>Formation drillability</i>	5	m/jam
K_c^0	<i>Formation cutting force parameter</i>	100000	N/tonm ²

Pada tabel 3.1 dan tabel 3.2 merupakan parameter-parameter yang akan digunakan dalam pencarian nilai WOB untuk masing masing kedalaman, nilai *pbit*, perhitungan ROP melalui Optimisasi, dan untuk persamaan pengendalian tekanan dalam simulasi operasi *drilling* pada penelitian ini. Dengan hasil tersebut diharapkan dapat terciptanya hasil ROP yang maksimum dan pengendalian operasi *drilling* yang baik dan stabil.

3.2 Pemodelan Operasi *Drilling*

Pada penelitian ini dilakukan pemodelan untuk sistem *drilling*. Terdapat empat jenis pemodelan yang dilakukan yakni, pemodelan *weight on bit*, pemodelan *pressure*, pemodelan *rate of penetration* dan pemodelan pengendalian *pressure* terhadap perubahan kedalaman. *Pressure* pada injeksi lumpur akan dimodelkan dengan menghitung besarnya *pressure* pada bagian *rig* dari bagian *surface equipment* (*main pump*) hingga bagian *annulus* sampai proses penginjeksian kembali dengan menggunakan persamaan (2.17). Perhitungan total *pressure* pada setiap titik sistem *drilling* dihitung dengan menggunakan persamaan kesetimbangan massa sederhana. Sedangkan pemodelan untuk menentukan laju

penetrasi mata bor kedalam sumur pengeboran dengan menggunakan persamaan (2.4) sampai dengan (2.11). Untuk pemodelan pengendalian tekanan merupakan bagian dari desain pengendalian yang dihitung dengan rumus persamaan (2.12) sampai (2.18). Untuk Pemodelan *pressure bottom hole* dilakukan dengan melakukan perubahan kedalaman hingga titik tertentu sebagai nilai *disturbance*. Dengan nilai WOB yang telah diketahui akan dilakukan analisa terhadap pengaruhnya pada *pressure bottom hole*. dilakukan dari atas ke bawah pada seluruh peralatan *drilling* dilakukan dengan menambahkan kedalaman operasi sebagai *disturbance*. *Weight on bit* ini yang akan mempengaruhi nilai *pressure* dan laju aliran akibat dari kecepatan laju penetrasi dari mata bor.

3.3 Penentuan Fungsi Objektif

Dalam teknik optimisasi diperlukan fungsi Objektif sebagai elemen untuk menentukan arah dan tujuan dari optimisasi pada proses *drilling*. Pada penelitian ini tujuan yang ingin dicapai adalah mendapatkan nilai paling optimum untuk *rate of penetration (ROP)*. Dimana dengan Nilai ROP optimum dapat menciptakan proses *drilling* yang aman dan terkendali, karena terjaganya siklus aliran lumpur dari bawah keatas dan dapat diulangi terus menerus tanpa menimbulkan kerugian secara materi. Beberapa faktor yang menjadi faktor perhitungan ROP antara lain, seperti WOB dan putaran *bit* (RPM).

Dengan masing masing faktor seperti yang telah dijabarkan pada persamaan (2.9) hingga (2.11) dan parameter a_4 , a_5 , a_6 , a_8 dipilih melalui studi literatur dengan nilai pada tabel 3.3 (Erik-Halgestad, 2010)

Tabel 3. 3 Parameter *Rate of Penetration* (Erik-Halgestad, 2010)

Parameter	a_4	a_5	a_6	a_8
Nilai	0.01	1	0.7	0.3

$$f_4 = R_0 e^{0.01(pf-pbh)} \quad (3.1)$$

$$f_5 = \left[\frac{\left(\frac{W}{db}\right) - \left(\frac{W}{db}\right) t}{71.4 - \left(\frac{W}{db}\right) t} \right] \quad (3.2)$$

$$f_6 = \left(\frac{N}{60}\right)^{0.7} \quad (3.3)$$

$$f_8 = \left(\frac{F_j}{4482}\right)^{0.3} \quad (3.4)$$

Pada persamaan dijelaskan mengenai model ROP dimana terdapat konstanta f_1 hingga f_8 . Dari hasil studi literatur $f_1 - f_3$ dan f_7 digabungkan dalam satu konstanta, yaitu R_0 . Konstanta ini merepresentasikan *formation drillability* dalam *m/hr*. sehingga didapatkan hasil persamaan ROP sebagai fungsi objektif sebagai berikut.

$$J = R_0 e^{0.01(pf-pbh)} \left[\frac{\left(\frac{W}{db}\right) - \left(\frac{W}{db}\right) t}{71.4 - \left(\frac{W}{db}\right) t} \right] \left(\frac{N}{60}\right)^{0.7} \left(\frac{F_j}{4482}\right)^{0.3} \quad (3.5)$$

Dari persamaan (3.5) dengan nilai parameter pada tabel 3.3 maka, masing masing kedalaman akan dapat dihitung untuk nilai ROP optimum pada tiap kondisi operasinya, dengan memasukkan nilai WOB dan juga *pressure bottom hole* dari hasil perhitungan. Hasil perhitungan fungsi objektif ini juga akan menjadi tinjauan terhadap simulasi operasi *drilling* selanjutnya.

3.4 Optimisasi dengan Algoritma Stokastik

Pada penelitian ini teknik optimisasi yang digunakan adalah menggunakan teknik algoritma stokastik dengan metode *genetic algorithm*, dimana pada penelitian sebelumnya telah dilakukan perbandingan dengan metode lain dengan hasil variabel optimisasi yang lebih baik menggunakan metode *genetic algorithm*. Selain hal tersebut, salah satu alasan pemilihan metode ini dikarenakan cukup

umum digunakan pada beberapa penelitian optimisasi, sehingga dapat diandalkan. Untuk langkah-langkah pemrograman untuk proses metode ini telah dijabarkan dan dijelaskan pada bab 2 sebelumnya.

Pada penelitian ini, dilakukan optimisasi pada 4 variabel yang akan dioptimisasi yang tercantum dalam tabel 3.4 berikut:

Tabel 3. 4 Variabel Optimisasi

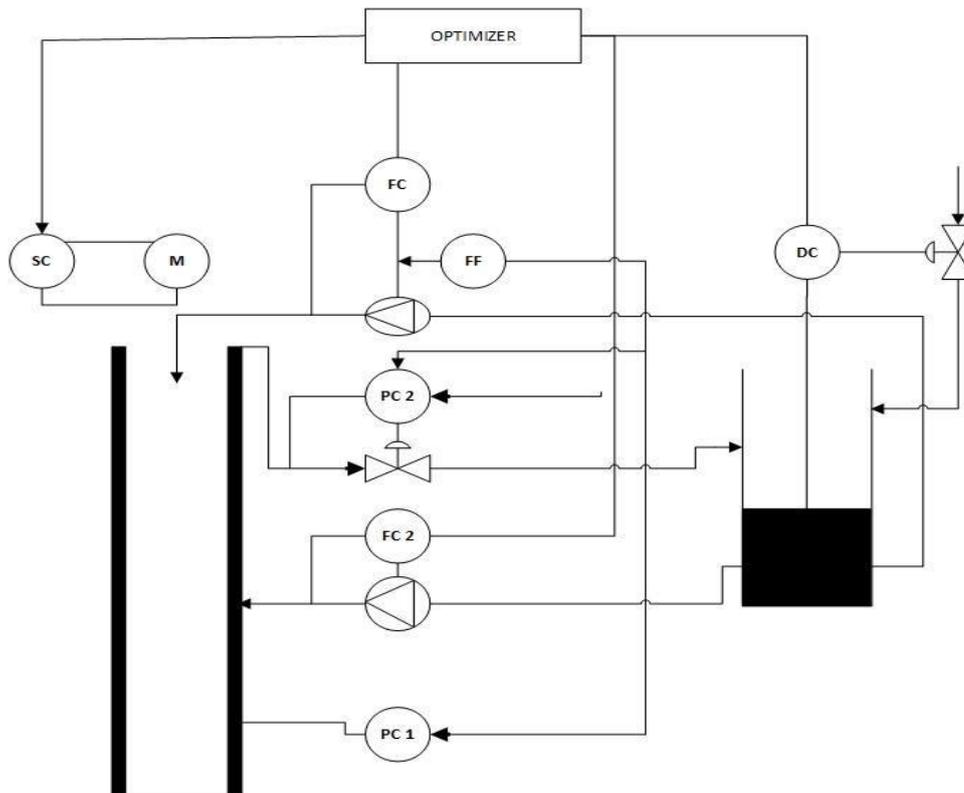
MV(u)	Deskripsi	Batas bawah	Batas atas	satuan
N	Putaran mata Bor	100	200	rpm
q_{in}	<i>Flowrate</i> injeksi	0.001	50	Liter/s
p_c	<i>Choke pressure</i>	0.001	100	bar
ρ_m	<i>Mud density</i>	0.001	2000	Kg/m ³

Pada tabel 3.4 terdapat variabel yang akan dioptimasi beserta nilai-nilai *upper bond* dan *lower bond* yang akan menjadi *constraint* pada teknik optimisasi penelitian ini. Hasil dari teknik optimisasi ini akan menjadi *setpoint* pada pengendalian tekanan yang kemudian akan diuji hasilnya untuk mendapatkan hasil pengendalian terbaik dan akurat.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Perancangan Sistem Pengendalian

Rancangan yang digunakan merupakan pengembangan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, dengan penggunaan konsep *plant wide control* dengan strategi *feedforward* dan tiga elemen pengendalian dalam desain sistem operasi *drilling*. Terdapat lima variabel yang digunakan sebagai parameter kontrol *drilling* ini yakni, *rotary speed*, *flow main pump*, *mud density*, dan *pressure choke*. Pengendalian laju aliran untuk sirkulasi *drilling mud* saat diinjeksikan dan keluar melalui saluran *choke*. Pengendalian tekanan bawah sumur, untuk mengatasi perubahan tekanan akibat penambahan *weight on bit* pada operasi pengeboran. Dan pengendalian putaran *bit* untuk menentukan nilai *rotary speed* yang optimal saat kondisi tertentu yakni saat *plant* menerima *disturbance*.



Gambar 4. 1 Desain sistem pengendalian *drilling*

Setelah dilakukan tahap optimisasi akan didapatkan fungsi objektif ROP untuk tiap pengaruh *disturbance* yang diberikan berupa variasi kedalaman. Lalu dilanjutkan dengan simulasi terhadap perubahan kedalaman menggunakan *setpoint* dari hasil optimisasi.

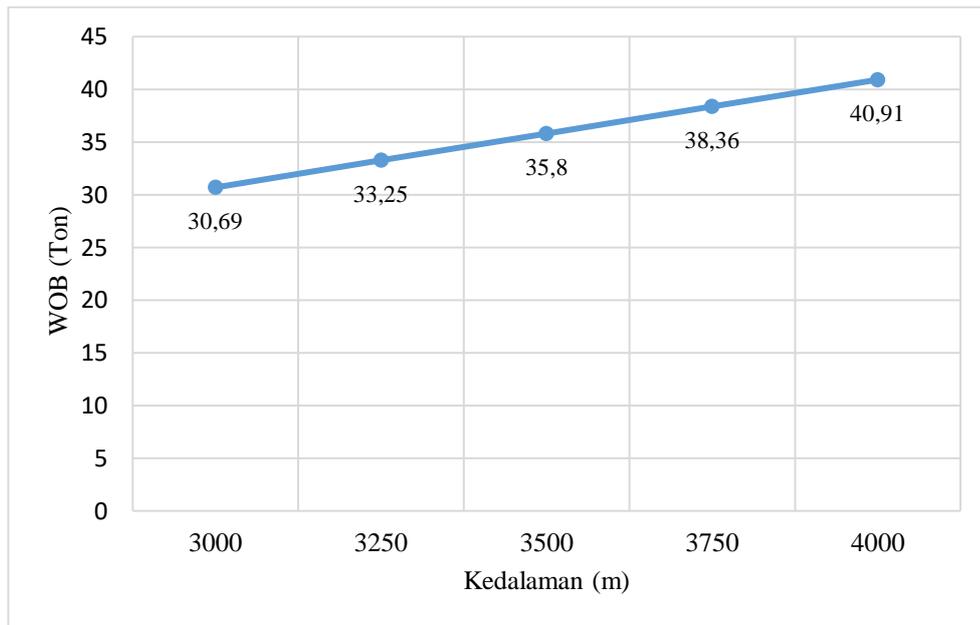
Dari gambar 4.1 dapat diperhatikan bahwa penambahan pengendalian *plant wide* dan *feedforward* akan membantu sistem dalam mendeteksi *disturbance* yakni nilai *weight on bit* akibat perubahan kedalaman operasi, dimana akan mempengaruhi kenaikan dari nilai *pbit* pada saat proses *drilling*.

4.2 Perhitungan *Weight on Bit* dan *Pressure Bit* terhadap Kedalaman

Adapun penentuan data sekunder didapatkan melalui data lapangan pengeboran kinabalu east tahun 1990 (Irawan, Rahman, & Tunio, 2012). Dengan kombinasi parameter berat *bit* yang diambil dari studi literatur penelitian sebelumnya (Erik-Halgstad, 2010). Akan diambil lima sampel kedalaman dengan selisih 250 m dari titik pengeboran 3000 m. Dengan variasi lima data kedalaman terhadap pengaruhnya ke *weight on bit* berdasarkan persamaan (2.1) dan pengaruhnya terhadap *pressure bit* berdasarkan persamaan (2.2), maka dapat dihitung untuk nilai dari masing-masing variabel tersebut. Dengan catatan bahwa nilai *pressure bottom hole* diasumsikan memiliki nilai yang sama dengan tekanan pada mata bor (*pbit*). sehingga untuk tiap sampel kedalaman operasi didapatkan nilai WOB dan *pbit* pada tabel 4.1 sebagai berikut.

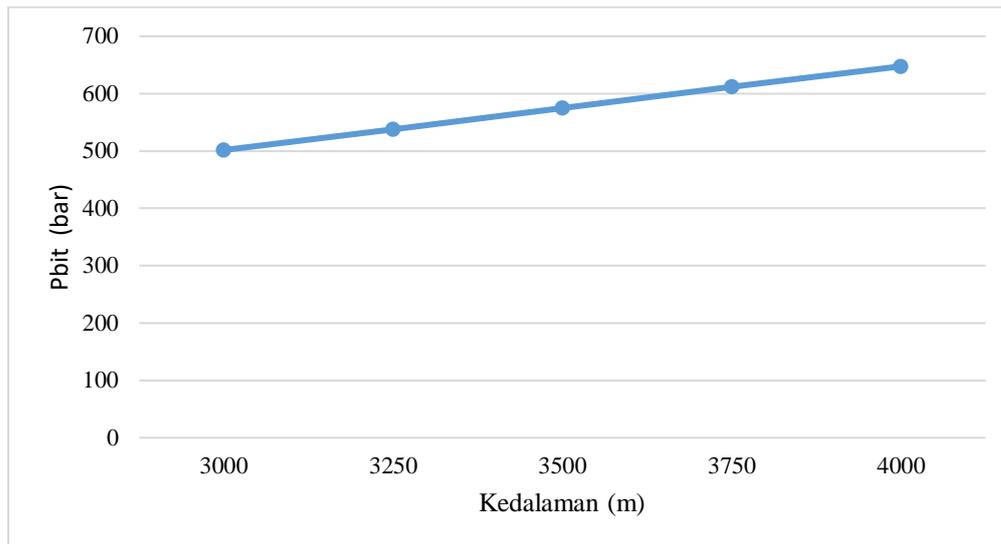
Tabel 4. 1 Data Kedalaman terhadap Nilai WOB dan *Pbit*

Kedalaman (<i>m</i>)	WOB (<i>ton</i>)	<i>pbit</i> (<i>bar</i>)
3000	30.69	500.32
3250	33.25	537.16
3500	35.8	574.28
3750	38.36	610.825
4000	40.91	647.66



Gambar 4. 2 Hubungan perubahan kedalaman dengan WOB

Meninjau dari hasil perhitungan untuk nilai WOB di tiap kedalaman operasi, dapat dilihat bahwa nilai WOB yang didapatkan di tiap penambahan kedalaman terus bertambah dengan selisih yang hampir sama. Nilai awal sebesar 30.69 ton pada kedalaman 300 m bertambah menjadi 33,35 ton pada kedalaman 3250 m. selisih penambahan WOB tersebut nilainya sama untuk tiap perubahan kedalaman 250 m. Perlu diketahui bahwa Penambahan nilai WOB ini dikarenakan disetiap penambahan kedalaman operasinya akan ada penambahan massa akibat sambungan *drillstring*. Penambahan WOB setiap kedalaman 250 m didapatkan rata rata penambahan sebesar 2.56 ton. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan beban dari atas pada *bit* akan berbanding lurus dengan penambahan kedalaman operasi *drilling*. Nilai WOB ini akan mempengaruhi tekanan yang ada dibawah sumur, dengan begitu nilai *pbit* juga akan bertambah dan berbanding lurus dengan penambahan kedalaman.



Gambar 4. 3 Nilai *pbit* saat perubahan kedalaman

Pada gambar 4.3 memperlihatkan hubungan antara nilai *pbit* di tiap perubahan kedalaman. Begitu halnya dengan penambahan WOB, penambahan nilai *pbit* akan menunjukkan selisih yang tidak jauh berbeda, untuk tekanan di tiap kedalamannya, dengan rata-rata nilai kenaikan *pbit* adalah 36,75 bar setiap kenaikan kedalaman operasi 250 m. grafik tersebut memperlihatkan bahwa perubahan kedalaman akan berbanding lurus terhadap perubahan nilai *pbit*.

4.3 Hasil Optimisasi dengan *Genetic Algorithm*

Dari fungsi objektif yang telah ditetapkan untuk optimisasi ini adalah mendapatkan nilai *rate of penetration* maksimum, dengan mengubah besarnya variabel optimisasi. Variabel yang dioptimisasi adalah *flowrate*, RPM, *pressure choke*, dan *mud density* pada proses *drilling*. Pada program optimisasi ini akan dimasukkan beberapa nilai parameter dan variabel hasil perhitungan. Parameter yang digunakan adalah parameter untuk persamaan dari faktor-faktor yang mempengaruhi nilai *rate of penetration*. Dan variabel yang dimasukkan adalah Nilai WOB dari tabel 4.1 beserta nilai kedalaman masing masing. Setelah variabel dimasukkan, maka dapat dituliskan persamaan (3.1) hingga persamaan (3.5) untuk pencarian nilai fungsi objektif. Sehingga, keluaran yang menjadi fokus pada optimisasi GA ini ada pada nilai ROP untuk masing masing kedalamannya. Secara filosofis, GA bekerja berdasarkan teori Darwin tentang prinsip evolusi “*survival of*

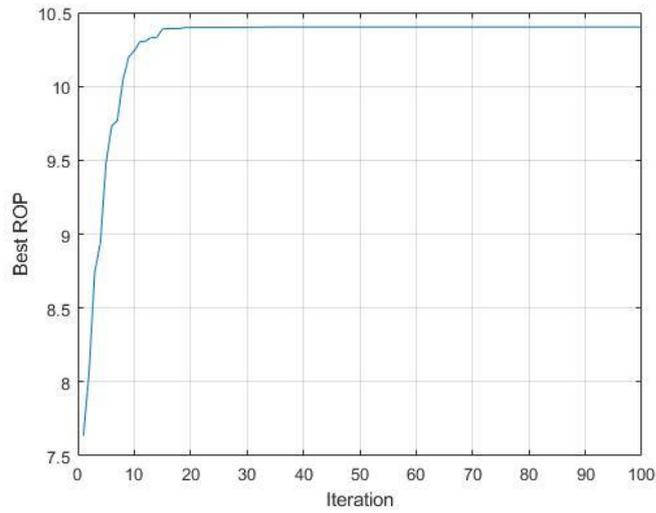
the fittest". Secara keseluruhan, GA bekerja dengan inspirasi prinsip seleksi alam dan genetik. Optimisasi menggunakan *genetic algorithm* (GA) dilakukan dengan penentuan parameter pada tabel 4.2 sebagai berikut:

Tabel 4. 2 Parameter Optimisasi GA

Parameter	Nilai
Populasi	200
Iterasi	100
<i>Elitism</i>	0.95
Probabilitas <i>crossover</i>	0.8
Probabilitas mutasi	0.01
Jumlah <i>bit</i>	20

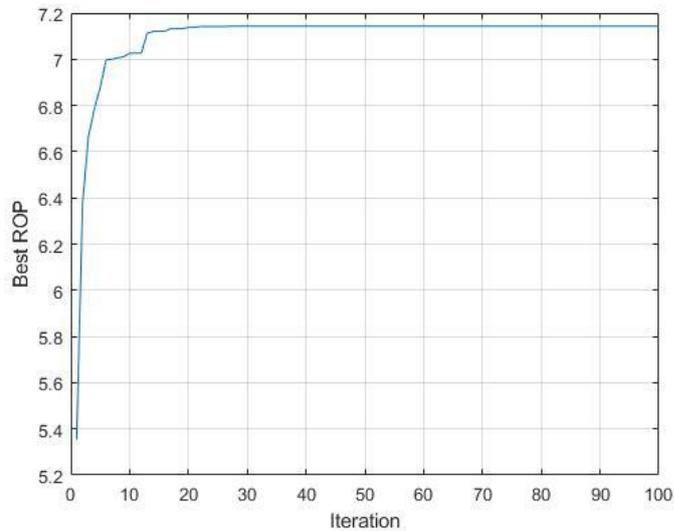
Proses optimisasi dijalankan melalui *software* MATLAB yang bertujuan untuk mendapatkan jumlah *tray* yang optimal. Sebelum optimisasi dijalankan, dilakukan penentuan *constraint* pada variabel-variabel yang akan di optimisasi. Variabel- variabel tersebut adalah putaran mata bor, laju alir pompa utama , densitas *mud* ,dan tekanan pada saluran *choke*. Variabel dipilih karena pada persamaan laju penetrasi , variabel-variabel tersebut dapat mempengaruhi laju penetrasi. Batas atas dan batas bawah ditentukan melalui performa maksimum dan minimum yang dapat dijalankan *constraint* tersebut.

Hasil optimisasi dapat ditunjukkan melalui gambar 4.4 hingga gambar 4.8 dengan hasil yang secara berangsur-angsur konvergen menuju nilai maksimum. Fungsi objektif didapatkan hasil pemodelan pada persamaan (3.1) hingga persamaan (3.4) untuk mendapatkan nilai variabel faktor penyusun persamaan ROP. masing masing perhitungan faktor akan menggunakan parameter yang ditampilkan pada tabel 3.3 sehingga bisa didapatkan nilai akhir ROP yang digunakan sebagai fungsi objektif optimisasi.



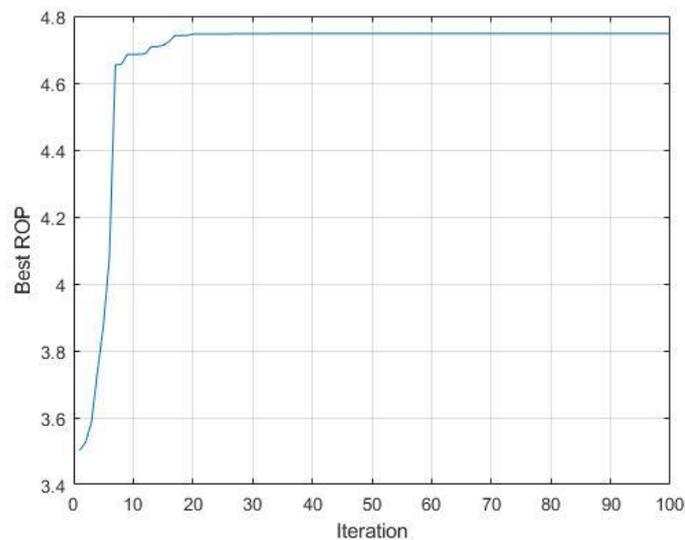
Gambar 4. 4 Grafik nilai optimisasi fungsi objektif *rate of penetration* pada kedalaman 3000 m

Pada gambar 4.4 dapat dilihat dengan sumbu x merupakan jumlah iterasi dan sumbu y merupakan nilai ROP sebagai fungsi objektif. Didapatkan nilai fungsi objektif dari ROP yang memiliki nilai optimum yaitu sebesar 10,401 m/jam. Dengan titik konvergen pada iterasi ke 15



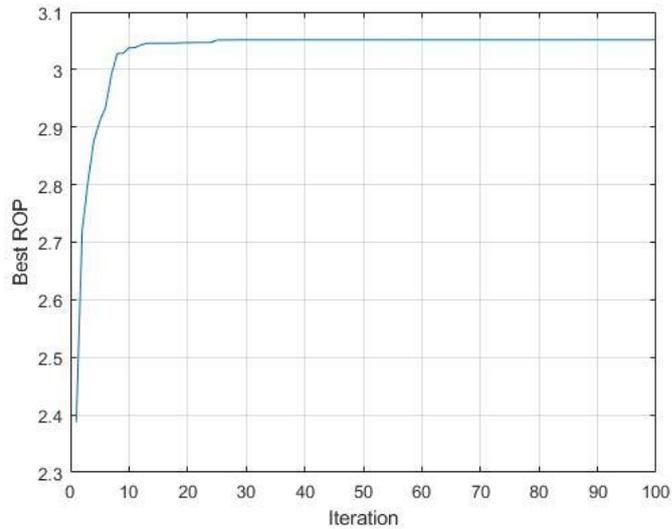
Gambar 4. 5 Grafik nilai optimisasi fungsi objektif *rate of penetration* pada kedalaman 3250 m

Pada gambar 4.5 dapat dilihat grafik hasil optimisasi *genetic algorithm* pada operasi *drilling* saat kedalaman 3250 m, dengan sumbu x merupakan jumlah iterasi dan sumbu y merupakan nilai ROP sebagai fungsi objektif. Didapatkan nilai fungsi objektif dari ROP yang memiliki nilai optimum yaitu sebesar 7,1435 m/jam. Dengan nilai optimum didapatkan di titik konvergen pada iterasi ke 22.



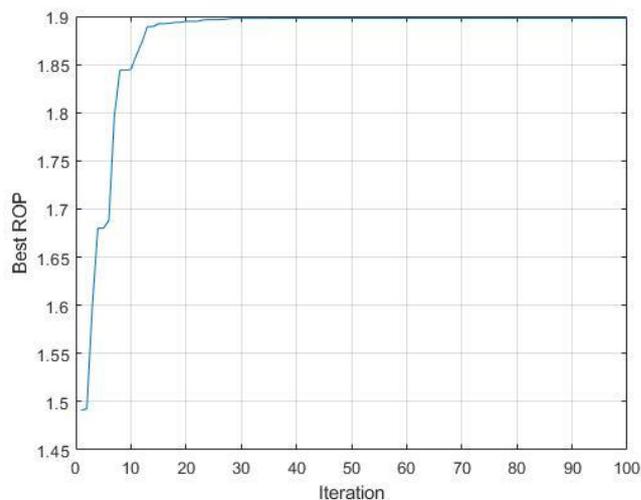
Gambar 4. 6 Grafik nilai optimisasi fungsi objektif *rate of penetration* pada kedalaman 3500 m

Pada gambar 4.6 dapat dilihat grafik hasil optimisasi *genetic algorithm* pada operasi *drilling* saat kedalaman 3500 m, dengan sumbu x merupakan jumlah iterasi dan sumbu y merupakan nilai ROP sebagai fungsi objektif. Didapatkan nilai fungsi objektif dari ROP yang memiliki nilai optimum yaitu sebesar 4,742 m/jam. Dengan nilai optimum didapatkan di titik konvergen pada iterasi ke 19.



Gambar 4. 7 Grafik nilai optimisasi fungsi objektif *rate of penetration* pada kedalaman 3750 m

Pada gambar 4.7 dapat dilihat dengan sumbu x merupakan jumlah iterasi dan sumbu y merupakan nilai ROP sebagai fungsi objektif. Didapatkan nilai fungsi objektif dari ROP yang memiliki nilai optimum yaitu sebesar 3,0515 m/jam. Dengan titik konvergen pada iterasi ke 25.



Gambar 4. 8 Grafik nilai optimisasi fungsi objektif *rate of penetration* pada kedalaman 4000 m

Pada gambar 4.8 dapat dilihat dengan sumbu x merupakan jumlah iterasi dan sumbu y merupakan nilai ROP sebagai fungsi objektif. Didapatkan nilai fungsi objektif dari ROP yang memiliki nilai optimum yaitu sebesar 1,898 m/jam. Dengan titik konvergen pada iterasi ke 30.

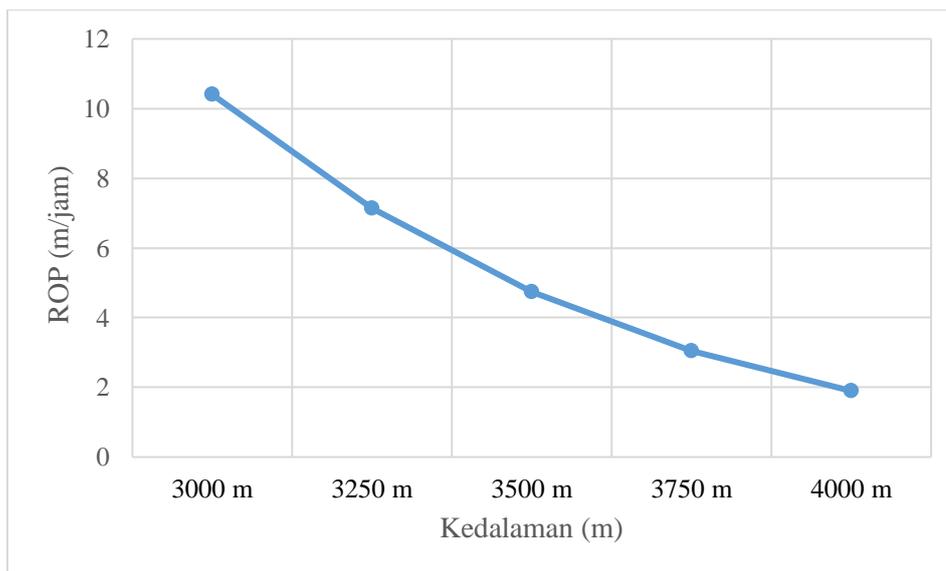
Sehingga dari serangkaian hasil optimisasi untuk masing masing variabel optimisasi di tiap kedalaman dapat dilihat pada tabel 4.3 dengan catatan bahwa nilai WOB telah digunakan sebagai variabel input dari hasil perhitungan, sebagai faktor untuk menghitung nilai ROP melalui metode optimisasi *genetic algorithm*, berikut:

Tabel 4.3 Hasil Optimisasi pada Masing-Masing Variabel

Variabel	Kedalaman Operasi				
	3000 m	3250 m	3500 m	3750 m	4000 m
<i>Weight on bit</i> (WOB) (ton)	30,691	33,246	35,801	38,356	40,910
Kecepatan putar (RPM)	157,610	148,540	199,564	165,320	115,368
<i>Flowrate mud</i> (liter/detik)	50	50	50	50	50
<i>Pressure choke</i> (bar)	9,05E-04	9,05E-04	9,05E-04	9,05E-04	9,05E-04
<i>Mud density</i> (kg/m ³)	490,234	499,999	453,6126	440,671	437
<i>Objective function</i> (m/jam)	10,401	7,144	4,742	3,052	1,898
Waktu untuk <i>drilling</i> (jam)	288	371,3	475,3	622,3	849,6

Dari hasil tersebut dapat dianalisis beberapa hasil mengenai hasil optimisasi menggunakan metode *genetic algorithm*. Dimana kecepatan operasi *drilling* untuk mencapai kedalaman operasi 3000 m akan didapatkan kecepatan penetrasi sebesar 10,401 m/ jam . sehingga waktu yang diperlukan untuk operasi tersebut berdasarkan persamaan hubungan jarak dan waktu adalah 288 jam atau 12 hari. Ketika adanya penambahan kedalaman menjadi 3250 m maka akan ada pengurangan laju penetrasi, dimana selisih ROP yang didapatkan ketika penambahan 250 m

selanjutnya adalah 3,3 m/jam, sehingga tambahan waktu yang diperlukan untuk mencapai kedalaman 3250 m adalah 83,3 jam atau 3,5 hari. Dari hasil yang ditunjukkan tabel 4.3, maka waktu yang diperlukan untuk perubahan fungsi objektif laju penetrasi dari 300 m menuju kedalaman 4000 m adalah 849,6 jam atau 35,4 hari. dan grafik untuk hubungan ROP dengan perubahan tiap kedalaman dapat dilihat pada gambar 4.9. berikut:



Gambar 4. 9 Perubahan ROP pada masing-masing kedalaman

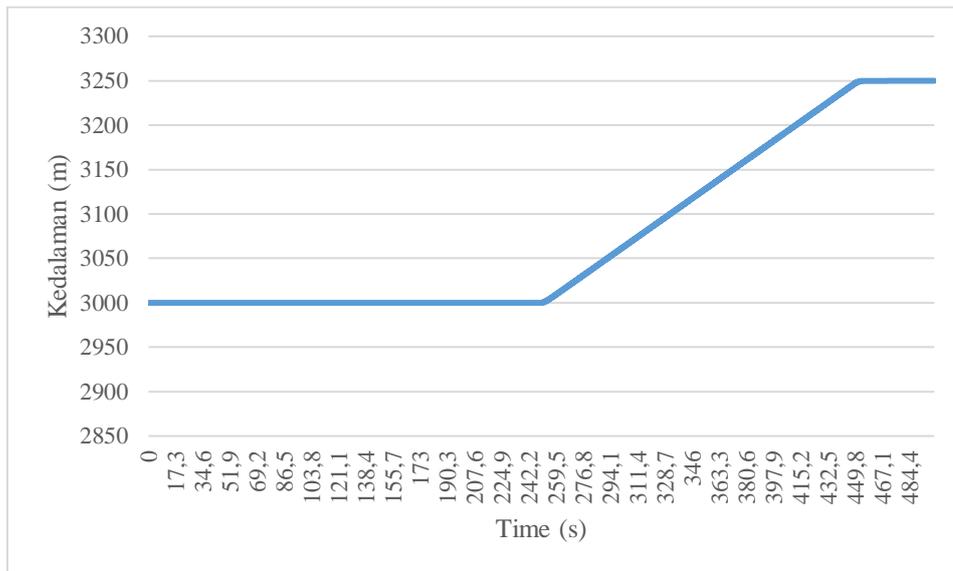
Pada hasil optimisasi memperlihatkan dengan bertambahnya nilai kedalaman akan diiringi dengan mengecilnya nilai *rate of penetration*. Hal ini disebabkan oleh hubungan kedalaman dengan tekanan pada sumur. Nilai tekanan sumur akan semakin meningkat seiring bertambahnya nilai kedalaman dan faktor *weight on bit* yang menyebabkan penambahan tekanan. dan berdasarkan persamaan (3.1) kenaikan nilai tekanan dasar sumur akan mempengaruhi penurunan *rate of penetration*. Untuk menjaga nilai ROP di titik optimumnya dan menjaga kestabilan sumur untuk mencegah keruntuhan dinding sumur, maka akan dijaga tekanan seestabil mungkin dengan cara sirkulasi injeksi *mud*. Dan juga untuk mendapatkan nilai ROP yang maksimal dibutuhkan putaran mata bor yang sesuai. Untuk nilai ROP terkecil 1,898 m/jam pada kedalaman terbesar 4000 m dan nilai ROP terbesar yakni 10,401 m/jam pada kedalaman 3000 m. dengan adanya nilai ROP untuk tiap kedalaman pada operasi *drilling*, maka dapat diprediksi waktu untuk pengeboran.

Nilai ROP yang optimal, akan mempersingkat lamanya waktu *drilling*. Dengan berkurangnya waktu *drilling*, maka biaya untuk *drilling* dapat mencapai nilai yang minimum dan menguntungkan.

4.4 Hasil Simulasi Pengendalian Tekanan Dasar Sumur

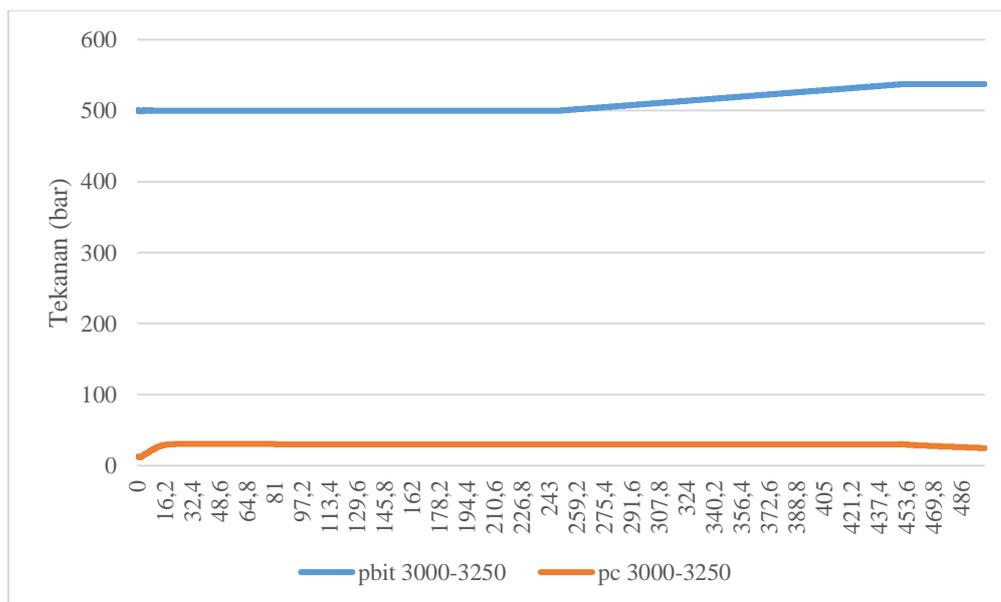
Desain pengendalian dengan penambahan *controller feedforward* untuk mengantisipasi dari gangguan terhadap perubahan nilai *pressure bottom hole* atau *pbit* yang merupakan akibat dari penambahan nilai *weight on bit* karena perubahan kedalaman operasi. Pada proses *drilling*, *Pbit* harus dapat dikendalikan untuk mendapatkan kestabilan tekanan yang ideal. Dengan perubahan penambahan kedalaman operasi, maka akan terdapat penambahan nilai WOB, sehingga nilai *pbit* akan terus meningkat dan menyebabkan performa ROP menurun, hal tersebut memang alami terjadi dan yang dapat dilakukan adalah menjaga agar tekanan didalam sumur stabil dengan *cutting* batuan dari hasil pengeboran tetap terangkat keatas.

Dengan simulasi yang telah dirancang pada penelitian ini akan dibagi berdasarkan kenaikan nilai kedalaman sesuai dari hasil tabel 4.1. dimana kenaikan dari titik *setpoint* ke kedalaman tertentu harus memiliki nilai *pbit* yang sesuai dari hasil perhitungan tersebut. Dikarenakan perhitungan dilakukan di selisih kedalaman yang seragam yaitu tiap 250 m, maka proses kenaikan kedalaman kali ini akan di representasikan pada satu kali kenaikan nilai kedalaman, yaitu pada kedalaman 3000 m ke 3250 m. pada simulasi ini akan diperlihatkan masing-masing respon pengendalian pada tiap variabel proses ketika plant mendapatkan *disturbance*. Waktu yang ditentukan untuk simulasi ini adalah selama 500 detik. Ketika plant sudah mencapai kondisi (*steady-state*) pada detik ke 250 maka *plant* akan menerima sinyal *disturbance* karena penambahan WOB sehingga terjadi lonjakan grafik *pbit*. Adapun hasil simulasi pengendalian ini dapat dilihat melalui gambar 4.10 hingga gambar 4.14.



Gambar 4. 10 Perubahan kedalaman operasi

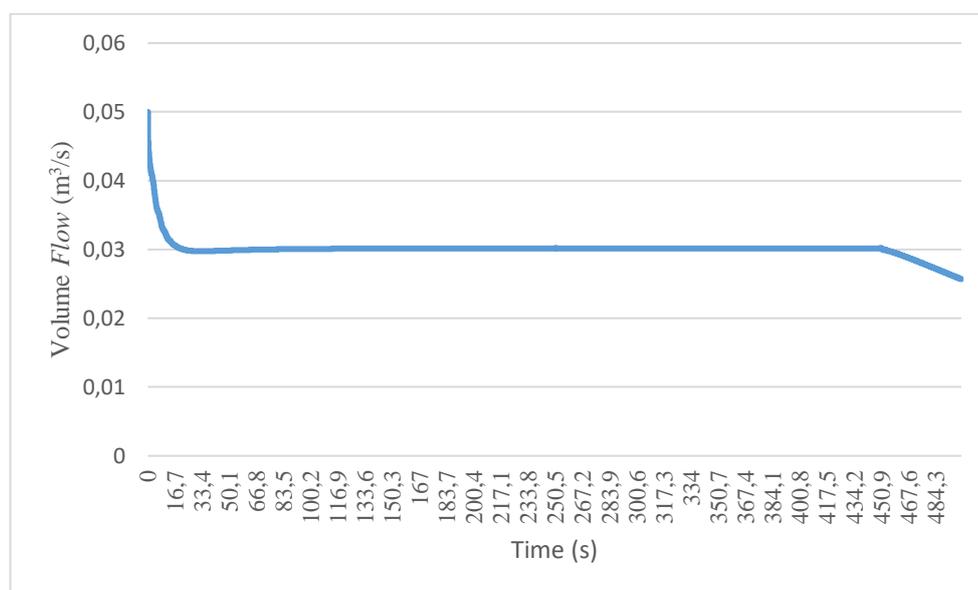
Kedalaman operasi dimulai pada kedalaman 3000 m dan mengalami *disturbance* berupa kenaikan kedalaman operasi pada detik ke 250. Pada gambar 4.11 memperlihatkan kedalaman operasi bergerak menuju 3250 m hingga detik ke 450, untuk kemudian stabil di titik kedalaman 3250 m untuk detik selanjutnya.



Gambar 4. 11 Perubahan nilai *pbit* dan *pc*

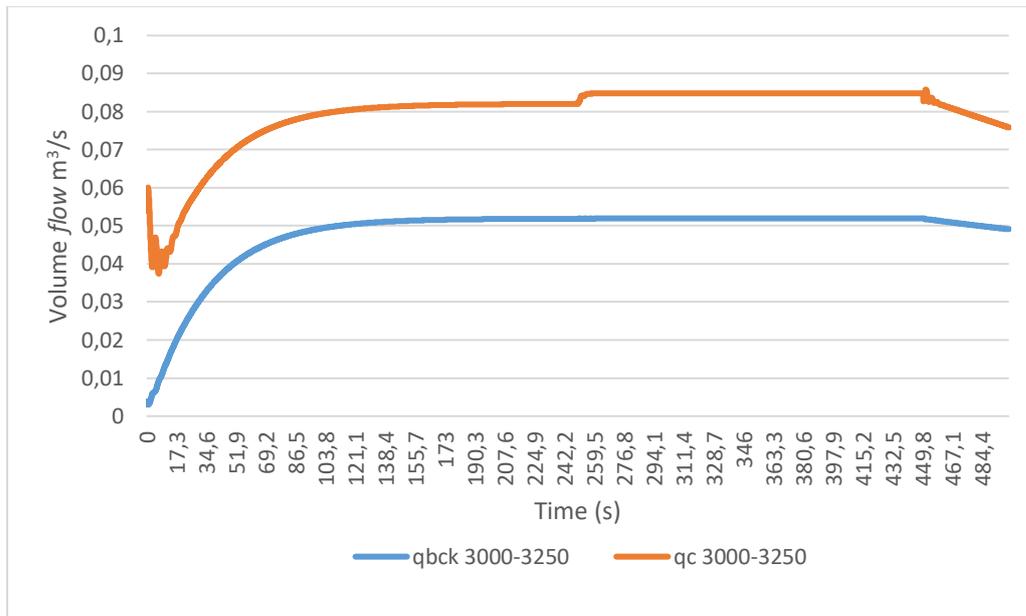
Dari hasil gambar 4.11 dan data yang telah diambil dari hasil simulasi didapatkan penambahan nilai tekanan pada bawah sumur. dimulai ketika sistem

berada di tekanan 500 bar, lalu mendapatkan efek *disturbance* pada detik ke 250. Besar nilai *pbit* meningkat hingga 537,16 bar pada kedalaman 3250 m. setelah mengalami kenaikan hingga detik ke 450 nilai *pbit* stabil di angka 537,16 bar. Sedangkan untuk respon *pressure choke* (p_c) terlihat stabil pada 30.1 bar sebelum mengalami *disturbance*, setelah *pbit* mengalami peningkatan, dan nilai *pbit* menyentuh tekanan 537,16 bar pada detik ke 450 *pressure choke* (p_c) mengalami penurunan hingga 24,7 bar. hal ini menggambarkan bahwa kenaikan nilai keduanya sebanding sehingga tekanan yang masuk dan tekanan keluar tetap terjaga keseimbangannya.



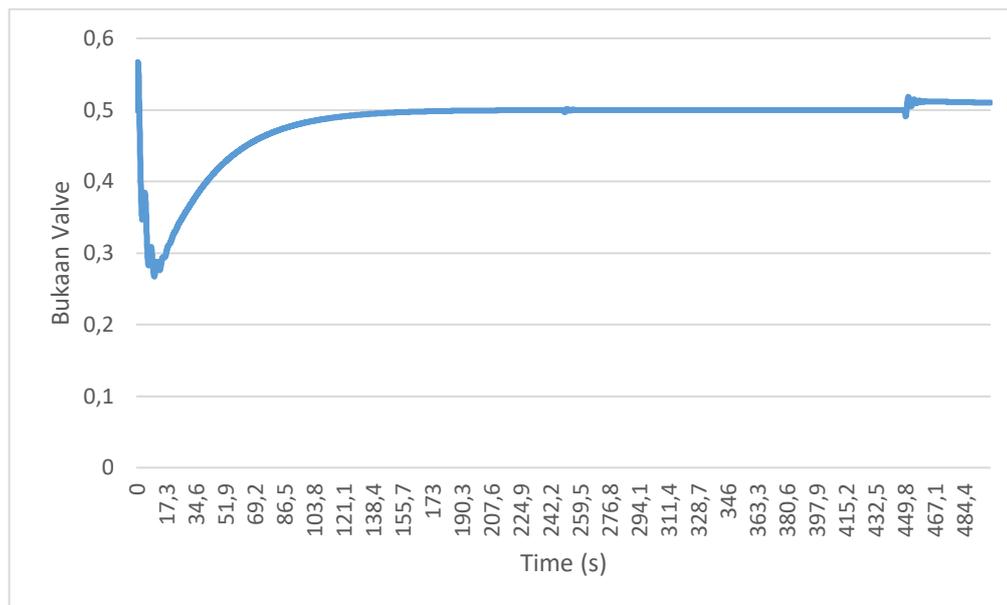
Gambar 4. 12 Volume injeksi *mud*

Pada gambar 4.12 ini terlihat bahwa volume injeksi *mud* mengalami penurunan dari awal sistem melakukan respon, dimana volume *mud* yang diinjeksikan menurun dari titik inisiasi 0,05 m³/s menuju titik kestabilan pada nilai 0,03 m³/s. ketika proses *drilling* mengalami perubahan nilai kedalaman titik volume injeksi masih berada di nilai yang stabil, lalu ketika kedalaman telah menyentuh 3250 m memperlihatkan volume injeksi *mud* mengalami penurunan ke angka 0,026 m³/s. Hal ini menunjukkan bahwa saat *pbit* naik maka *main pump* akan menurunkan injeksi *mud* untuk mempertahankan massa lumpur di dasar *borehole* dengan mengurangi laju aliran pada *bit* sehingga *pbit* juga tetap terjaga.



Gambar 4. 13 Perubahan laju aliran *choke valve* dan *backpump*

Pada gambar 4.13 dapat dilihat bahwa saat sistem *drilling* mengalami kondisi *pbit* stabil menuju *pbit* naik, laju aliran pompa balik (q_{bck}) tidak mengalami perubahan dan cenderung stabil seiring berjalannya waktu. Sedangkan nilai laju aliran dari saluran *choke* (q_c) mengalami peningkatan menjadi $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$ ketika proses kenaikan *pbit*, dan ketika *pbit* telah mncapai nilai maksimalnya, nilai q_c mengalami penurunan menjadi $0,076 \text{ m}^3/\text{s}$, kemudian terus meningkat seiring berjalannya waktu. Nilai *flowrate* pada saluran *choke* merupakan hasil dari respon bukaan *valve* yang perlahan membesar sejak *plant* mendapatkan *disturbance* penambahan nilai WOB karena perubahan kedalaman. Hal tersebut menunjukkan bahwa saat *pbit* naik, q_c akan menambahkan aliran *mud* keluar dari *borehole* untuk menstabilkan nilai *pbit* dimana q_{bck} tetap stabil menginjeksikan *mud*, agar fluida dan serpihan batuan dari hasil *drilling* dibawah sumur tetap dapat mengalir keatas.



Gambar 4. 14 Respon bukaan *choke valve*

Pada gambar 4.14 dapat dilihat respon *choke valve* yang awalnya stabil pada bukaan 48%, setelah sistem *drilling* mengalami penambahan nilai *pbit* pada detik ke 250 bukaan *valve* sedikit demi sedikit membuka lebih besar, lalu setelah menyentuh *pbit* maksimumnya, bukaan *choke valve* makin membesar menuju 51 % . Hal tersebut menunjukkan bahwa saat kenaikan *pbit* maka *valve* akan membuka lebih besar dan meregulasi aliran *mud* yang keluar untuk memenuhi kesetimbangan tekanan pada *borehole* agar *pbit* tetap terjaga.

Tren nilai dan bentuk grafik di masing-masing proses penambahan nilai perubahan tekanan terlihat identik, dikarenakan setiap proses ditentukan setiap penambahan kedalaman 250 m dengan penambahan nilai WOB di tiap kenaikan 250 m bernilai sama. pengaruh penambahan WOB di tiap prosesnya memiliki peran terhadap perubahan tekanan di dasar sumur atau *pbit*. Sistem akan dibiarkan mencapai *setpoint* awalnya hingga keadaan tekanan *steady state* tercapai, dimana Ketika kondisi ini sistem dibangkitkan dari titik awal hingga mencapai kestabilan di titik *setpoint*. Ketika kondisi *steady state* hasil respon pengendalian menunjukkan aliran *backpump*, *choke valve* dan *main pump* dalam keadaan yang setimbang dan berbanding lurus. Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi *steady state* adalah 250 detik setelah itu *setpoint* sistem akan diubah berdasarkan penambahan variabel kedalaman operasi. Respon pengendalian dilakukan ketika proses tekanan

dinamik dimana pada saat penambahan kedalaman, diiringi penambahan WOB yang akan berpengaruh kepada penambahan *pressure bottom hole* atau *pbit*, sehingga *setpoint* sistem akan berubah seiring dengan penambahan kedalaman tersebut. Total perubahan tekanan dari kedalaman dari 3000 m ke 4000 m adalah 147,34 bar, dan kenaikan *pbit* pada hasil grafik simulasi telah menunjukkan hasil yang sesuai. Respon pengendalian dengan strategi *feedforward* pada saat kondisi dinamik dilakukan dengan menurunkan volume aliran injeksi dan tekanan lumpur yang masuk melalui *main pump*, dan diinjeksikan ke *bottomhole* oleh *qbit*. Hal tersebut dikarenakan aliran *mud* masuk telah ditentukan sebagai *feed* sehingga pengendalian tekanan utama adalah dengan mengatur laju aliran masuk oleh *main pump*. Lalu respon oleh *choke valve* telah sesuai dengan cara memperbesar bukaan *valve* seiring dengan penambahan kedalaman, dan penambahan nilai *pbit*. Ketika terjadi kenaikan tekanan pada *pbit*, *choke valve* membuka semakin lebar sehingga menurunkan tekanan pada saluran *choke* untuk memungkinkan *mud* keluar dalam volume yang lebih besar. Saluran *choke* berperan untuk menjaga kesetimbangan massa laju aliran, tekanan masuk dan keluar, dibantu dengan aliran injeksi *mud* oleh *backpump*. Apabila terjadi kenaikan *pbit* sesuai dengan kondisi tersebut *backpump* mengalirkan *mud* dalam volume stabil tanpa adanya peningkatan dan ketika *pbit* telah mencapai nilai yang dianggap tinggi maka *backpump* akan menurunkan injeksinya. Nilai volume laju aliran pada saluran *choke* merupakan volume lumpur hasil injeksi *main pump* dengan membawa serpihan batuan (*cutting*) yang telah terangkat dari dasar sumur ditambah dengan volume lumpur dari injeksi *backpump*.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan beberapa poin penting sebagai berikut:

- Penambahan kedalaman operasi tiap 250 m akan menghasilkan penambahan *weight on bit* sebesar 2,56 ton dan kenaikan tekanan dasar sumur dengan nilai rata rata 36,84 bar, ditinjau dari hasil perhitungan sehingga hubungan *weight on bit* dan tekanan dasar sumur adalah berbanding lurus.
- Dari hasil optimisasi yang dilakukan menggunakan metode *genetic algorithm* terdapat 4 variabel yang dianggap memengaruhi nilai fungsi objektif ROP ketika perubahan kedalaman operasi, yaitu: *rotary speed*, *flow rate mud*, *mud density* dan *pressure choke* dengan input variabel *weight on bit* (WOB). Nilai ROP akan semakin mengecil seiring dengan bertambahnya kedalaman operasi dan meningkatnya tekanan dasar sumur. Kedalaman operasi paling dalam 4000 m dengan nilai ROP terkecil 1,898 m/jam. Dan kedalaman operasi 3000 m dengan nilai ROP 10,401 m/jam.
- Dari inti pengerjaan tugas akhir ini adalah simulasi pengendalian *drilling* didapatkan beberapa respon dengan penambahan *feedforward control*. Dimana tiap elemen pengendalian menghasilkan respon berkesinambungan untuk menjaga tekanan *pbit* dan *pressure bottom hole* yang ideal dan menjaga kesetimbangan massa didalam sumur dengan pengaruh perubahan kedalaman operasi.

5.2 Saran

Adapun saran yang bisa diberikan penulis untuk penelitian selanjutnya adalah:

- Penggunaan data akan lebih baik, bila bisa didapatkan hasil operasi *drilling* secara langsung untuk data primer sehingga penulis dapat menganalisa dan memilih variabel yang dibutuhkan.
- Penambahan *controller* MPC sebagai pembanding dari hasil PID, dan alternatif untuk mendapatkan performa kontrol *drilling* yang lebih baik.

Daftar Pustaka

- Bellarby, J. (2009). *Well Completion Design*. Aberdeen: Elsevier.
- Biyanto, T. (2016). Thermal and hydraulic impacts consideration in refinery crude preheat train cleaning scheduling using recent stochastic optimization methods.
- Bordons, C., & Camacho, E. (1999). *Model Predictive Control*. Springer-Verlag London Limited.
- Bourgoyne Jr., A., & Young Jr., F. (1974). *A multiple regression approach to optimal drilling and abnormal pressure detection*. Society of Petroleum Engineers.
- Bourgoyne, A., Chenevert, M., Millheim, K., & Young, F. (1986). *Applied Drilling Engineering*. Society of Petroleum Engineers (SPE).
- Cooper, D. (2008). *Pattern-based closed-loop quality control for the injection molding process*.
- Dai, L., Xia, Y., Fu, M., & Mahmoud, S. (2012). *Discrete-time model predictive control In Advance In Discrete Systems*. InTech.
- Dienanta, G., & Biyanto, T. (2017). *Optimisasi Operasi Drilling*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Erik-Halgestad, D. (2010). *The Drilling Process: A Plantwide Control Approach*. Norwegia: Faculty of Natural Sciences and Technology Department of Chemical Engineering- NTNU.
- Gatlin, C. (1960). *Petroleum Engineering: Drilling and Well Completions*. Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- Goldberg, D. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Boston: Addison-Wesley Longman Publishing Co.
- Guo, B., Lyons, W., & Ghalambor, A. (2007). *Petroleum Production Engineering*. Gulf Professional Publishing.
- Irawan, S., Rahman, A. A., & Tunio, S. Q. (2012). Optimization of Weight on Bit During Drilling Operation Based on Rate of Penetration Mode.

- Kuncoro, F., & Biyanto, T. (2019). *Optimisasi Pada Kondisi Operasi Control Drilling Dengan Konsep Plant Wide Control*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Lim, S., & Haron, H. (2013). Performance Comparison of Genetic Algorithm, Differential Evolution and Particle Swarm Optimization Towards Benchmark Functions. *ICOS*. Sarawak: IEE.
- Mitchell, R., & Miska, S. (2011). *Fundamental of Drilling Engineering*. Dallas, Texas: Society of Petroleum Engineers.
- Moses, A., & Egbon, F. (2011). Semi-analytical models on the effect of drilling fluid properties on Rate of Penetration (ROP). *SPE no. 150806. Proceedings of the Nigeria Annual International Conference and Exhibition*. Abuja, Nigeria.
- Nyquist, Scott. (2018). Energy 2050: Insight from The Ground Up. *Sustainability & Resource Productivity, McKinsey & Company*.
- Orukpe, P. (2012). MODEL PREDICTIVE CONTROL FUNDAMENTALS. *Nigerian Journal of Technology* .
- Sakkaki, B. (2018). *Design of Offshore Drilling Fluids*.
- Saleem, Q. A. (2011). *Is It Possible to Ignore Problems Rising During Vertical Drilling A Review*. 3(11): 1331-1336: *J. Appl. Sci. Eng. Technol.*, .
- Schlumberger. (2020, June). *True Vertical Depth*. Retrieved from Schlumberger Glossary:
https://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/t/true_vertical_depth.aspx?p=1
- Transocean, P. (2009). *Drilling Practices Workshop :Student Reference Material & Workbook. Buku Panduan Training PT. Transocean*. Transocean :Singapore Training Centre.
- Tuna, E. (2010). *Real Time Optimization of Drilling Parameters during drilling operation (Thesis)*. Middle East Technical University.
- van Lingen, N., & Garnier, A. (1959). Phenomena Affecting Drilling Rates at Depth. *Annual Fall Meeting of SPE*. Houston, TX.
- Vidrine, D., & Benit, E. (1968). Field Verification of effect of Differential Pressure on Drilling Rate. *J. Petroleum Technology*, 20(7).

LAMPIRAN

A. Fungsi Objektif Optimisasi

```
function ROP=fobdrilling(x)
%optimized variable
WOB=30.6 %weight on bit (tons)
RPM=x(2) %rotary speed (RPM)
qmud=x(3) %flow rate lumpur (L/s)
pc=x(4) %pressure choke (bar)
rho=x(5) %density lumpur (kg/m3)

%Parameter drilling model
R0=5; %formation drillability (m/hr)
pf=470; %formation pressure at bottom well (bar)
tt0= 10; %trip time hours
wdbmax=178.583; %maximum WOB per diameter (tons/m)
wdbt=63/R0; %threshold WOB per m diameter (tons/m)
N=100; %drill string RPM (min-1)
db=0.254; %drill bit diameter (m)
theta1=900; %annulus friction parameter (kg/m4s)
dstring=0.1; %drill string outer diameter (m)
D=3007; %depth well (m)
dp=0.005; %particle diameter (m)
phi=pi;
rhos=2700; %formation density (kg/m3)
g=9.8; %gravity (m/s2)

%Rate of Penetration Modelling
kc=5e5/R0; %valve flow konstan (m2)
Aa=(db^2-dstring^2)*phi/4; %cross-sectional area of annulus (m2)
An=3*pi*(0.01^2)/4; %nozzle x-sec area (m2)
F=WOB/db*kc*db^2*phi/4; %force
T=F*dstring/2000; %torque (kNm)
newrho=rho*(1-T/100)+rhos*T/100; %rho friction (kg/m3)
pbh=x(4)+(theta1*x(3)/1000)+newrho*g*D/1e5 %bottom hole pressure
(bar)
P=T*2*phi*x(2)/60; %power (kW)
Fj=x(3)^2*rho/An/1e6; %hydraulic jet impact force (N)
ROP=(R0*((WOB/db-wdbt)/(71.4-
wdbt))*((N/60)^0.7))*((Fj/4482)*0.3)*exp(0.01*(pf-pbh))

K=15*R0; %formation of abrasiveness constant (hours)
va=qmud/100/Aa; %annulus velocity (m/s)
vslip=sqrt(8/9*g*dp*(rhos-newrho)/rho); %slip velocity (m/s)
vT=va-vslip; %transport velocity (m/s)
qs=ROP*phi/4*db^2*1000/3600; %cutting feed rate (1/s)
xc=qs/1000/Aa/vT*100; %cuttings fraction

%cost of drilling
td0=K*(60/ROP)^1.7*(wdbmax-WOB/db)/(wdbmax-71.433); %bit life-time
cost=D*((1/ROP)+(tt0/(ROP*td0))) %cost drilling
end
```

B. Kode Genetic Algorithm

```

clear all
clc

Dimension = 4;
UB = [200 50 100 2000];           % Upper Bounds
LB = [100 0.001 0.001 0.001];    % Lower Bounds

Npop = 200;
Maxit = 100;
e1 = 0.95;
Pc = 0.8;
Pm = 0.01;
Psilang = 0.8;
Nbit = 20;

eBangkit = [];
Individu = [];
eIndividu = [];
david = [];
Dadatfit = [];
Datfit = [];
summary = [];
eDadatfit = [];
efitnessmax = [];
eIndividuMax = [];

Bangkit = round(rand(Npop,Nbit*Dimension));
popsize = size(Bangkit,1);
for i = 1:Dimension
    batas(i) = UB(i)-LB(i);
end
for i =1:Npop
    for j = 1:Dimension
        Desimal(i,j)= bi2de(Bangkit(i, ((j*Nbit) - (Nbit-1)):(j*Nbit)), 'left-
msb');
        Individu(i,j) = floor((Desimal(i,j)*batas(:,j) -
batas(:,j)+LB(:,j)*(2^Nbit-1))/(2^Nbit-1));
    end
end
Datfit = [];
variabel = [];
for i = 1:size(Individu,1)
    fitness = fobdrilling(Individu(i,:));
    Datfit = [Datfit;fitness];
    [fitemax,nmax]=max(Datfit);
end
Dadatfit = [];
for generasi=1:Maxit
    disp('GA processing')

```

```

clear command windows
clear command history
clear memory
if generasi > 1
sort_fit = sortrows(sort,Nbit*Dimension+1);
Individul = sort_fit(round((1-el)*Npop+1):Npop,:);
remain = sort_fit(round(el*Npop)+1:Npop,:);
X = Individul;
M = size(X,1);
sumfitness = sum(Datfit);
for i=1:M
Prob(i) = Datfit(i)/sumfitness;
end
for i=2:M
Prob(i) = Prob(i)+Prob(i-1);
end
for i=1:M
n=rand;
k=1;
for j=1:M-1
if (n>Prob(j))
k=j+1;
end
end
Xparents(i,:) = X(k,:);
end
%=====Crossover=====
[M,d] = size(Xparents);
Xcrossed = Xparents;
for i=1:2:M-1
c=rand;
if (c<=Pc)
p=ceil((d-1)*rand);
Xcrossed(i,:) = [Xparents(i,1:p) Xparents(i+1,p+1:d)];
Xcrossed(i+1,:) = [Xparents(i+1,1:p) Xparents(i,p+1:d)];
end
end
if (M/2~=floor(M/2))
c=rand;
if (c<=Pc)
p=ceil((d-1)*rand);
str=ceil((M-1)*rand);
Xcrossed(M,:) = [Xparents(M,1:p) Xparents(str,p+1:d)]; %the first
child is chosen
end
end
%=====Mutation=====
[M,d] = size(Xcrossed);
Xnew=Xcrossed;
for i=1:M
for j=1:d
p=rand;
if (p<=Pm)
Xnew(i,j)=1-Xcrossed(i,j);
end
end
end
disp('New fitness calculation');

```

```

Bangkit = [Xnew(:,1:Nbit*Dimension);remain(:,1:Nbit*Dimension)];
end
eBangkit = [eBangkit; Bangkit];
for i =1:Npop
for j = 1:Dimension;
Desimal(i,j) = bi2de(Bangkit(i, ((j*Nbit)-(Nbit-
1)):(j*Nbit)), 'left-msb');
Individu(i,j) = (Desimal(i,j)*batas(:,j)-
batas(:,j)+LB(:,j)*(2^Nbit-1))/(2^Nbit-1);
end
end
Datfit = [];
for i = 1:Npop
fitness = fobdrilling(Individu(i,:));
Datfit = [Datfit;fitness];
[fitemax,nmax] = max(Datfit);
end
Dadatfit = Datfit;
eDadatfit = [eDadatfit;Dadatfit];
eIndividu = [eIndividu;Individu];
[fitnessmax,nmax] = max(eDadatfit);
efitnessmax = [efitnessmax;fitnessmax];
h = plot (efitnessmax);
xlabel('Iteration');
ylabel('Best ROP');
hold on
grid on
refreshdata (h, 'caller')
drawnow;
hold off
BangkitMax = eBangkit(nmax,:);
IndividuMax = eIndividu(nmax,:);
eIndividuMax = [eIndividuMax;IndividuMax];
BangkitMaxlast = BangkitMax;
schedmax = BangkitMax;
clear z;
sort = [Bangkit Dadatfit];
summary = [summary; sort];
david = [david; Dadatfit];
end

```

C. Kode Pemodelan

```

function [f, qc] =
calcf_pru(t, x, zc, qbck, qp, hBit, Va, VaDot, Vd, betaa, betad, M, ...
theta1, theta2, rhod, rhoa, g)
%Function calculates right hand side f = [f1;f2;f3] of system
equations
%x = [pc;pp;qbit]

p0 = 0 %atmospheric pressure since the units are barg we have p0 =
0
pc = x(1); %main pump pressure
pp = x(2); %pressure choke
qbit = x(3); % flow rate through the bit

```

```

qc = 0.0025*zc*sqrt(2/rhoa*(pc-p0)); %menghitung flowrate through
the chocke valve

% calc f
f1 = (betaa/Va) * (qbit - qc + qbck + VaDot); %menghitung pc
f2 = (betad/Vd) * (qp - qbit); % menghitung pp

% menghitung qbit
if qbit>0
f3 = (1/M) * (pp-pc-theta1*qbit-theta2*abs(qbit)*qbit +...
(rhod-rhoa)*g*hBit); %kondisi qbit bernilai positif
else
f3 = max((1/M) * (pp-pc+(rhod-rhoa)*g*hBit),0);
%kondisi qbit bernilai negatif, maka flow mud yg mengalir melalui
annulus dan bit dianggap constant
end

f = [f1;f2;f3];
end

```

D. Simulasi Pressure

```

clear all
close all
clc

% set up simulation
% stepsize
dT = 0.1;
% time vector
time=0:dT:200;
% system parameters
Va = 128.45;
Vd = 17.02;
VaDot = 0;
betaa = 20000;
betad = 20000;
M = 8384;
% massa jenis mud
rhoa = 0.0140;
rhod = 0.0140;
g = 9.81;
theta1= 900;
theta2= 60000;
hBit = 3750;
WOB = 38.4

Atot = 0.0485; %Va/hBit + Vd/hBit
Apipe = 0.00218; %7" OD 3" ID

%intial conditions
pc0 = 13;
pp0 = 208;
qbit0 = 3000/60000;
zc0 = 0.5;
pbit0 = 612;

```

```

pcref0 = 13;
hmud0 = 3000;
qbck0 = 235/60000;
qp0 = 3000/60000;
hpipe0 = 3000;
qc0 = qp0+qbck0;

% storage arrays
pc = zeros(length(time),1);
pp = zeros(length(time),1);
qbit = zeros(length(time),1);
qbck = zeros(length(time),1);
qp = zeros(length(time),1);
zc = zeros(length(time),1);
pbit = zeros(length(time),1);
pcref = zeros(length(time),1);
hmud = zeros(length(time),1);
qc = zeros(length(time),1);
hpipe = zeros(length(time),1);

pc(1) = pc0;
pp(1) = pp0;
qbit(1) = qbit0;
zc(1) = zc0;
pbit(1) = pbit0;
pcref(1) = pcref0;
hmud(1) = hmud0;
qbck(1) = qbck0;
qp(1) = qp0;
hpipe(1) = hpipe0;
qc(1) = qc0;

%PI controller to keep pbit at a set point
pbitref = 612;
Kppcref = 4;
Kipcref = 10;
eipcref = pcref0/Kipcref;

%PI controller to keep pc at a set point
Kp = 0.01;
Ki = 5e-3;
ei = zc0/Ki;

%PI controller to keep zc at a set point
zcref = 0.5;
Kpbck = 0.01;
Kibck = 0.005;
eibck = qbck0/Kibck;

%PI controller to keep qp at a set point
qpref = 3000/60000;
Kpqp = 0.1;
Kiqp = 0.1;
eiqp = qp0/Kiqp;

%PI controller to keep hpipe at a set point

```

```

hpipepref = 3000;
Kphpipe = 0.1;
Kihpipe = 0.5;
eihpipe = hpipe0/Kihpipe;

%Euler integration
for i=1:length(time)-1
%Define current state vectors
x = [pc(i); pp(i);qbit(i)];
hBit = hBit + 0.125
pbitref = pbitref + 0.018
%Set inputs
%if time(i)<50

%qpref = 3000/60000;
%hpipepref = 3000;
%pbit(i) = 470;
%elseif time(i)<200
%Ramp down pump
% qpref = 0;
% zcref = 0.15;
%pbit(i) = 621;
% % elseif time(i)<300
%Trip out drill string
% hpipepref = 2973;
% % pbit(i) = 470;
% % elseif time(i)<400
%Trip in drill string
% hpipepref = 3000;
% % pbit(i)= 440;
% %
% % elseif time(i)>=400
%Ramp up pump
% qpref = 3000/60000;
% zcref = 0.5;
% % pbit(i) = 430;
% %
%end

%Controllers
if i>=2

epcref = pbitref - pbit(i - 1);
eipcref = eipcref + dT*epcref;
pcref(i) = max(Kppcref*epcref + Kipcref*eipcref,0);

qpref(i) = 0.001*(max(Kppcref*epcref + Kipcref*eipcref,0));
% qpref(i) = qpref;

%Controller to keep qp at set point, with switch
% eqp = qpref - qp(i - 1);
eqp = qpref(i-1) - qp(i - 1);
eiqp = eiqp + dT*eqp;
if abs(epcref) < 5
qp(i) = Kpqp*eqp + Kiqp*eiqp;

```

```

else
qp(i) = qp(i - 1);
end

%Controller to keep hpipe at set point, with switch
ehpipe = hpipe_ref - hpipe(i - 1);
eihpipe = eihpipe + dT*ehpipe;
if abs(epcref) < 5
hpipe(i) = Kphpipe*ehpipe + Kihpipe*eihpipe;
else
hpipe(i) = hpipe(i-1);
end

%Simple controller to keep pc at pcref by changing zc
e = pc(i-1) - pcref(i-1);
ei = ei + dT*e;
zc(i) = min(max(Kp * e + Ki * ei,0),100);

%Input reset controller to keep zc at set point by changing qbck
ebck = zcref - zc(i - 1);
eibck = eibck + dT*ebck;
qbck(i) = max( Kpbck*ebck + Kibck*eibck,0);

end

%Calculate right?hand side
[f, qccalc] = calcf(time(i),x,zc(i),qbck(i),qp(i),hBit,Va,...
VaDot,Vd,betaa,betad,M,theta1,theta2,rhod,rhoa,g);

%Step states
x = x + dT*f;

if i>2
vpipe = (hpipe(i)-hpipe(i-1))/dT;
else
vpipe = 0;
end

qc(i+1) = qccalc + Apipe*vpipe;
hmud(i+1) = hmud(i)+Apipe*vpipe/Atot*dT + (qp(i)+ qbck(i)-...
qc(i))/Atot*dT;

%Store results

pc(i+1) = x(1);
pp(i+1) = x(2);
qbit(i+1) = x(3);

%Calculate pbit
pbit(i+1) = pc(i+1)+theta1*qbit(i+1)+rhoa*g*hBit+WOB;

end

%Store last results
zc(length(time)) = zc(length(time)-1);

```

```

qp(length(time)) = qp(length(time)-1);
qbck(length(time)) = qbck(length(time)-1);
pcref(length(time)-1:length(time)) = pcref(length(time)-2);
hmud(length(time)) = hmud(length(time)-1);
hpipe(length(time)) = hpipe(length(time)-1);
qc(length(time)) = qc(length(time)-1);

%% Plot results
set(0, 'defaultaxesfontsize', 14);
set(0, 'defaulttextfontsize', 14);
set(0, 'DefaultLineLineWidth', 1.5);
set(0, 'DefaultFigureColor', 'none');
legFontSize = 16;
scrsz = get(0, 'ScreenSize');

figure
plot(time, pc, time, pcref, time, pbit)
h(1)=legend('$p_c$', '$p_{c,s}$', '$p_{bit}$', 'Location', 'Best');
axis([0 200 0 650]);
xlabel('Time [s]');
ylabel('Pressure [bar]')
set(h, 'Interpreter', 'latex', 'FontSize', legFontSize)
set(gcf, 'PaperPositionMode', 'auto')
% Use screen size
print -djpeg feedforward1

figure
plot(time, zc*100)
h(1)=legend('$z_c$');
%axis([0 200 0 100]);
ylabel('Valve Position [%]');
xlabel('Time [s]');
set(h, 'Interpreter', 'latex', 'FontSize', legFontSize)
set(gcf, 'PaperPositionMode', 'auto') % Use screen size
print -djpeg feedforward2

figure
plot(time, qp*60000, time, qbit*60000)
h(1)=legend('$q_p$', '$q_{bit}$', 'Location', 'Best');
%axis([0 600 0 2500]);
ylabel('Volume flow [liter/min]');
xlabel('Time [s]');
set(h, 'Interpreter', 'latex', 'FontSize', legFontSize)
set(gcf, 'PaperPositionMode', 'auto') % Use screen size
print -djpeg feedforward3

figure
plot(time, qbck*60000, time, qc*60000)
h(1)=legend('$q_{bck}$', '$q_c$', 'Location', 'Best');

```

E. Persamaan Biaya *Drilling* Minimum

Pada penelitian ini dilakukan optimisasi terhadap *rate of penetration drilling*, sedangkan untuk nilai biaya tidak dilakukan pembahasan, namun meninjau dari hasil penelitian sebelumnya telah didapatkan persamaan *drilling cost* sebagai berikut:

$$\min J = \min \left(\frac{D}{R} + t_t^0 \frac{D}{R t_d^0} \right)$$

Tabel A. 1 Parameter perhitungan biaya *drilling*

Variabel	Nilai	Keterangan
t_t^0	10 jam	<i>Single Trip Time</i>
D	3000 m	<i>Well Depth</i>
R _{DA}	12,6741 m/jam	<i>Rate of Penetration Duelist Algorithm</i>
R _{KWA}	12,9367 m/jam	<i>Rate of Penetration Killer Whale Algorithm</i>
R _{RWA}	9,3525 m/jam	<i>Rate of Penetration Rain Water Algorithm</i>
$t_{d(DA)}^0$	16699,69 jam	<i>Drill bit life-time Duelist Algorithm</i>
$t_{d(KWA)}^0$	15531,26 jam	<i>Drill bit life-time Killer Whale Algorithm</i>
$t_{d(RWA)}^0$	19410,2 jam	<i>Drill bit life-time Rain Water Algorithm</i>

BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Kota Surabaya pada 27 Desember 1997. Penulis menempuh pendidikan di SD Muhammadiyah 4 Surabaya (2004 – 2010), SMPN 3 Surabaya (2010 – 2013), SMAN 16 Surabaya (2013 – 2016), dan pendidikan S-1 di Departemen Teknik Fisika , Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Selama menjadi mahasiswa, penulis mengambil bidang minat rekayasa Instrumentasi dan menjadi asisten Laboratorium Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol. Selama kuliah penulis aktif dalam kegiatan kepanitiaan dan organisasi Badan Eksekutif Mahasiswa ITS. Pada Juni – Agustus 2019 penulis melakukan *internship* dalam Departemen Engineering di PT. Pertamina Hulu Energi ONWJ DKI Jakarta. Pada *internship* tersebut penulis melakukan analisis pada Deviasi pembacaan *Orifice Meter* yang digunakan sebagai alat ukur laju aliran gas untuk proses *custody transfer* pada plant penerima gas *Onshore Receiving Facility* Muara karang. Penulis dapat dihubungi melalui *e-mail* yuavilel@gmail.com.

