TUGAS AKHIR - TF 181801

OPTIMISASI KONDISI OPERASI *DRILLING* UNTUK MENGATASI PERUBAHAN MASSA JENIS BATUAN MENGGUNAKAN METODE KONTROL PID

MUHAMMAD GHOFUR R.
NRP. 02311640000030

Dosen Pembimbing:
Ir. Matradji, M.Kom.

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

Halaman ini sengaja dikosongkan

TUGAS AKHIR - TF 181801

OPTIMISASI KONDISI OPERASI DAN KONTROL PADA *DRILLING* UNTUK MENGATASI PERUBAHAN MASSA JENIS BATUAN MENGGUNAKAN METODE KONTROL PID

MUHAMMAD GHOFUR R.
NRP. 02311640000030

Dosen Pembimbing:
Ir. Matradji, M.Kom.

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

FINAL PROJECT - TF 181801

OPTIMIZATION OF OPERATING AND CONTROL CONDITIONS IN DRILLING TO OVERCOME DENSITY ROCK CHANGES USING PID CONTROL METHOD

MUHAMMAD GHOFUR R.
NRP. 02311640000030

Supervisors:
Ir. Matradji, M.Kom.

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

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama	: Muhammad Ghofur R
NRP	: 02311640000030
Departemen / Prodi	: Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika
Fakultas	: Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FT-IRS)
Perguruan Tinggi	: Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "**Optimisasi Kondisi Operasi dan Kontrol pada *Drilling* untuk Mengatasi Perubahan Massa Jenis Batuan dengan Metode Kontrol PID**" 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, 10 Agustus 2020

Yang membuat pernyataan,

Muhammad Ghofur R

NRP. 02311640000030

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

OPTIMISASI KONDISI OPERASI DAN KONTROL PADA *DRILLING* UNTUK MENGATASI PERUBAHAN MASSA JENIS BATUAN MENGGUNAKAN METODE KONTROL PID

Oleh:

Muhammad Ghofur R

NRP. 02311640000030

Surabaya, 10 Agustus 2020

Menyetujui,

Pembimbing

Ir. Matradji, M.Kom.

NIP. 197610061999031002

Mengetahui,

Kepala Departemen

Teknik Fisika FTI-ITS

Dr. Suyanto, S.T., M.T.

NIP. 197111131995121002

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

OPTIMISASI KONDISI OPERASI DAN KONTROL PADA *DRILLING* UNTUK MENGATASI PERUBAHAN MASSA JENIS BATUAN MENGGUNAKAN METODE KONTROL PID

TUGAS AKHIR

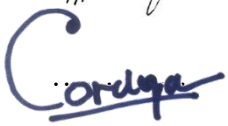
Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Progam Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FTIRS)
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

MUHAMMAD GHOFUR RAHMATULLAH

NRP. 023116400000030

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

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

SURABAYA

2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

OPTIMISASI KONDISI OPERASI DAN KONTROL PADA *DRILLING* UNTUK MENGATASI PERUBAHAN MASSA JENIS BATUAN MENGGUNAKAN METODE KONTROL PID

Nama	**:**	**Muhammad Ghofur R**
NRP	**:**	**023116400000030**
Departemen	**:**	**Teknik Fisika FT-IRS - ITS**
Dosen Pembimbing	**:**	**Ir. Matradji, M.Kom.**

ABSTRAK

Proses utama yang dilakukan dalam pengambilan minyak adalah pembuatan sumur (*wellbore*). Pembuatan *wellbore* membutuhkan sub-sub komponen pendukung seperti *man power, machine, material, methods, environment,* dan *time.* Proses selanjutnya adalah *drilling* (pengeboran), pada tahap ini mulai diterapkannya otomatisasi dikarenakan beberapa faktor, salah satunya adalah batuan. Proses pengeboran sumur harus melewati berbagai jenis batuan yang ada di bumi. Batuan terdiri dari mineral atau bahan organik yang berada di lapisan bawah permukaan atau strata yang tersebar di dunia. Pada saat pengeboran batuan yang akan ditemui digolongkan dalam 3 jenis dasar batuan, batuan *igneous*, sedimen dan *metamorf*. Perlu adanya pemodelan kondisi operasi *drilling* untuk mengatasi perubahan massa jenis batuan diawali dengan tahap penentuan nilai *ROP* (*rate of penetration*) terhadap munculnya *disturbance*, oleh karena itu dilakukanlah optimasi terhadap munculnya perubahan massa jenis batuan. Didapatkan hasil optimisasi *ROP* pada perubahan massa jenis batuan *clay*, *sandstone*, *limestone* dan granit masing masing 7.8111 bar, 6.5731 bar, 5.329 bar, dan 4.9006 bar. Hasil *ROP* akan menentukan fraksi serpihan pada *bottom hole*, serpihan akan ikut terangkut bersama *mud* dalam proses pembersihan *bottom hole*, penambahan serpihan pada *mud* akan menaikkan nilai dari massa jenis *mud*. Nilai massa jenis *mud* awal adalah 1400 kg/m^3 sedangkan nilai massa jenis *mud* campuran akibat serpihan batuan *clay*, *sandstone*, *limestone* dan *granite* masing masing memiliki nilai 1401.97186643153 kg/m^3, 1401.95399033976 kg/m^3, 1401.92783583179 kg/m^3, serta 1401.91588506096 kg/m^3. Oleh karena itu perlu dilakukan pengontrolan terhadap *pressure* pada *bit*

atau *pressure* pada *bottom hole* akibat pengaruh perubahan massa jenis batuan. Pada penelitian kali ini dilakukan pengendalian *pressure* pada *bottom hole* dengan *pressure* pada *choke valve* (*pc*), besar bukaan pada *choke valve* (*zc*) serta *flowrate backpump* (*qbck*) sebagai *manipulated variable*.

Kata Kunci: *drilling, pressure bottom hole,* massa jenis batuan, *disturbance.*

OPTIMIZATION OF OPERATING AND CONTROL CONDITIONS IN DRILLING TO OVERCOME DENSITY ROCK CHANGES USING PID CONTROL METHOD

Name	**:**	**Muhammad Ghofur R**
NRP	**:**	**02311640000030**
Department	**:**	**Engineering Physics FT-IRS - ITS**
Supervisors	**:**	**Ir. Matradji, M.Kom.**

ABSTRACT

The main process carried out in oil extraction is the making of a well (wellbore). Wellbore manufacturing requires supporting sub-components such as man power, machine, material, methods, environment, and time. The next process is drilling (drilling), at this stage the implementation of automation starts due to several factors, one of which is rock. The process of drilling wells must pass through various types of rocks that exist on earth. Rock consists of minerals or organic materials that are in the subsurface layer or strata that are spread in the world. At the time of rock drilling that will be found classified into 3 basic types of rocks, igneous, sedimentary and metamorphic rocks. It is necessary to model drilling operation conditions to overcome changes in rock density beginning with the stage of determining the value of ROP (rate of penetration) on the emergence of disturbance, therefore an optimization of the emergence of changes in rock density occurs. The results from the optimization of the ROP on the change in the density of clay, sandstone, limestone and granite are 7,8111 bar, 6,5731 bar, 5,329 bar and 4,9006 bar respectively. The results of the ROP will determine the fraction of debris on the bottom hole, the debris will be transported along with the mud in the bottom hole cleaning process, the addition of splinter to the mud will increase the value of the mud density. The initial mud density value is 1400 kg/m^3 while the value of mixed mud density due to clay, sandstone, limestone and granite rock fragments each has a value of 1401.97186643153 kg/m^3, 1401.95399033976 kg/m^3, 1401.92783583179 kg/m^3, and 1401.91588506096 kg/m^3, 1401.95399033976

kg/m^3, 1401.92783583179 kg/m^3, and 1401.91588506096 kg/m^3, 1401.95399033976 kg/m^3, 1401.92783583179 kg/m^3, and 1401.91588506096 kg/m^3, 1401.95399033976 kg/m^3, 1401.92783583179 kg/m^3, and 1401.91588506096 kg/m^3, 1401.95399033976 kg/m^3, 1401.92783583179 kg/m^3. Therefore it is necessary to control the pressure on the bit or pressure on the bottom hole due to the influence of changes in rock density. In this study the pressure control of the bottom hole was carried out with pressure on the choke valve (pc), the size of the opening in the choke valve (zc) and the flowrate backpump (qbck) as a manipulated variable.

***Keywords**: drilling, pressure bottom hole, rock density, disturbance*

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat 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 KONDISI OPERASI DAN KONTROL PADA *DRILLING* UNTUK MENGATASI PERUBAHAN MASSA JENIS BATUAN DENGAN METODE KONTROL PID"

Tugas Akhir merupakan salah satu persyaratan akademik yang harus dipenuhi. Penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Bapak Dr. Suyanto, S.T., M.T. selaku Ketua Departemen Teknik Fisika yang telah memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan selama menempuh pendidikan di Teknik Fisika.
2. Kedua orang tua serta kedua saudara kandung yang selalu mendoakan yang terbaik demi kelancaran dan kelulusan penulis.
3. Bapak Ir. Matradji, M.Kom. dan bapak Totok Ruki Biyanto, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing yang telah dengan sabar memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan yang sangat bermanfaat.
4. Bapak Totok Ruki Biyanto, S.T., Ph.D. selaku Kepala Laboratorium Rekayasa Instrumensi dan Kontol yang telah memberikan ilmu, petunjuk, nasihat, serta kemudahan perizinan.
5. Ibu Dr. Ir. Ronny Dwi Noriyati, M.Kes. selaku dosen wali yang selalu sabar dan baik hati dalam melakukan perwalian.
6. Seluruh teman-teman F51, F52, dan F53 yang telah mendukung saya dalam susah maupun senang.
7. Seluruh teman teman Laboratorium Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol yang membantu saya dalam mengerjakan TA.
8. Dewantina M.P.A, Mirza Ichwanul Aziz, Rumah tiara, *Anglo Saxon*, *Socialife* selaku teman dan tempat yang telah menemani, mendengarkan, dan memberi masukan dalam keluh kesah di pengerjaan tugas akhir ini.
9. Seluruh dosen dan civitas akademik Teknik Fisika, terima kasih sebesar besarnya atas kesempatan yang diberikan.

10. Semua pihak yang tidak dapat dikatakan satu persatu.

Penulis sadar 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, 10 Agustus 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL……i
COVER PAGE iii
COVER PAGE iv
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI v
LEMBAR PENGESAHAN.....vii
LEMBAR PENGESAHAN.....ix
ABSTRAK xi
ABSTRACT xiii
DAFTAR ISI xvii
DAFTAR GAMBAR.....xix
DAFTAR TABEL xxxvii
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang..... 1
1.2 Rumusan Masalah..... 3
1.3 Tujuan 3
1.4 Lingkup Kajian..... 4
1.5 Sistematika Laporan 4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....7
2.1 *Drilling* Proses..... 7
2.2 Properti Pengeboran..... 15
2.3 Pemodelan Sistem *Drilling* 17
2.4 *Feedforward Control* 26
2.5 PID..... 27
2.6 *Disturbance* pada Proses *Drilling*..... 27

2.7 Jenis Lapisan Batuan 28
BAB III METODOLOGI PENELITIAN 31
3.1 Perumusan Masalah 32
3.2 Studi Literatur 32
3.3 Penentuan Parameter Pemodelan *Drilling* 33
3.4 Penentuan Fungsi Objektif 34
3.5 Pemodelan pada Sistem *Drilling* 35
3.6 Variansi *Disturbance* 35
3.7 Variabel Teknik Optimisasi Menggunakan Metode *Genetic algorithm* . 36
3.8 Simulasi Kontrol Menggunakan PID 37
3.9 Kesimpulan 37
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 39
4.1 Pengujian Konektivitas Alat dengan Jaringan Internet 39
4.2 Analisa *ROP* dengan Pengaruh *Disturbance* 40
4.3 Optimisasi *ROP* dengan Perubahan Massa Jenis Batuan 41
4.4 Kontrol Sistem *Drilling* 48
4.5 Hasil Simulasi Sistem Kontrol pada Operasi *Drilling* 50
4.6 Analisa Hasil Simulasi Sistem Kontrol pada Operasi *Drilling* 159
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 163
5.1 Kesimpulan 163
5.2 Saran 164
DAFTAR PUSTAKA 165
LAMPIRAN 167
BIODATA PENULIS 181

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 *Mud circulation* sistem 8
Gambar 2. 2 Cara kerja lumpur pemboran 10
Gambar 2. 3 Hubungan *shear, stress, shear rate*, dan viskositas 12
Gambar 2. 4 Tipe *casing* berdasarkan trayek 13
Gambar 2. 5 Proses *perforation* 14
Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian 31
Gambar 4. 1 Rancangan *drilling* PWC sesudah penambahan kontroler *feedforward* 39
Gambar 4. 2 Grafik variansi massa jenis batuan terhadap *ROP* 41
Gambar 4. 3 Grafik nilai optimisasi fungsi objektif *rate of penetration* dengan metode GA tanpa perubahan massa jenis batuan 42
Gambar 4. 4 Grafik nilai optimisasi fungsi objektif *rate of penetration* dengan metode GA dengan perubahan massa jenis batuan *clay* 43
Gambar 4. 5 Grafik nilai optimisasi fungsi objektif *rate of penetration* dengan metode GA dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* 44
Gambar 4. 6 Grafik nilai optimisasi fungsi objektif *rate of penetration* dengan metode GA dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* 45
Gambar 4. 7 Grafik nilai optimisasi fungsi objektif *rate of penetration* dengan metode GA dengan perubahan massa jenis batuan *granite* 46
Gambar 4. 8 Grafik variansi massa jenis batuan terhadap *ROP* setelah optimisasi 47
Gambar 4. 9 Grafik variansi massa jenis batuan terhadap *RPM* setelah optimisasi 48
Gambar 4. 10 Grafik *density* campuran perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone* 51
Gambar 4. 11 Grafik *pbit* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone* 51
Gambar 4. 12 Grafik *pc,pc setpoint, dan pbit-400* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone* 51

Gambar 4. 13 Grafik *zc* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone* 52
Gambar 4. 14 Grafik *qc* dan *qbck* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone* 52
Gambar 4. 15 Grafik *qp* dan *qbit* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone* 52
Gambar 4. 16 Grafik *density mud* campuran saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone* 53
Gambar 4. 17 Grafik *pbit* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone* 53
Gambar 4. 18 Grafik *qp* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone* 54
Gambar 4. 19 Grafik *pc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone* 54
Gambar 4. 20 Grafik *pc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone* 55
Gambar 4. 21 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone* 55
Gambar 4. 22 Grafik *zc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone* 56
Gambar 4. 23 Grafik *zc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone* 56
Gambar 4. 24 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone* 56
Gambar 4. 25 Grafik *qc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone* 57
Gambar 4. 26 Grafik *qc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone* 57
Gambar 4. 27 Grafik perbandingan *qc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone* 58
Gambar 4. 28 Grafik *qbck* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone* 58

Gambar 4. 29 Grafik *qbck* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone* 59
Gambar 4. 30 Grafik perbandingan *qbck* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone*..... 59
Gambar 4. 31 Grafik *density* campuran perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone* 60
Gambar 4. 32 Grafik *pbit* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone* 60
Gambar 4. 33 Grafik *pbit, pc dan pc setpoint* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone*..... 60
Gambar 4. 34 Grafik *zc* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone* 61
Gambar 4. 35 Grafik *qc* dan *qbck* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone* 61
Gambar 4. 36 Grafik *qp* dan *qbit* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone* 61
Gambar 4. 37 Grafik *density* campuran saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone* 62
Gambar 4. 38 Grafik *pbit* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone*..... 62
Gambar 4. 39 Grafik *qp* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone*..... 63
Gambar 4. 40 Grafik *pc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone*..... 63
Gambar 4. 41 Grafik *pc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone* 64
Gambar 4. 42 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone* 64
Gambar 4. 43 Grafik *zc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone* 65
Gambar 4. 44 Grafik *zc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone* 65

Gambar 4. 45 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone* 65
Gambar 4. 46 Grafik *qc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone* 66
Gambar 4. 47 Grafik *qc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone* 66
Gambar 4. 48 Grafik perbandingan *qc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone* 67
Gambar 4. 49 Grafik *qbck* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone* 67
Gambar 4. 50 Grafik *qbck* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone* 68
Gambar 4. 51 Grafik perbandingan *qbck* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone* 68
Gambar 4. 52 Grafik *density* campuran perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite* 69
Gambar 4. 53 Grafik *pbit* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite* 69
Gambar 4. 54 Grafik *pbit, pc* dan *pc setpoint* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite* 69
Gambar 4. 55 Grafik *zc* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite* 70
Gambar 4. 56 Grafik *qc* dan *qbck* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite* 70
Gambar 4. 57 Grafik *qp* dan *qbit* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite* 70
Gambar 4. 58 Grafik *density* campuran saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite* 71
Gambar 4. 59 Grafik *pbit* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite* 71
Gambar 4. 60 Grafik *qp* saat dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite* 72

Gambar 4. 61 Grafik *pc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite* 72
Gambar 4. 62 Grafik *pc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite* 73
Gambar 4. 63 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite* 73
Gambar 4. 64 Grafik *zc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite* 74
Gambar 4. 65 Grafik *zc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite* 74
Gambar 4. 66 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite* 74
Gambar 4. 67 Grafik *qc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite* 75
Gambar 4. 68 Grafik *qc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite* 75
Gambar 4. 69 Grafik perbandingan *qc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite* 76
Gambar 4. 70 Grafik *qbck* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite* 76
Gambar 4. 71 Grafik *qbck* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite* 77
Gambar 4. 72 Grafik perbandingan *qbck* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite* 77
Gambar 4. 73 Grafik *density* campuran perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone* 78
Gambar 4. 74 Grafik *pbit* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone* 78
Gambar 4. 75 Grafik *pbit, pc* dan *pc setpoint* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone* 78
Gambar 4. 76 Grafik *zc* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone* 79

Gambar 4. 77 Grafik *qc* dan *qbck* dengan perubahan massa jenis *sandstone* menuju *limestone*.....79
Gambar 4. 78 Grafik *qp* dan *qbit* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone* 79
Gambar 4. 79 Grafik *density* campuran saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone* 80
Gambar 4. 80 Grafik *pbit* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone*.....80
Gambar 4. 81 Grafik *qp* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone*.....81
Gambar 4. 82 Grafik *pc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone*.....81
Gambar 4. 83 Grafik *pc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone*.....82
Gambar 4. 84 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone* 82
Gambar 4. 85 Grafik *zc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone*.....83
Gambar 4. 86 Grafik *zc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone*.....83
Gambar 4. 87 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone* 83
Gambar 4. 88 Grafik *qc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone*.....84
Gambar 4. 89 Grafik *qc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone*.....84
Gambar 4. 90 Grafik perbandingan *qc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone* 85
Gambar 4. 91 Grafik *qbck* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone*.....85
Gambar 4. 92 Grafik *qbck* saat t=225s dengan perubahan massa jenis *sandstone* menuju *limestone* 86

Gambar 4. 93 Grafik perbandingan *qbck* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone* 86
Gambar 4. 94 Grafik *density* campuran perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite* 87
Gambar 4. 95 Grafik *pbit* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite* 87
Gambar 4. 96 Grafik *pbit, pc* dan *pc setpoint* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite* 87
Gambar 4. 97 Grafik *zc* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite* 88
Gambar 4. 98 Grafik *qc* dan *qbck* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite* 88
Gambar 4. 99 Grafik *qp* dan *qbit* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite* 88
Gambar 4. 100 Grafik *density* campuran saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite* 89
Gambar 4. 101 Grafik *pbit* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite* 89
Gambar 4. 102 Grafik *qp* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite* 90
Gambar 4. 103 Grafik *pc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite* 90
Gambar 4. 104 Grafik *pc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite* 91
Gambar 4. 105 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite* 91
Gambar 4. 106 Grafik *zc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite* 92
Gambar 4. 107 Grafik *zc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite* 92
Gambar 4. 108 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite* 92

Gambar 4. 109 Grafik *qc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite* 93
Gambar 4. 110 Grafik *qc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite* 93
Gambar 4. 111 Grafik perbandingan *qc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite* 94
Gambar 4. 112 Grafik *qbck* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite* 94
Gambar 4. 113 Grafik *qbck* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite* 95
Gambar 4. 114 Grafik perbandingan *qbck* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite* 95
Gambar 4. 115 Grafik *density* campuran perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite* 96
Gambar 4. 116 Grafik *pbit* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite* 96
Gambar 4. 117 Grafik *pbit*, *pc* dan *pc setpoint* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite* 96
Gambar 4. 118 Grafik *zc* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite* 97
Gambar 4. 119 Grafik *qc* dan *qbck* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite* 97
Gambar 4. 120 Grafik *qp* dan *qbit* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite* 97
Gambar 4. 121 Grafik *density* campuran saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite* 98
Gambar 4. 122 Grafik *pbit* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite* 98
Gambar 4. 123 Grafik *qp* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite* 99
Gambar 4. 124 Grafik *pc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite* 99

Gambar 4. 125 Grafik *pc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite* 100
Gambar 4. 126 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite* 100
Gambar 4. 127 Grafik *zc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite* 101
Gambar 4. 128 Grafik *zc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite* 101
Gambar 4. 129 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite* 101
Gambar 4. 130 Grafik *qc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite* 102
Gambar 4. 131 Grafik *qc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite* 102
Gambar 4. 132 Grafik perbandingan *qc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite* 103
Gambar 4. 133 Grafik *qbck* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite* 103
Gambar 4. 134 Grafik *qbck* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite* 104
Gambar 4. 135 Grafik perbandingan *qbck* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite* 104
Gambar 4. 136 Grafik *density* campuran perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay* 105
Gambar 4. 137 Grafik *pbit* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay* 106
Gambar 4. 138 Grafik *pbit*, *pc* dan *pc setpoint* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay* 106
Gambar 4. 139 Grafik *zc* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay* 106
Gambar 4. 140 Grafik *qc* dan *qbck* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay* 107

Gambar 4. 141 Grafik *qp* dan *qbit* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay* 107
Gambar 4. 142 Grafik *density* campuran saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay* 108
Gambar 4. 143 Grafik *pbit* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay* 108
Gambar 4. 144 Grafik *qp* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay* 108
Gambar 4. 145 Grafik *pc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay* 109
Gambar 4. 146 Grafik *pc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay* 109
Gambar 4. 147 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay* 110
Gambar 4. 148 Grafik *zc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay* 110
Gambar 4. 149 Grafik *zc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay* 111
Gambar 4. 150 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay* 111
Gambar 4. 151 Grafik *qc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay* 112
Gambar 4. 152 Grafik *qc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay* 112
Gambar 4. 153 Grafik perbandingan *qc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay* 112
Gambar 4. 154 Grafik *qbck* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay* 113
Gambar 4. 155 Grafik *qbck* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay* 113
Gambar 4. 156 Grafik perbandingan *qbck* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay* 114

Gambar 4. 157 Grafik *density* campuran perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay* 114
Gambar 4. 158 Grafik *pbit* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay* 115
Gambar 4. 159 Grafik *pbit, pc* dan *pc setpoint* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay* 115
Gambar 4. 160 Grafik *zc* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay* 115
Gambar 4. 161 Grafik *qc* dan *qbck* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay* 116
Gambar 4. 162 Grafik *qp* dan *qbit* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay* 116
Gambar 4. 163 Grafik *density* campuran saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay* 117
Gambar 4. 164 Grafik *pbit* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay* 117
Gambar 4. 165 Grafik *qp* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay* 117
Gambar 4. 166 Grafik *pc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay* 118
Gambar 4. 167 Grafik *pc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay* 118
Gambar 4. 168 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay* 119
Gambar 4. 169 Grafik *zc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay* 119
Gambar 4. 170 Grafik *zc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay* 120
Gambar 4. 171 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay* 120
Gambar 4. 172 Grafik *qc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay* 121

Gambar 4. 173 Grafik *qc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay* 121
Gambar 4. 174 Grafik perbandingan *qc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay* 121
Gambar 4. 175 Grafik *qbck* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay* 122
Gambar 4. 176 Grafik *qbck* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay* 122
Gambar 4. 177 Grafik perbandingan *qbck* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay* 123
Gambar 4. 178 Grafik *density* campuran perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone* 123
Gambar 4. 179 Grafik *pbit* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone* 124
Gambar 4. 180 Grafik *pbit, pc* dan *pc setpoint* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone* 124
Gambar 4. 181 Grafik *zc* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone* 124
Gambar 4. 182 Grafik *qc* dan *qbck* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone* 125
Gambar 4. 183 Grafik *qp* dan *qbit* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone* 125
Gambar 4. 184 Grafik *pbit* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone* 126
Gambar 4. 185 Grafik *pbit* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone* 126
Gambar 4. 186 Grafik *density* campuran saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone* 126
Gambar 4. 187 Grafik *pc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone* 127
Gambar 4. 188 Grafik *pc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone* 127

Gambar 4. 189 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone* 128
Gambar 4. 190 Grafik *zc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone*..... 128
Gambar 4. 191 Grafik *zc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone*..... 129
Gambar 4. 192 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone* 129
Gambar 4. 193 Grafik *qc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone*..... 130
Gambar 4. 194 Grafik *qc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone*..... 130
Gambar 4. 195 Grafik perbandingan *qc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone* 130
Gambar 4. 196 Grafik *qbck* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone*..... 131
Gambar 4. 197 Grafik *qbck* saat t=225s dengan perubahan massa jenis *limestone* menuju *sandstone* 131
Gambar 4. 198 Grafik perbandingan *qbck* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone*..... 132
Gambar 4. 199 Grafik *density* campuran perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay* 132
Gambar 4. 200 Grafik *pbit* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay*..... 133
Gambar 4. 201 Grafik *pbit*, *pc* dan *pc setpoint* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay* 133
Gambar 4. 202 Grafik *zc* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay*..... 133
Gambar 4. 203 Grafik *qc* dan *qbck* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay* 134
Gambar 4. 204 Grafik *qp* dan *qbit* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay* 134

Gambar 4. 205 Grafik *density* campuran saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay* 135
Gambar 4. 206 Grafik *pbit* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay* 135
Gambar 4. 207 Grafik *qp* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay* 135
Gambar 4. 208 Grafik *pc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay* 136
Gambar 4. 209 Grafik *pc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay* 136
Gambar 4. 210 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay* 137
Gambar 4. 211 Grafik *zc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay* 137
Gambar 4. 212 Grafik *zc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay* 138
Gambar 4. 213 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay* 138
Gambar 4. 214 Grafik *qc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay* 139
Gambar 4. 215 Grafik *qc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay* 139
Gambar 4. 216 Grafik perbandingan *qc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay* 139
Gambar 4. 217 Grafik *qbck* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay* 140
Gambar 4. 218 Grafik *qbck* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay* 140
Gambar 4. 219 Grafik perbandingan *qbck* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay* 141
Gambar 4. 220 Grafik *density* campuran perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone* 141

Gambar 4. 221 Grafik *pbit* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone* 142
Gambar 4. 222 Grafik *pbit, pc* dan *pc setpoint* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone* 142
Gambar 4. 223 Grafik *zc* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone* 142
Gambar 4. 224 Grafik *qc* dan *qbck* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone* 143
Gambar 4. 225 Grafik *qp* dan *qbit* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone* 143
Gambar 4. 226 Grafik *density* campuran saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone* 144
Gambar 4. 227 Grafik *pbit* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone* 144
Gambar 4. 228 Grafik *qp* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone* 144
Gambar 4. 229 Grafik *pc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone* 145
Gambar 4. 230 Grafik *pc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone* 145
Gambar 4. 231 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone* 146
Gambar 4. 232 Grafik *zc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone* 146
Gambar 4. 233 Grafik *zc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone* 147
Gambar 4. 234 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone* 147
Gambar 4. 235 Grafik *qc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone* 148
Gambar 4. 236 Grafik *qc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone* 148

Gambar 4. 237 Grafik perbandingan *qc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone* 148
Gambar 4. 238 Grafik *qbck* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone* 149
Gambar 4. 239 Grafik *qbck* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone* 149
Gambar 4. 240 Grafik perbandingan *qbck* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone* 150
Gambar 4. 241 Grafik *density* campuran perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone* 150
Gambar 4. 242 Grafik *pbit* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone* 151
Gambar 4. 243 Grafik *pbit, pc* dan *pc setpoint* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone* 151
Gambar 4. 244 Grafik *zc* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone* 151
Gambar 4. 245 Grafik *qc* dan *qbck* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone* 152
Gambar 4. 246 Grafik *qp* dan *qbit* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone* 152
Gambar 4. 247 Grafik *density* campuran saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone* 153
Gambar 4. 248 Grafik *pbit* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone* 153
Gambar 4. 249 Grafik *qp* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone* 153
Gambar 4. 250 Grafik *pc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone* 154
Gambar 4. 251 Grafik *pc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone* 154
Gambar 4. 252 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone* 155

Gambar 4. 253 Grafik *zc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone* 155
Gambar 4. 254 Grafik *zc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone* 156
Gambar 4. 255 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone* 156
Gambar 4. 256 Grafik *qc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone* 157
Gambar 4. 257 Grafik *qc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone* 157
Gambar 4. 258 Grafik perbandingan *qc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju limeston 157
Gambar 4. 259 Grafik *qbck* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone* 158
Gambar 4. 260 Grafik *qbck* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone* 158
Gambar 4. 261 Grafik perbandingan *qbck* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone* 159

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Parameter Pemodelan Tekanan 17
Tabel 2. 2 Parameter Laju Penetrasi 19
Tabel 2. 3 Parameter Pemodelan Tekanan Dinamik 26
Tabel 3. 1 Nilai Parameter Pemodelan Tekanan *Steady State* 33
Tabel 3. 2 Nilai Parameter Tekanan Dinamik pada Sistem *Drilling* 34
Tabel 3. 3 Variansi Massa Jenis Batuan 36
Tabel 3. 4 Variabel Optimisasi 36
Tabel 4.1 Tabel Analisis Variansi Massa Jenis Batuan Terhadap *ROP* 40
Tabel 4. 2 Hasil Optimisasi GA 5 Variabel Tanpa Perubahan Massa Jenis Batuan 43
Tabel 4. 3 Hasil Optimisasi GA dengan Perubahan Massa Jenis Batuan *Clay* 44
Tabel 4. 4 Hasil Optimisasi GA dengan Perubahan Massa Jenis Batuan *Sandstone* 45
Tabel 4. 5 Hasil Optimisasi GA dengan Perubahan Massa Jenis Batuan *Limestone* 46
Tabel 4. 6 Hasil Optimisasi GA dengan Perubahan Massa Jenis Batuan *Granite* 47
Tabel 4. 7 Tabel *Pressure* pada *Bit* 49
Tabel 4. 8 Penurunan *Pbit* dengan Perubahan Massa Jenis Batuan 50
Tabel 4. 9 Kenaikan *Pbit* dengan Perubahan Massa Jenis Batuan 105

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada zaman saat ini tidak dapat dipungkiri ketergantungan terhadap sumber daya alam yang berkaitan langsung dengan kehidupan masyarakat lambat laun semakin menigkat. Salah satu sumber daya alam yang paling dibutuhkan salah satunya adalah minyak dan gas atau lebih dikenal dengan istilah minyak bumi. Minyak bumi terbentuk dari sisa sisa makhluk hidup yang mati dan mengendap dalam lapisan batuan sejak zaman dahulu, sekitar 10 – 600 juta tahun yang lalu. Untuk mendapatkan minyak dan gas bumi melewati proses yang terbilang cukup kompleks, manusia membutuhkan alat alat berat yang dapat membantu pengerjaanya dalam mendapatkan minyak dan gas bumi. Dalam proses pencarian minyak dan gas bumi digunakan metode seismologi atau *seismic*. Seismologi dapat digunakan untuk mencari keberadaan cadangan minyak baik di darat maupun di laut. Komponen penting pada pengeboran adalah performansi *drilling fluid*. Besarnya biaya *drilling fluid* mencapai 15%-18% dari total biaya pengeboran (A. D. C. f. O. O. Operations,2010).

Proses utama yang dilakukan dalam pengambilan minyak adalah pembuatan sumur (*wellbore*). Pembuatan *wellbore* membutuhkan beberapa komponen pendukung seperti *man power, machine, material, methods, environment,* dan *time*. Namun masalah pertama muncul pada biaya pengadaaan seluruh komponen tersebut yang terbilang mahal sehingga perlu ditentukan variabel yang dapat dimanipulasi untuk menekan *cost*, yaitu variabel *time* dan *man power*.. Proses selanjutnya adalah *drilling* (pengeboran), pada tahap ini mulai diterapkannya otomatisasi dikarenakan beberapa faktor, salah satunya adalah keamanan. Banyaknya kasus kecelakaan yang terjadi akibat kegagalan kerja sistem seperti pada *rig* contohnya, tragedi oklahoma menjadi pengalaman yang memaksa industri minyak dan gas untuk menyediakan teknologi guna meminimalisir terjadinya kegagalan pada sebuah *plant*. Dalam hal ini otomatisasi dalam bidang pengeboran membutuhkan lebih sedikit pekerja untuk menyelesaikan masalah yang terjadi

secara manual dan konvensional dengan mengganti sebagian operasi secara otomatis dan kontrol yang dapat diakses melalui komputer secara berkelanjutan.

Faktor lainnya yang mendorong otomatisasi dalam dunia industri minyak dan gas adalah performansi, diperlukan proses yang lebih efisien guna meningkatkan produktivitas serta kualitas dari produk yang dihasilkan. Terdapat beberapa hal yang yang dibutuhkan untuk mencari cara optimal dalam melakukan operasi. Cara tersebut meliputi optimisasi pada bagian-bagian sistem serta mengatur pengendalian *plant* secara keseluruhan yang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi dan perfomansi pengeboran. Dalam pengeboran juga terdapat kemungkinan *error* yang terjadi, *lag in decision* dalam proses ataupun kesalahan karena *fatigue* atau stres akibat mengandalkan tenaga manusia untuk semua operasi. Dengan menggunakan sistem otomatis dan terintegrasi merupakan sebuah langkah penyelesaian untuk membantu mengurangi kesalahan tersebut dalam sistem serta untuk mengurangi biaya produksi maupun kerugian serta bahaya kerja. Disisi lain, adanya sistem tersebut dapat membangun jaringan lokal,regional dan global agar saling terhubung untuk berbagi informasi (A. Junaidi, 2015). Sudah menjadi hal yang lumrah bagi industri minyak dan gas ini secara perlahan mengadaptasi sistem *drilling* otomatis sebagai sarana yang ampuh untuk meningkatkan produktivitas, kualitas dan keselamatan pekerja yang merupakan komponen penting dalam sebuah perusahaan.

Saat menentukan proses pengeboran ada beberapa faktor yang perlu diperhatikan, salah satunya adalah *oil and gas drilling geology*, geologi sendiri merupakan studi tentang benda padat yang membentuk bumi, yang mencangkup seluruh formasi bawah tanah berupa tanah dan bebatuan, berbagai lapisan kerak bumi serta inti bumi. Dalam hal ini *geology* memainkan peranan penting dalam proses *drilling*, salah satunya eksplorasi yang dapat menentukan dimana letak minyak dan gas bumi yang ada di dalam tanah dan tipe sumur paling baik yang digunakan dalam mencapainya. Untuk saat ini keberhasilan eksplorasi sumur secara universal berkisar pada 40%-50% (Kementrian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia,2014). Proses pengeboran sumur harus melewati berbagai jenis batuan yang ada di bumi. Batuan terdiri dari mineral atau bahan organik yang berada di lapisan bawah permukaan atau strata yang tersebar di dunia. Pada saat

pengeboran batuan yang akan ditemui digolongkan dalam 3 jenis dasar batuan, batuan *igneous*, sedimen dan *metamorf*. Diperlukan tipe *drill bit* yang berbeda pula bagi setiap batuan yang ditemui, kecepatan bor yang berbeda pula, serta tekanan *bit* agar proses pengeboran dapat berjalan secara efisien dan aman.

Dari latar belakang diatas dapat disimpulkan bahwasanya masih terdapat beberapa hal yang dibutuhkan dalam mengoptimisasi sistem otomatis pada operasi *drilling*. Perlu adanya penelitian lebih lanjut terkait metode yang digunakan untuk menemukan langkah yang tepat untuk memperbaharui sistem *drilling*. Untuk itu dilakukan penelitian pada *drilling* dengan tujuan memberikan simulasi awal sebelum nantinya akan dilakukan penerapan alat dalam skala industri besar. Meskipun otomatisasi *rig* pengeboran merupakan hal utama dalam penelitian ini, namun otomatisasi khususnya dalam industri *oil & gas*, melibatkan kontrol otomisasi *ROP* terhadap tipe batuan saat proses *drilling* yang akan memberikan solusi yang layak secara ekonomis, aman, dan sesuai untuk tujuan pengeboran dengan desain yang sangat aman bagi pihak *engineer* maupun pengebor.

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang tersebut, maka didapatkan rumusan masalah yang akan diselesaikan sebagai berikut:

a) Bagaimana memodelkan kondisi operasi *drilling* untuk mengatasi perubahan massa jenis batuan?
b) Metode kontrol apa yang digunakan dalam pemodelan kondisi operasi *drilling* untuk mengatasi perubahan massa jenis batuan?

1.3 Tujuan

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

a) Mampu memodelkan kondisi operasi *drilling* untuk mengatasi perubahan massa jenis batuan
b) Metode kontrol yang digunakan dalam pemodelan kondisi operasi *drilling* untuk mengatasi perubahan massa jenis batuan berupa PID dan *feedforward*

1.4 Lingkup Kajian

Adapun lingkup kajian pada penelitian kali ini, yaitu sebagai berikut:

a) *Density* batuan yang digunakan meliputi (*density* batuan kapur, pasir, lempung dan granit)
b) Metode kontrol yang digunakan berupa PID dengan penambahan *feedforward*
c) Dilakukan analisa pada hasil MATLAB pada detik ke 150s-300s
d) Nilai *pressure* dan *flowrate* pada *main pump* dianggap konstan
e) Efisiensi proses penyaringan/pemisahan antara mud dan batuan yang terangkat dari lubang pengeboran dianggap 100% (terjadi pemisahan secara sempurna). Sehingga massa jenis *mud* yang diinjeksikan kembali dari *main pump* akan bernilai sama.

1.5 Sistematika Laporan

Secara sistemasi, laporan tugas akhir ini tersusun dalam lima bab 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 pembuatan sumur minyak, aspek pengeboran, parameter tekanan, kontrol PID, kontrol *feedforward*, pemodelan sistem *drilling*, dan teknik optimasi dengan metode stokastik.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

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

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyediakan hasil pengolahan, analisa, dan pembahasan dari data sekunder tugas akhir ini.

BAB V PENUTUP

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

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 *Drilling* Proses

Proses pada *drilling* diawali dengan pencarian minyak dalam bumi menggunakan metode *seismic*. Operasi pengeboran menjadi aspek penting dalam industri minyak dan gas bumi karena tanpa operasi pengeboran, minyak dan gas dalam bumi tidak akan sampai di permukaan (N.N,2008). Terdapat tahapan-tahapan yang harus dilakukan pada proses operasi pengeboran yang meliputi:

- Pemboran (*drilling)*
- Pengontrolan sumur (*well control)*
- Penyelesaian sumur (*well completion*)
- Pengujian sumur (*Well testing*) (N.N,2008)

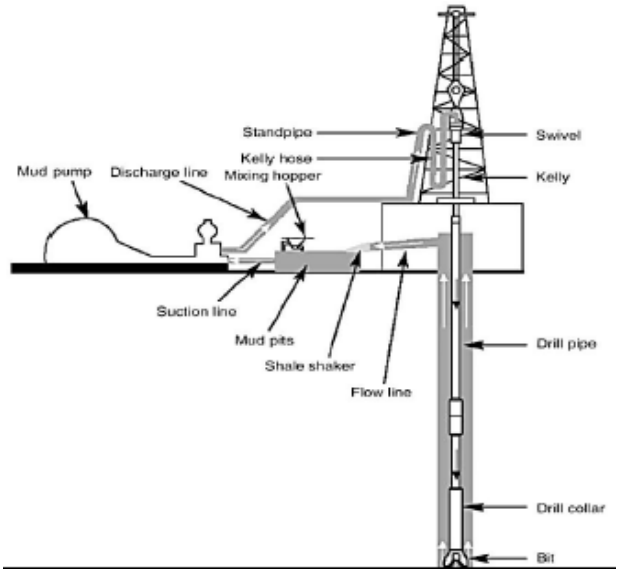
Proses pengeboran minyak dan gas dapat dijelaskan sebagai berikut:

A. Drilling

Pembuatan sumur dilakukan setelah melakukan survei seismik terhadap lokasi dan kemudian dilakukanlah pengeboran terhadap formasi tanah dengan menggunakan gaya tekan kebawah dan rotasi dari *drill string* yang ditransmisikan menuju mata bor (*bit*).

Pada proses pengeboran sumur, tahapan-tahapan seperti penggantian lumpur, penggantian *casing*, dan *cementing* dilakukan tiap trayek *casing*. Setelah sumur terbentuk, dinding-dinding formasi yang dibor akan meninggalkan serpihan-serpihan bebatuan (*cutting*) yang dapat mengganggu proses *drilling* selanjutnya sehingga dibutuhkan injeksi lumpur untuk mengatasinya. Lumpur diinjeksikan melalui lubang pada *drill string* menuju ke dasar sumur dan mengangkat *cutting* ke permukaan melalui *annulus* untuk dilakukan pemisahan *cutting* dengan lumpur dan untuk mendinginkan *bit*. Hasil *cutting* kemudian dianalisis oleh tim geologi untuk menentukan karakteristik lapisan tanah dan mengalirkan lumpur ke *mud pit* untuk dialirkan kembali ke sumur. Proses penyaringan dan pengaliran lumpur kembali disebut dengan *mud circulation* sistem.

Proses pada *mud circulation* sistem dimulai dari pemompaan lumpur dari *mud pit* melalui *stand pipe* menuju ke *rotary hose*. Kemudian lumpur akan mengalir ke dalam *swivel* menuju ke dasar lubang melalui *kelly, drill pipe, drill collar*, dan keluar ke *annulus* melalui *bit nozzle*. Setelah itu campuran lumpur dengan *cutting* dibawa menuju ke *mud conditioner* yang terdiri dari *shale shaker, desander, desilter*, dan *degasser* untuk dilakukan penyaringan hingga lumpur dan *cutting* terpisah. Lumpur yang telah disaring dialirkan ke *mud pit* untuk diinjeksikan kembali kedalam sumur.



Gambar 2. 1 *Mud circulation* sistem (Topik Sarip,2015)

B. *Well Control* (C. Gatlin,2006)

Kontrol sumur (*well control*) diperlukan dalam proses industri produksi minyak dalam tujuannya memberikan *safety*, seperti pencegahan *blowout* dan *kick*. Melalaikan kontrol sumur dapat berimbas buruk bagi perusahaan saat *kick* dan *blowout* muncul, seperti *drilling cost* meningkat, membuang serta merusak sumber daya alam, dan kemungkinan menghilangkan nyawa manusia.

1. *Kick* dan *Blowout*

Kick muncul sebagai hasil dari tekanan pada formasi lebih besar daripada tekanan hidrostatik lumpur yang menyebabkan fluida mengalir dari formasi

menuju *wellbore*. *Blowout* bisa terjadi jika *kick* yang terjadi tidak dapat dikontrol.

Alasan dari ketidaksetimbangan tekanan pada formasi dengan tekanan hidrostatik lumpur bisa berasal dari:

a. Berat lumpur kurang.
b. Injeksi lumpur tidak benar sehingga masih terdapat lubang yang tidak terisi.
c. Tekanan *swab.*
d. *Cut mud.*
e. Kehilangan sirkulasi.

Berdasarkan kondisi-kondisi penyebab *kick* diatas, terdapat tanda-tanda akan munculnya *kick* yaitu:

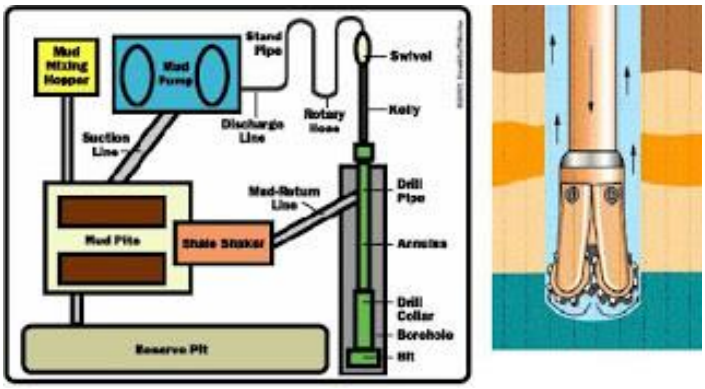
a. Peningkatan *flow rate*.
b. Peningkatan volume *pit.*
c. Aliran lumpur mengalir keluar dari sumur.
d. Tekanan pompa menurun dan *stroke* pompa meningkat.
e. Tidak terisinya lubang saat proses.
f. Berat *string* berubah.
g. Alat pengeboran hancur.
h. Penurunan berat lumpur.

2. Fungsi Lumpur Pemboran (T. S. T. Centre,2009)

Lumpur pemboran merupakan faktor penting penentu berhasil tidaknya pada proses *drilling*. Terdapat fungsi-fungsi lumpur pada proses *drilling*, yaitu:

a. Mengangkat *cutting* ke permukaan yang bergantung pada kecepatan fluida di *annulus* dan kapasitas menahan fluida yang merupakan fungsi dari *density*, aliran, dan viskositas.
b. Mendinginkan dan melumasi *bit* dan *drill string* akibat panas yang timbul akibat bergesekan dengan formasi.
c. Lumpur menahan dinding pada lubang bor dengan *mud cake* di permukaan formasi yang *permeable* sehingga aliran fluida tertahan dan tidak masuk ke formasi selanjutnya.

d. Mengatur tekanan formasi dengan memperhitungkan besar kecilnya *density* lumpur yang dimasukkan.
e. Mendapatkan informasi *mud log* dan *sample log* untuk dianalisis terdapat tidaknya kandungan hidroksida beserta penentuan jenis formasi yang dibor.



Gambar 2. 2 Cara kerja lumpur pemboran (Robert F,2014)

Dalam proses *drilling* diperlukannya lumpur yang diinjeksikan dari permukaan bumi dengan *density* yang telah ditentukan sebelumnya. Pemakaian lumpur dikarenakan perlu daya angkat yang dapat lebih besar pada fluida untuk mengangkat sisa-sisa serpihan hasil pengeboran. Ada terdapat banyak fluida yang dapat digunakan pada proses *drilling* antara lain, air, lumpur bahkan minyak dan tentunya semua telah dilakukan pencampuran dengan senyawa kimia lainnya.. Pada penelitian kali ini digunakan lumpur dengan massa jenis sebesar 1400 kg/m3. Hal ini menunjukkan campuran lumpur dengan densitas yang telah ditentukan dapat mengangkat serpihan batuan yang ada di sumur pengeboran. Dimana serpihan batuan akan mengapung dan ikut terangkut kembali ke permukaan bumi. Nilai densitas yang lebih kecil atau tidak sesuai dapat menyebabkan batuan tidak terangkat dan tenggelam sehingga terjadi penumpukan serpihan di dasar sumur, sebaliknya densitas lumpur yang lebih besar akan mengangkat serpihan batuan namun merasa sulit untuk mengalir. Oleh karena itu diperlukannya lumpur pengeboran yang mampu mengangkat batuan dan *flowable*, dan tentu saja dibutuhkan *cost* yang besar pula dalam pembuatannya.

3. Sifat Lumpur (Slumberger,2007)

Pada proses *drilling*, sifat-sifat lumpur perlu diperhatikan karena peranannya berhubungan langsung dengan fungsi lumpur bor sebagai penahan tekanan formasi dan pengangkut *cutting*. Sifat-sifat lumpur tersebut yaitu:

a. *Density*

Density merupakan salah satu sifat lumpur yang peranannya berhubungan langsung dengan fungsi penahan tekanan formasi. *Density* lumpur bor yang terlalu besar akan menyebabkan lumpur hilang ke formasi (*lost circulation*) dan *density* yang terlalu besar akan menyebabkan munculnya *kick* sehingga perlu disesuaikan dengan keadaan formasi. Perhitungan *density* lumpur menggunakan asumsi-asumsi persamaan (2.1) dan persamaan (2.2) sebagai berikut:

1. Volume material

$$V_s + V_{ml} = V_{mb} \quad \text{.....(2.1)}$$

2. Jumlah berat

$$d_s \; x \; V_s \; x \; d_{ml} \; x \; V_{ml} = \; d_{mb} \; x \; V_{mb} \quad \text{.....(2.2)}$$

dengan:

$V_s = volume\ solid\ (bbl)$

$V_{ml} = volume$ lumpur lama (bbl)

$V_m = volume$ lumpur baru (bbl)

$d_s =$ berat jenis $solid\ (ppg)$

$d_{ml} =$ berat jenis lumpur lama (ppg)

$d_{mb} =$ berat jenis lumpur baru(ppg)

Berdasarkan persamaan (2.1) dan (2.2) didapat:

$$V_s = \frac{(d_{mb} - d_{ml}) x \; W_{ml}}{(d_s - d_{mb})} \quad \text{.....(2.3)}$$

Persamaan berat zat pemberat (*solid*):

$$W_s = V_s \, x \, d_s \quad \text{.....(2.4)}$$

Sehingga *volume solid* (%):

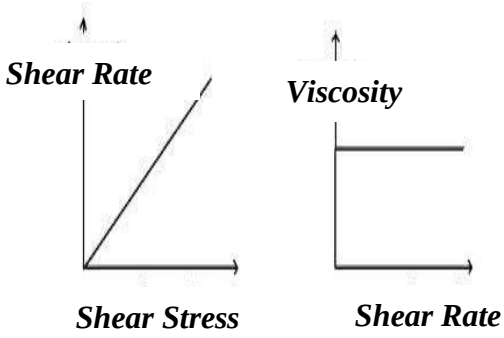
$$\frac{V_s}{V_{mb}} \, x \, 100 = \frac{(d_{mb} - d_{ml})}{(d_s - d_{mb})} \, x \, 100 \quad \text{.....(2.5)}$$

Berat *solid* (%):

$$\frac{d_s \, x \, V_s}{d_{mb} \, x \, V_{mb}} \, x \, 100 = \frac{d_s (d_{mb} - d_{ml})}{d_{mb} (d_s - d_{mb})} \, x \, 100 \quad \text{.....(2.6)}$$

b. Viskositas dan *Gel Strength*

Pengukuran sifat-sifat rheologi fluida pemboran juga perlu diperhatikan mengingat perannya sebagai faktor efektifitas pengangkat *cutting*. Menghitung viskositas memerlukan penentuan hubungan *shear stress* dan *shear rate* seperti pada gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Hubungan *shear stress*, *shear rate*, dan viskositas **(**C. Gatlin,2006)

C. *Well Completion* (C. Gatlin,2006)

Well completion merupakan proses persiapan untuk memproduksi fluida hidroksida dengan cara pemasangan seluruh peralatan ke dalam sumur sehingga proses kontrol dan *monitoring* aliran dapat terlaksana dengan baik. Terdapat tahapan pada proses *well completion*, yaitu:

1. Pemasangan *Christmas Tree*

Christmas tree terletak di permukaan di mana pada bagian ini terpasang beragam *valve* yang digunakan dalam proses pengambilan fluida hidrokarbon sehingga produksi dapat dikontrol dengan menutup atau membuka *valve* tersebut.

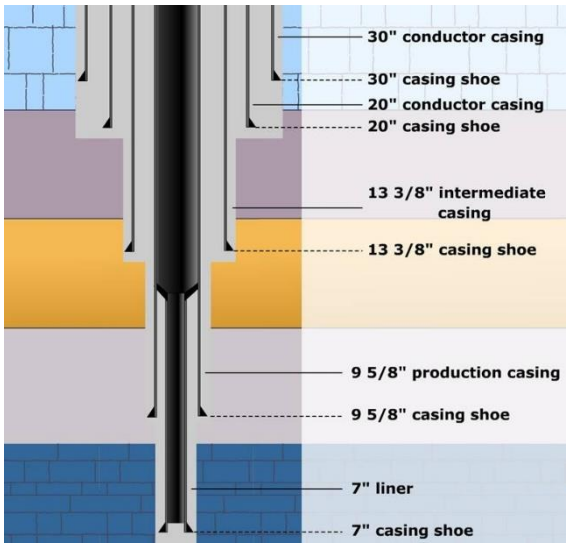
2. Pemasangan *Wellhead*

Wellhead terletak tepat dibawah *christmas tree* yang digunakan sebagai suspensi *casing* atau *tubing*; menahan dan mengisolasi tekanan pada *casing*, yang mana *wellhead* tersebut diletakkan di permukaan ketika banyak *casing srting* terpakai; bertindak sebagai pengait *blowout preventer* ketika pengeboran sedang berlangsung; dan bertindak sebagai pengait *christmas tree* untuk operasi produksi.

3. Pemasangan *Casing*

Casing merupakan komponen utama dari pembuatan sumur yang biasanya besar di diameter dan lebih panjang daripada *drill pipe* dan digunakan untuk menopang lubang sumur. Pada proses *drilling*, penggunaan *casing* dilakukan tiap trayek dan secara berkala dimulai dengan *surface casing*, *intermediate casing*, berakhir di *production casing* dan *tubing* pada *well completion*. Fungsi dari *casing* adalah sebagai berikut:

a. Sebagai penopang dinding sumur.
b. Mencegah air bersih bercampur dengan fluida yang tidak diinginkan.
c. Mengisolasi air dan gas agar tidak masuk ke dalam *wellbore*.
d. Menjadi pembatas untuk mengontrol tekanan dari formasi
e. Sebagai tempat pemasangan *artificial lift*.
f. Sebagai tempat mengalirnya fluida produksi.



Gambar 2. 4 Tipe *casing* berdasarkan trayek (*drilling course*, 2015)

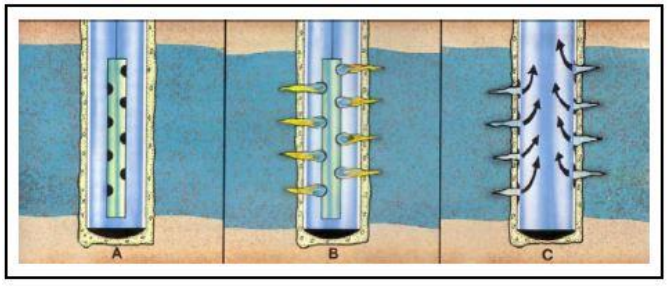
4. *Cementing* (C. Gatlin,2006)

Cementing merupakan proses penyemenan *casing* terhadap lubang bor menggunakan bubur semen yang terdiri dari campuran semen bubuk, zat aditif, dan air. Kegunaan dari proses *cementing* adalah sebagai berikut:

a. Mencegah bergeraknya fluida melalui ruang *annular* diluar *casing*.
b. Melindungi dan mendukung *casing*.
c. Menghentikan pergerakan fluida melalui formasi struktur tanah.
d. Menutup bagian kosong dari sumur.

5. *Perforation* (C. Gatlin,2006)

Perforation merupakan proses pembuatan lubang pada *casing* bagian dasar yang menutupi sumber hidrokarbon agar fluida hidrokarbon dapat mengalir kedalam *tube*. Proses *perforation* dilakukan dengan menggunakan tembakan perforasi bertipe WCP.



Gambar 2. 5 Proses *perforation* (Andy S, 2010)

6. Pemasangan *Tubing*

Pemasangan tubing dilakukan setelah bor diangkat dan proses pemasangan *casing* maupun *cementing* selesai. *Tubing* digunakan untuk sebagai jalan alir hidrokarbon menuju permukaan.

D. *Well Testing*

Well testing merupakan uji performansi sumur di mana pada proses ini akan didapatkan data mengenai tekanan, temperatur, *specific gravity*, umur dari sumur minyak, dan banyaknya minyak yang dapat dihasilkan (R. F. Mitchel, 2008).

2.2 Properti Pengeboran

Saat proses pengeboran terdapat p*rop*erti yang perlu untuk dijaga kestabilannya. P*rop*erti tersebut harus dijaga sesuai dengan *range* yang sudah ditentukan sebelumnya. Properti yang dimaksud adalah sebagai berikut:

a. *Mud Density*

Mud density atau yang selanjutnya juga bisa disebut *mud weight*, dapat ditingkatkan kerapatannya dengan menambahkan berbagai macam jenis *solid* atau material yang dapat larut. Semakin tinggi *density*, maka semakin besar usaha yang diperlukan untuk memindahkan *mud*. *Mud* akan diinjeksikan melalui *main pump* yang ada di permukaan menuju *reservoir* melalui *pipe* pada *bit*, *density* berpengaruh langsung terhadap pengangkatan *cutting* batuan hasil penetrasi dari ujung *bit*, untuk diangkat menuju ke permukaan melalui *annulus*. *Density* berfungsi untuk:

1. Menghasilkan tekanan hidrostatik untuk mencegah formasi fluida masuk ke dalam *wellbore*.
2. *Mud weight* yang lebih besar membantu untuk membawa *cutting* akibat dari efek daya apung.
3. Menstabilkan *wellbore* jika dinding memiliki kecenderungan untuk runtuh

b. Laju Aliran

Laju aliran atau *flow rate* pada saat injeksi lumpur harus memperhatikan beberapa hal, yaitu semakin besar jumlah lumpur yang dipompa, maka semakin cepat lumpur tersebut harus mengalir, serta semakin cepat aliran lumpur, maka semakin besar pergesekannya. Maka dari itu, laju aliran sangat bergantung dengan tekanan dari pompa. Apabila laju aliran diperbesar menjadi dua kalinya, maka besarnya tekanan pompa menjadi empat kalinya.

Laju aliran sendiri merupakan faktor yang paling berpengaruh pada *hole cleaning*. Semakin cepat laju aliran, maka semakin bagus *hole cleaning*-nya. Akan tetapi, tingginya laju aliran harus diimbangi dengan besarnya aliran maksimal yang bisa ditahan oleh pompa. Laju aliran memiliki satuan galon per menit (gpm) (T. S. T. Centre,2009).

c. *Rate of Penetration* (*ROP*)

ROP merupakan kecepatan *bit* melaju menembus bebatuan untuk memperdalam *borehole*. *ROP* biasa dinyatakan dengan satuan inchi per menit, meter per jam, atau menit per-*foot*. Meningkatkan *ROP* berbanding lurus dengan *cutting* batuan yang dihasilkan. Semakin cepat *ROP* dapat menghasilkan *cutting* yang semakin banyak, begitu pula dengan sebaliknya. Oleh karena itu perlunya menjaga dan menentukan kecepatan *ROP* dari *bit* saat melakukan proses *drilling*. Terdapat beberapa aspek yang harus diperhatikan untuk meningkatkan *ROP*, yaitu: pemilihan *bit* yang tepat, konfigurasi yang tepat, pemilihan mahkota *bit* yang tepat, aliran lumpur yang tepat, *rotation speed* dan *pressure* yang tepat.

d. Tekanan Pada *Bit*

Tekanan lubang bawah atau *pressure bit* merupakan tekanan pada dasar lubang pengeboran yang harus dijaga kestabilan tekanannya. Nilai tekanan pada *pbit* yang didapat pada bawah lubang merupakan sinyal yang akan menjadi acuan pada pengendalian tekanan. Pengukuran pada titik-titik pengeboran termasuk tekanan pada *bit* dilakukan dengan metode-metode sesuai dengan tingkat sirkulasi lumpur dan formasi batuan sehingga menghasilkan nilai yang dapat digunakan acuan pada titik selanjutnya. Besarnya laju aliran lumpur minimum sekitar 600-1000 liter/menit agar dapat memberikan sinyal yang mampu diolah pada pengendalian selanjutnya. Sedangkan masalah yang sering terjadi adanya proses *delay* pada saat pengiriman data, hal ini yang membuat proses *drilling* menjadi kurang optimal dikarenakan ketidakmampuan dalam menjaga stabilitas dari *pressure bit*. Pengukuran tekanan pada *bit* ini dimodelkan dengan menggunakan rumus kesetimbangan massa sederhana. Aliran lumpur melalui anulus sumur ke permukaan dapat digunakan untuk menentukan profil tekanan (A. D. C. f. O. O. Operations,2010).

Prinsip yang sama juga diterapkan pada *choke pressure* atau tekanan di bagian atas anulus. Pada *choke pressure* memiliki prinsip kerja yang sama karena sama-sama mengatur tekanan dan bekerja secara berkelanjutan. Untuk

menghindari pemanasan secara spontan, *pressure choke* memiliki tekanan setara dengan tekanan atmosfir.

Selain properti, diperlukan juga parameter-parameter yang berpengaruh pada pengeboran seperti tertera pada tabel 2.1

Tabel 2. 1 Parameter Pemodelan Tekanan

Parameter	Deskripsi
d_b	*Drill Bit Diameter*
$\left(\frac{W}{db}\right)t$	*Threshold WOB/diameter*
d_a	*Drill Dtring Diameter*
d_p	*Drilled Particle Diameter*
θ	*Annulus Friction Parameter*
D	*Depth Of Well*
ρ_m	*Drilling Mud Density*
ρ_s	*Cuttings Density*
R_0	*Formation Drillability*
k_c^0	*Formation Cutting Force Parameter*

2.3 Pemodelan Sistem *Drilling* (D. Erik-Halgestad,2010)

Pada penelitian ini dilakukan dua jenis pemodelan pada proses *drilling*, yaitu pemodelan *ROP* dan tekanan lumpur. Kedua jenis pemodelan tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut:

a. Pemodelan *ROP*

Pada penelitian ini, *ROP* dimodelkan dengan menggunakan model Bourgoyne Jr. dan Young Jr. atau lebih dikenal dengan BYM model. Pemodelan BYM mempunyai tiga persamaan utama yang terdiri dari delapan *subfunction* yang tiap-tiapnya memiliki pengaruh pada performansi *ROP*. Pesamaan model BYM disajikan pada persamaan berikut ini:

$$ROP = f_1 * f_2 * f_3 * f_4 * f_5 * f_6 * f_7 * f_8 \quad \text{.....(2.7)}$$

dengan:

ROP = rate of penetration

f_1= efek *formation strength*

f_2= efek kedalaman dan pemadatan

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*

Faktor-faktor pemodelan mulai dari f1 sampai f8 mewakili berbagai tingkat pada laju penetrasi. Faktor-faktor yang digunakan pada penelitian ini hanya f4, f5, f6, dan f8 dikarenakan f1, f2, f3, dan f7 dianggap konstan pada model pengeboran *steady state*. Faktor-faktor f4, f5, f6, dan f8 disajikan sebagai berikut:

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

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

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

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

dengan:

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*

W merupakan notasi berat *bit* dalam satuan metrik ton. *N* merupakan notasi *rotary speed* dari *bit* dalam satuan putaran per menit (*RPM*). Diameter *bit* dan kedalaman sumur dinotasikan d_b. (*W*/ d_b)t merupakan nilai ambang batas berat *bit*

per diameter *bit* yang perlu dihitung untuk menembus formasi tanah yang mana bergantung pada karakteristik formasi. *pf* merupakan notasi tekanan formasi di bagian bawah sumur, sedangkan *pbh* merupakan notasi tekanan lubang bawah di sumur. *Fj* merupakan notasi gaya akibat dampak jet *nozzle* dalam *N*. Faktor f1-f3 dan f7 yang konstan digabung dalam satu konstanta, yaitu R0. Konstanta tersebut merujuk pada kemampuan *drillability* formasi dalam satuan m/jam. Eksponen a4, a5, a6 dan a8 dipilih berdasarkan nilai tipikal yang telah disebutkan dalam litreatur, dan disajikan pada tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Parameter Laju Penetrasi

Parameter	a_4	a_5	a_6	a_8
Nilai	0.01	1	0.7	0.3

Secara teori peningkatan *WOB* memengaruhi peningkatan *ROP*, namun tidak dengan *rotary speed*. Hasil *ROP* yang optimal bisa dicapai dengan melakukan proses *hole cleaning* yang baik. Namun pada penelitian kali ini, kondisi *hole cleaning* diasumsikan dalam keadaan sempurna. Persamaan dimana *WOB* memengaruhi *ROP* disajikan sebagai berikut:

$$ROP = R_0 e^{0.01(pf-pbh)} \left[\frac{\left(\frac{W}{db}\right)-\left(\frac{W}{db}\right)t}{71.4-\left(\frac{W}{db}\right)t}\right] \left(\frac{N}{60}\right)^{0.7} \left(\frac{F_j}{4482}\right)^{0.3} \quad \text{.....(2.12)}$$

b. Torsi dan Daya

Torsi dan daya merupakan variabel yang perlu dimonitoring selama proses *drilling* dan merupakan variabel yang memegang peranan penting dalam pengendalian proses. Torsi diperlukan untuk memutar tali bor yang merupakan hasil dari gaya *Fc* dan jari-jari tali bor yang merupakan panjang lengan tempat gaya bekerja. Gaya *Fc* dapat dinyatakan sebagai hasil dari gaya potong spesifik *kc* dan luas permukaan *drilling*, seperti ditunjukkan dalam persamaan berikut , di mana ds menunjukkan diameter string bor.

$$T = Fc\frac{ds}{2} = kc\frac{d_b^2\, ds\, \pi}{8} \text{.....(2.13)}$$

Gaya potong spesifik *kc* tergantung pada kekuatan formasi batuan dan berat pada *bit*. Diasumsikan bahwa gaya potong spesifik dapat dimodelkan sebagai hasil dari parameter k_c^0 yang hanya tergantung pada karakteristik formasi dikalikan dengan *WOB*. Ini ditunjukkan dalam persamaan (2.14) berikut :

$$kc = k_c^0 W \quad \text{..... (2.14)}$$

Daya (dalam kW) dapat dihitung dari torsi (T) seperti yang ditunjukkan pada persamaan (2.15) berikut :

$$P = \frac{2 \pi N T}{60000} \quad \text{.....(2.15)}$$

c. Pembersihan Lubang Bawah

Salah satu tujuan dari injeksi lumpur pengeboran adalah untuk mengangkut potongan atau serpihan batuan yang dihasilkan dari perputaran *bit* melalui *dril* dan naik ke permukaan melalui *annulus* sumur. Sangat penting untuk memastikan transportasi yang baik dari serpihan batuan. Jika tidak, mata bor akan terus menggiling serpihan batuan yang menumpuk di bagian bawah sumur. Ini akan mempengaruhi tingkat penetrasi yang lebih rendah dan dengan demikian pengeboran menjadi kurang efisien.

Laju sirkulasi dan spesifikasi dari lumpur pengeboran menentukan besarnya kapasitas untuk mengangkut serpihan. Pertama, menetukan kecepatan *slip* partikel, yang tergantung pada geometri dan massa jenis serpihan. Kecepatan *slip* untuk cairan *newtonian* dapat dihitung menggunakan hukum *Stoke*. Diameter hidrolik *anulus* dapat dihitung menggunakan persamaan (2.16). *Reynolds number* dapat dibuat seperti yang ditunjukkan pada persamaan (2.17). dengan memilih nilai yang sesuai untuk kecepatan *annulus*, massa jenis lumpur, viskositas, dan diameter tali bor dan sumur.

$$d_H = \frac{\pi (d_b^2 - d_s^2)}{\pi (d_b - d_s)} = d_b - d_s \quad \text{.....(2.16)}$$

$$N_{Re} = \frac{\rho_f v_a d_H}{\mu} = \frac{1400 \frac{kg}{m^3} . \ 0{,}7 \frac{m}{s} . \ (0{,}254m - 0{,}1m)}{0{,}02 \ Pa.s} = 7546 \quad \text{.....(2.17)}$$

Dari persamaan (2.17) jelas bahwa hukum *Stoke* tidak dapat digunakan untuk bilangan *Reynolds* lebih dari 0,1. Oleh karena itu koefisien gesekan ditentukan secara empiris. Koefisien gesekan dalam hal ini didefinisikan dalam persamaan berikut :

$$f = \frac{F}{A\,E_K} \text{.....(2.18)}$$

Dimana *F* merupakan gaya yang diberikan pada partikel karena hambatan viskositas, *A* merupakan area karakteristik partikel, dan *EK* merupakan energi kinetik per satuan volume.

Gaya *F* adalah perbedaan antara berat dan daya apung partikel, yang didefinisikan oleh persamaan (2.19). Diameter partikel dinotasikan *dp*, sedangkan *ρs* dan *ρf* masing-masing menunjukkan massa jenis partikel dan massa jenis lumpur efektif. Energi kinetik didefinisikan oleh persamaan (2.20), di mana v_{sl} adalah kecepatan *slip* partikel.

$$F = F_g - F_{bo} = \left(\rho_s - \rho_f\right) g\ (\mu \frac{d_p^3}{6}) \text{ .....(2.19)}$$

$$E_K = \frac{1}{2}\ \rho_s v_{sl}^2 \text{ .....(2.20)}$$

Diasumsikan partikel berbentuk bola, area karakteristik $A = \mu\ d_p^2/4$. Dengan menggabungkan persamaan sebelumnya didapatkan persamaan (2.21) untuk faktor gesekan sebagai berikut :

$$f = \frac{4}{3}\ g\ \frac{d_p}{v_{sl}^2}\ (\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f}) \text{ .....(2.21)}$$

Moore mengusulkan bahwa untuk *Reynolds number* di atas 300, menyebabkan aliran di sekitar partikel turbulen dan faktor gesekan menjadi konstan pada nilai sekitar 1,5. Chien merekomendasikan 1,72 untuk penggunaan koefisien gesekan saat *Reynolds number* di atas 100. Dengan demikian, menggunakan korelasi *Moore* dan menyelesaikan persamaan (2.22) untuk kecepatan *slip*, kita mendapatkan persamaan berikut :

$$v_{sl} = \sqrt{\frac{8}{9}\ g\ d_p\ \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f}} \text{ .....(2.22)}$$

Efektifitas kecepatan transpor (vt) dari sepihan potongan didefinisikan sebagai perbedaan antara kecepatan lumpur anulus dan kecepatan *slip* partikel, ditunjukkan dalam persamaan (2.23). Dengan mengasumsikan bahwa aliran lumpur yang mengalir melalui *bit* (*qbit*) adalah sama dengan aliran lumpur yang berasal dari pompa utama (*qin*), kecepatan aliran *annulus* dinyatakan dalam persamaan (2.24). A_a mewakili area penampang *annulus* sumur.

$$v_T = v_a - v_{slip} \quad \text{.....(2.23)}$$

$$v_a = \frac{q_{bit}}{A_a} = \frac{4\, q_{in}}{\pi\ (d_b^2 - d_s^2)} \quad \text{.....(2.24)}$$

Kecepatan *transport* dapat digunakan untuk menghitung fraksi serpihan (x_c) dalam lumpur yang mengalir dalam *anulus* sumur, juga dapat dinyatakan sebagai fungsi dari laju potongan serpihan seperti yang ditunjukkan dalam Persamaan (2.25). [R. F. Mitchel,2011]

$$v_T = \frac{q_s}{A_a x_c} \quad \text{.....(2.25)}$$

Laju aliran serpihan per detik (q_s) ditentukan oleh *ROP* (*R*) seperti yang ditunjukkan pada persamaan (2.26), dan fraksi padatan pada lumpur yang kembali dapat dihitung dengan mengatur kembali persamaan (2.25) seperti yang ditunjukkan dalam persamaan (2.27). Kepadatan efektif dari lumpur yang kembali tergantung pada fraksi atau banyaknya serpihan, dan dihitung menggunakan persamaan (2.28).

$$q_s = \frac{R}{3600} A_b = \frac{R}{3600}\ \pi\ \frac{d_b^2}{4} \quad \text{.....(2.26)}$$

$$x_c = \frac{q_s}{A_a v_T} \quad \text{.....(2.27)}$$

$$\rho_f = x_c \rho_s + (1 - x_{c)} \rho_m \quad \text{.....(2.28)}$$

Kecepatan *transport* v_T harus lebih besar dari nol agar serpihan dapat diangkut keluar dari sumur. v_T negatif berarti bahwa kecepatan *slip* lebih tinggi daripada kecepatan *annulus*, menghasilkan akumulasi potongan serpihan di bagian bawah sumur. Sementara v_T kecil dan positif dalam teori akan membawa serpihan ke

permukaan, ini akan menghasilkan persentase serpihan yang sangat tinggi dalam lumpur dan secara signifikan meningkatkan massa jenis lumpur, dan akan menyebabkan tekanan lubang bawah yang lebih tinggi dan dengan demikian kondisi pengeboran yang kurang optimal.

d. Pemodelan Tekanan *Drilling*

Pemodelan untuk tekanan injeksi *drilling* dilakukan dengan melakukan perhitungan tekanan yang dibangkitkan pada pompa *main pump*, tekanan sepanjang *drilling pipe* (hidrostatik), tekanan akibat penambahan massa dari serpihan batuan, tekanan sepanjang *annulus*, tekanan yang disebabkan karena bukaan *choke vlave* dan tekanan karena *back pump*. Penambahan tekanan pada setiap titik tersebut mengacu pada persamaan kesetimbangan massa dimana *input* sama dengan *output*. Berikut ini disajikan persamaan mengenai penambahan tekanan diatas.

$$\theta qin + Pbh + \rho gD + \theta qback = \left(\frac{qc}{kc.zc}\right)^2 \rho m \quad \text{..... (2.29)}$$

Pada persamaan (2.29), 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 (2.29) 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.

$$\theta qin + Pbh + \rho gD + \theta qbck = pc \quad \text{..... (2.30)}$$

dengan:

Θ_{qin} = *choke pressure*

p_{bit} = *pressure main pump*

Θ_{qbck} = bukaan *valve*

ρ_m = *mud density*

k_c = *valve coefficient*

q_c = *flow choke valve*

z_c = bukaan *valve*

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*.

e. Pemodelan Pengendalian Tekanan

Pemodelan pengendalian tekanan secara dinamik bertujuan untuk menguji kinerja kontrol tekanan. Pada pemodelan ini diasumsikan bahwa aliran adalah satu dimensi dengan kerapatan konstan pada *annulus* dan luas penampang. Persamaan pemodelan pengendalian tekanan merupakan gabungan dari persamaan kontinuitas dan momentum (s) yang disajikan pada persamaan (2.31) sampai dengan persamaan (3.3) berikut:

$$\frac{V_a}{\beta_a} p_c = q_{bit} \dot{-} q_c + q_{bck} \quad \text{..... (2.31)}$$

$$\frac{V_d}{\beta_d} p_p = \dot{q_p} - q_{bit} \quad \text{..... (2.32)}$$

$$M\dot{q}_{bit} = p_p - p_c - \theta_1 q_{bit} - \theta_2 |q_{bit}| q_{bit} \quad \text{..... (2.33)}$$

Tekanan pada lubang bawah dihitung menggunakan persamaan (2.34) dan tekanan pada *choke* dihitung menggunakan persamaan (2.35).

$$pbh = p_c + \theta_1 q_{bit} + \rho gD \quad \text{..... (2.34)}$$

$$qc = K_c Z_c \sqrt{\frac{2}{\rho_m}(p_c - p_0)} \quad \text{..... (2.35)}$$

dengan:

p_c = *choke pressure*

pbh = *pressure bottom hole*

p_p = *pressure main pump*

z_c = *bukaan valve*

q_{bck} = *flow back pump*

q_{bit} = *flow bit*

q_p = *flow main pump*

q_c = *flow choke*

Pada pemodelan ini, gesekan linier diasumsikan untuk *annulus* sumur dan gesekan kuadrat diasumsikan untuk *bit string*. Penurunan tekanan akibat gesekan dimodelkan dengan parameter gesekan *θ1* dan *θ2*. Tekanan p_p dan p_c merupakan notasi untuk *pressure back pump* dan *choke pressure* dengan satuan barg. *p0* merupakan notasi tekanan atmosfir, dan bernilai 0 dikarenakan satuan unitnya adalah *barg*. Laju *qp, qbck, qbit* dan *qc* merupakan notasi dari tingkat pompa utama, pompa tekanan balik, laju aliran melalui *bit* dan laju aliran yang melalui *choke valve*. *Kc* adalah konstanta *valve* dengan satuannya m^2. *Va* merupakan notasi *volume annulus* sumur. *Vd* merupakan notasi *volume internal* dari *string bit* yang dihitung menggunakan spesifikasi diameter bagian dalam. β merupakan notasi *modulus bulk* lumpur pengeboran sebagai parameter ukuran ketahanan lumpur terhadap kompresibilitas. *M* merupakan notasi jumlah koefisien massa *Ma* dan *Md* yang didefinisikan pada Persamaan (2.36) dan (2.37).

$$M_{a=\frac{\rho D}{Aa}} \quad \text{..... ...(2.36)}$$

$$M_d = \frac{\rho D}{A_d} \quad \text{..... .....(2.37)}$$

Parameter-parameter pemodelan dirangkum dan disajikan pada tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Parameter Pemodelan Tekanan Dinamik

Parameter	Deskripsi
$\boldsymbol{d_b}$	*Drill bit diameter*
$\boldsymbol{d_s}$	*Drill string outer diameter*
$\boldsymbol{d_i}$	*Drill string inner*
$\boldsymbol{V_a}$	*Annulus volume*
$\boldsymbol{V_d}$	*Drill string internal volume*
$\boldsymbol{\beta}$	*Bulk modulus*
$\boldsymbol{\theta_1}$	*Annulus friction parameter*
$\boldsymbol{\theta_2}$	*Drill string friction parameter*
M	*Mass coefficient*
D	*Depth of well*
$\boldsymbol{\rho}$	*Drilling mud density*
$\boldsymbol{K_c}$	*Valve flow constant*

2.4 *Feedforward Control* (M. T. E, 2000)

Feedforward control merupakan kontrol yang menggunakan perhitungan dari *input disturbance* pada *plant* sebagai informasi tambahan untuk meningkatkan performa kontrol PID *single-loop*. Pengukuran *input disturbance* memberikan "peringatan dini" bahwa kedepannya variabel kontrol akan terganggu sewaktu-waktu. Dengan adanya peringatan dini ini, kontroler *feedforward* punya kesempatan untuk meyesuaikan variabel manipulasi sebelum variabel yang dikendalikan menyimpang dari *setpoint*.

Feedforward control memiliki dua karakteristik, yaitu:

- Gangguan yang teridentifikasi memengaruhi variabel yang diukur secara signifikan.
- Gangguan tersebut dapat diukur, mungkin membutuhkan tambahan instrumen.

Desain umum dari kontroler *feedforward* ditunjukkan pada persamaan (2.38) berikut.

$$G_{ff}(s) = -\frac{G_d(s)}{G_p(s)} \quad \text{.....(2.38)}$$

Perlu diperhatikan bahwa kontroler *feedforward* bergantung pada model gangguan dan proses.

2.5 PID

PID pada penelitian ini akan digunakan sebagai kontroler pada pengendalian *drilling* proses tersebut. *Proportional-Integrated-Derivative* (PID) memiliki tiga syarat, pertama *proporsional* dengan *error* (e), yang kedua *proporsional* dengan integral *error* dan yang ketiga *proporsional* terhadap *derivative* dari *error*. *Output* dari kontroler PID adalah nilai *input* manipulasi *u(t)*. Persamaan kontroler PID disajikan pada Persamaan 2.1.

$$u(t) = Kpe(t) + Ki\int_0^t e(t)d_\tau + K_D\frac{de(t)}{dt} \quad \text{.....(2.39)}$$

Kp, Ki, dan K_D adalah parameter tuning dari pengendalian, dan disebut *proporsional gain, integral gain* dan *derivative gain*. Hanya pengendali PI yang digunakan penelitian ini karena respon pengendalian tekanan sudah cukup cepat (A. D. C. f. O. O. Operations,2010). Persamaan kontroler PI secara sederhana melibatkan aksi *derivatif*. Dengan demikian, hanya menggunakan dua parameter *tuning*, yaitu *Kp* dan *Ki*.

2.6 *Disturbance* pada Proses *Drilling*

Pada penilitian kali ini dilakukan penambahan *disturbance* berupa penambahan massa jenis batuan. Ketika saat proses dilakukan banyak faktor pengganggu yang tidak dapat dihindari salah satunya adalah massa jenis batuan. Pada saat *drilling* batuan akan menjadi hal yang sering ditemui, karena pada saat proses pengeboran, maka yang akan di bor adalah lapisan batuan dan lapisan tanah yang berada di bawah permukaan bumi. Berbagai macam batuan yang akan ditemui pada saat proses pengeboran, batuan yang akan sering ditemui adalah batuan sedimen dikarenakan pada batuan sedimen inilah minyak bumi mengendap. Untuk massa jenis batuan sedimen sendiri memiliki *range* massa jenis batuan antara 1900-2700 $\mathrm{kg/m^3}$. Adapula batuan beku dan batuan *metamorf* atau peralihan, kedua jenis batuan ini juga akan ditemui saat pengeboran, namun tidak sesering batuan sedimen yang biasanya menjadi *reservoir* saat proses *drilling*. Penambahan *disturbance*

perubahan massa jenis batuan akan memberikan gangguan berupa penambahan tekanan pada saat proses *drilling* berlangsung yang akan berdampak pada perubahan nilai dari beberapa variabel *drilling* yang bersangkutan. Hal yang paling utama adalah penambahan massa jenis lumpur pengeboran. Besarnya massa jenis lumpur pengeboran akan bertambah seiring adanya penambahan massa jenis batuan serta serpihan batuan sisa hasil gesekan antara *bit* dengan dinding batuan.

2.7 Jenis Lapisan Batuan

Proses pengeboran sumur harus melewati berbagai jenis batuan yang ada di bumi. Batuan terdiri dari mineral atau bahan organik yang berada di lapisan bawah permukaan atau strata yang tersebar di dunia. Pada saat pengeboran batuan yang akan sering ditemui berupa, batuan pasir, lempung dan granit. Batuan dapat mengandung mineral tunggal, seperti garam batu dan batu kapur tertentu, adapula yang mengandung banyak mineral seperti granit (*kuarsa, feldspar*, *mika* dan mineral lainnya. Diperlukan tipe drill *bit* yang berbeda pula bagi setiap batuan yang ditemui, kecepatan bor yang berbeda pula, serta tekanan *bit* agar proses pengeboran dapat berjalan secara efisien dan aman.

a. Batuan *Igneous*

Batuan *igneous* atau batuan beku merupakan batuan yang terbentuk pada permukaan bumi ataupun di bawah permukaan bumi melalui penyejukan magma yang melimpah keluar ataupun terperangkap di bawah kerak bumi. Batuan *igneous* dibagi terbagi menjadi 2 yaitu batuan *igneous* intrusif dan batuan *igneous* ekstrusif. Batuan *igneous* intrusif terbentuk akibat penyejukan magma secara perlahan lahan dalam kerak bumi yang menghasilkan batuan bertekstur kasar.

Sedangkan batuan *igneous* ekstrusif terbentuk apabila magma mengalir keluar permukaan bumi sebagai lava dan membeku di permukaan dan cenderung menghasilkan batuan bertekstur halus. Formasi intrusi yang khas adalah batolit, stok, lakolit, sill dan dike. Ketika magma membeku di dalam kerak bumi, magma mendingin perlahan membentuk batuan bertekstur kasar, seperti granit, gabro, atau diorit. Dalam kaitannya dengan dunia migas batuan beku merupakan batuan yang akan ditemui ketika melakukan operasi *drilling*, dengan

strukturnya yang keras maka perlu dilakukan kontrol kecepatan pada *drilling bit* dengan benar dan aman agar sisa batuan hasil *drilling* yang dihasilkan lebih sedikit serta halus.

b. Batuan Sedimen

Batuan sedimen adalah batuan yang terbentuk di permukaan bumi pada kondisi temperatur dan tekanan yang rendah. Batuan ini berasal dari batuan yang mengalami pelapukan, erosi, dan kemudian lapukannya diangkut oleh air, udara, atau es, yang selanjutnya diendapkan dan berakumulasi di dalam cekungan pengendapan, membentuk sedimen. Material-material sedimen itu kemudian terkompaksi, mengeras, mengalami litifikasi, dan terbentuklah batuan sedimen. Jenis batuan sedimen yang banyak menjadi *reservoir* minyak dan gas adalah *limestone* (batu kapur) dan *sandstone* (batu pasir). *Limestone* sebagian besar tersusun atas kalsium karbonat (CaCO3), dengan ciri putih keabu abuan agak lunak, dan jika ditetesi asam akan membentuk karbon dioksida. *Limestone* biasanya terbentuk di perairan dangkal, tenang dan hangat. Dalam kaitannya dengan dunia migas, batuan *limestone* sangat disukai karena mempunyai sifat porous dan *permeable*.

Batuan pasir menempati 25% dari total batuan sedimen yang ada di bumi. Tekstur umum batu pasir adalah epiklastik (yang berarti mereka terdiri dari klas-klas). Batu pasir tersusun dari material ukuran pasir dengan ukuran butir antara 1/16 – 2mm (sebagai fragmen penyusun utama) kemudian campuran matriks dan semen (sebagai perekat semua fragmen yang ada, biasanya berupa mineral sangat halus berupa karbonat, silika, dan lainnya). Adapula batuan lempung yang merupakan batuan sedimen dengan ukuran butir lebih kecil dari 1/256 mm.

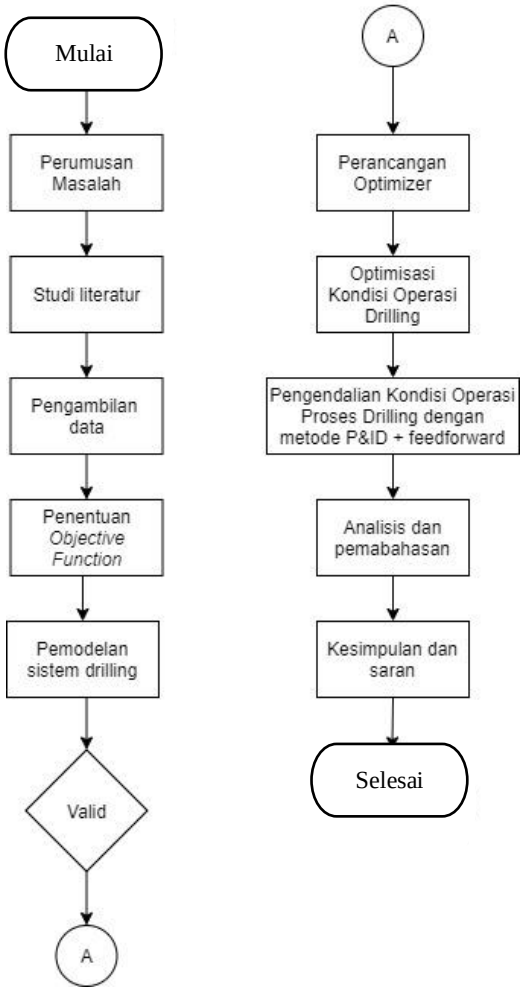
c. Batuan *Metamorf*

Batuan *metamorf* (batuan malihan) adalah salah satu kelompok utama batuan yang merupakan hasil transformasi atau ubahan dari suatu tipe batuan yang telah ada sebelumnya, *protolith*, oleh suatu proses yang disebut metamorfisme, yang berarti "perubahan bentuk". Batuan metamorf membentuk bagian yang cukup besar dari kerak bumi dan diklasifikasikan berdasarkan tekstur, selain juga oleh susunan mineral dan susunan kimianya (fasies

metamorfik). Batuan jenis ini dapat terbentuk secara mudah akibat berada dalam kedalaman tinggi, mengalami suhu tinggi dan tekanan besar dari lapisan batuan di atasnya. Mereka dapat terbentuk dari proses tektonik seperti tabrakan benua, yang menyebabkan tekanan horisontal, gesekan dan distorsi. Mereka juga terbentuk ketika batuan terpanaskan oleh intrusi dari batuan cair dan panas yang disebut magma dari interior bumi. Mineral metamorfik adalah mineral yang terbentuk hanya pada suhu dan tekanan tinggi terkait dengan proses metamorfosis. Mineral ini, yang dikenal termasuk silimanit, kyanit, staurolit, andalusit, dan beberapa garnet. Contoh batuan *metamorf* adalah batu tulis dan batu marmer.

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

Berikut merupakan diagram alir proses dari usulan tugas akhir ini:



Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian

Dari *flowchart* pada gambar 3.1 tersebut, didapat beberapa langkah dalam pelaksanaan tugas akhir ini yaitu:

a. Pengambilan Data

Tahap ini berisi pengambilan data yang merupakan data sekunder sesuai dengan parameter *drilling* yang dibutuhkan.

b. Penentuan Fungsi *Objective*

Pada tahap ini optimisasi dilakukan dengan cara menentukan *objective function* yang sesuai untuk proses *drilling* dengan mempertimbangkankan gangguan saat operasi *drilling* berupa perubahan formasi massa jenis batuan.

c. Penambahan *Disturbance* Massa Jenis Batuan

Pada tahap ini dilakukan penambahan *disturbance* berupa massa jenis batuan. Ditentukan 4 massa jenis batuan yang akan dijadikan variabel gangguan. Adapun jenis batuan yang digunakan antara lain, *clay*, *sandstone*, *limestone*, dan *granite*.

d. Optimisasi Kondisi Operasi Proses *Drilling* dengan Penambahan *Disturbance*

Pada tahap ini dilakukan optimisasi kondisi operasi *drilling* dengan metode *genetic algorithm* hingga didapat hasil *objective function* dan variabel yang terbaik untuk dijadikan *setpoint* pada pengendalian.

e. Pengendalian Kondisi Operasi *Drilling* dengan penambahan *Disturbance*

Pada tahap ini dilakukan uji perfomansi pengendalian dengan *setpoint* yang telah didapatkan dari hasil optimisasi.

f. Analisis Data

Hasil yang telah diperoleh kemudian dianalisis untuk dapat disimpulkan serta memenuhi tujuan yang ada.

3.1 Perumusan Masalah

Perumusan masalah digunakan untuk menjelaskan masalah mengenai rancang bangun transmisi data. Perumusan masalah juga digunakan untuk menjadi dasar dari tujuan penelitian yang sedang dilakukan.

3.2 Studi Literatur

Studi literatur perlu dilakukan sebelum melakukan sebuah penelitian. Kegiatan yang dapat dilakukan yaitu pencarian informasi dan fakta-fakta terkait yang menunjang sebuah penelitian. Studi literatur yang dilakukan dapat berupa jurnal, buku, dan informasi lainnya mengenai penelitian serupa maupun penelitian sebelumnya sebagai dasar informasi dari sistem dan komponen dari kelengkapan yang digunakan.

3.3 Penentuan Parameter Pemodelan *Drilling*

Adapun parameter yang digunakan dalam pembuatan pemodelan *drilling* yang berhubungan dengan variabel yang perlu dikontrol saat operasi *drilling* berlangsung, seperti massa jenis lumpur yang dipakai, serta spesifikasi alat yang diperlukan seperti diameter dari *bit*, diameter pipa yang digunakan serta koefisien gesek dari tiap pipa. Pada pemodelan sistem *drilling* diberikan gangguan untuk menentukan variabel optimal yang akan dikontrol. Terdapat 2 jenis parameter yang digunakan sebagai data dalam penelitian ini yaitu parameter *steady state pressure* dan parameter tekanan dinamik. Nilai pada parameter tersebut tertuang sebagai berikut:

Tabel 3. 1 Nilai Parameter Pemodelan Tekanan *Steady State* (A. D. C. f. O. O. Operations,2010)

Parameter	Deskripsi	Nilai	Unit
d_b	*drill bit diameter*	0,254	M
$(W/d_b)t$	*Threshold WOB per diameter*	12,6	ton/m
D_s	*Drill string diameter*	0,10	M
d_p	*Drilled particle diameter*	0,005	M
θ	*Annulus friction parameter*	900	kg/m^{4}s
D	*Depth of well*	3000	M
ρ_m	*Drilling mud density*	1400	kg/m3
ρ_s	*Cutting density*	2700	kg/m3
R_0	*formation drillability*	5	m/jam
K_c^0	*Formation cutting force parameter*	100.000	N/tonm^2

Tabel 3. 2 Nilai Parameter Tekanan Dinamik pada Sistem *Drilling* (A. D. C. f. O. O. Operations,2010)

Parameter	Deskripsi	Nilai	Unit
d_b	*Drill bit diameter*	0,254	M
d_i	*Drill string inner*	0,085	M
d_s	*Drill string outer diameter*	0,10	M
V_a	*Annulus volume*	128,45	m^3
V_d	*Drill sting internal volume*	17,02	m^3
D	*Depth of well*	3000	M
β	*Bulk modulus*	20.000	Bar
θ_1	*Annulus friction parameter*	900	kg/m^4s
θ_2	*Drill string friction parameter*	187.000	kg/m^7
K_c	*Valve flow constant*	0,025	m^2
ρ	*Drilling mud density*	0,0140	10^5kg/m3
M	*Mass coefficient*	8.384	$10^5kg/m^4$

Tabel 3.1 dan 3.2 merupakan parameter-parameter yang akan digunakan sebagai elemen perhitungan pada sistem *drilling* sehingga pemodelan yang sesuai akan didapatkan.

3.4 Penentuan Fungsi Objektif

Penelitian ini memiliki tujuan yang lebih detail yaitu mengoptimumkan *rate of penetration* (*ROP*) agar lumpur dapat mengalir dengan baik dari awal hingga akhir proses *drilling* secara aman dan terkendali dengan mempertimbangkan faktor seperti penambahan serpihan batu pada *bottom hole* dimana *pressure bottom hole*

yang diperlukan harus sama dengan yang diberikan. Perlu dilakukan optimisasi ulang terhadap penelitian sebelumnya yang dilakukan pada keadaan *steady state* tanpa adanya *disturbance*. *Disturbance* yang digunakan berupa perubahan massa jenis batuan yang akan berpengaruh terhadap hasil fraksi batuan yang dihasilkan sesuai dengan massa jenis *disturbance* masing masing. Optimisasi dilakukan sebanyak 4 kali sesuai dengan variansi massa jenis batuan yang telah ditentukan.

3.5 Pemodelan pada Sistem *Drilling*

Pada penelitian ini pemodelan sistem *drilling* dilakukan dengan tiga jenis parameter pemodelan yaitu pemodelan laju penetrasi (*ROP*), pemodelan *pressure* pada setiap proses sirkulasi pengeboran, serta pemodelan pengendalian tekanan. *Total pressure* pada setiap titik sistem *drilling* dihitung dengan menggunakan persamaan kesetimbangan massa sederhana. Sedangkan pemodelan untuk menentukan *ROP bit* kedalam sumur pengeboran menggunakan persamaan (2.10) sampai (2.15). Pemodelan pengendalian tekanan yang dihitung dengan menggunakan rumus persamaan (2.16) sampai (2.22). Pemodelan *pressure* yang dilakukan dari atas ke bawah pada seluruh peralatan *drilling* dilakukan dengan menambahkan serpihan batu sebagai *disturbance*. Serpihan batu ini yang akan mempengaruhi nilai *density*, *pressure*, dan laju aliran setelah *bit* akibat dari kecepatan laju penetrasi dari *bit*. Secara sederhana pada penelitian kali ini difokuskan pada respon dari lumpur melewati *bit* pada *bottom hole* dibawah sampai dengan lumpur dan fraksi batuan yang mengendap dibawah sampai di permukaan bumi, yang nantinya akan dilakukan penyaringan/pemisahan terhadap lumpur dan fraksi batuan yang terangkut untuk pemakaian lumpur kembali untuk operasi *drilling* berikutnya. Sedangkan untuk penelitian kali ini proses penyaringan/pemisahan lumpur di permukaan bumi dianggap stabil atau terjadi penyaringan sempurna sehingga massa jenis lumpur yang akan di injeksikan kembali sama dengan massa jenis lumpur awal.

3.6 Variansi *Disturbance*

Pada penelitian kali ini diberikan *disturbance* berupa perubahan massa jenis batuan dengan 4 kondisi batuan. Batuan yang diambil merupakan batuan yang

mengandung minyak bumi, yaitu pada lapisan batuan sedimen dan metamorf. Batuan yang ditentukan antara lain *clay* (lempung), *sandstone* (batuan pasir), *limestone* (batuan gamping), dan *granite* (*granite*). Dengan masing- masing batuan memiliki massa jenis masing masing sebesar 2210 kg/m^3, 2350 kg/m^3, 2550 kg/m^3 dan 2640 kg/m^3. Untuk lebih jelasnya dijelaskan seperti pada table berikut :

Tabel 3. 3 Variansi Massa Jenis Batuan

no	Batuan	rho (kg/m3)	Rho campuran (kg/m3)
1	Clay	2210	1401.970907
2	Sandstone	2350	1401.952957
3	Limestone	2550	1401.926708
4	Granite	2640	1401.914719
5	Steady State	1400	1400

3.7 Variabel Teknik Optimisasi Menggunakan Metode *Genetic Algorithm*

Dalam penelitian ini dilakukan optimisasi menggunakan metode *genetic algorithm* (GA), hasil yang didapat untuk membandingkan hasil dari *ROP* (*rate of penetrattion*) terhadap perubahan masing masing massa jenis batuan yang telah ditentukan. Hasil yang didapat dari perhitungan metode tersebut akan dijadikan sebagai *setpoint* baru untuk melakukan simulasi kontrol operasi *drilling*. Pada penelitian ini, dilakukan optimisasi pada 5 variabel yang akan dioptimisasi yang tercantum dalam tabel berikut:

Tabel 3. 4 Variabel Optimisasi (A. D. C. f. O. O. Operations,2010)

Mv(u)	**Deskripsi**	***Lower Bond***	***Upper Bond***	**Unit**
W	Berat *bit*	10	200	Tons
N	Putaran *bit*	100	200	*RPM*
q_{in}	*Flowrate*	0,001	50	litre/s
$\boldsymbol{p_c}$	*Choke pressure*	0,001	100	Bar
$\boldsymbol{p_m}$	*Mud Density*	0,001	2000	kg/m3

3.8 Simulasi Kontrol Menggunakan PID

Pada tahap ini kontrol yang digunakan menggunakan metode PID yaitu PI. Pada tahap ini bertujuan untuk melihat hasil respon dari pemberian *disturbance* dengan menggunakan variabel baru hasil optimiasi. Serta menganilis pengaruh *disturbance* terhadap kontrol yang telah diberikan merujuk pada kondisi steady state tanpa adanya *disturbance* perubahan massa jenis batuan. Pada tahap ini respon yang akan diamati difokuskan pada kondisi operasi *drilling* ketika lumpur melewati *bottom hole* dan mengangkat serpihan batuan sampai dengan permukaan. Untuk aliran dari pompa utama serta *pressure* pada *main pump* dianggap pada kondisi stabil. Dari hasil tersebut akan dianalisa terkait perubahan *setpoint* pada *pressure choke* (*pc*), besar bukaan pada *choke valve* (*zc*) serta aliran lumpur saat melewati *choke valve* (*qc*).

3.9 Kesimpulan

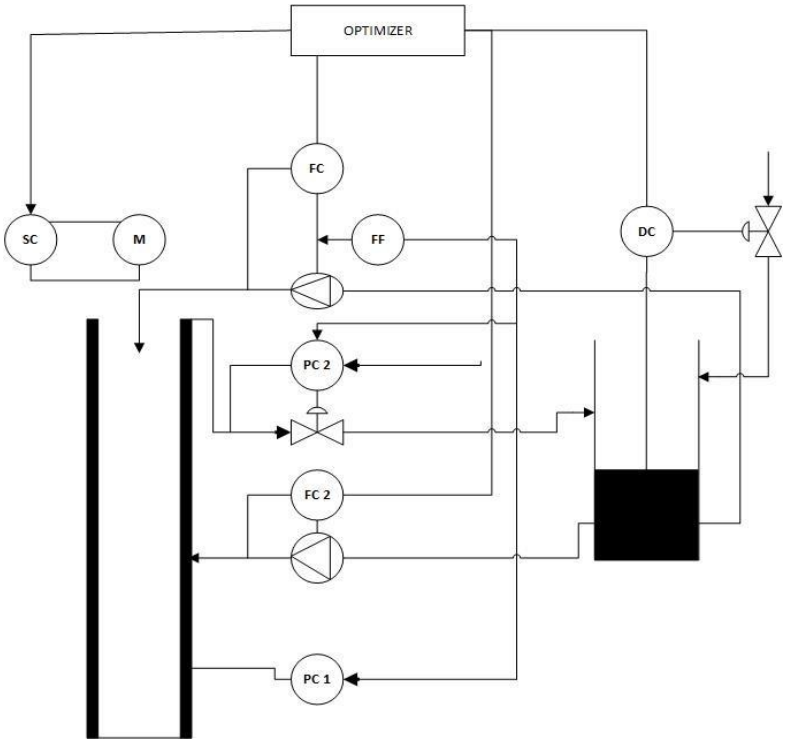
Langkah terakhir dalam melakukan penelitian tugas akhir ini adalah pembuatan kesimpulan. Pembuatan kesimpulan dilakukan berdasarkan hasil analisis dan pembahasan. Kesimpulan ini disusun sesuai dengan tujuan penelitian untuk menjawab permasalahan penelitian.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Konektivitas Alat dengan Jaringan Internet

Pada laporan ini digunakan rancangan PWC, *plant drilling modern* yang mengacu pada rancangan sebelumnya. Pembeda antara rancangan PWC penelitian ini dengan penelitian sebelumnya ialah penambahan kontroler *feedforward*. Penambahan kontroler *feedforward* diharapkan dapat mengatasi masalah pada penelitian sebelumnya. gambar 4.1 merupakan rancangan PWC pada penelitian sebelumnya yang telah ditambahkan kontroler *feedforward.*



Gambar 4. 1 Rancangan *drilling* PWC sesudah penambahan kontroler *feedforward*

Seperti pada penelitian sebelumnya, terdapat 5 variabel yang dijadikan parameter *drilling* PWC, yaitu: *rotary speed, flow main pump, density control, WOB,* dan *pressure choke*. Pada *rotary speed, flow main pump,* dan *density control* memiliki nilai *setpoint fix* berdasarkan dari hasil pertimbangan geologist. *WOB*

memiliki nilai *setpoint* berdasarkan hasil optimisasi. Sedangkan *pressure choke* memiliki nilai *setpoint* berdasarkan hasil optimisasi dengan kondisi keadaan proses normal dan menjadi *cascade* jika proses mengalami kondisi abnormal akibat ketidakpastian massa serpihan batuan.

Pressure choke akan bekerja bersama *back pump* sebagai penyeimbang (*balancing*). Setelah dilakukan pemasangan prosedur PWC secara keseluruhan, maka akan didapatkan proses *recycle* sistem *drilling* yang paling efisien

4.2 Analisa *ROP* dengan Pengaruh *Disturbance*

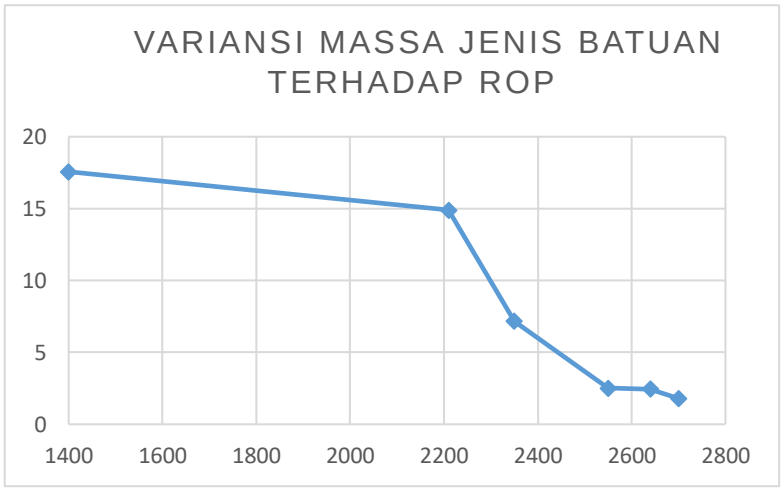
Analisa *rate of penetration* didasarkan pada thesis penelitian sebelumnya didapatkan nilai dari 5 variabel dan nilai fungsi objektif optimal menggunakan metode optimisasi *duelist algorithm, killer whale algorithm, dan rain water Algorithm*. Dari nilai optimisasi didapatkan paling optimal adalah menggunakan metode *killer whale algorithm*. Nilai dari thesis sebelumnya akan digunakan sebagai nilai untuk menganalisa *ROP* dengan pengaruh variansi *disturbance*, variabel yang akan menjadi *disturbance* berupa variansi massa jenis batuan. Massa jenis batuan yang digunakan berupa massa jenis batuan *clay, sandstone, limestone* dan *granite,* didapatkan data secara perhitungan sebagai berikut :

Tabel 4.1 Tabel Analisis Variansi Massa Jenis Batuan Terhadap *ROP*

Batuan	Rho	Newrho	ROP	ROP
ST	1400	1400	-17.56565538	17.56566
Clay	2210	1456.11	-14.89433591	14.89434
Sandstone	2350	1705.364	-7.157603852	7.157604
Limestone	2550	2061.441	-2.512579551	2.51258
Granite	2640	2221.675	-2.459038784	2.459039
TA sebelum	2700	2328.498	-1.796267562	1.796268

Dari tabel 4.1 didapatkan nilai *rate of penetration* dengan memasukkan variabel optimal dari thesis sebelumnya sebagai acuan ke persamaan (2.15). Massa jenis lumpur yang baru dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (2.16). Didapatkan nilai terbesar untuk *ROP* ketika keadaan pada kondisi *steady state* sebesar 17.56566 m/jam dan nilai terkecil 1.796268 m/jam. Nilai negatif

menandakan bahwasanya proses *drilling* dilakukan ke bawah (kearah sumbu x negatif).



Gambar 4. 2 Grafik variansi massa jenis batuan terhadap *ROP*

Dari grafik dapat disimpulkan bahwasanya penambahan *disturbance* mempengaruhi *rate of penetration*, dimana semakin besar massa jenis batuan, semakin padat batuan maka diikuti dengan penurunan *ROP*. Hal ini terjadi bertujuan dalam mengurangi serpihan batuan yang dihasilkan dari gesekan antara batuan dan *bit* dari *drilling*. Seperti yang disebutkan diatas bahwasanya penumpukan potongan serpihan didalam hole dapat menaikkan tekanan dalam lubang bawah yang mengakibatkan proses pengeboran menjadi kurag optimal.

4.3 Optimisasi *ROP* dengan Perubahan Massa Jenis Batuan

Dilakukan optimisasi kembali dengan penambahan 4 massa jenis batuan dengan menggunakan software MATLAB dan metode optimisasi *genetic algorithm*. Optimisasi kembali dilakukan untuk mencari nilai optimum dari *ROP* untuk masing masing massa jenis batuan yang digunakan sebagai *disturbance*.

Fungsi objektif dari optimisasi ini adalah menentukan nilai optimal dari variabel *density, flowrate, RPM, pressure choke,* dan *WOB* pada proses *drilling*. Secara filosofis, GA bekerja berdasarkan teori Darwin tentang prinsip evolusi "*survival of the fittest*". Secara keseluruhan, GA bekerja berdasarkan prinsip seleksi alam dan genetik. Optimisasi menggunakan *genetic algorithm* (GA) dilakukan dengan menetapkan parameter seperti:

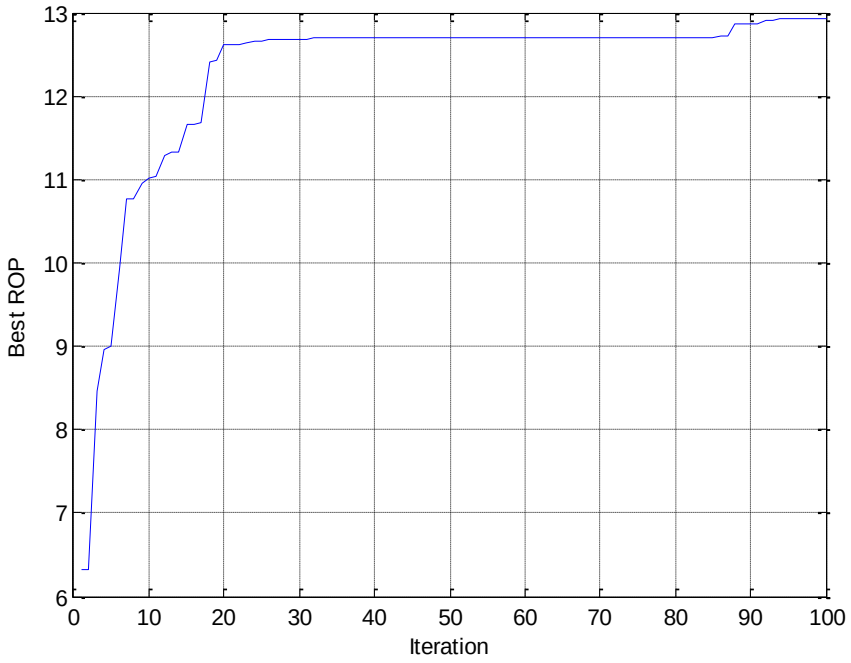
- Jumlah populasi = 200
- Jumlah iterasi = 500
- *Elitism* = 0.95
- Probabilitas *crossover* = 0.8
- Probabilitas mutasi = 0.001
- Jumlah *bit* = 18

Proses optimisasi dijalankan melalui *software* MATLAB yang bertujuan untuk mendapatkan nilai *ROP* yang optimal. Hasil optimisasi secara berangsur-angsur konvergen menuju nilai maksimum

Didapatkan data sebagai berikut :

a. Optimisasi GA tanpa perubahan massa jenis batuan

Didapatkan grafik sebagai berikut :



Gambar 4. 3 Grafik nilai optimisasi fungsi objektif *rate of penetration* dengan metode GA tanpa perubahan massa jenis batuan

Pada gambar diatas didapatkan grafik hasil optimisasi 5 variabel yang memengaruhi nilai *ROP*. Pada grafik tersebut sumbu x merupakan jumlah iterasi yang dilakukan dan sumbu y merupakan besar nilai fungsi objektif. Nilai *ROP*

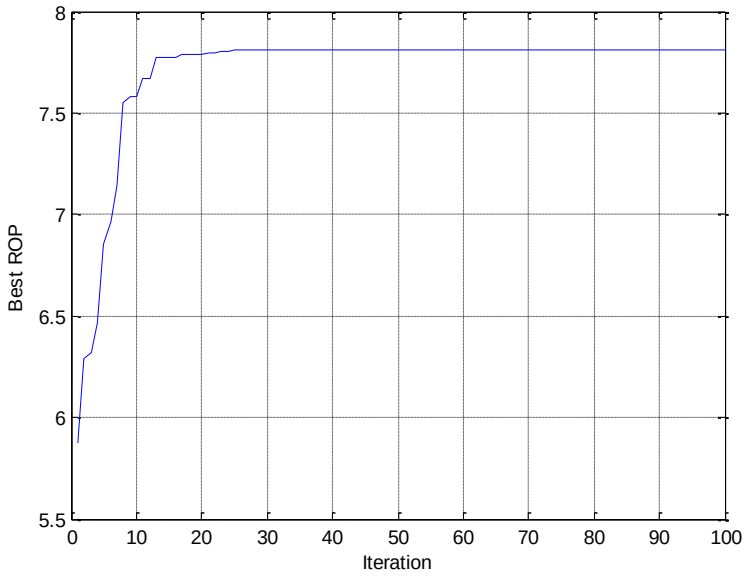
optimum yang didapatkan sebesar 12,9341 m/jam dengan variabel optimisasi optimum yang ditunjukkan pada tabel 4.2 berikut :

Tabel 4. 2 Hasil Optimisasi GA 5 Variabel Tanpa Perubahan Massa Jenis Batuan

Variabel optimisasi	Deskripsi	Nilai
WOB(Tons)	Weight onBit	17.9796
Rotary SpeedRPM)	Rotary Speed	107.2624
qmud (liter/s)	Flowratemud	49.9999
pc (bar)	Pressurechoke	0.0032
rho mud (kg/m3)	Mud density	410.537
Fungsi Objektif	Rate of Penetration	12.9341

b. Optimisasi GA dengan perubahan massa jenis batuan *clay*

Didapatkan grafik sebagai berikut :



Gambar 4. 4 Grafik nilai optimisasi fungsi objektif *rate of penetration* dengan metode GA dengan perubahan massa jenis batuan *clay*

Pada gambar diatas didapatkan grafik hasil optimisasi 5 variabel yang memengaruhi nilai *ROP*. Pada grafik tersebut sumbu x merupakan jumlah iterasi yang dilakukan dan sumbu y merupakan besar nilai fungsi objektif.

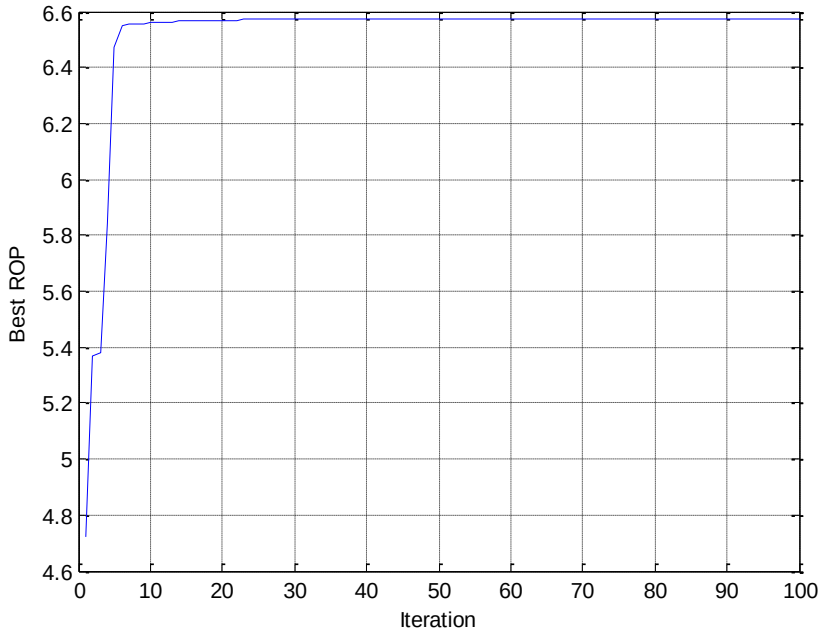
Nilai *ROP* optimum yang didapatkan sebesar 7,8111 m/jam dengan variabel optimisasi optimum yang ditunjukkan pada tabel 4.3 berikut :

Tabel 4. 3 Hasil Optimisasi GA dengan Perubahan Massa Jenis Batuan *Clay*

Variabel optimisasi	Deskripsi	Nilai
WOB(Tons)	Weight onBit	45.3001
Rotary SpeedRPM)	Rotary Speed	197.0585
qmud (liter/s)	Flowratemud	50
pc (bar)	Pressurechoke	0.00090463
Densitymud (kg/m3)	Mud density	410.537
Fungsi Objektif	Rate of Penetration	7.8111

c. Optimisasi GA dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone*

Didapatkan grafik sebagai berikut :



Gambar 4. 5 Grafik nilai optimisasi fungsi objektif *rate of penetration* dengan metode GA dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone*

Pada gambar diatas didapatkan grafik hasil optimisasi 5 variabel yang memengaruhi nilai *ROP*. Pada grafik tersebut sumbu x merupakan jumlah iterasi yang dilakukan dan sumbu y merupakan besar nilai fungsi objektif. Nilai *ROP*

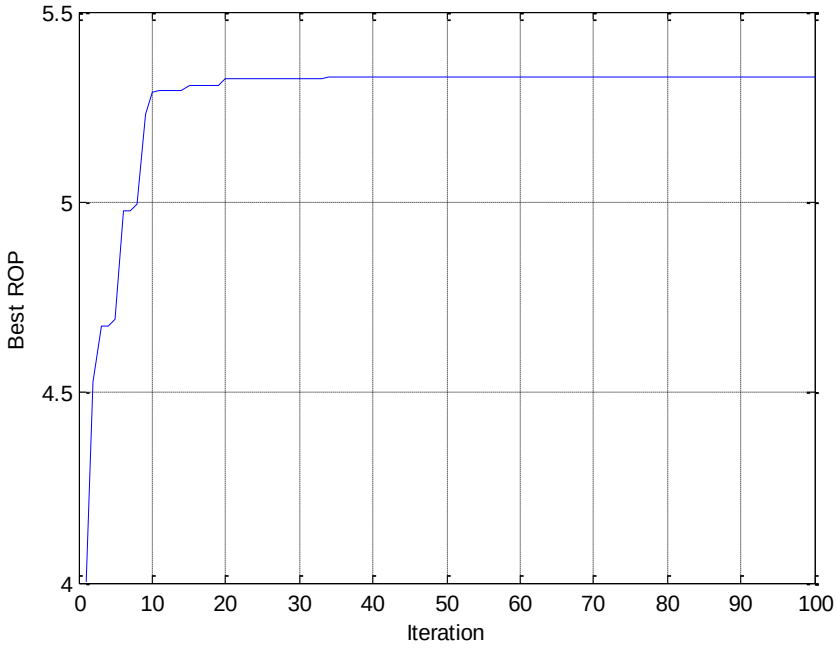
optimum yang didapatkan sebesar 6,5731 m/jam dengan variabel optimisasi optimum yang ditunjukkan pada tabel 4.4 berikut :

Tabel 4. 4 Hasil Optimisasi GA dengan Perubahan Massa Jenis Batuan *Sandstone*

Variabel optimisasi	Deskripsi	Nilai
WOB(Tons)	Weight onBit	39.0956
Rotary SpeedRPM)	Rotary Speed	172.5489
qmud (liter/s)	Flowratemud	50
pc (bar)	Pressurechoke	0.00090463
Densitymud (kg/m3)	Mud density	410.537
Fungsi Objektif	Rate of Penetration	6.5731

d. Optimisasi GA dengan perubahan massa jenis batuan *limestone*

Didapatkan grafik sebagai berikut :



Gambar 4. 6 Grafik nilai optimisasi fungsi objektif *rate of penetration* dengan metode GA dengan perubahan massa jenis batuan *limestone*

Pada gambar diatas didapatkan grafik hasil optimisasi 5 variabel yang memengaruhi nilai *ROP*. Pada grafik tersebut sumbu x merupakan jumlah iterasi yang dilakukan dan sumbu y merupakan besar nilai fungsi objektif. Nilai *ROP*

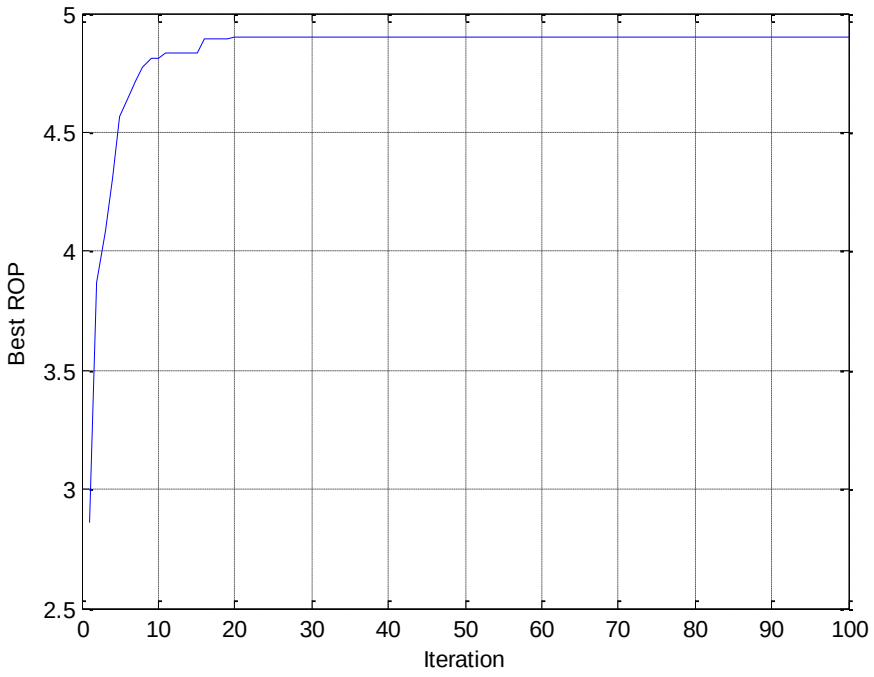
optimum yang didapatkan sebesar 5,329m/jam dengan variabel optimisasi optimum yang ditunjukkan pada tabel 4.5 berikut :

Tabel 4. 5 Hasil Optimisasi GA dengan Perubahan Massa Jenis Batuan *Limestone*

Variabel optimisasi	Deskripsi	Nilai
WOB(Tons)	Weight onBit	17.9796
Rotary SpeedRPM)	Rotary Speed	107.2624
qmud (liter/s)	Flowratemud	50
pc (bar)	Pressurechoke	0.00090463
Densitymud (kg/m3)	Mud density	410.537
Fungsi Objektif	Rate of Penetration	5.329

e. Optimisasi GA dengan perubahan massa jenis batuan *granite*

Didapatkan grafik sebagai berikut :



Gambar 4. 7 Grafik nilai optimisasi fungsi objektif *rate of penetration* dengan metode GA dengan perubahan massa jenis batuan *granite*

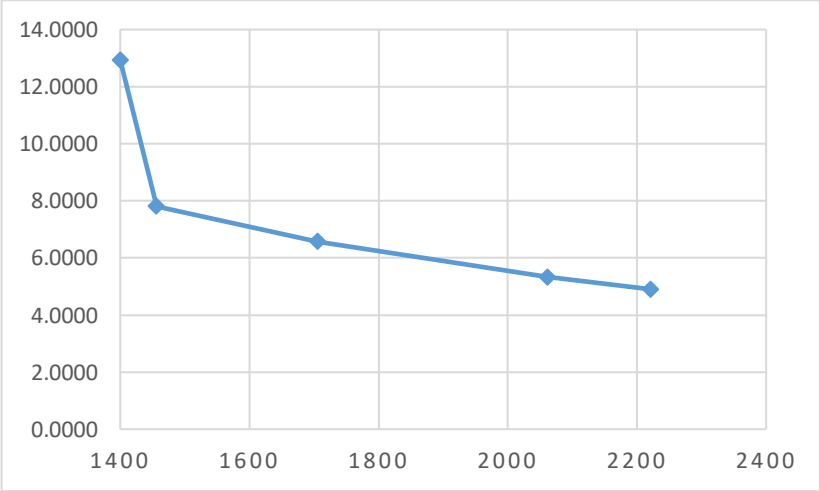
Pada gambar diatas didapatkan grafik hasil optimisasi 5 variabel yang memengaruhi nilai *ROP*. Pada grafik tersebut sumbu x merupakan jumlah iterasi yang dilakukan dan sumbu y merupakan besar nilai fungsi objektif. Nilai *ROP*

optimum yang didapatkan sebesar 4,9006 m/jam dengan variabel optimisasi optimum yang ditunjukkan pada tabel 4.6 berikut :

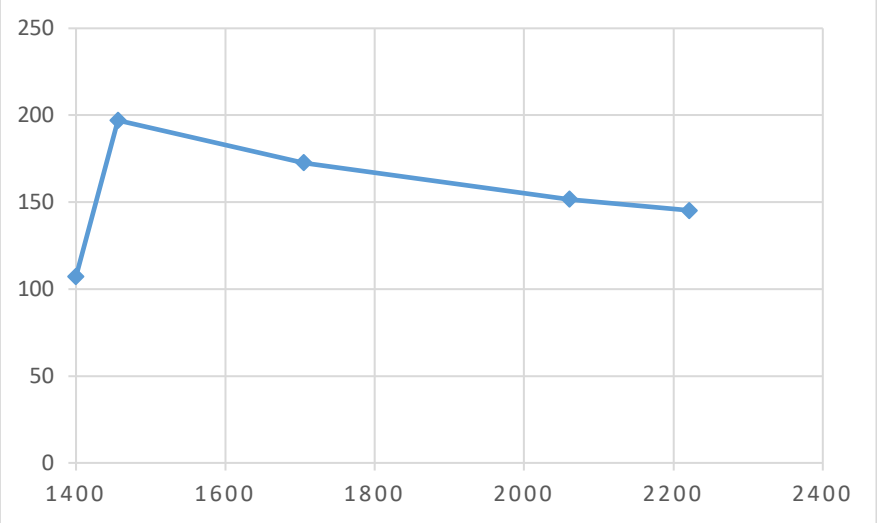
Tabel 4. 6 Hasil Optimisasi GA dengan Perubahan Massa Jenis Batuan *Granite*

Variabel optimisasi	Deskripsi	Nilai
WOB(Tons)	Weight onBit	17.9796
Rotary SpeedRPM)	Rotary Speed	107.2624
qmud (liter/s)	Flowratemud	50
pc (bar)	Pressurechoke	0.00090463
Densitymud (kg/m3)	Mud density	410.537
Fungsi Objektif	Rate of Penetration	4.9006

Dari 5 tabel diatas didapatkan nilai fungsi objektif masing masing kondisi. Jika dibandingkan pada penelitian sebelumnya tanpa adanya perubahan massa jenis baatuan dengan penambahan dari perubahan massa jenis batuan nilai dari *ROP* cenderung mengalami penurunan. Hal ini membuktikan bahwasanya *disturbance* mempengaruhi nilai *ROP* dimana semakin rapat massa jenis batuan maka *ROP* juga akan mengalami penurunan. Diikuti dengan nilai *rotary speed* (*RPM*) yang semakin menurun seiring dengan semakin rapatnya massa jenis batuan. Hasil optimisasi merupakan nilai optimal untuk nilai *ROP* dan *RPM*, dimana keduanya semakin menurun dengan penambahan *disturbance* hal ini disebabkan pula untuk menjaga *cutting* batuan hasil penetrasi *bit* yang tidak terlalu banyak sehingga tidak menumpuk pada *bottom hole*.



Gambar 4. 8 Grafik variansi massa jenis batuan terhadap *ROP* setelah optimisasi



Gambar 4. 9 Grafik variansi massa jenis batuan terhadap *RPM* setelah optimisasi

Sedangkan untuk nilai *mud density* dan *qmud* tidak mengalami perubahan bahkan cenderung sama dikarenakan nilai *disturbance* berupa massa jenis batuan tidak mempengaruhi proses injeksi *mud* dari atas serta *flowrate* dari *mud* yang melewati *main pump*, bisa dikatakan bahwasanya nilai dari keduanya adalah konstan.

4.4 Kontrol Sistem *Drilling*

Tahapan selanjutnya adalah mengkontrol proses pada sistem *drilling*. Pada bagian kontrol, hasil optimisasi sebelumnya dijadikan sebagai *setpoint* pada variabel dan parameter kontroler pada sistem *drilling*. Diberikannya variabel dan parameter pada sistem kontrol tersebut bertujuan untuk menjamin nilai *rate of penetration* (*ROP*) tetap stabil yang bertujuan dalam *safety* ataupun menekan *drilling cost* seminimal mungkin. Dalam hal keamanan saat proses *drilling*, tekanan pada mata bor (*Pbit*) harus dijaga karena *Pbit* yang terlalu tinggi atau terlalu rendah dapat memengaruhi proses *drilling*. Dalam rangka menjaga agar *drilling surface* bekerja optimal dan aman, maka perlu diciptakan kondisi operasi yang tepat dimana *ROP* tetap stabil dan *pbit* terjaga dengan mengubah *setpoint* dari variabel sesuai dengan kondisi operasional saat proses *drilling* dilakukan. Pada penelitian ini dilakukan penambahan kontroler *feedforward* dengan tujuan untuk mengatasi

permasalahan pada saat *pbit* mengalami perubahan baik naik ataupun saat mengalami penurunan.

Pada penelitian ini dilakukan uji simulasi sistem kontrol *drilling* menggunakan PID. Simulasi kontrol dilakukan pada 5 kondisi, pertama kondisi *steady state*, untuk kondisi 2-5 dilakukan simulasi kontrol dengan adanya pengaruh *disturbance* berupa massa jenis batuan dimana terdapat 4 variasi batuan yang digunakan antara lain : *clay*, *sandstone*, *limetone* dan *granite*. Dalam melakukan simulasi kondisi operasi *drilling* pertama dilakukan perhitungan untuk *pressure* pada *bit* untuk masing masing kondisi operasional. *Setpoint* untuk *pbit* telah ditentukan dengan besar senilai 470 bar. Dalam menghitung *pbit* dapat dilakukan dengan memasukkan nilai variabel pada persamaan (2.16). Didapatkan data sebagai berikut :

Tabel 4. 7 Tabel *Pressure* pada *Bit*

no	Batuan	rho (kg/m3)	Rho campuran (kg/m3)	pbit
1	Clay	2210	1401.970907	470.1794
2	Sandstone	2350	1401.952957	470.1742
3	Limestone	2550	1401.926708	470.1665
4	Granite	2640	1401.914719	470.1629
5	Steady State	1400	1400	469.6

Dari tabel diatas didapatkan *pbit* ketika kondisi steady state sebesar 469.6 bar, menunjukkan nilai yang tidak jauh berbeda dengan *pbit setpoint*. Sedangkan ketika diberikan gangguan berupa perubahan massa jenis batuan dari kerapatan yang paling kecil menuju kerapatan paling besar, *pbit* cenderung turun hal dikarenakan *ROP* dan *RPM* pada batuan *clay* (lempung) setelah dilakukannya optimisasi memiliki nilai yang lebih besar daripada batuan massa jenis lain, nilai *ROP* dan *RPM* yang lebih besar nantinya akan menentukan nilai dari fraksi batuan atau *cutting* batuan yang lebih banyak pula. Dari tabel didapatkan bahwa penambahan *disturbance* massa jenis batuan berpengaruh pada perubahan *pressure* pada *bit*, dimana terjadi penambahan *pressure* pada *bit* sehingga harus dilakukan kontrol dengan merubah manipulated variabel (bukaan *valve*, back *pressure* pump, aliran *mud* utama) untuk menjaga *pbit* tetap pada *setpoint*.

4.5 Hasil Simulasi Sistem Kontrol pada Operasi *Drilling*

Dilakukan simulasi operasi *drilling* menggunakan software MATLAB untuk mengetahui respon tiap variabel terhadap penambahan *disturbance* perubahan massa jenis batuan. Adapun hal yang terjadi pada simulasi :

a. Pada waktu 0-50 detik, terjadi operasi *drilling* (pengaliran lumpur) pada kondisi steady, dengan flow *mud* pada *bit* dan *main pump* sebesar 3000 liter/min,
b. Pada waktu 50-100 detik, *setpoint* pada flow rate pompa lumpur utama diatur ke 0. Dikarenakan terjadi pemasangan pipa sehingga tidak ada lumpur yang diinjeksi.
c. Pada waktu 100-150 detik, *setpoint* pada drill *bit* diatur kembali, bertambah sedalam -3000 m. Tanpa ada injeksi mud
d. Pada waktu 150-225 detik, terjadi operasi *drilling* (pengaliran lumpur) kembali dan pengeboran dilanjutkan
e. Pada waktu 225-300 detik, terjadi penambahan *disturbance* berupa perubahan massa jenis batuan.

4.5.1 Kondisi Gangguan saat *Pbit* Turun

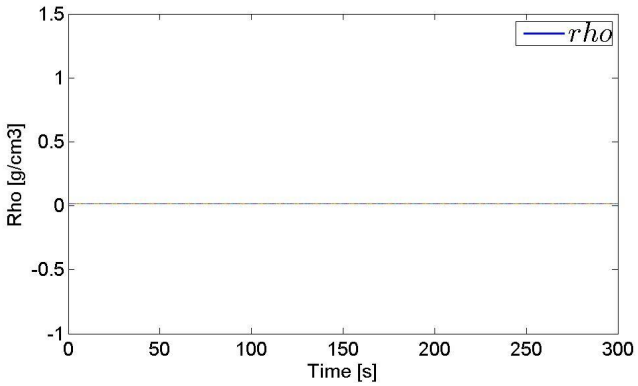
Pada penelitian kali ini dilakukan analisa terhadap *pressure* pada bit yang mengalami penurunan dikarenakan perubahan massa jenis batuan. Dapat dilihat pada tabel 4.7, dimana nilai *pbit* terbesar dikarenakan karena adanya perubahan massa jenis batuan *clay* sebesar 470.179446763799 bar. Diikuti dengan penambahan *pbit* karena perubahan massa jenis batuan *sandstone, limestone, dan granite* dengan nilai masing masing 470.174169356617 bar, 470.166452221397 bar, 470.162927342442 bar. Maka kondisi gangguan saat *pbit* turun dikarenakan perubahan massa jenis batuan dapat ditentukan, terdapat 6 variasi yaitu sebagai berikut :

Tabel 4. 8 Penurunan *Pbit* dengan Perubahan Massa Jenis Batuan

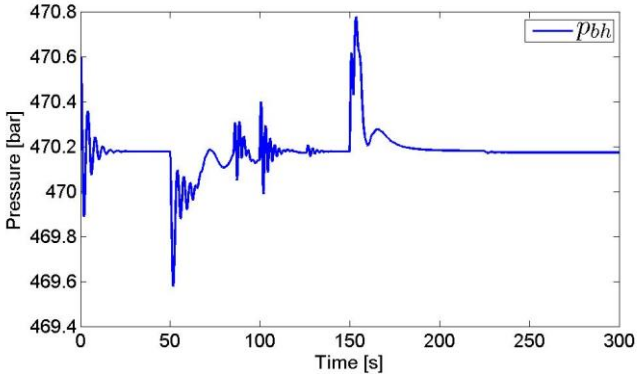
No	Perubahan Massa jenis batuan	Pbit sebelum	Pbit sesudah
1	Clay menuju Sandstone	470.17944676380	470.17416935662
2	Clay menuju Limestone	470.17944676380	470.16645222140
3	Clay menuju Granite	470.17944676380	470.16292734244
4	Sandstone menuju Limestone	470.17416935662	470.16645222140
5	Sandstone menuju Granite	470.17416935662	470.16292734244
6	Limestone menuju Granite	470.16645222140	470.16292734244

1. *Clay* menuju *Sandstone*

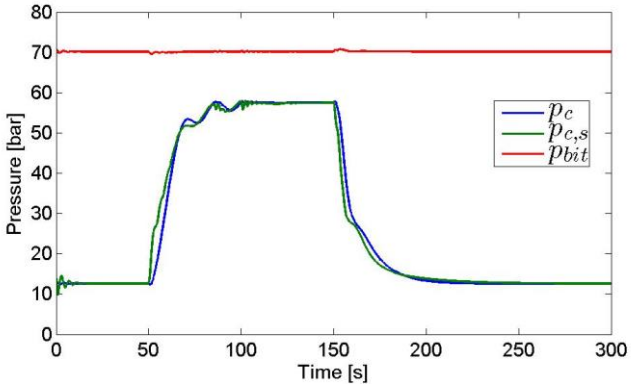
Setelah dilakukan simulasi sistem kontrol pada operasi *drilling* didapatkan data sebagai berikut :



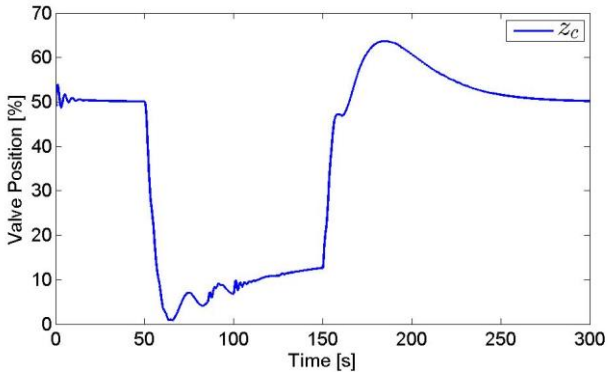
Gambar 4. 10 Grafik *density* campuran perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone*



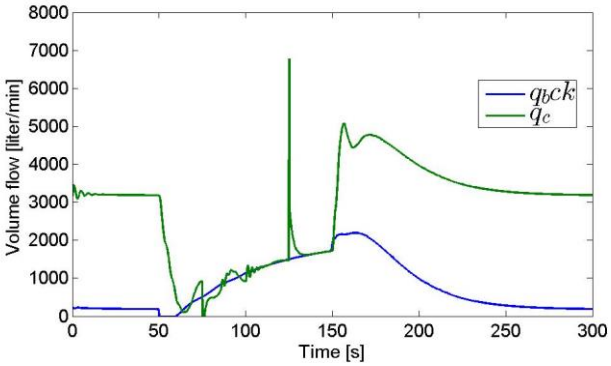
Gambar 4. 11 Grafik *pbit* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone*



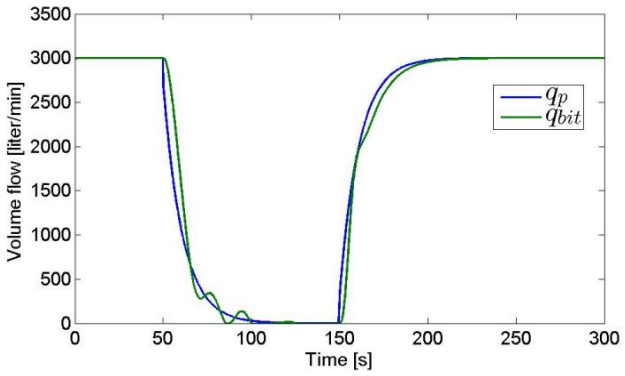
Gambar 4. 12 Grafik *pc,pc setpoint, dan pbit-400* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone*



Gambar 4. 13 Grafik *zc* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone*



Gambar 4. 14 Grafik *qc* dan *qbck* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone*



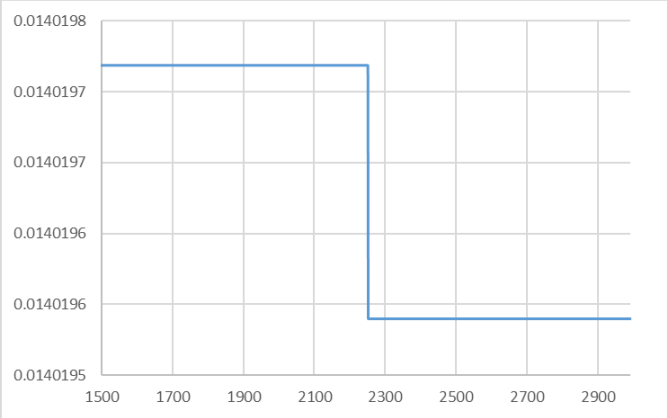
Gambar 4. 15 Grafik *qp* dan *qbit* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone*

Gambar 4.10-4.15 menunjukkan hasil kontrol operasi *drilling* pada kondisi *pbit* turun dikarenakan perubahan massa jenis batuan dari *clay* menju *sandstone*. Pada waktu 0-50s (kondisi tanpa pengaruh perubahan massa jenis batuan) dan 150-300s (kondisi adanya perubahan massa jenis batuan). Perubahan massa jenis batuan akan

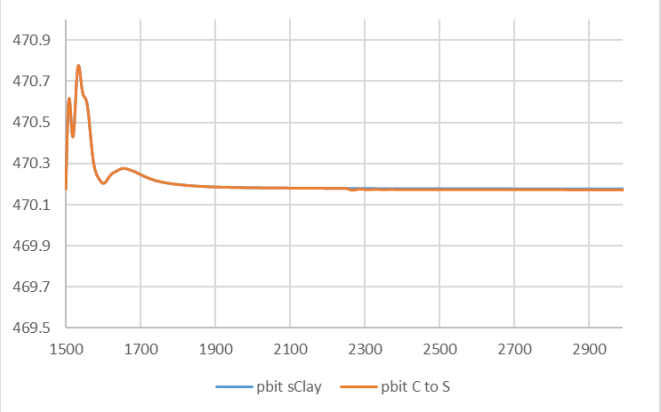
mempengaruhi perubahan *pbit*. Kontrol terhadap *pbit* akan merubah nilai *pressure* pada choke, perubahan *pressure* pada choke akan mempengaruhi perubahan nilai *zc*, *qc*, *qbck*. Nilai *qbit* dan *qp* konstan sebesar 3000 liter/min. Hal ini dikarenakan *qbit* dan *qp* dianggap konstan, yang berarti nilai *disturbance* berupa perubahan massa jenis batuan tidak mempengaruhi besarnya nilai *flowrate* pada *main pump* yang berada di permukaan bumi. Analisa lebih lanjut dilakukan pada waktu 150-300s, dimana diberikan disturbance perubahan massa jenis batuan pada waktu 225s, didapatkan hasil sebagai berikut :

a. Nilai *pbit* terhadap perubahan massa jenis batuan dan nilai *qp*

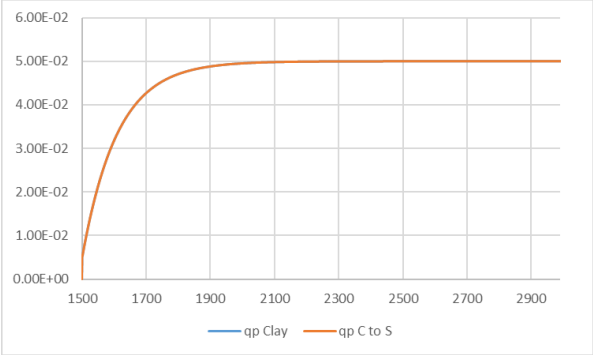
Dilakukan plot pada excel sebagai berikut :



Gambar 4. 16 Grafik *density mud* campuran saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone*



Gambar 4. 17 Grafik *pbit* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone*

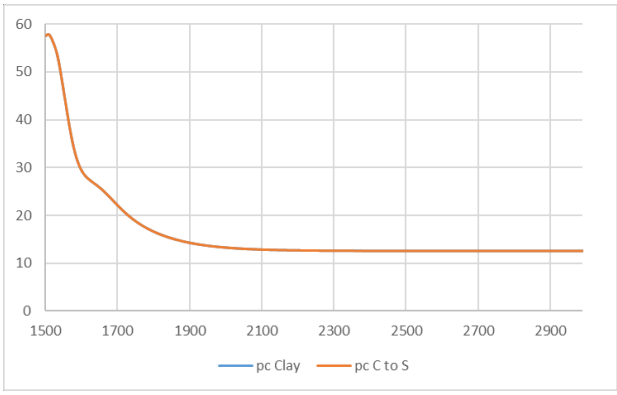


Gambar 4. 18 Grafik *qp* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone*

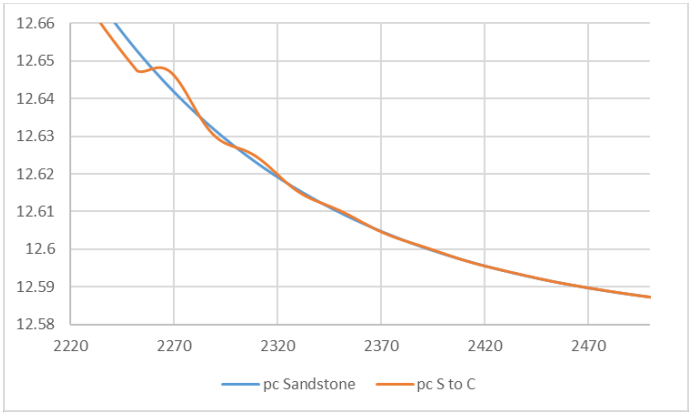
Dari Gambar 4.17 dan 4.18 dapat diambil analisa ketika operasi drilling berlangsung pada t=225 detik hubungan antara massa jenis campuran lumpur dan serpihan dengan nilai *pressure* pada *bit*. Setelah diberikan perubahan massa jenis batuan dari *clay* menuju *sandstone* mempengaruhi nilai pada *pbit*, nilai *pbit* cenderung menurun seiring dengan massa jenis campuran yang lebih kecil. Selain itu nilai *qp* relative stabil namun mengalami kenaikan dengan nilai *qp clay* sebesar 0.0499999161707563 liter/min dan *qp clay* menuju *sandstone* sebesar 0.0499999161770126 liter/min. Oleh karena itu perlu dilakukan pengontrolan terhadap variabel lain untuk menjaga nilai *pbit* tetap pada *setpoint* sebesar 470 bar.

b. Nilai *pc* terhadap perubahan *pbit*

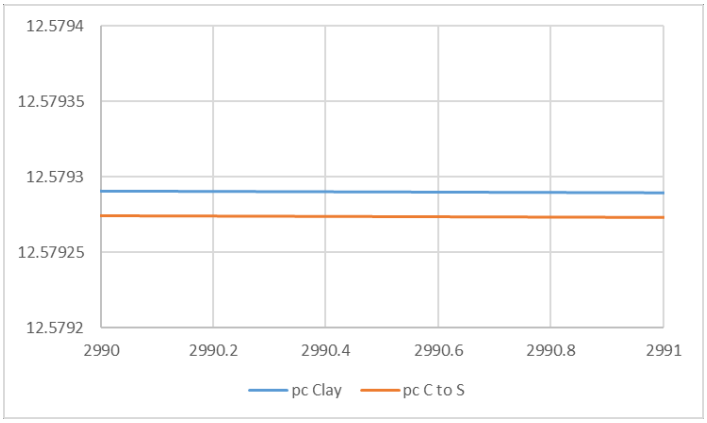
Dilakukan plot pada excel sebagai berikut :



Gambar 4. 19 Grafik *pc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone*



Gambar 4. 20 Grafik *pc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone*

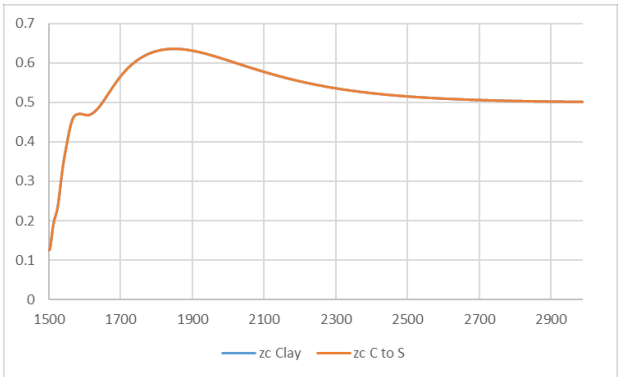


Gambar 4. 21 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone*

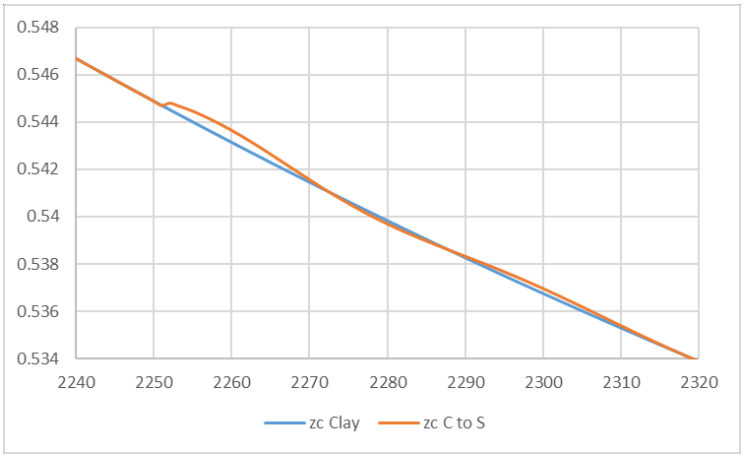
Dari gambar 4.19 dan 4.20 dapat diambil analisa ketika operasi drilling berlangsung nilai *pc* akan mengalami penurunan agar menjaga *pbit* tetap pada *setpoint*nya. Nilai *pc* untuk batuan *clay* sebesar 12.5792808135826 bar sedangkan *pc* setelah perubahan batuan *clay* menuju *sandstone* bernilai 12.5792644704933 bar. Terjadi penurunan *pc* sebesar +/- 0.00002 bar. Perubahan *pbit* yang dipengaruhi oleh perubahan massa jenis batuan akan memberikan perubahan nilai *pc* dan *pc setpoint*, hal ini dikarenakan perlu adanya kontrol dan penyesuaian agar *pbit* tetap pada *setpoint* dan lumpur serta serpihan yang terangkut dapat terangkat menuju permukaan bumi.

c. Nilai *zc, qc,* dan *qbck* terhadap perubahan *pc*

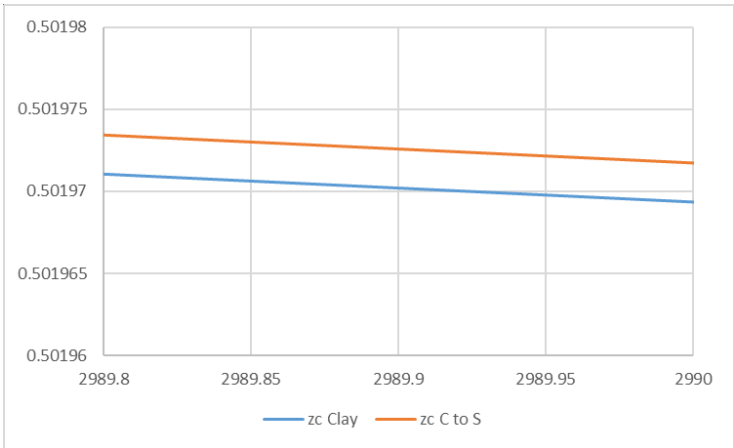
Dilakukan plot pada excel sebagai berikut :



Gambar 4. 22 Grafik *zc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone*

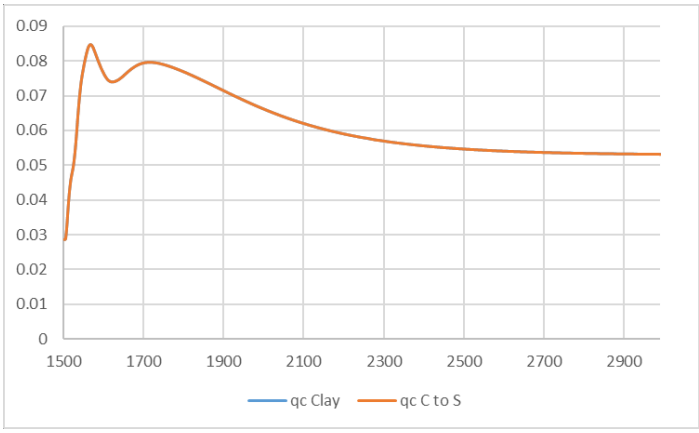


Gambar 4. 23 Grafik *zc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone*

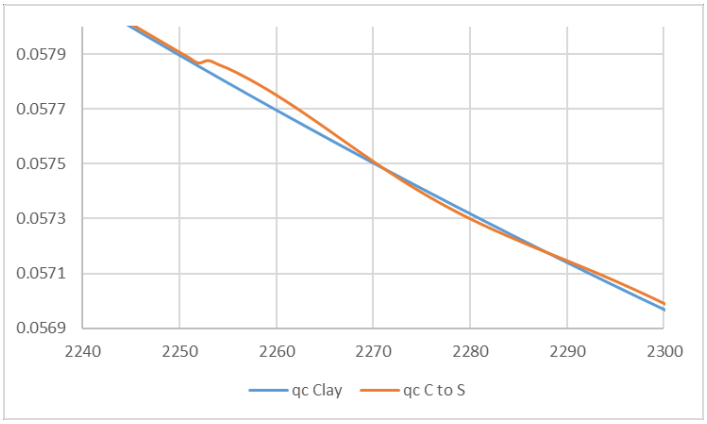


Gambar 4. 24 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone*

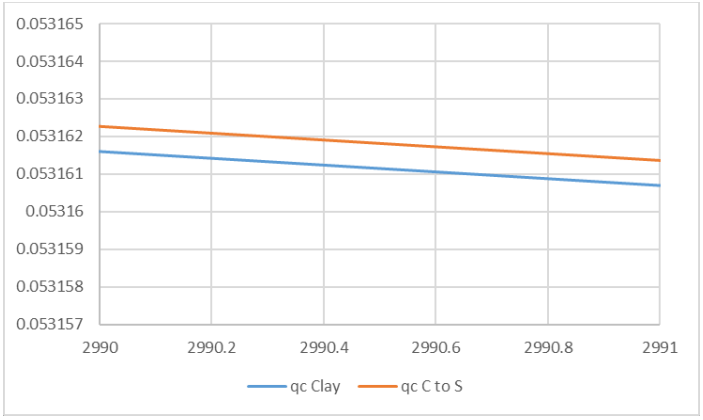
Dari gambar 4.21 – 4.23 dapat dianalisa bahwa nilai *zc* akan mengalami osilasi pada t=225s dan kemudian nilai *zc* akan cenderung akan mengalami kenaikan, hal ini sejalan dikarenakan perubahan nilai *pressure* pada chocke vlave pada sub bagian sebelumnya. Nilai *zc* (bukaan *valve*) untuk batuan *clay* sebesar 0.501894419443367 atau sebesar 50.1894% sedangkan *pc* setelah perubahan batuan *clay* menuju *sandstone* bernilai 0.501897710593733 atau sebesar 50.1896% . Terjadi kenaikan *zc* sebesar +/- 0.000003%. Semakin kecil nilai *pc* diperlukan bukaan *valve* (*zc*) yang lebih besar daripada kondisi sebelumnya untuk mendapatkan nilai *pressure* yang lebih kecil pula.



Gambar 4. 25 Grafik *qc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone*

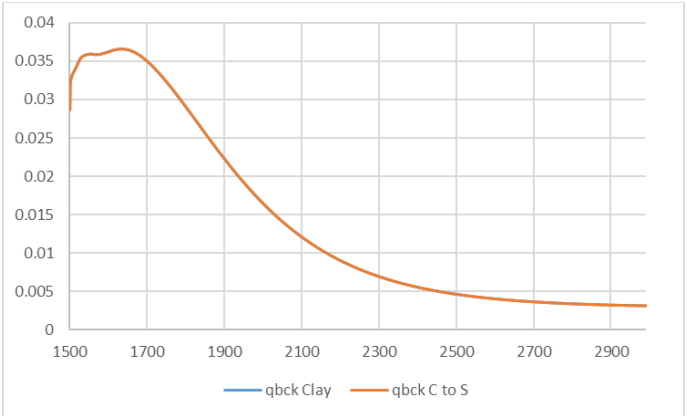


Gambar 4. 26 Grafik *qc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone*

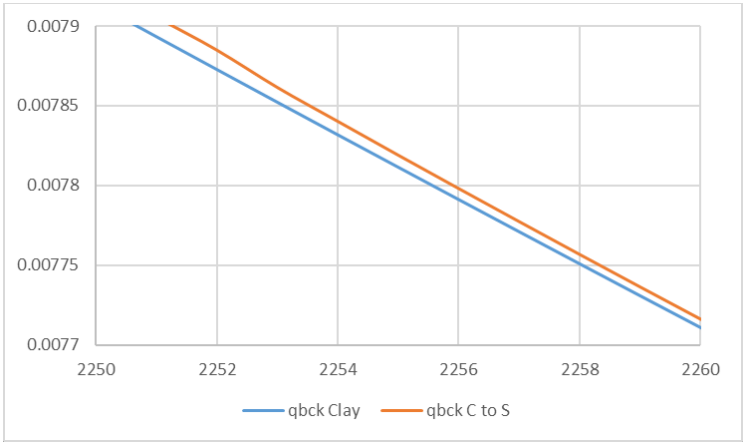


Gambar 4. 27 Grafik perbandingan *qc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone*

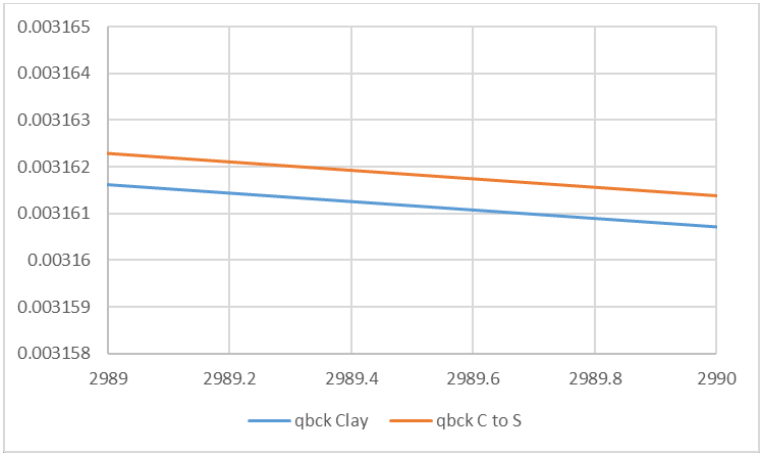
Dari gambar 4.24 – 4.26 dapat dianalisa bahwa nilai *qc* akan mengalami osilasi pada t=225s dan kemudian nilai *zc* akan cenderung akan mengalami kenaikan, hal ini sejalan dikarenakan pengaruh perubahan nilai *pc* pada sub bagian sebelumnya. Nilai *qc* (*flowrate* pada *valve*) untuk batuan *clay* sebesar 0.0531536055316624 m3/s sedangkan *qc* setelah perubahan batuan *clay* menuju *sandstone* bernilai 0.0531542599320899 m3/s. Terjadi penurunan *qc* sebesar +/- 0.000001 m3/s. Semakin kecil nilai *pc* akan mempengaruhi nilai *qc* dimana keduanya berbanding terbalik, dimana semakin kecil nilai *pc* akan diikuti dengan semakin besarnya nilai *qc*.



Gambar 4. 28 Grafik *qbck* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone*



Gambar 4. 29 Grafik *qbck* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone*

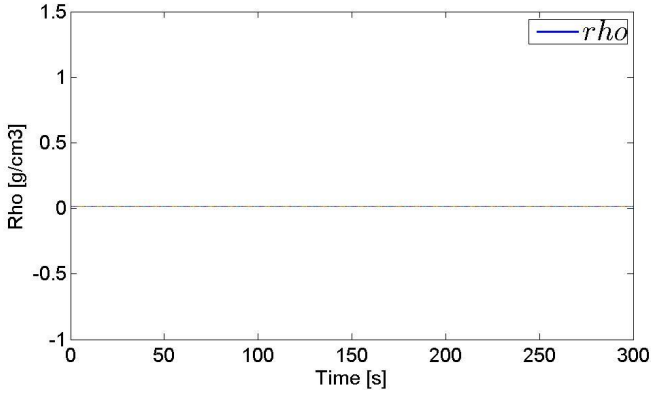


Gambar 4. 30 Grafik perbandingan *qbck* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *sandstone*

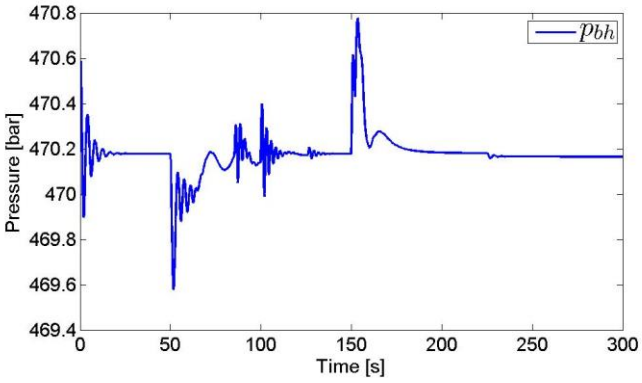
Dari gambar 4.27 – 4.29 dapat dianalisa bahwa nilai *qbck* akan mengalami osilasi pada t=225s dan kemudian nilai *qbck* akan cenderung akan mengalami kenaikan, hal ini sejalan dikarenakan pengaruh perubahan nilai *pc* pada sub bagian sebelumnya. Nilai *qc* (*flowrate* pada *back pump*) untuk batuan *clay* sebesar 0.00315275365465993 liter/min sedangkan *qc* setelah perubahan batuan *clay* menuju *sandstone* bernilai 0.00315340650252026 liter/min. Terjadi penurunan *qbck* sebesar +/- 0.000001 liter/min. Semakin kecil nilai *pc* akan mempengaruhi nilai *qbck* dimana keduanya berbanding terbalik, dimana semakin kecil nilai *pc* akan diikuti dengan semakin besar nilai *qbck*.

2. *Clay* menuju *Limestone*

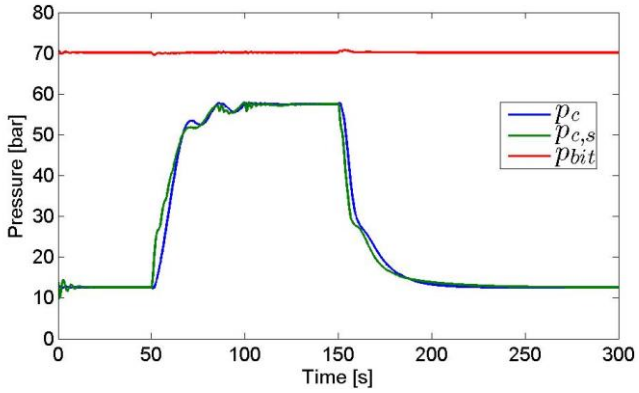
Setelah dilakukan simulasi sistem kontrol pada operasi *drilling* didapatkan data sebagai berikut :



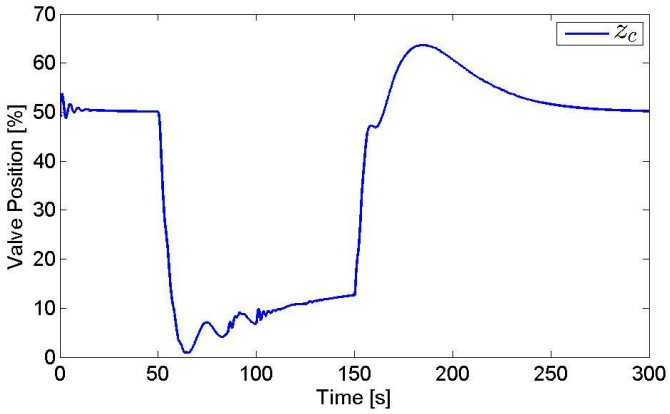
Gambar 4. 31 Grafik *density* campuran perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone*



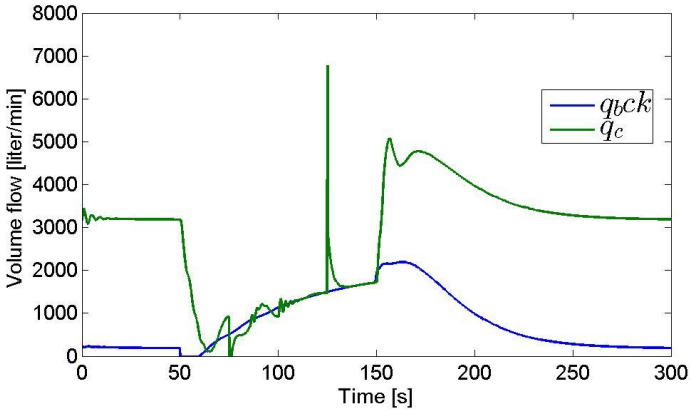
Gambar 4. 32 Grafik *pbit* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone*



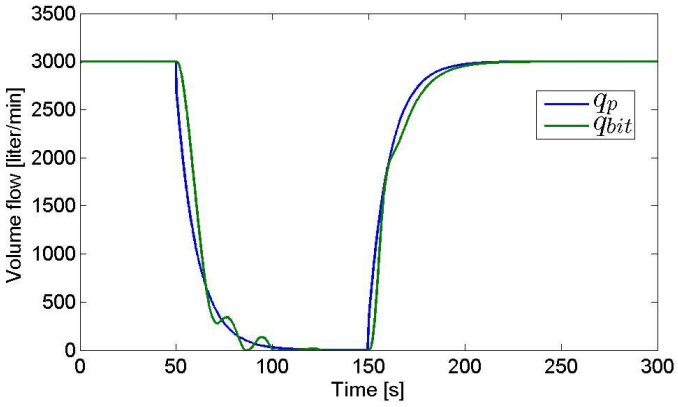
Gambar 4. 33 Grafik *pbit, pc dan pc setpoint* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone*



Gambar 4. 34 Grafik *zc* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone*



Gambar 4. 35 Grafik *qc* dan *qbck* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone*

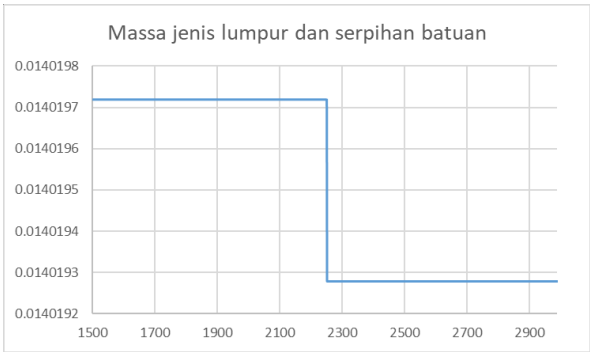


Gambar 4. 36 Grafik *qp* dan *qbit* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone*

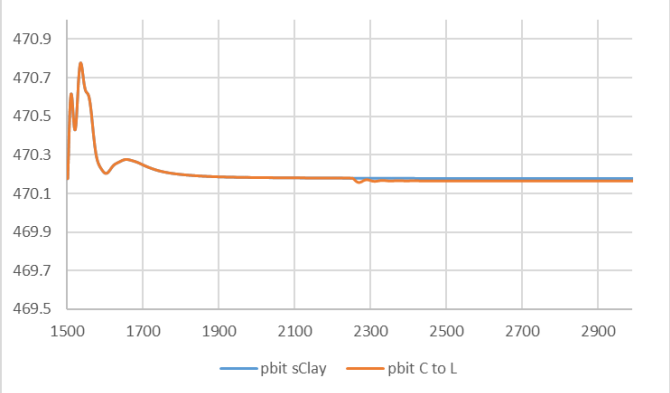
Grafik 4.31- 4.36 menunjukkan hasil kontrol operasi *drilling* pada kondisi *pbit* turun dikarenakan perubahan massa jenis batuan dari *clay* menju *limestone*. Pada waktu 0-50s (kondisi tanpa pengaruh perubahan massa jenis batuan) dan 150-300s (kondisi adanya perubahan massa jenis batuan). Perubahan massa jenis batuan akan mempengaruhi perubahan *pbit*. Kontrol terhadap *pbit* akan merubah nilai *pressure* pada choke, perubahan *pressure* pada choke akan mempengaruhi perubahan nilai *zc*, *qc*, serta *qbck*. Nilai *qbit* dan *qp* konstan sebesar 3000 liter/min. Hal ini dikarenakan *qbit* dan *qp* dianggap konstan, yang berarti nilai *disturbance* berupa perubahan massa jenis batuan tidak mempengaruhi besarnya nilai *flowrate* pada *main pump* yang berada di permukaan bumi. Analisa lebih lanjut dilakukan pada waktu 150-300s, dimana diberikan disturbance perubahan massa jenis batuan pada waktu 225s, didapatkan hasil sebagai berikut :

a. Nilai *pbit* terhadap perubahan massa jenis batuan dan nilai *qp*

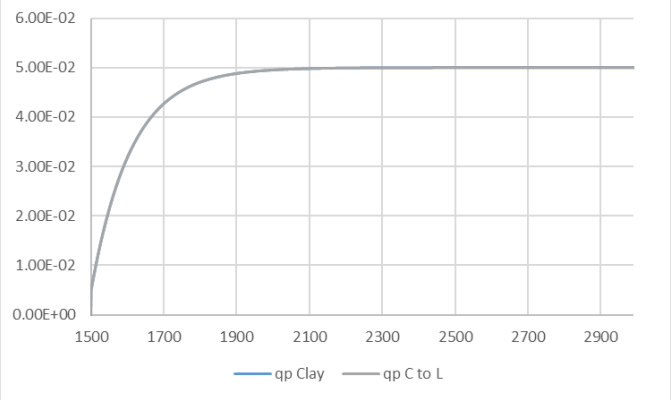
Dilakukan plot pada excel sebagai berikut :



Gambar 4. 37 Grafik *density* campuran saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone*



Gambar 4. 38 Grafik *pbit* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone*

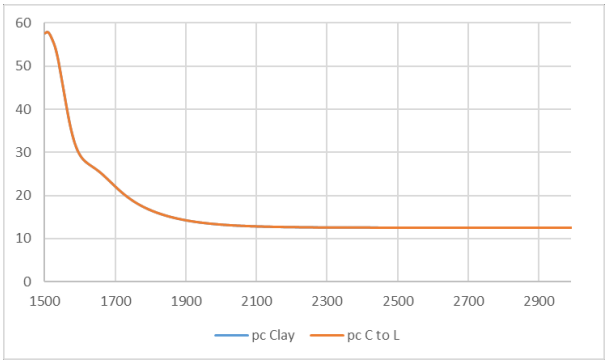


Gambar 4. 39 Grafik *qp* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone*

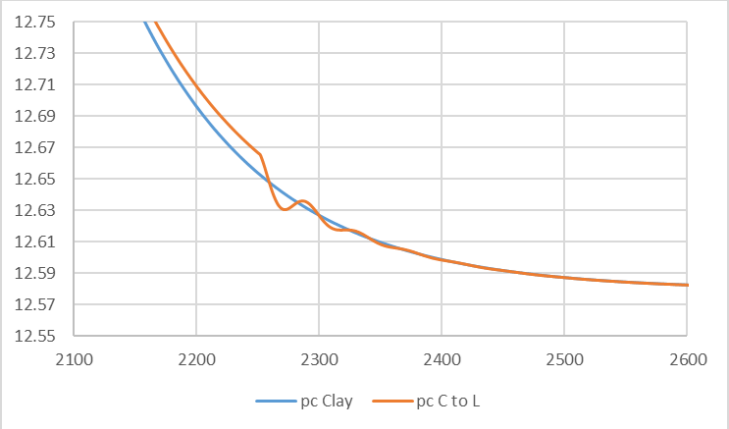
Dari gambar 4.37 dan 4.39 dapat diambil analisa ketika operasi drilling hubungan antara massa jenis campuran lumpur dan serpihan dengan nilai *pressure* pada bit. Setelah diberikan perubahan massa jenis batuan dari *clay* menuju *limestone* saat t=225s mempengaruhi nilai pada *pbit*, nilai *pbit* akan mengalami penurunan seiring dengan massa jenis campuran yang lebih kecil. Selain itu nilai *qp* relative stabil namun mengalami kenaikan dengan nilai *qp clay* sebesar 0.0499999161707563 m^3/s dan *qp clay* menuju *limestone* sebesar 0.0499999161861572 m^3/s. Oleh karena itu dilakukan pengontrolan terhadap variabel lain untuk menjaga nilai *pbit* tetap pada *setpoint* sebesar 470 bar.

b. Nilai *pc* terhadap perubahan *pbit*

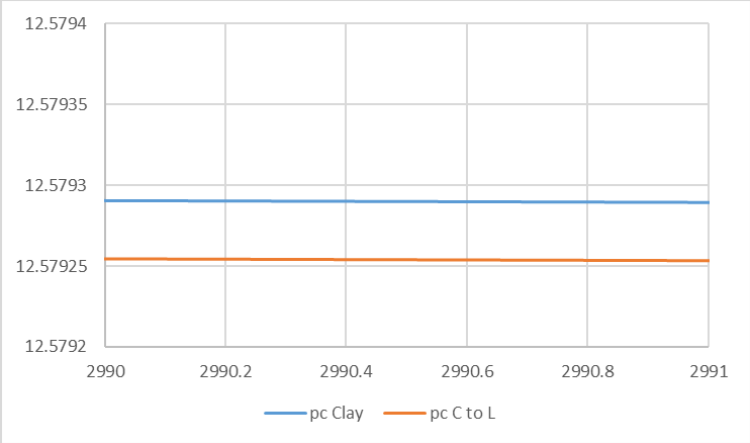
Dilakukan plot pada excel sebagai berikut :



Gambar 4. 40 Grafik *pc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone*



Gambar 4. 41 Grafik *pc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone*

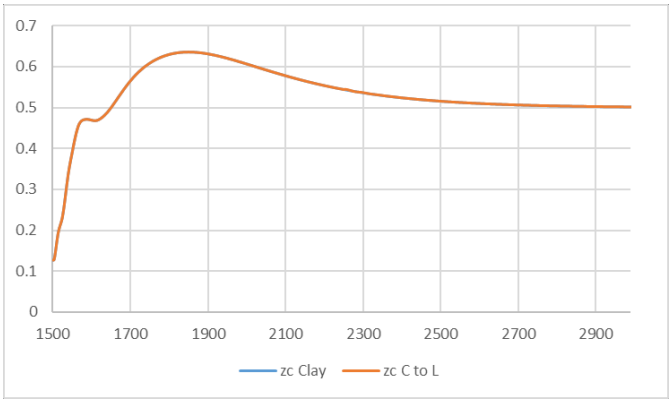


Gambar 4. 42 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone*

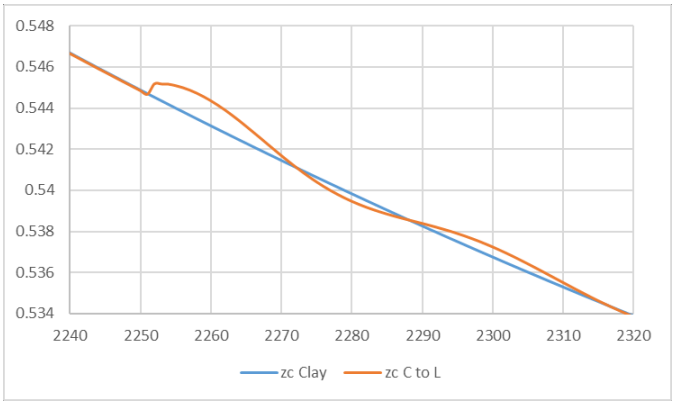
Dari gambar 4.40 dan 4.42 dapat diambil analisa ketika operasi drilling berlangsung nilai *pressure* pada choke *valve*, dimana nilai *pc* akan mengalami penurunan agar seiring penurunan *pbit*. Nilai *pc* untuk batuan *clay* sebesar 12.5792808135826 bar sedangkan *pc* setelah perubahan batuan *clay* menuju *limestone* bernilai 12.5792447974167 bar. Terjadi penurunan *pc* sebesar +/- 0.00004 bar. Perubahan *pbit* yang dipengaruhi oleh perubahan massa jenis batuan akan memberikan perubahan nilai *pc* dan *pc setpoint*, hal ini dikarenakan perlu adanya kontrol dan penyesuaian agar *pbit* tetap pada *setpoint* dan lumpur serta serpihan yang terangkut dapat terangkat menuju permukaan bumi.

c. Nilai *zc, qc,* dan *qbck* terhadap perubahan *pc*

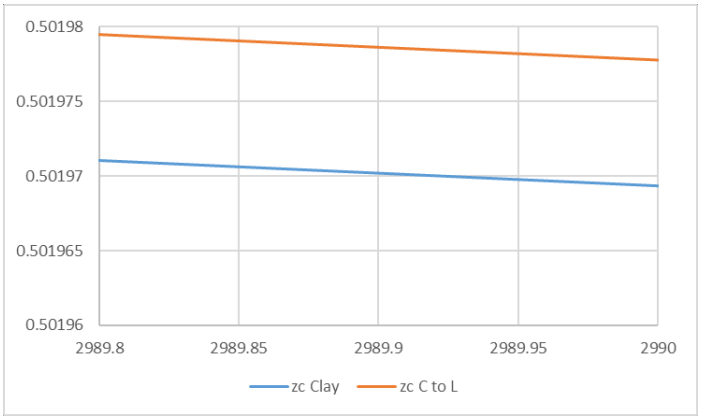
Dilakukan plot pada excel sebagai berikut :



Gambar 4. 43 Grafik *zc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone*

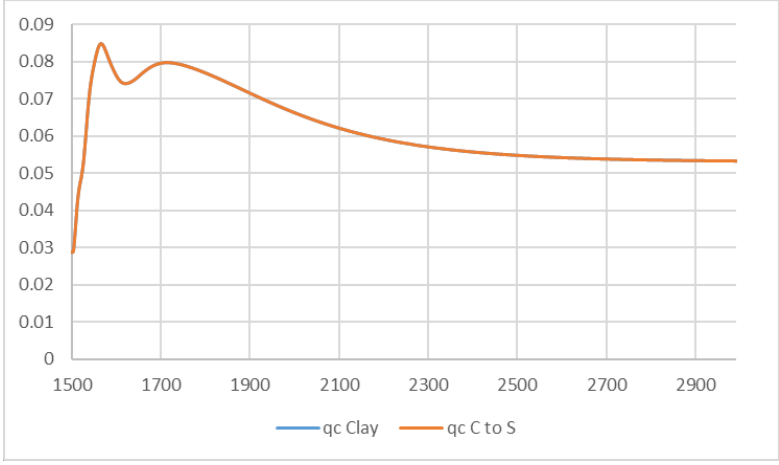


Gambar 4. 44 Grafik *zc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone*

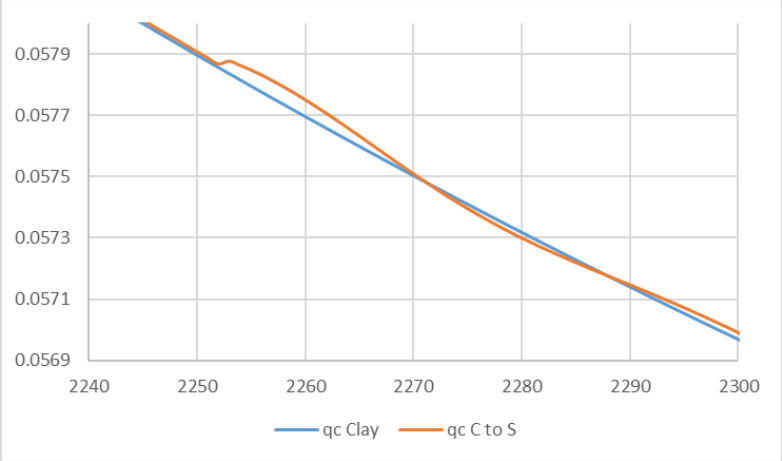


Gambar 4. 45 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone*

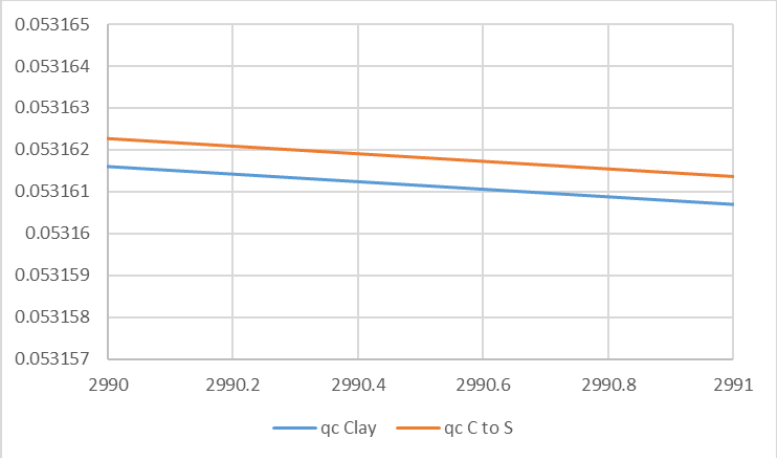
Dari gambar 4.43 – 4.45 dapat dianalisa bahwa nilai *zc* akan mengalami osilasi pada t=225s dan kemudian nilai *zc* akan cenderung akan mengalami kenaikan, hal ini sejalan dikarenakan perubahan nilai *pressure* pada *chocke valve* pada sub bagian sebelumnya. Nilai *zc* (bukaan *valve*) untuk batuan *clay* sebesar 0.501894419443367 atau sebesar 50.1894% sedangkan *pc* setelah perubahan batuan *clay* menuju *limestone* bernilai 0.501902522295488 atau sebesar 50.1902% . Terjadi kenaikan *zc* sebesar +/- 0.01 %. Semakin kecil nilai *pc* diperlukan bukaan *valve* (*zc*) yang lebih besar daripada kondisi sebelumnya untuk mendapatkan nilai *pressure* yang lebih kecil pula.



Gambar 4. 46 Grafik *qc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone*

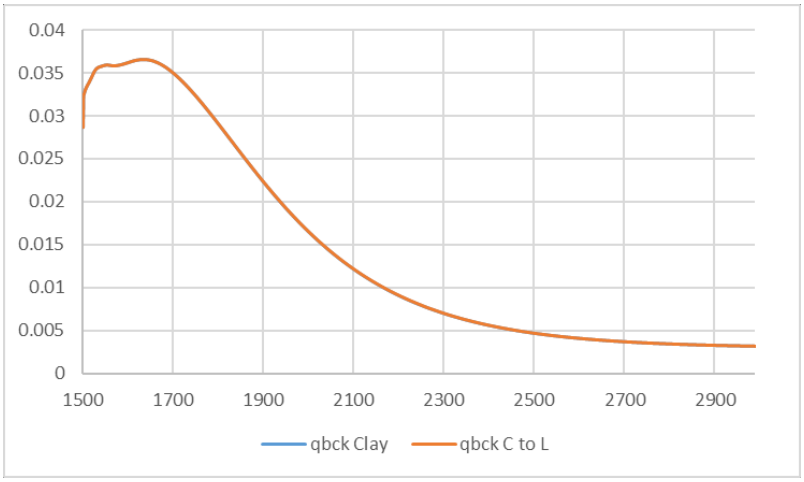


Gambar 4. 47 Grafik *qc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone*

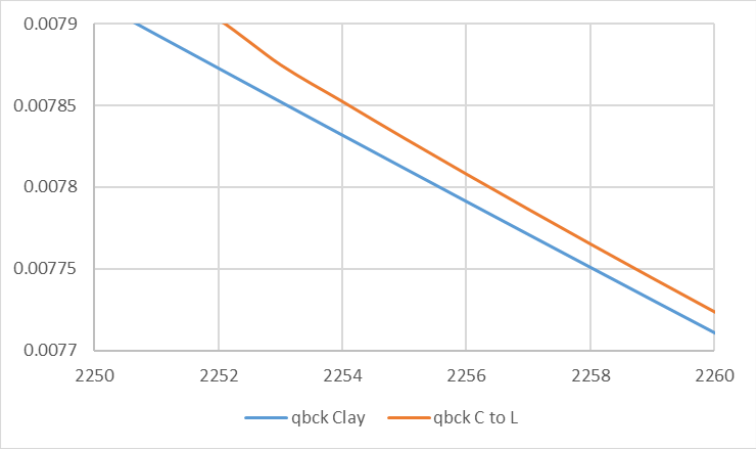


Gambar 4. 48 Grafik perbandingan *qc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone*

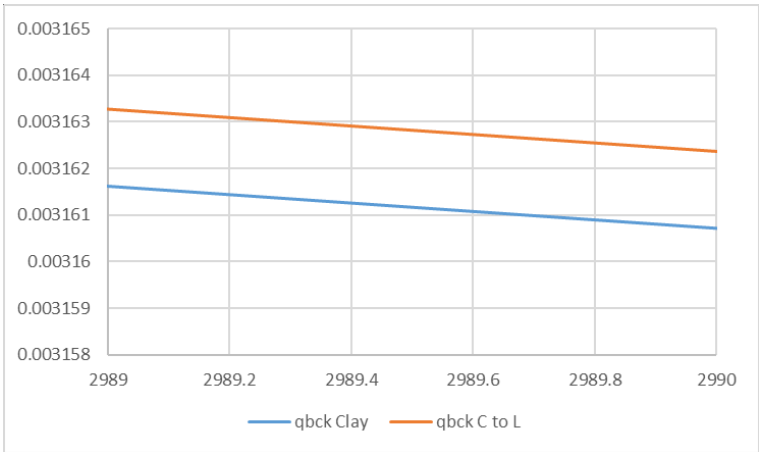
Dari gambar 4.46 – 4.48 dapat dianalisa bahwa nilai *qc* akan mengalami osilasi pada t=225s dan kemudian nilai *zc* akan cenderung akan mengalami kenaikan, hal ini sejalan dikarenakan pengaruh perubahan nilai *pc*. Nilai *qc* (*flowrate* pada *valve*) untuk batuan *clay* sebesar 0.0531536055316624 m3/s sedangkan *qc* setelah perubahan batuan *clay* menuju *limestone* bernilai 0.0531552259775626 m3/s. Terjadi penurunan *qc* sebesar +/- 0.000002 m3/s. Semakin kecil nilai *pc* akan mempengaruhi nilai *qc* dimana keduanya berbanding terbalik, dimana semakin kecil nilai *pc* akan diikuti dengan semakin besarnya nilai *qc*.



Gambar 4. 49 Grafik *qbck* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone*



Gambar 4. 50 Grafik *qbck* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone*

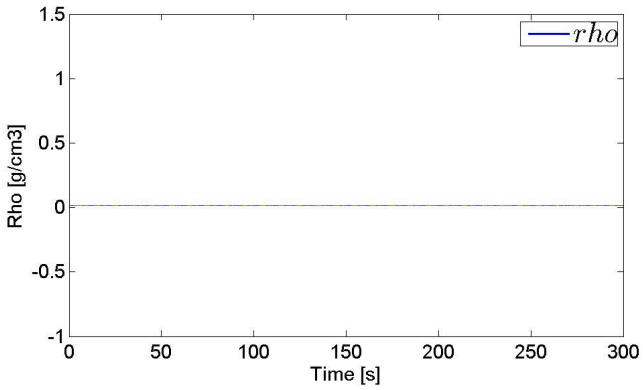


Gambar 4. 51 Grafik perbandingan *qbck* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *limestone*

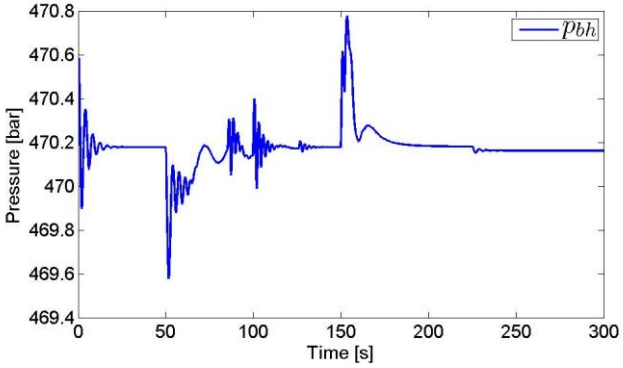
Dari gambar 4.49 – 4.51 dapat dianalisa bahwa nilai *qbck* akan mengalami osilasi pada t=225s meski tidak besar dan kemudian nilai *qbck* akan cenderung akan mengalami kenaikan, hal ini dikarenakan pengaruh perubahan nilai *pc*. Nilai *qbck* (*flowrate* pada *back pump*) untuk batuan *clay* sebesar 0.00315275365465993 m3/s sedangkan *qc* setelah perubahan batuan *clay* menuju *limestone* bernilai 0.00315437027812086 m3/s. Terjadi kenaikan *qbck* sebesar +/- 0.000002 m3/s. Semakin kecil nilai *pc* akan mempengaruhi nilai *qbck* dimana keduanya berbanding terbalik, dimana semakin kecil nilai *pc* akan diikuti dengan semakin besar nilai *qbck*.

3. *Clay* menuju *Granite*

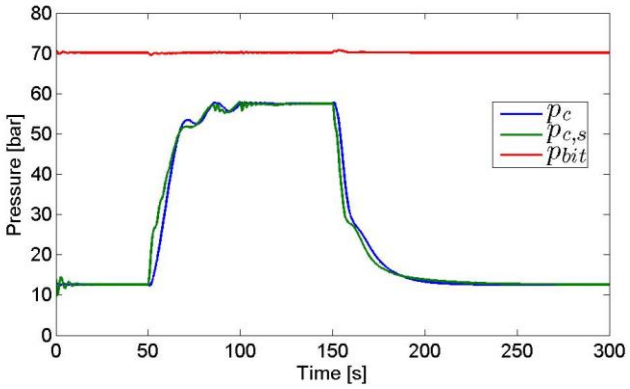
Setelah dilakukan simulasi sistem kontrol pada operasi *drilling* didapatkan data sebagai berikut :



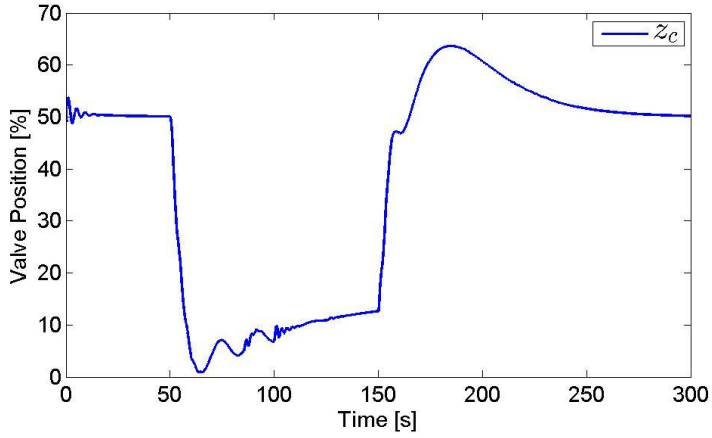
Gambar 4. 52 Grafik *density* campuran perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite*



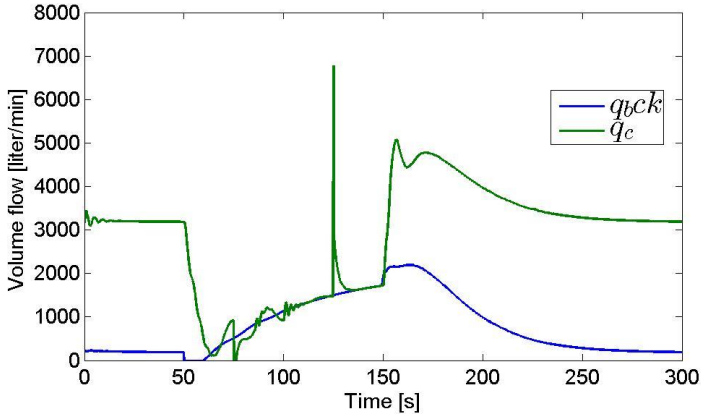
Gambar 4. 53 Grafik *pbit* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite*



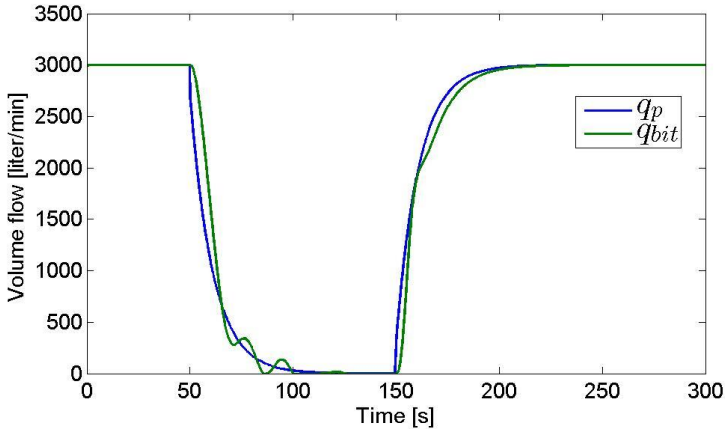
Gambar 4. 54 Grafik *pbit, pc* dan *pc setpoint* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite*



Gambar 4. 55 Grafik *zc* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite*



Gambar 4. 56 Grafik *qc* dan *qbck* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite*

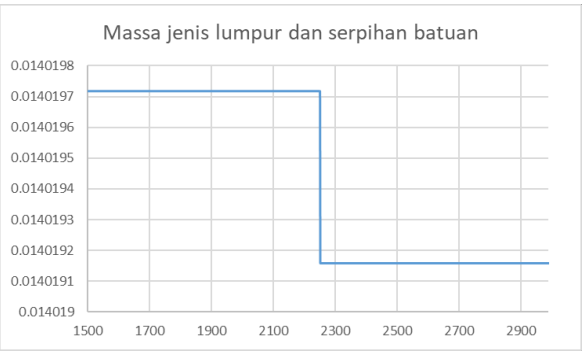


Gambar 4. 57 Grafik *qp* dan *qbit* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite*

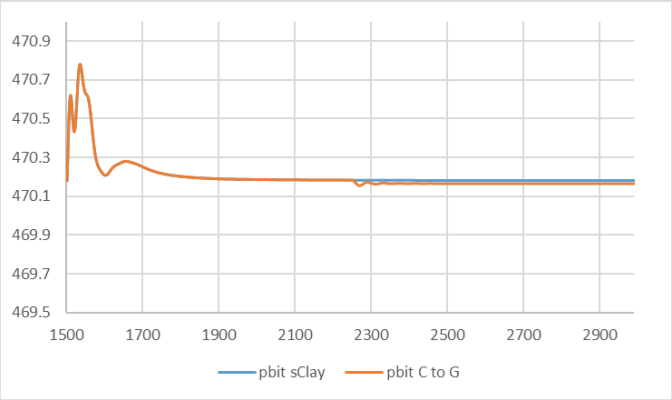
Gambar 4.52-4.57 menunjukkan hasil kontrol operasi *drilling* pada kondisi *pbit* turun dikarenakan perubahan massa jenis batuan dari *clay* menju *limestone*. Pada waktu 0-50s (kondisi tanpa pengaruh perubahan massa jenis batuan) dan 150-300s (kondisi adanya perubahan massa jenis batuan). Perubahan massa jenis batuan akan mempengaruhi perubahan *pbit*. Kontrol terhadap *pbit* akan merubah nilai *pressure* pada choke, perubahan *pressure* pada choke akan mempengaruhi perubahan nilai *zc*, *qc*, serta *qbck*. Nilai *qbit* dan *qp* konstan sebesar 3000 liter/min. Hal ini dikarenakan *qbit* dan *qp* dianggap konstan, yang berarti nilai *disturbance* berupa perubahan massa jenis batuan tidak mempengaruhi besarnya nilai *flowrate* pada *main pump* yang berada di permukaan bumi. Analisa lebih lanjut dilakukan pada waktu 150-300s, dimana diberikan disturbance perubahan massa jenis batuan pada waktu 225s, didapatkan hasil sebagai berikut :

a. Nilai *pbit* terhadap perubahan massa jenis batuan dan nilai *qp*

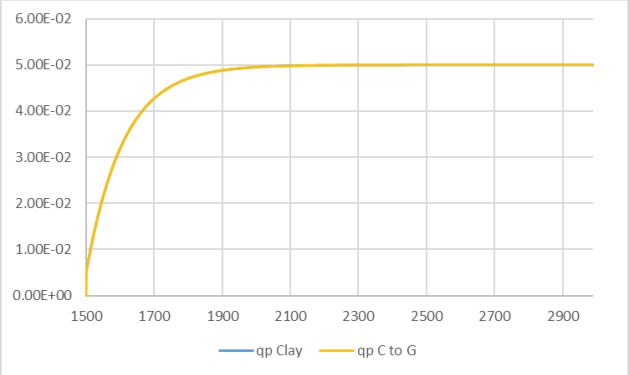
Dilakukan plot pada excel sebagai berikut :



Gambar 4. 58 Grafik *density* campuran saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite*



Gambar 4. 59 Grafik *pbit* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite*

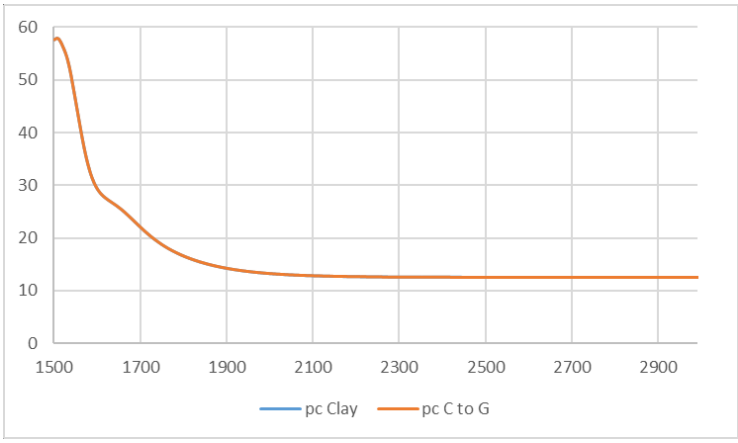


Gambar 4. 60 Grafik *qp* saat dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite*

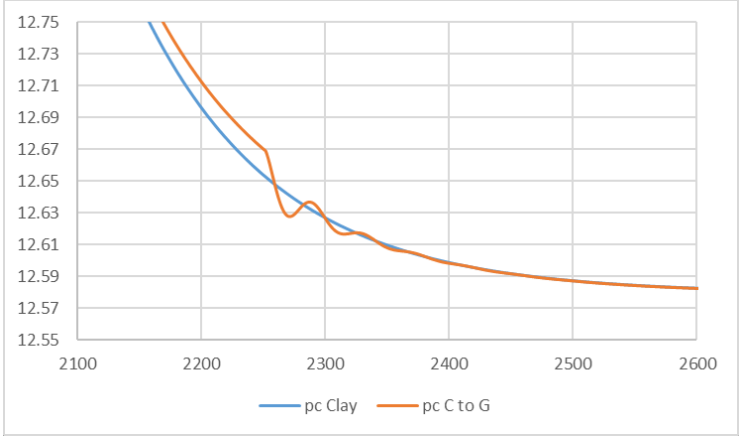
Dari gambar 4.58 dan 4.60 dapat diambil analisa ketika operasi drilling berlangsung pada 225s hubungan antara massa jenis campuran lumpur dan serpihan dengan nilai *pressure* pada bit. Setelah diberikan perubahan massa jenis batuan dari *clay* menuju *sandstone* mempengaruhi nilai pada *pbit*, nilai *pbit* cenderung menurun seiring dengan massa jenis campuran yang lebih kecil. Selain itu nilai *qp* relative stabil namun mengalami kenaikan dengan nilai *qp clay* sebesar 0.0499999161707563 dan *qp clay* menuju *limestone* sebesar 0.0499999161903325. Oleh karena itu dilakukan pengontrolan terhadap variabel lain untuk menjaga nilai *pbit* tetap pada *setpoint* sebesar 470 bar.

b. Nilai *pc* terhadap perubahan *pbit*

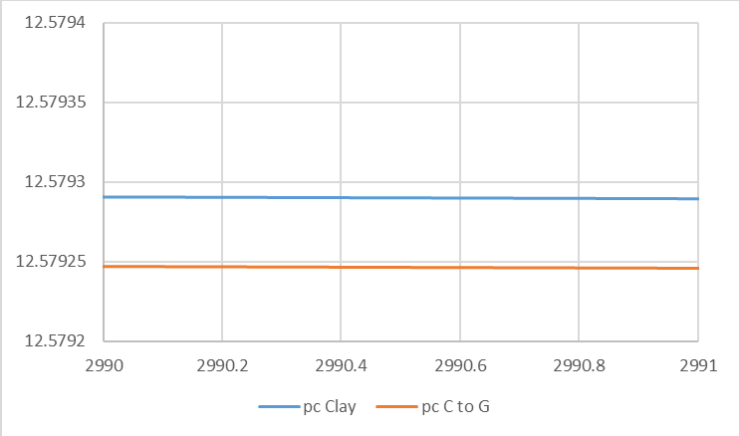
Dilakukan plot pada excel sebagai berikut :



Gambar 4. 61 Grafik *pc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite*



Gambar 4. 62 Grafik *pc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite*

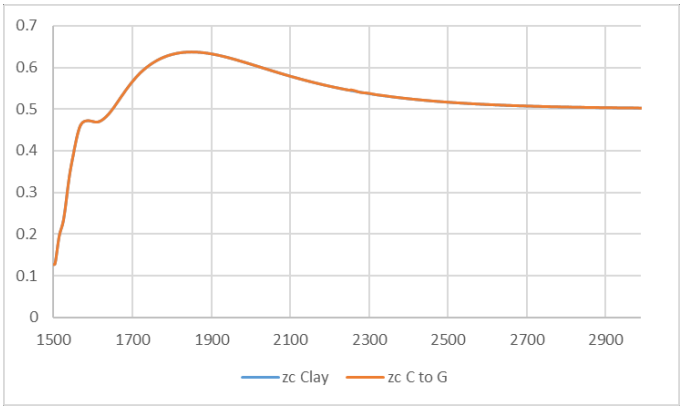


Gambar 4. 63 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite*

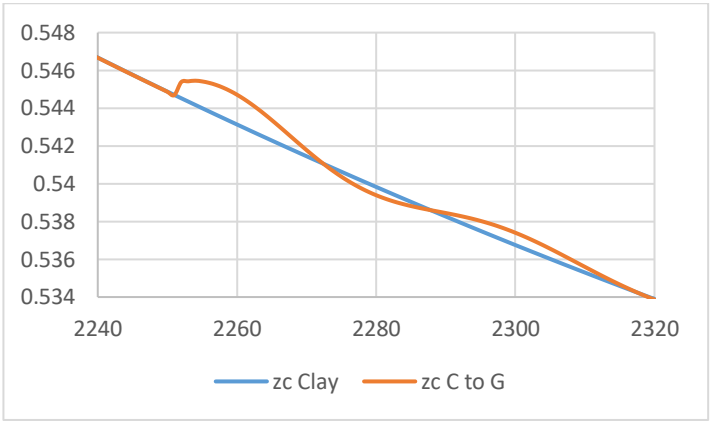
Dari gambar 4.61 dan 4.63 dapat diambil analisa ketika operasi drilling berlangsung nilai *pc* akan mengalami penurunan agar menjaga *pbit* tetap pada *setpoint*nya. Nilai *pc* untuk batuan *clay* sebesar 12.5792808135826 bar sedangkan *pc* setelah perubahan batuan *clay* menuju *granite* bernilai 12.57923711728 bar. Terjadi penurunan *pc* sebesar +/- 0.00005 bar, nilai penurunan yang lebih besar daripada kondisi sebelumnya. Perubahan *pbit* yang dipengaruhi oleh perubahan massa jenis batuan akan memberikan perubahan nilai *pc* dan *pc setpoint*, hal ini dikarenakan perlu adanya kontrol dan penyesuaian agar *pbit* tetap pada *setpoint* dengan merubah nilai *pc* dan serpihan yang terangkut dapat terangkat menuju permukaan bumi.

c. Nilai *zc, qc,* dan *qbck* terhadap perubahan *pc*

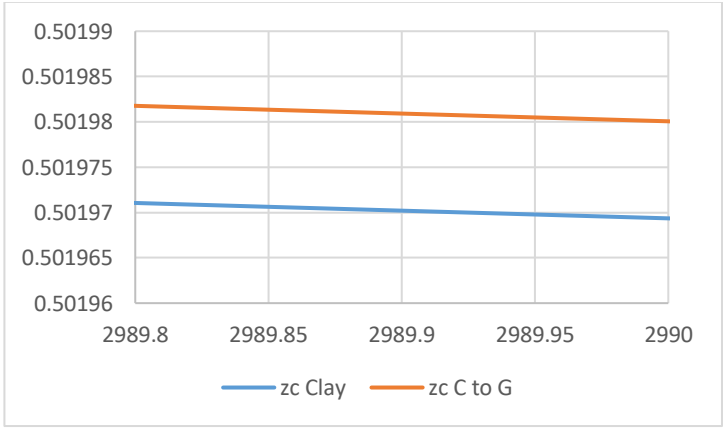
Dilakukan plot pada excel sebagai berikut :



Gambar 4. 64 Grafik *zc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite*

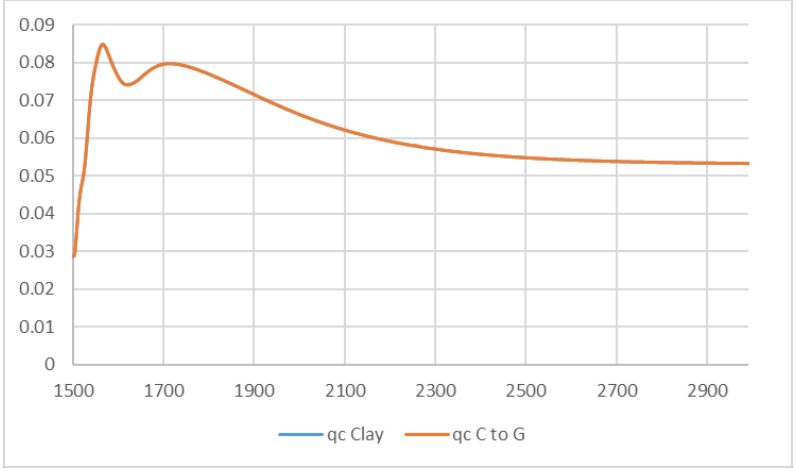


Gambar 4. 65 Grafik *zc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite*

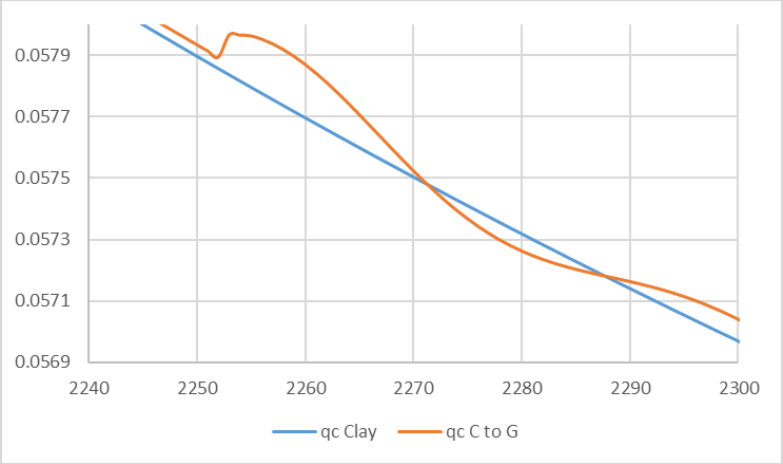


Gambar 4. 66 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite*

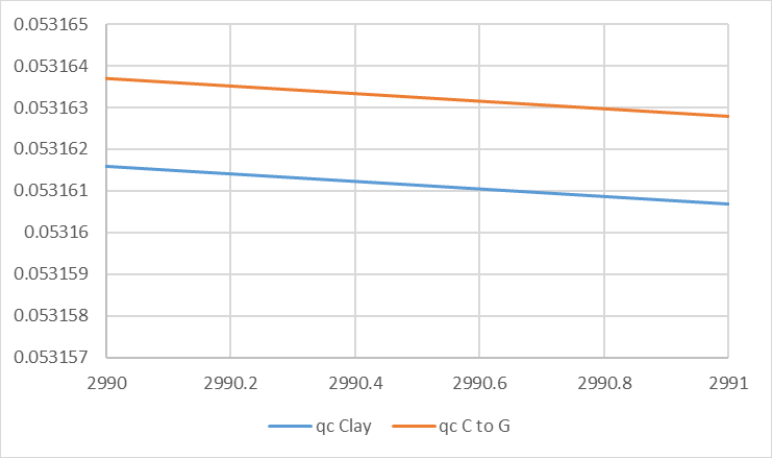
Dari gambar 4.64 – 4.66 dapat dianalisa bahwa nilai *zc* akan mengalami osilasi pada t=225s dan kemudian nilai *zc* akan cenderung akan mengalami kenaikan, hal ini dikarenakan perubahan nilai *pressure* pada chocke vlave. Nilai *zc* (bukaan *valve*) untuk batuan *clay* sebesar 0.501894419443367 atau sebesar 50.1894% sedangkan *pc* setelah perubahan batuan *clay* menuju *granite* bernilai 0.501904719679426 atau sebesar 50.1904% . Terjadi kenaikan *zc* sebesar +/- 0.01 %. Semakin kecil nilai *pc* diperlukan bukaan *valve* (*zc*) yang lebih besar daripada kondisi sebelumnya untuk mendapatkan nilai *pressure* yang lebih kecil pula.



Gambar 4. 67 Grafik *qc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite*

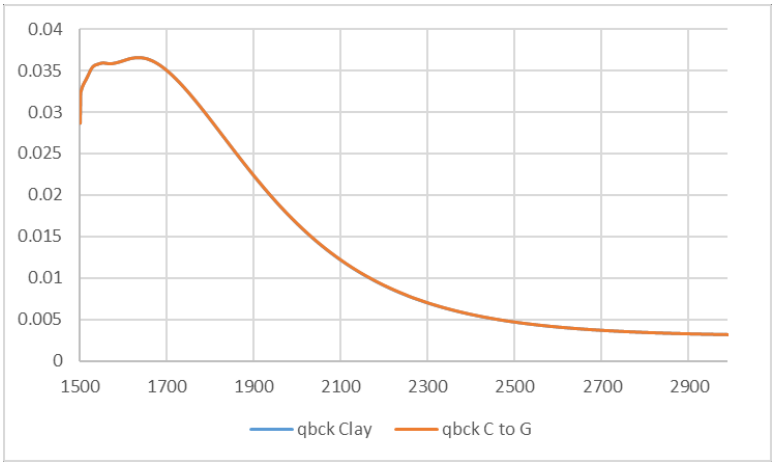


Gambar 4. 68 Grafik *qc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite*

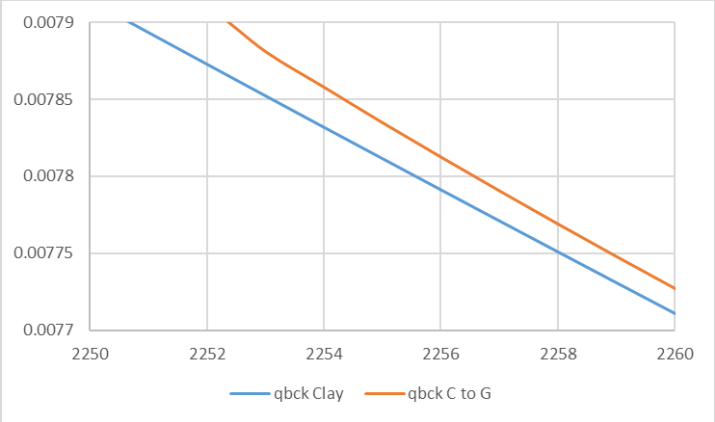


Gambar 4. 69 Grafik perbandingan *qc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite*

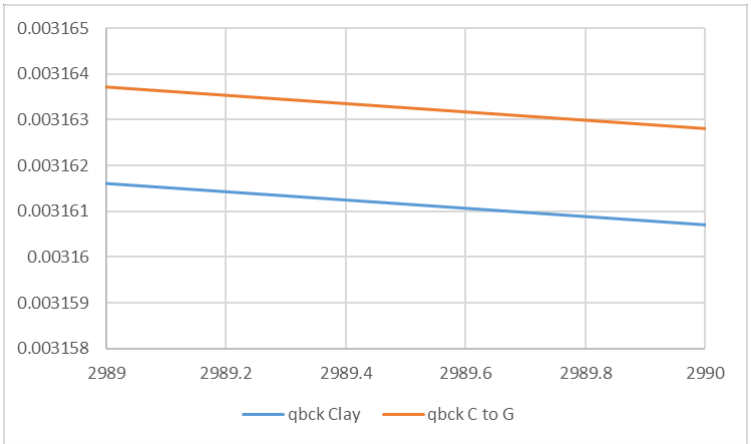
Dari gambar 4.67 – 4.69 dapat dianalisa bahwa nilai *qc* akan mengalami osilasi pada t=225s dan kemudian nilai *zc* akan cenderung akan mengalami kenaikan, hal ini dikarenakan pengaruh perubahan nilai *pc*. Nilai *qc* (*flowrate* pada *valve*) untuk batuan *clay* sebesar 0.0531536055316624 m3/s sedangkan *qc* setelah perubahan batuan *clay* menuju *granite* bernilai 0.0531556700351362 m3/s. Terjadi penurunan *qc* sebesar +/- 0.000002 m3/s. Semakin kecil nilai *pc* akan mempengaruhi nilai *qc* dimana keduanya berbanding terbalik, dimana semakin kecil nilai *pc* akan diikuti dengan semakin besarnya nilai *qc*.



Gambar 4. 70 Grafik *qbck* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite*



Gambar 4. 71 Grafik *qbck* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite*

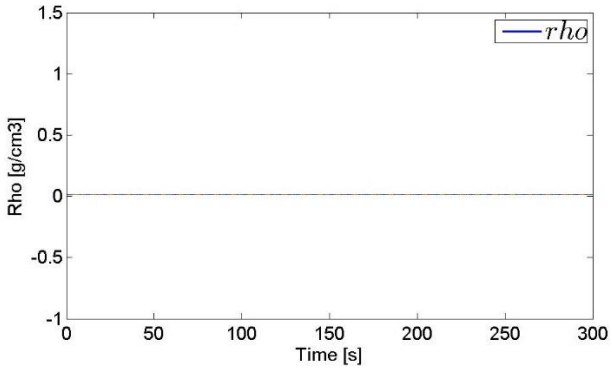


Gambar 4. 72 Grafik perbandingan *qbck* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *clay* menuju *granite*

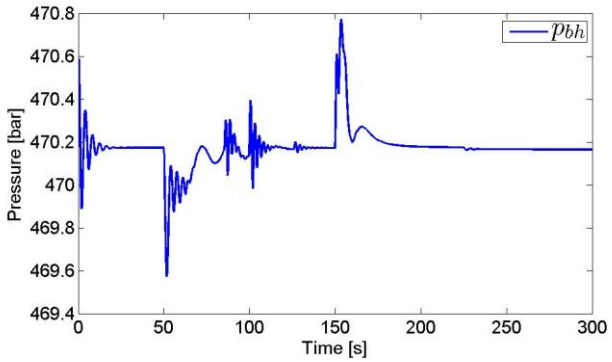
Dari gambar 4.70 – 4.72 dapat dianalisa bahwa nilai *qbck* akan mengalami osilasi pada t=225s dan kemudian nilai *qbck* akan cenderung akan mengalami kenaikan, hal ini sejalan dikarenakan pengaruh perubahan nilai *pc*. Nilai *qc* (*flowrate* pada *back pump*) untuk batuan *clay* sebesar 0.00315275365465993 m3/s sedangkan *qbck* setelah perubahan batuan *clay* menuju *granite* bernilai 0.00315481329910087 m3/s. Terjadi kenaikan *qbck* sebesar +/- 0.000002 liter/min. Semakin kecil nilai *pc* akan mempengaruhi nilai *qbck*, dimana semakin kecil nilai *pc* akan diikuti dengan semakin besar nilai *qbck*, ini menandakan perlu adanya *flowrate* tambahan untuk membantu menaikkan serpihan batuan ke permukaan.

4. *Sandstone* menuju *Limestone*

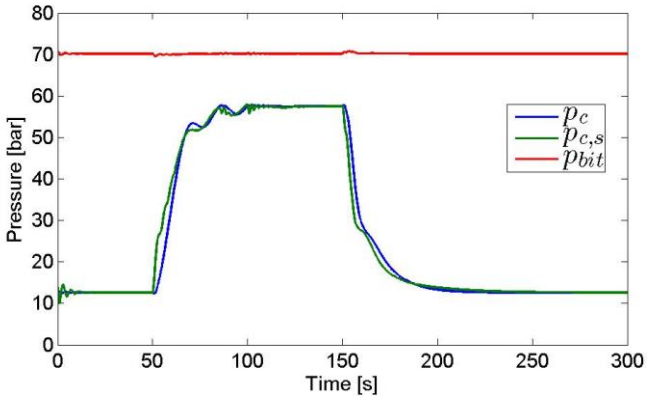
Setelah dilakukan simulasi sistem kontrol pada operasi *drilling* didapatkan data sebagai berikut :



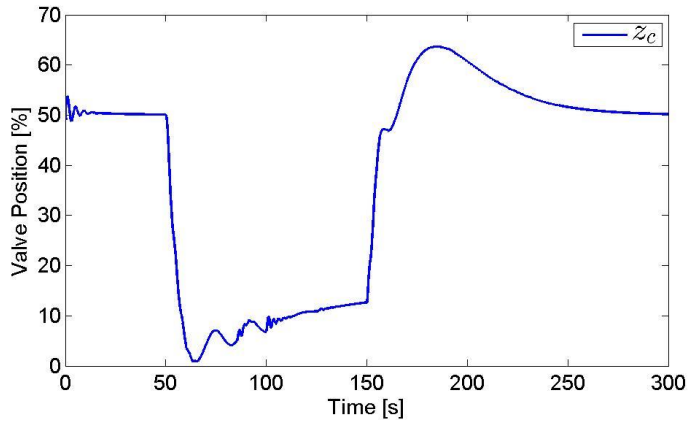
Gambar 4. 73 Grafik *density* campuran perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone*



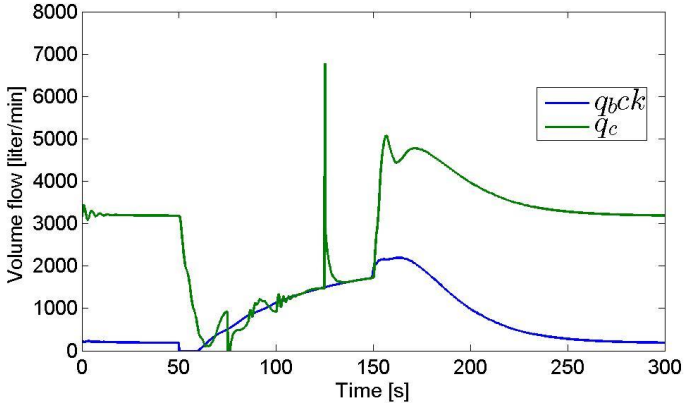
Gambar 4. 74 Grafik *pbit* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone*



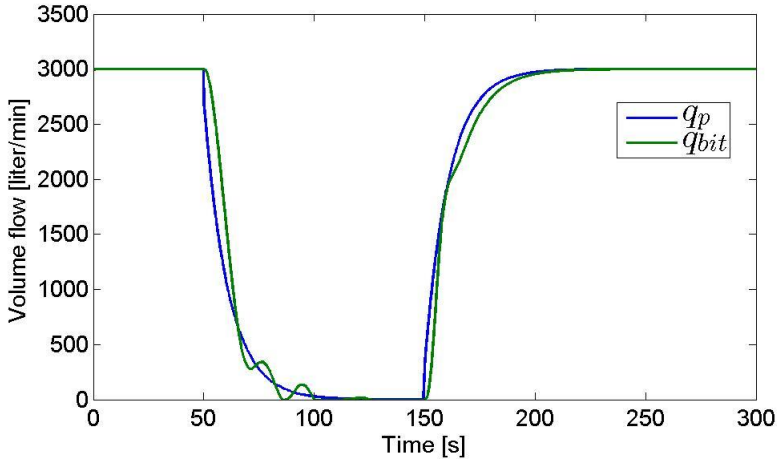
Gambar 4. 75 Grafik *pbit*, *pc* dan *pc setpoint* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone*



Gambar 4. 76 Grafik *zc* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone*



Gambar 4. 77 Grafik *qc* dan *qbck* dengan perubahan massa jenis *sandstone* menuju *limestone*

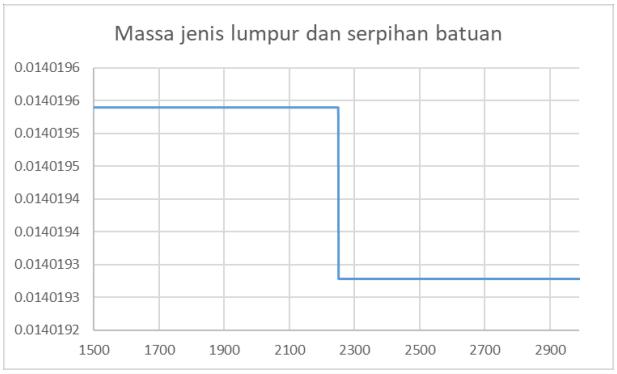


Gambar 4. 78 Grafik *qp* dan *qbit* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone*

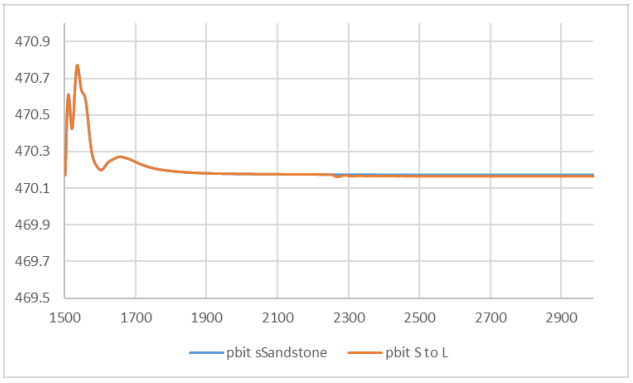
Gambar 4.73-4.78 menunjukkan hasil kontrol operasi *drilling* pada kondisi *pbit* turun dikarenakan perubahan massa jenis batuan dari *clay* menju *limestone*. Pada waktu 0-50s (kondisi tanpa pengaruh perubahan massa jenis batuan) dan 150-300s (kondisi adanya perubahan massa jenis batuan). Perubahan massa jenis batuan akan mempengaruhi perubahan *pbit*. Kontrol terhadap *pbit* akan merubah nilai *pc*, perubahan *pressure* pada *pc* akan mempengaruhi perubahan nilai *zc*, *qc*, serta *qbck*. Nilai *qbit* dan *qp* stabil sebesar 3000 liter/min. Hal ini dikarenakan *qbit* dan *qp* dianggap konstan, yang berarti nilai *disturbance* berupa perubahan massa jenis batuan tidak mempengaruhi besarnya nilai *flowrate* pada *main pump* yang berada di permukaan bumi. Analisa lebih lanjut dilakukan pada waktu 150-300s, dimana diberikan disturbance perubahan massa jenis batuan pada waktu 225s, didapatkan hasil sebagai berikut :

a. Nilai *pbit* terhadap perubahan massa jenis batuan dan nilai *qp*

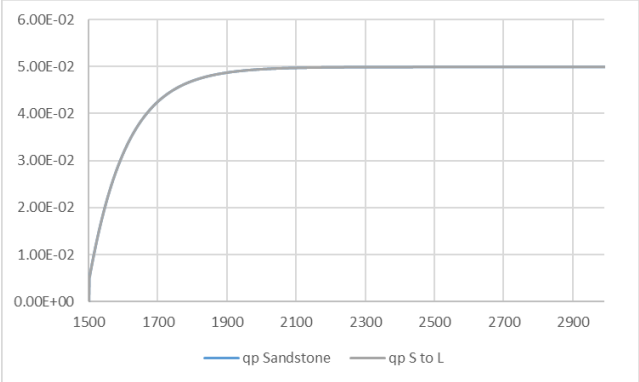
Dilakukan plot pada excel sebagai berikut :



Gambar 4. 79 Grafik *density* campuran saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone*



Gambar 4. 80 Grafik *pbit* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone*

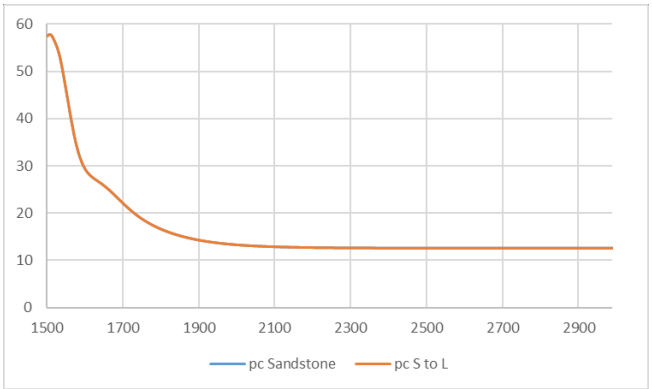


Gambar 4. 81 Grafik *qp* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone*

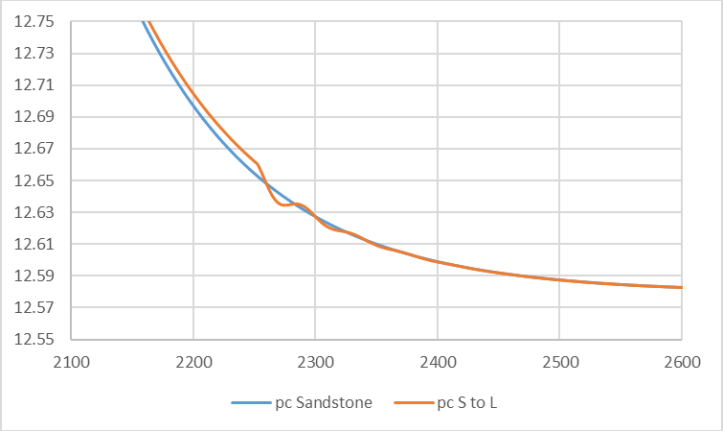
Dari gambar 4.79 dan 4.81 dapat diambil analisa ketika operasi drilling berlangsung pada 225s hubungan antara massa jenis campuran lumpur dan serpihan dengan nilai *pressure* pada bit. Setelah diberikan perubahan massa jenis batuan dari *sandstone* menuju *limestone* mempengaruhi nilai pada *pbit*, nilai *pbit* cenderung menurun seiring dengan massa jenis campuran yang lebih kecil. Selain itu nilai *qp* relative stabil namun mengalami kenaikan dengan nilai *qp sandstone* sebesar 0.0499999161707708 dan *qp sandstone* menuju *limestone* sebesar 0.0499999161799184. Oleh karena itu dilakukan pengontrolan terhadap variabel lain untuk menjaga nilai *pbit* tetap pada *setpoint* sebesar 470 bar.

b. Nilai *pc* terhadap perubahan *pbit*

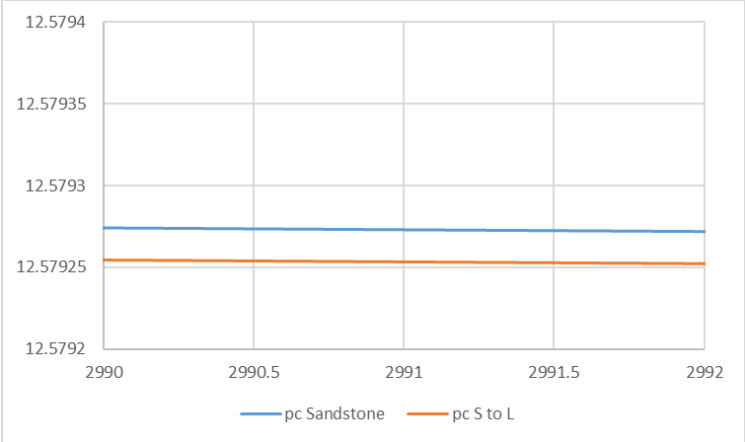
Dilakukan plot pada excel sebagai berikut :



Gambar 4. 82 Grafik *pc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone*



Gambar 4. 83 Grafik *pc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone*

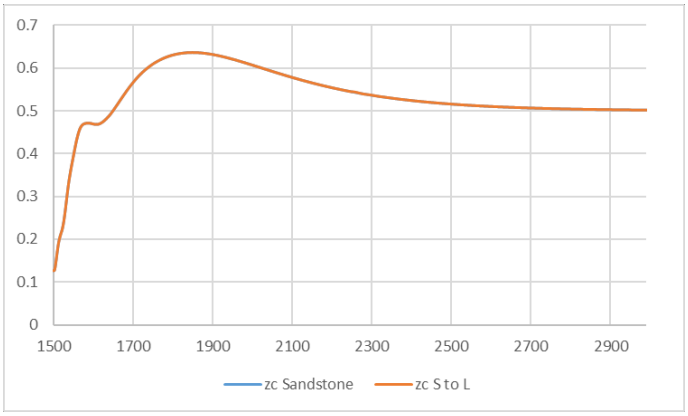


Gambar 4. 84 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone*

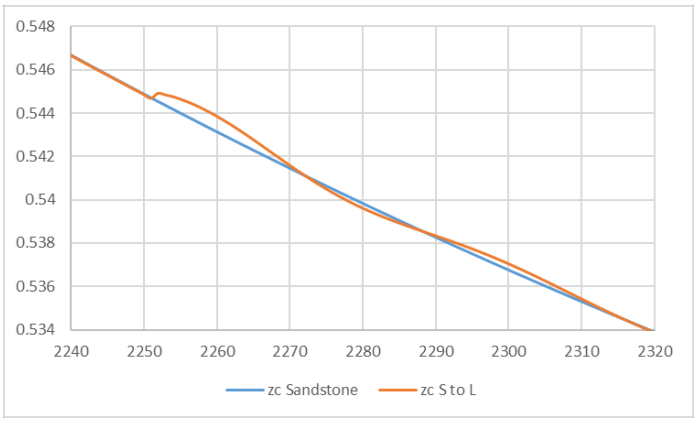
Dari gambar 4.82 dan 4.84 dapat diambil analisa ketika operasi drilling berlangsung nilai *pc* akan mengalami penurunan agar menjaga *pbit* tetap pada *setpoint*nya. Nilai *pc* untuk batuan *sandstone* sebesar 12.5792643410166 bar sedangkan *pc* setelah perubahan batuan *sandstone* menuju batuan *limestone* bernilai 12.5792446680022 bar. Terjadi penurunan *pc* sebesar +/- 0.00002 bar. Perubahan *pbit* yang dipengaruhi oleh perubahan massa jenis batuan akan memberikan perubahan nilai *pc* dan *pc setpoint*, hal ini dikarenakan adanya kontrol dan penyesuaian agar *pbit* tetap pada *setpoint* dan lumpur serta serpihan yang terangkut dapat terangkat menuju permukaan bumi.

c. Nilai *zc, qc,* dan *qbck* terhadap perubahan *pc*

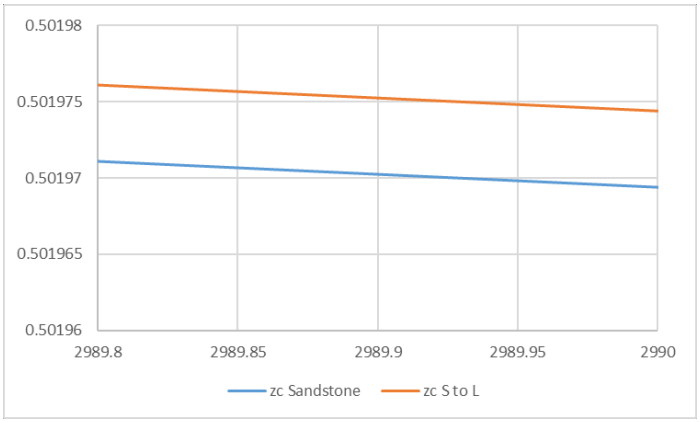
Dilakukan plot pada excel sebagai berikut :



Gambar 4. 85 Grafik *zc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone*

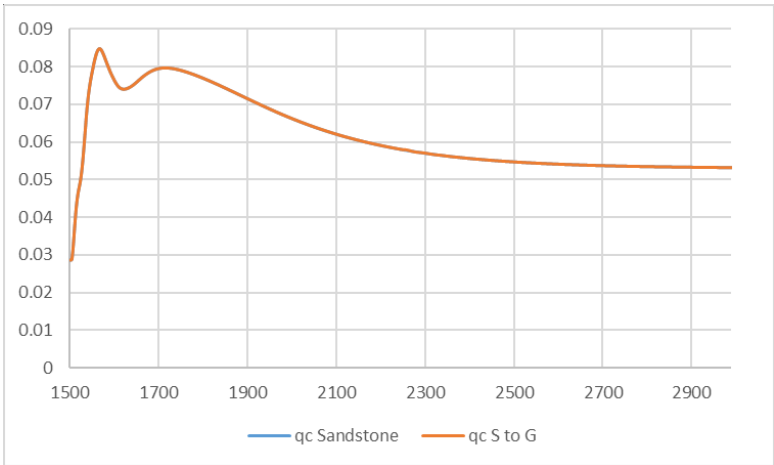


Gambar 4. 86 Grafik *zc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone*

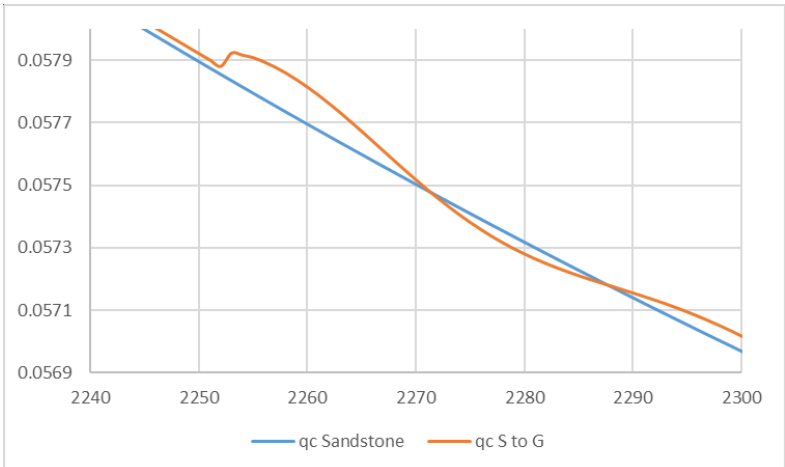


Gambar 4. 87 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone*

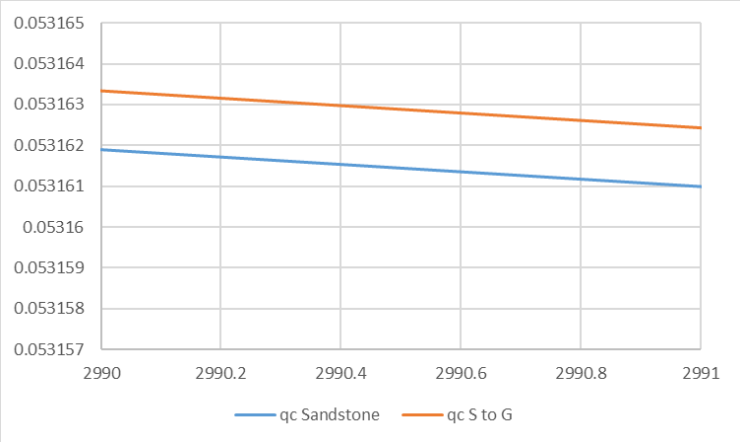
Dari gambar 4.85 – 4.87 dapat dianalisa bahwa nilai *zc* akan mengalami osilasi pada t=225s dan kemudian nilai *zc* akan cenderung akan mengalami kenaikan, hal ini sejalan dikarenakan perubahan nilai *pressure* pada chocke vlave. Nilai *zc* (besar bukaan *valve*) untuk batuan *sandstone* sebesar 0.501894460109261 atau sebesar 50.1894% sedangkan *pc* setelah perubahan batuan *sandstone* menuju *limestone* bernilai 0.501899273319426 atau sebesar 50.1899% . Terjadi kenaikan *zc* sebesar +/- 0.0005%. Semakin kecil nilai *pc* diperlukan bukaan *valve* (*zc*) yang lebih besar daripada kondisi sebelumnya untuk mendapatkan nilai *pressure* yang lebih kecil pula



Gambar 4. 88 Grafik *qc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone*

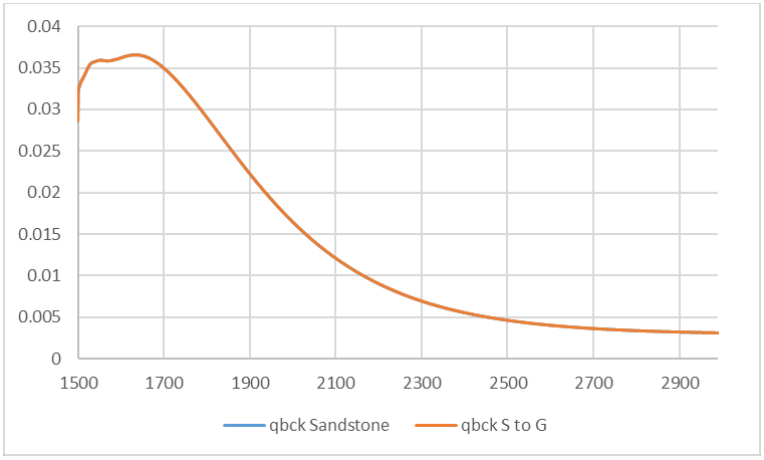


Gambar 4. 89 Grafik *qc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone*

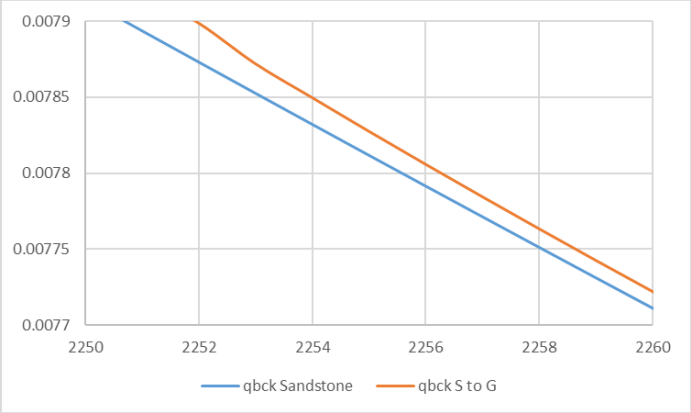


Gambar 4. 90 Grafik perbandingan *qc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone*

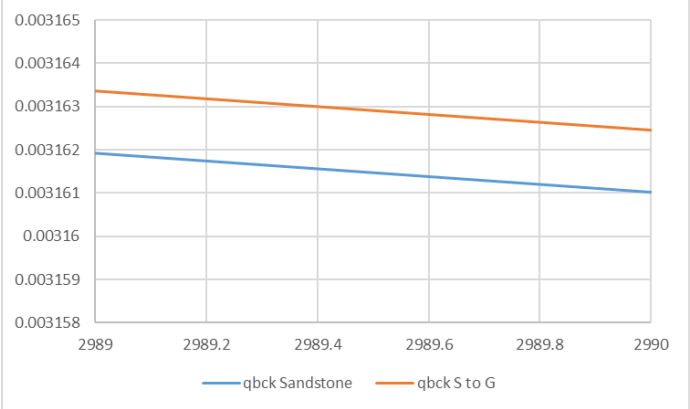
Dari gambar 4.88 – 4.90 dapat dianalisa bahwa nilai *qc* akan mengalami osilasi pada t=225s dan kemudian nilai *qc* akan cenderung mengalami kenaikan, hal ini sejalan dikarenakan pengaruh perubahan nilai *pc*. Nilai *qc* (*flowrate* pada *valve*) untuk batuan *sandstone* sebesar 0.0531539139254136 m3/s sedangkan *qc* setelah perubahan batuan *sandstone* menuju *limestone* bernilai 0.0531548801285108 m3/s. Terjadi kenaikan *qc* sebesar +/- 0.000001 m3/s. Semakin kecil nilai *pc* akan mempengaruhi nilai *qc*, dimana *pressure* dan *flowrate* berbanding terbalik, artinya semakin kecil nilai *pc* akan diikuti dengan semakin besarnya nilai *qc*.



Gambar 4. 91 Grafik *qbck* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone*



Gambar 4. 92 Grafik *qbck* saat t=225s dengan perubahan massa jenis *sandstone* menuju *limestone*

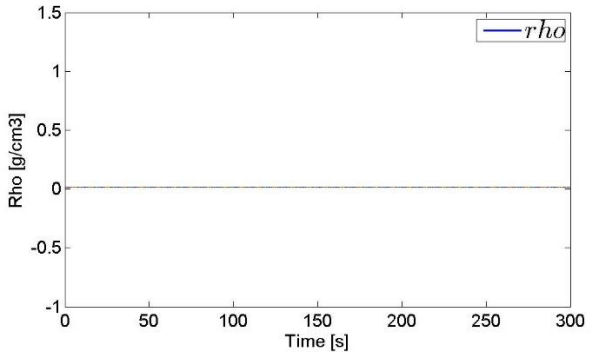


Gambar 4. 93 Grafik perbandingan *qbck* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *limestone*

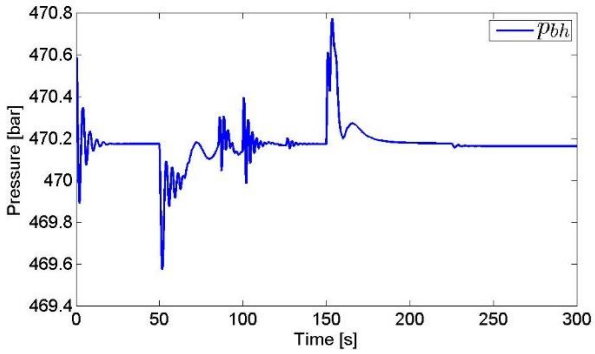
Dari gambar 4.91 – 4.93 dapat dianalisa bahwa nilai *qbck* akan cenderung akan mengalami kenaikan setelah t=225s. Nilai *qbck* (*flowrate* pada *back pump*) untuk batuan *sandstone* sebesar 0.00315306202921625 m3/s sedangkan *qbck* setelah perubahan batuan *sandstone* menuju batuan *limestone* bernilai 0.00315402596172905 m3/s. Terjadi kenaikan *qbck* sebesar +/- 0.000001 m3/s. Besarnya nilai *pc* akan mempengaruhi nilai *qbck*, dimana semakin kecil nilai *pc* akan diikuti dengan semakin besar nilai *qbck*, ini menandakan adanya penurunan nilai pada *pbit* dan *pc* memperlukan adanya *flowrate* tambahan dari *back pump* untuk membantu menaikkan serpihan batuan ke permukaan

5. *Sandstone* menuju *Granite*

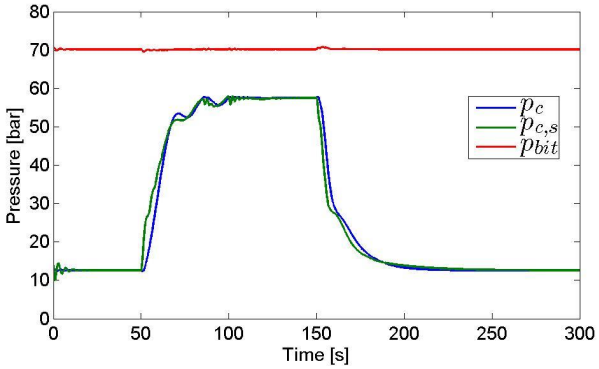
Setelah dilakukan simulasi sistem kontrol pada operasi *drilling* didapatkan data sebagai berikut :



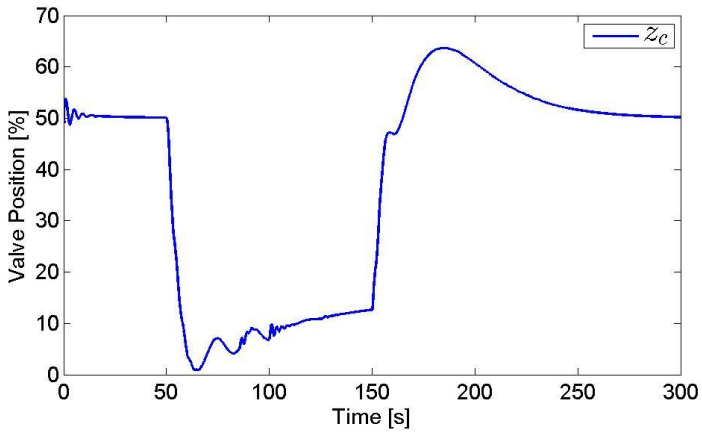
Gambar 4. 94 Grafik *density* campuran perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite*



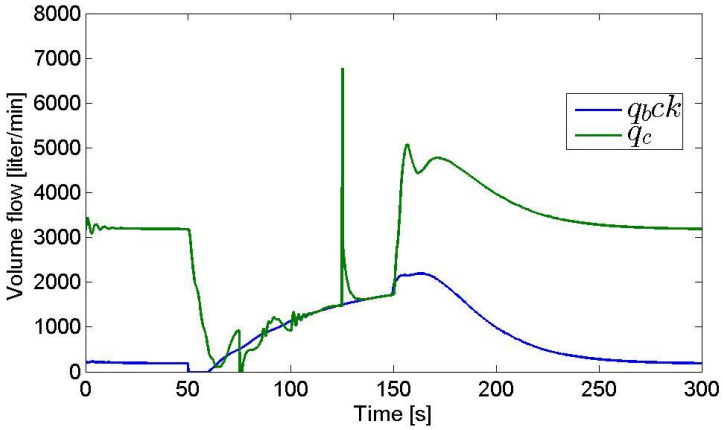
Gambar 4. 95 Grafik *pbit* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite*



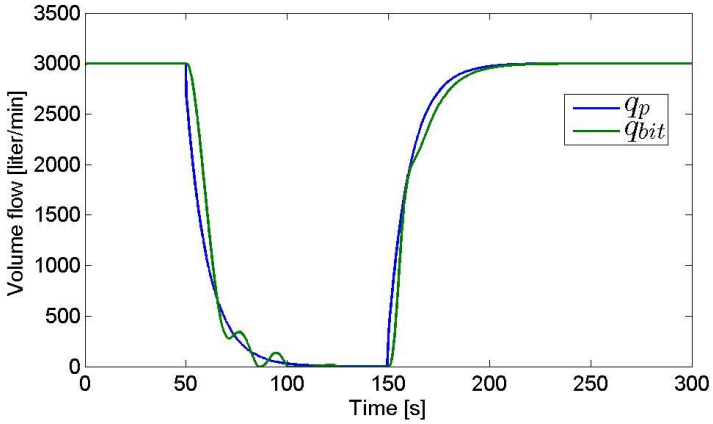
Gambar 4. 96 Grafik *pbit*, *pc* dan *pc setpoint* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite*



Gambar 4. 97 Grafik *zc* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite*



Gambar 4. 98 Grafik *qc* dan *qbck* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite*

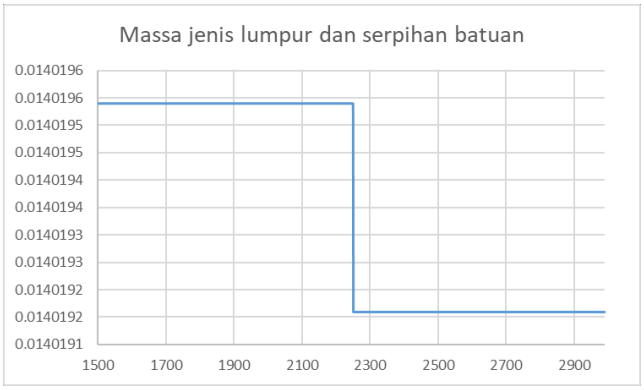


Gambar 4. 99 Grafik *qp* dan *qbit* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite*

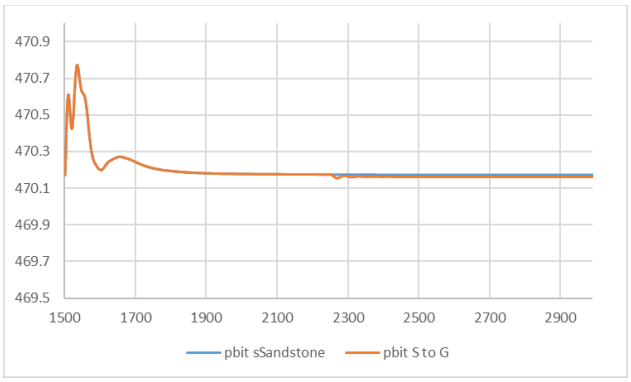
Grafik 4.94 - 4.99 menunjukkan hasil kontrol operasi *drilling* pada kondisi *pbit* turun dikarenakan perubahan massa jenis batuan dari *clay* menju *limestone*. Pada waktu 0-50s (kondisi tanpa pengaruh perubahan massa jenis batuan) dan 150-300s (kondisi adanya perubahan massa jenis batuan). Perubahan massa jenis batuan akan mempengaruhi perubahan *pbit*. Kontrol terhadap *pbit* akan merubah nilai *pressure* pada choke, perubahan *pressure* pada choke akan mempengaruhi perubahan nilai *zc*, *qc*, serta *qbck*. Nilai *qbit* dan *qp* stabil sebesar 3000 liter/min. Hal ini dikarenakan *qbit* dan *qp* dianggap konstan, yang berarti nilai *disturbance* berupa perubahan massa jenis batuan tidak mempengaruhi besarnya nilai *flowrate* pada *main pump*. Analisa lebih lanjut dilakukan pada waktu 150-300s, dimana diberikan disturbance perubahan massa jenis batuan pada waktu 225s, didapatkan hasil sebagai berikut :

a. Nilai *pbit* terhadap perubahan massa jenis batuan dan nilai *qp*

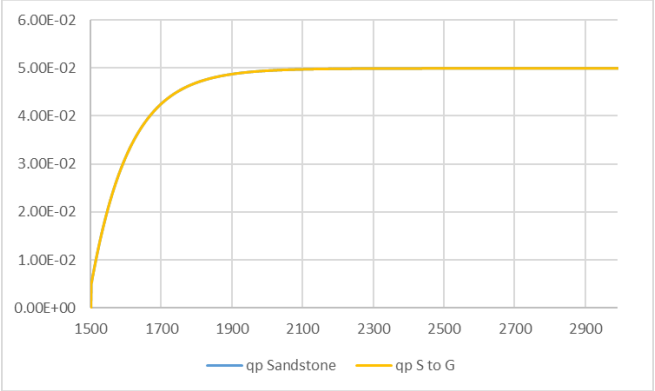
Dilakukan plot pada excel sebagai berikut :



Gambar 4. 100 Grafik *density* campuran saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite*



Gambar 4. 101 Grafik *pbit* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite*

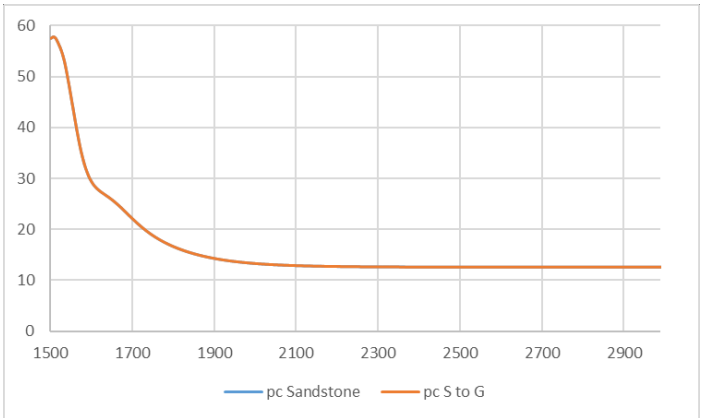


Gambar 4. 102 Grafik *qp* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite*

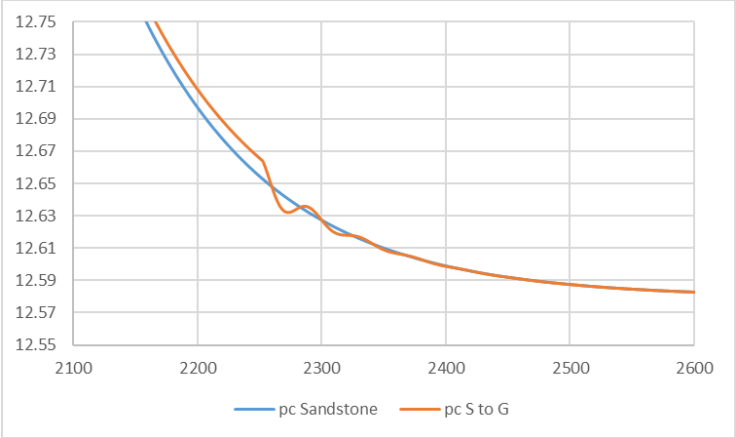
Dari gambar 4.100 dan 4.102 dapat diambil analisa ketika operasi drilling berlangsung pada 225s hubungan antara massa jenis campuran lumpur dan serpihan dengan nilai *pressure* pada bit. Setelah diberikan perubahan massa jenis batuan dari *sandstone* menuju *granite* mempengaruhi nilai pada *pbit*, nilai *pbit* cenderung menurun seiring dengan massa jenis campuran yang lebih kecil. Selain itu nilai *qp* relative stabil namun mengalami kenaikan dengan nilai *qp sandstone* sebesar 0.0499999161707708 dan *qp sandstone* menuju *granite* sebesar 0.0499999161840951. Oleh karena itu dilakukan pengontrolan terhadap variabel lain untuk menjaga nilai *pbit* tetap pada *setpoint* sebesar 470 bar.

b. Nilai *pc* terhadap perubahan *pbit*

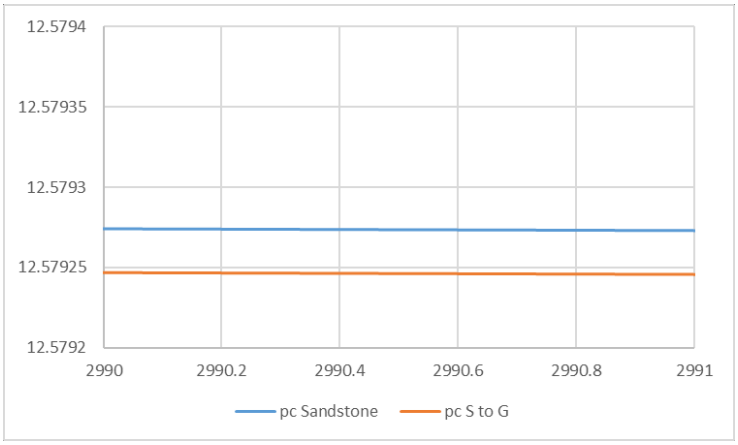
Dilakukan plot pada excel sebagai berikut :



Gambar 4. 103 Grafik *pc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite*



Gambar 4. 104 Grafik *pc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite*

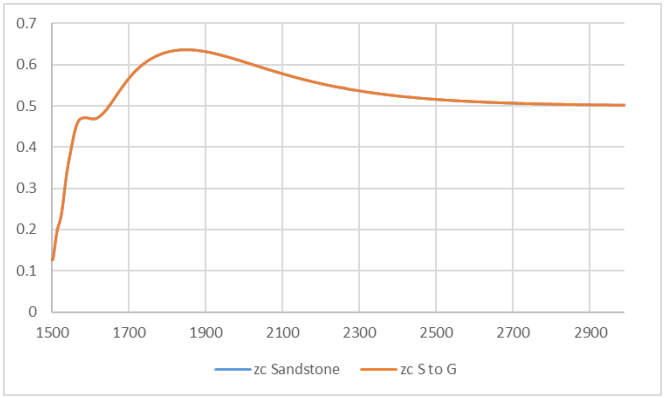


Gambar 4. 105 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite*

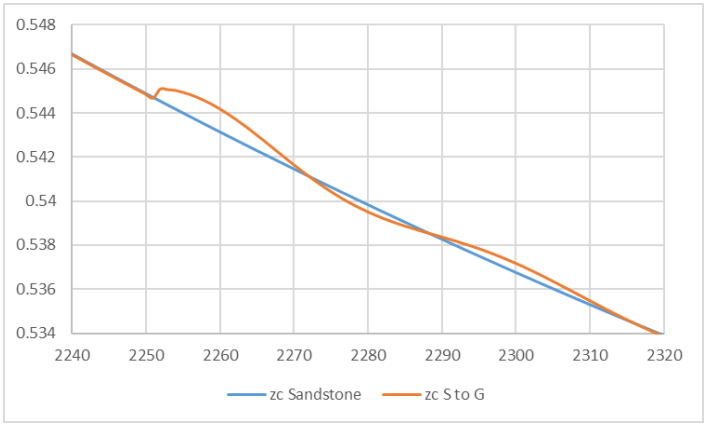
Dari gambar 4.103 dan 4.105 dapat diambil analisa ketika operasi drilling berlangsung besar nilai *pc* akan mengalami penurunan. Nilai *pressure* pada choke *valve* untuk batuan *sandstone* sebesar 12.5792643410166 bar sedangkan *pc* setelah perubahan *sandstone* menuju *granite* bernilai 12.579236987893 bar. Terjadi penurunan *pc* sebesar +/- 0.00003 bar. Perubahan nilai *pbit* yang menurun dikarenakan pengaruh dari perubahan massa jenis batuan akan memberikan perubahan nilai *pc* dan *pc setpoint* yang menurun pula, hal ini dikarenakan perlu adanya kontrol dan penyesuaian agar *pbit* tetap pada *setpoint* dan lumpur serta serpihan yang terangkut dapat terangkat menuju permukaan bumi.

c. Nilai *zc, qc,* dan *qbck* terhadap perubahan *pc*

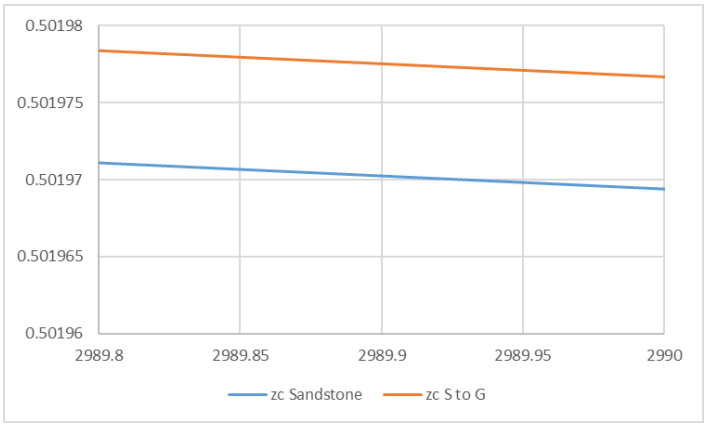
Dilakukan plot pada excel sebagai berikut :



Gambar 4. 106 Grafik *zc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite*

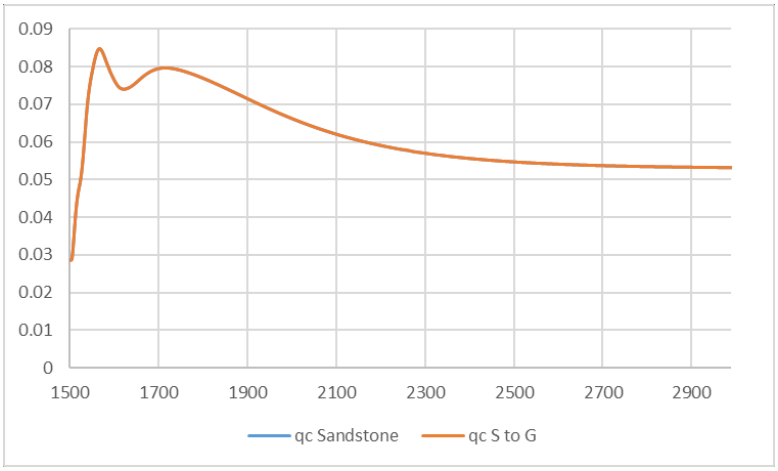


Gambar 4. 107 Grafik *zc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite*

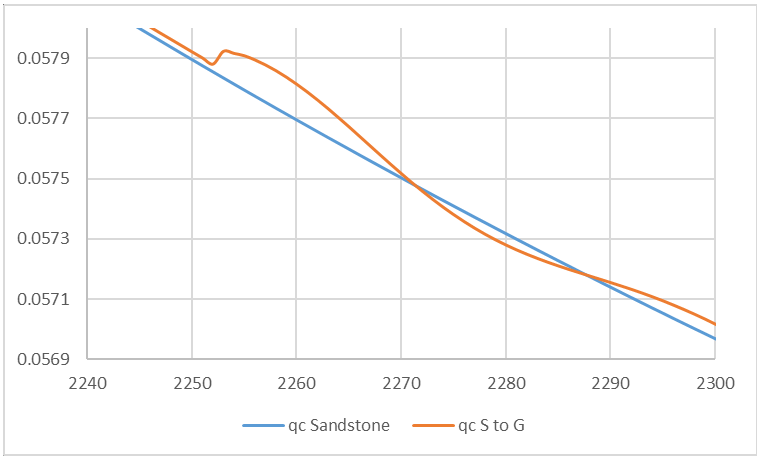


Gambar 4. 108 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite*

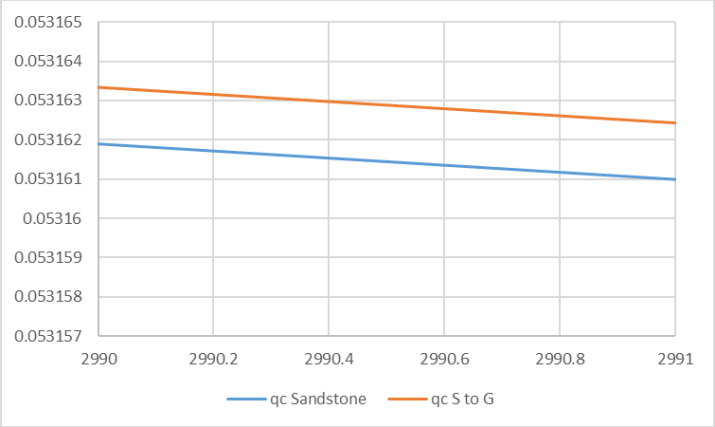
Dari gambar 4.106 – 4.108 dapat dianalisa bahwa nilai *zc* akan mengalami osilasi pada t=225s dan kemudian nilai *zc* akan cenderung akan mengalami kenaikan, hal ini dikarenakan perubahan nilai *pressure* pada chocke vlave. Nilai *zc* (bukaan *valve*) untuk batuan *sandstone* sebesar 0.501894460109261 atau sebesar 50.1894% sedangkan *pc* setelah perubahan batuan *sandstone* menuju *granite* bernilai 0.501901471368698 atau sebesar 50.1901% . Terjadi kenaikan *zc* sebesar +/- 0.01%. Semakin kecil nilai *pc* diperlukan bukaan *valve* (*zc*) yang lebih besar daripada kondisi sebelumnya untuk mendapatkan nilai *pressure* yang lebih kecil pula



Gambar 4. 109 Grafik *qc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite*

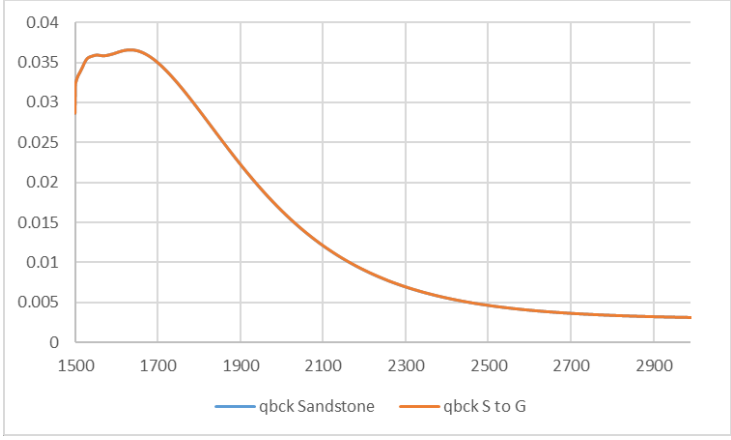


Gambar 4. 110 Grafik *qc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite*

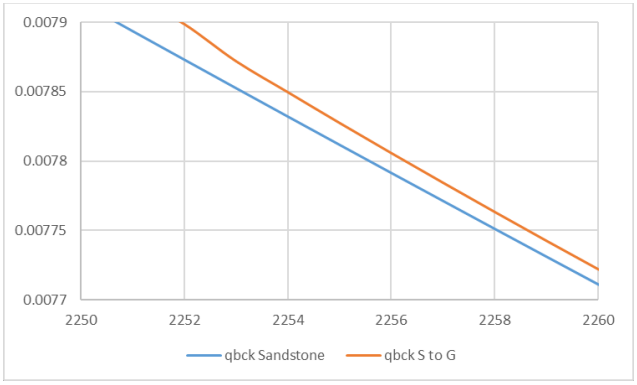


Gambar 4. 111 Grafik perbandingan *qc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite*

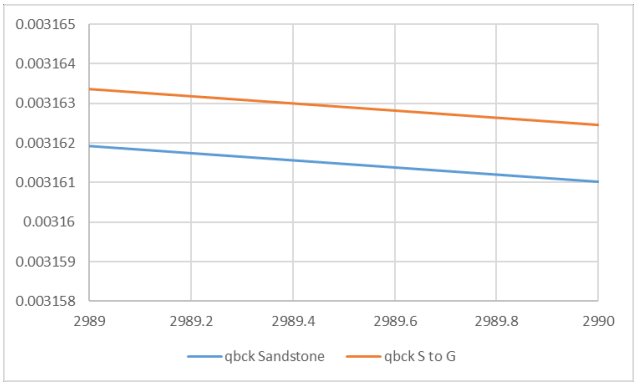
Dari gambar 4.109 – 4.111 dapat dianalisa bahwa nilai *qc* akan mengalami osilasi pada t=225s dan kemudian nilai *qc* akan cenderung akan mengalami kenaikan, hal ini dikarenakan pengaruh perubahan nilai *pc* pada sub bagian sebelumnya. Nilai *qc* (*flowrate* pada *valve*) untuk batuan *sandstone* sebesar 0.0531539139254136 m3/s sedangkan *qc* setelah perubahan batuan *sandstone* menuju *granite* bernilai 0.0531553242555464 m3/s. Terjadi kenaikan *qc* sebesar +/- 0.000002 m3/s. Hal ini menunjukkan nilai keduanya berbanding terbalik, dimana semakin kecil nilai *pc* akan diikuti dengan semakin besarnya nilai *qc*



Gambar 4. 112 Grafik *qbck* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite*



Gambar 4. 113 Grafik *qbck* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite*

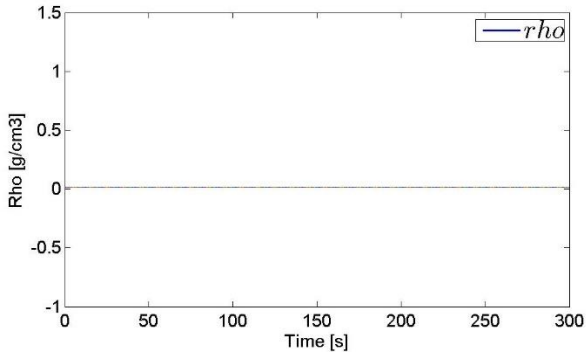


Gambar 4. 114 Grafik perbandingan *qbck* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *granite*

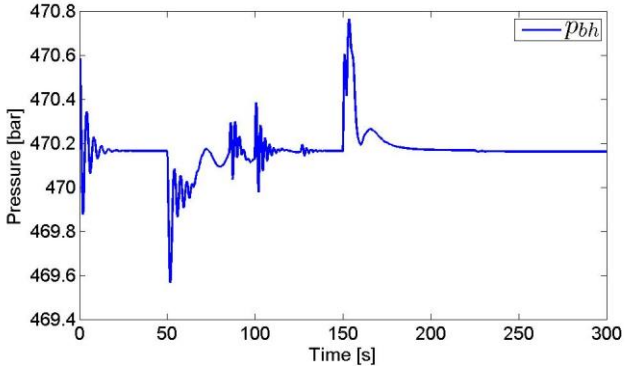
Dari gambar 4.112 – 4.114 dapat dianalisa bahwa nilai *qbck* akan mengalami osilasi pada t=225s dan kemudian nilai *qbck* akan cenderung akan mengalami kenaikan, hal ini sejalan dikarenakan pengaruh perubahan nilai *pc*. Nilai *qbck* (*flowrate* pada *back pump*) untuk batuan sabdstone sebesar 0.00315306202921625 m3/s sedangkan *qbck* setelah perubahan batuan *sandstone* menuju *granite* bernilai 0.00315446905185708 m3/s. Terjadi kenaikan *qbck* sebesar +/- 0.000001 m3/s. Besarnya nilai *pc* akan mempengaruhi nilai *qbck*, dimana semakin kecil nilai *pc* akan diikuti dengan semakin besar nilai *qbck*, ini menandakan adanya penurunan nilai pada *pbit* dan *pc* memperlukan adanya *flowrate* tambahan dari *back pump* untuk membantu menaikkan serpihan batuan ke permukaan.

6. *Limestone* menuju *Granite*

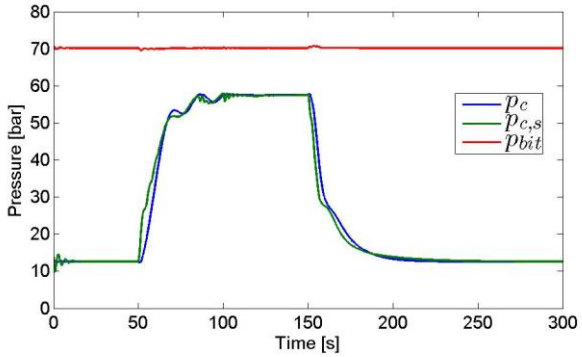
Setelah dilakukan simulasi sistem kontrol pada operasi *drilling* didapatkan data sebagai berikut :



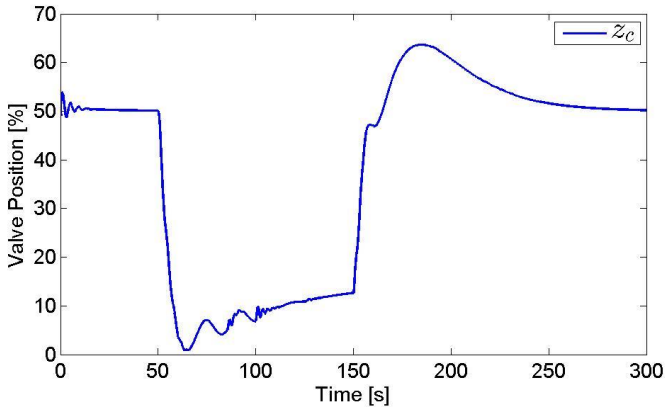
Gambar 4. 115 Grafik *density* campuran perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite*



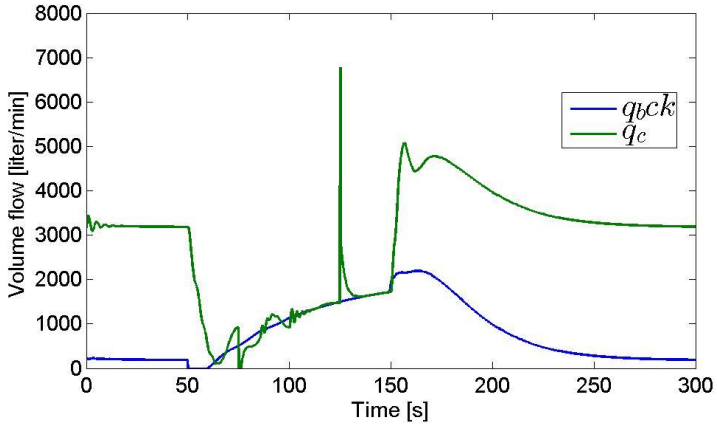
Gambar 4. 116 Grafik *pbit* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite*



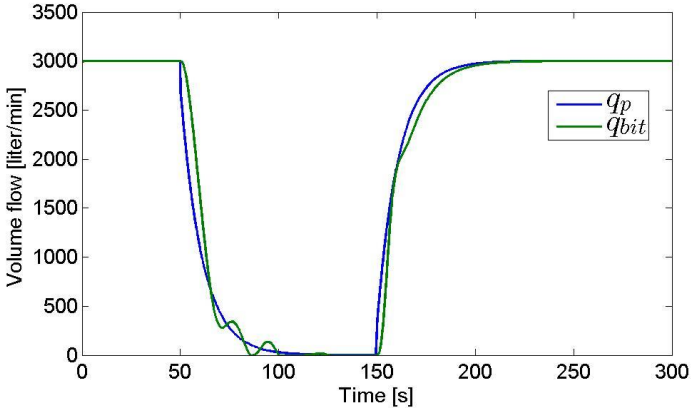
Gambar 4. 117 Grafik *pbit*, *pc* dan *pc setpoint* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite*



Gambar 4. 118 Grafik *zc* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite*



Gambar 4. 119 Grafik *qc* dan *qbck* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite*

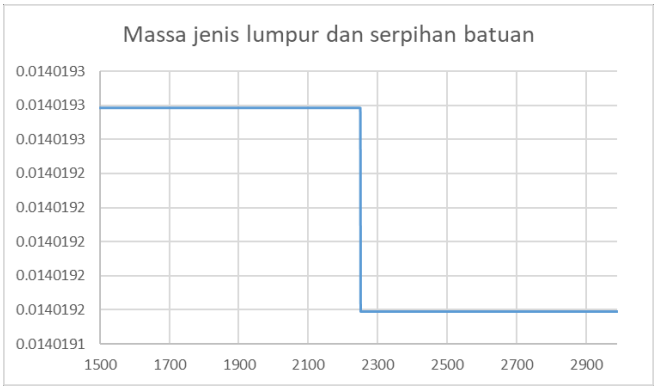


Gambar 4. 120 Grafik *qp* dan *qbit* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite*

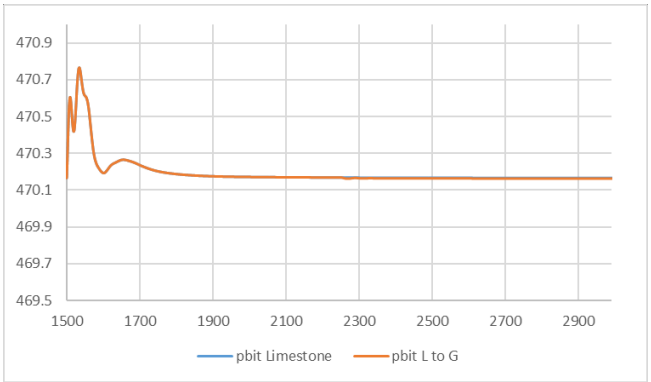
Gambar 4.115-4.120 menunjukkan hasil kontrol operasi *drilling* pada kondisi *pbit* turun dikarenakan perubahan massa jenis batuan dari *clay* menju *limestone*. Pada waktu 0-50s (kondisi tanpa pengaruh perubahan massa jenis batuan) dan 150-300s (kondisi adanya perubahan massa jenis batuan). Perubahan massa jenis batuan akan mempengaruhi perubahan *pbit*. Kontrol terhadap *pbit* akan merubah nilai *pressure* pada choke, perubahan *pressure* pada choke akan mempengaruhi perubahan nilai *zc*, *qc*, serta *qbck*. Nilai *qbit* dan *qp* stabil sebesar 3000 liter/min. Hal ini dikarenakan *qbit* dan *qp* dianggap konstan, yang berarti nilai *disturbance* berupa perubahan massa jenis batuan tidak mempengaruhi besarnya nilai *flowrate* pada *main pump* yang berada di permukaan bumi. Analisa lebih lanjut dilakukan pada waktu 150-300s, dimana diberikan disturbance perubahan massa jenis batuan pada waktu 225s, didapatkan hasil sebagai berikut :

a. Nilai *pbit* terhadap perubahan massa jenis batuan dan nilai *qp*

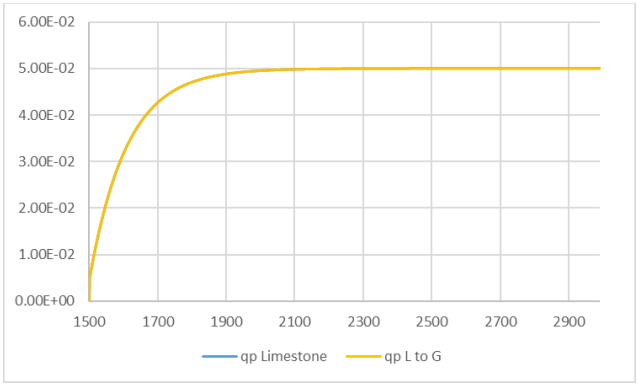
Dilakukan plot pada excel sebagai berikut :



Gambar 4. 121 Grafik *density* campuran saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite*



Gambar 4. 122 Grafik *pbit* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite*

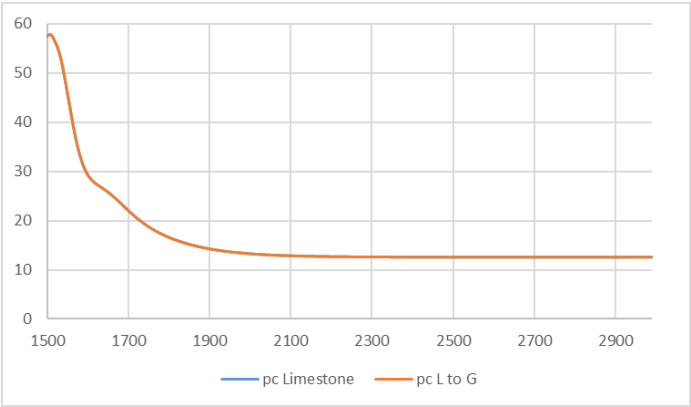


Gambar 4. 123 Grafik *qp* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite*

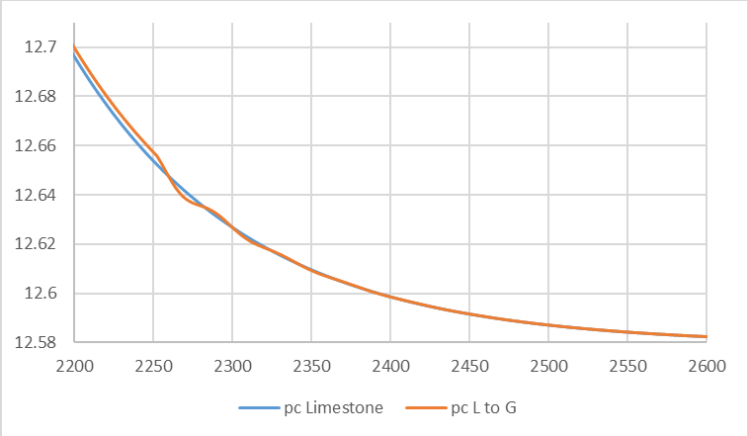
Dari gambar 4.121 dan 4.123 dapat diambil analisa ketika operasi drilling berlangsung hubungan antara massa jenis campuran lumpur dan serpihan dengan nilai *pressure* pada bit. Setelah diberikan perubahan massa jenis batuan dari *limestone* menuju *granite* pada t=225s akan mempengaruhi nilai pada *pbit*, nilai *pbit* cenderung menurun seiring dengan massa jenis campuran yang lebih kecil. Selain itu nilai *qp* relative stabil namun mengalami kenaikan dengan nilai *qp limestone* sebesar 0.0499999161707918 dan *qp limestone* menuju *granite* sebesar 0.0499999161749705. Oleh karena itu perlu dilakukan pengontrolan terhadap variabel lain untuk menjaga nilai *pbit* tetap pada *setpoint* sebesar 470 bar.

b. Nilai *pc* terhadap perubahan *pbit*

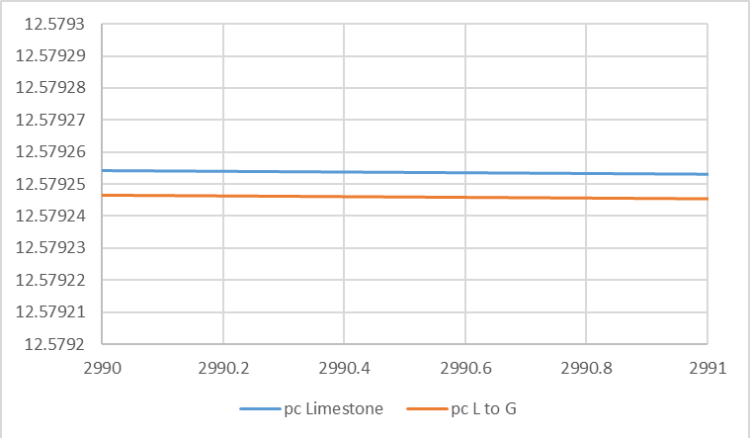
Dilakukan plot pada excel sebagai berikut :



Gambar 4. 124 Grafik *pc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite*



Gambar 4. 125 Grafik *pc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite*

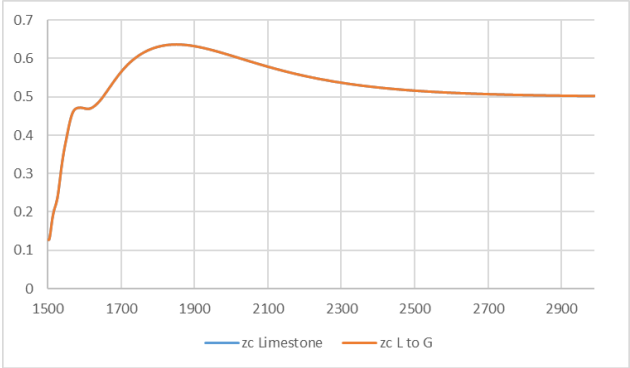


Gambar 4. 126 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite*

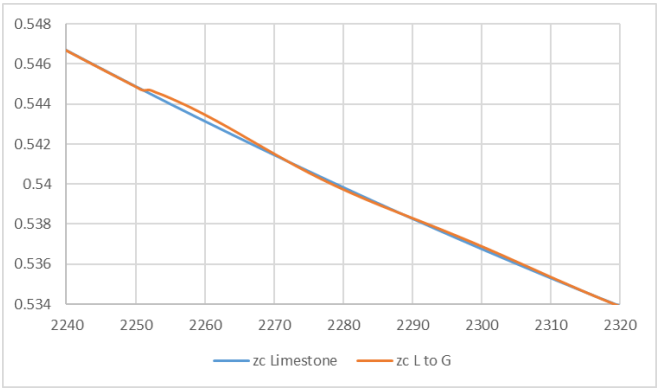
Dari gambar 4.124 dan 4.126 dapat diambil analisa ketika operasi drilling berlangsung nilai *pc* akan mengalami penurunan agar menjaga *pbit* tetap pada *setpoint*nya. Nilai *pc* untuk batuan *limestone* sebesar 12.5792444786816 bar sedangkan *pc* setelah perubahan batuan *limestone* menuju *granite* bernilai 12.5792367986146 bar. Terjadi penurunan *pc* sebesar +/- 0.00001 bar. Perubahan *pbit* yang mengalami penurunan dipengaruhi oleh perubahan massa jenis batuan akan memberikan perubahan nilai *pc* dan *pc setpoint*, hal ini dikarenakan perlu adanya kontrol dan penyesuaian agar *pbit* tetap pada *setpoint* dan lumpur serta serpihan yang terangkut dapat terangkat menuju permukaan bumi.

c. Nilai *zc, qc,* dan *qbck* terhadap perubahan *pc*

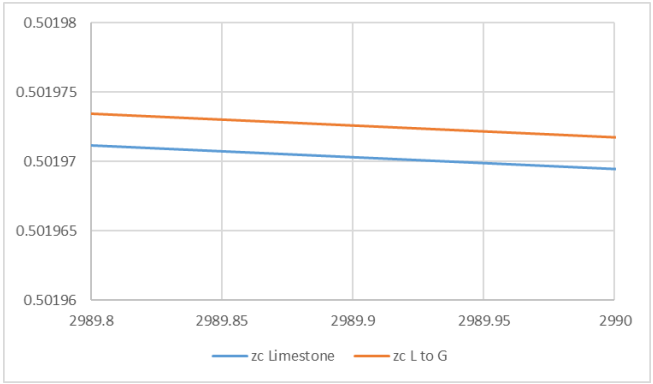
Dilakukan plot pada excel sebagai berikut :



Gambar 4. 127 Grafik *zc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite*



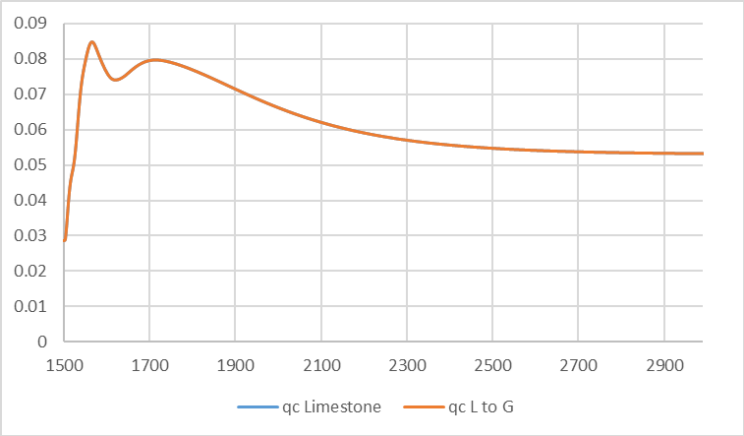
Gambar 4. 128 Grafik *zc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite*



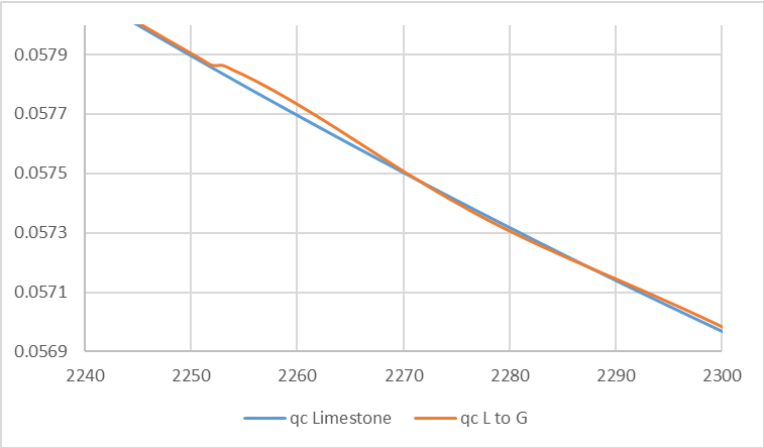
Gambar 4. 129 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite*

Dari gambar 4.127 – 4.129 dapat dianalisa bahwa nilai *zc* akan mengalami osilasi pada t=225s dan kemudian nilai *zc* akan cenderung akan

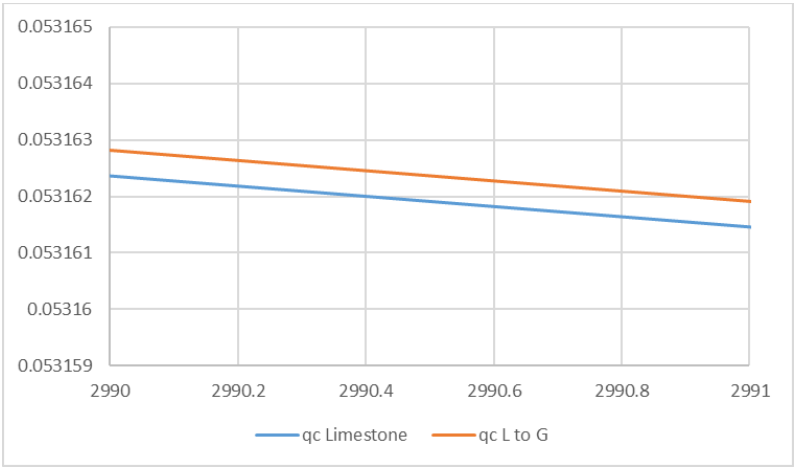
mengalami kenaikan, hal ini sejalan dikarenakan perubahan nilai *pressure* pada chocke vlave. Nilai *zc* (bukaan *valve*) untuk batuan *limestone* sebesar 0.501894520392766 atau sebesar 50.1894% sedangkan *pc* setelah perubahan batuan *limestone* menuju *granite* bernilai 0.501896719463273 atau sebesar 50.1896% . Terjadi kenaikan *zc* sebesar +/- 0.0002%. Hal ini menunjukkan bahwa semakin kecil nilai *pc* diperlukan bukaan *valve* (*zc*) yang lebih besar daripada kondisi sebelumnya untuk mendapatkan nilai *pressure* yang lebih kecil pula.



Gambar 4. 130 Grafik *qc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite*

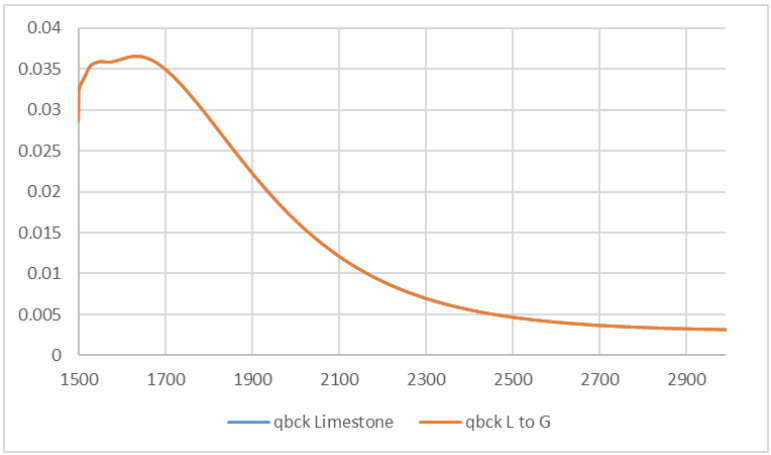


Gambar 4. 131 Grafik *qc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite*

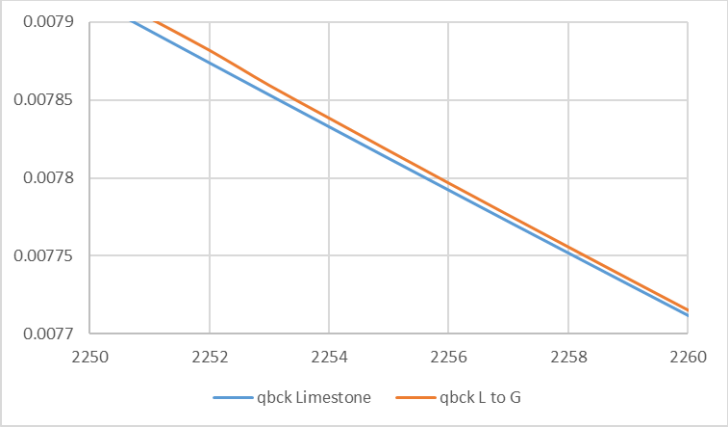


Gambar 4. 132 Grafik perbandingan *qc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite*

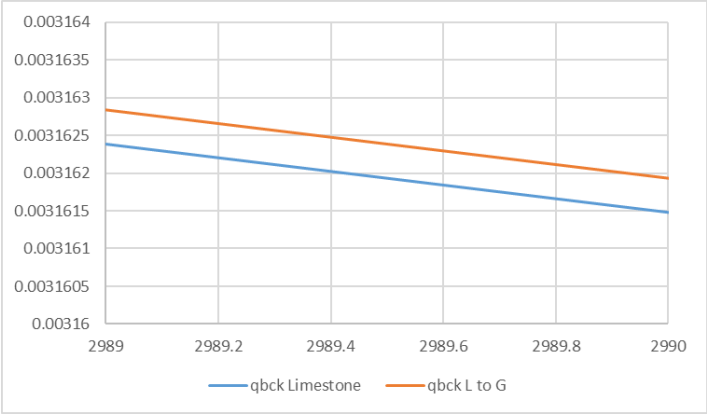
Dari gambar 4.130 – 4.132 dapat dianalisa bahwa nilai *qc* akan mengalami osilasi pada t=225s dan kemudian nilai *qc* akan cenderung akan mengalami kenaikan, hal ini sejalan dikarenakan pengaruh perubahan nilai *pc*. Nilai *qc* (*flowrate* pada *valve*) untuk batuan *limestone* sebesar 0.0531543741859841 m3/s sedangkan *qc* setelah perubahan batuan *limestone* menuju *granite* bernilai 0.0531548184197363 m3/s. Terjadi kenaikan *qc* sebesar +/- 0.0000005 m3/s. Semakin kecil nilai *pc* akan mempengaruhi nilai *qc* dimana keduanya berbanding terbalik, dimana semakin kecil nilai *pc* akan diikuti dengan semakin besarnya nilai *qc*



Gambar 4. 133 Grafik *qbck* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite*



Gambar 4. 134 Grafik *qbck* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite*



Gambar 4. 135 Grafik perbandingan *qbck* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *granite*

Dari gambar 4.133 – 4.135 dapat dianalisa bahwa nilai *qbck* akan cenderung akan mengalami kenaikan, hal ini dikarenakan pengaruh perubahan nilai *pc*. Nilai *qbck* (*flowrate* pada *back pump*) untuk batuan *limestone* sebesar 0.0031535222613314 m3/s sedangkan *qbck* setelah perubahan batuan *limestone* menuju *granite* bernilai 0.00315396545769378 m3/s. Terjadi kenaikan *qbck* sebesar +/- 0.0000004 m3/s. Besarnya nilai *pc* akan mempengaruhi nilai *qbck*, dimana semakin kecil nilai *pc* akan diikuti dengan semakin besar nilai *qbck*, ini menandakan adanya penurunan nilai pada *pbit* dan *pc* memperlukan adanya *flowrate* tambahan dari *back pump* untuk membantu menaikkan serpihan batuan ke permukaan

4.5.2 Kondisi *Pbit* Naik

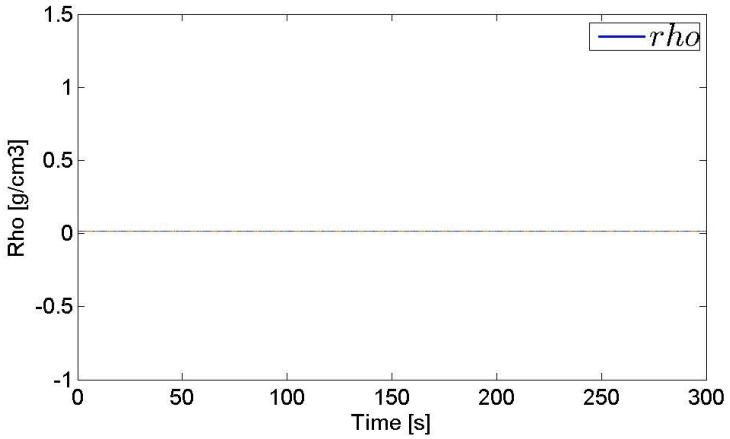
Pada penelitian kali ini dilakukan analisa terhadap *pressure* pada bit yang mengalami kenaikan dikarenakan perubahan massa jenis batuan. Dapat dilihat pada tabel 4.8, dimana nilai *pbit* terkecil dikarenakan karena adanya perubahan massa jenis batuan *granite* sebesar 470.162927342442. Diikuti dengan penambahan *pbit* karena perubahan massa jenis batuan *clay, sandstone, dan limestone,* dengan nilai masing masing bar 470.179446763799 bar, 470.174169356617 bar, 470.166452221397 bar, . Maka kondisi gangguan saat *Pbit* naik dikarenakan perubahan massa jenis batuan dapat ditentukan, terdapat 6 variasi yaitu sebagai berikut :

Tabel 4. 9 Kenaikan *Pbit* dengan Perubahan Massa Jenis Batuan

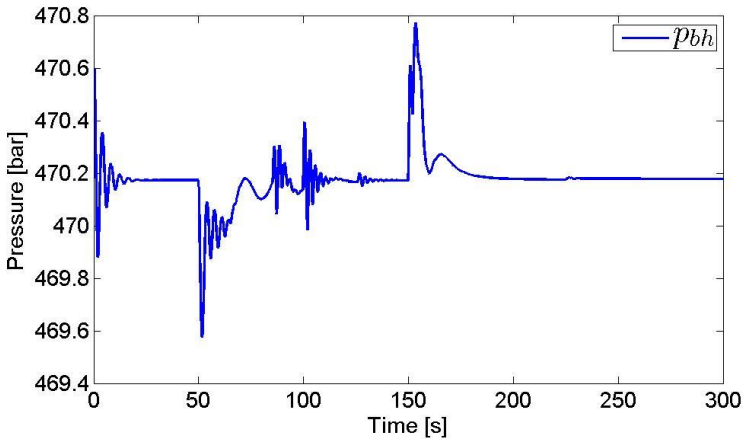
No	Perubahan Massa jenis batuan	Pbit sebelum	Pbit sesudah
1	Sandstone menuju Clay	470.17416935662	470.17944676380
2	Limestone menuju Clay	470.16645222140	470.17944676380
3	Limestone menuju Sandstone	470.16645222140	470.17416935662
4	Granite menuju Clay	470.16645222140	470.17944676380
5	Granite menuju Sandstone	470.16645222140	470.17416935662
6	Granite menuju Limestone	470.16645222140	470.16645222140

1. *Sandstone* menuju *Clay*

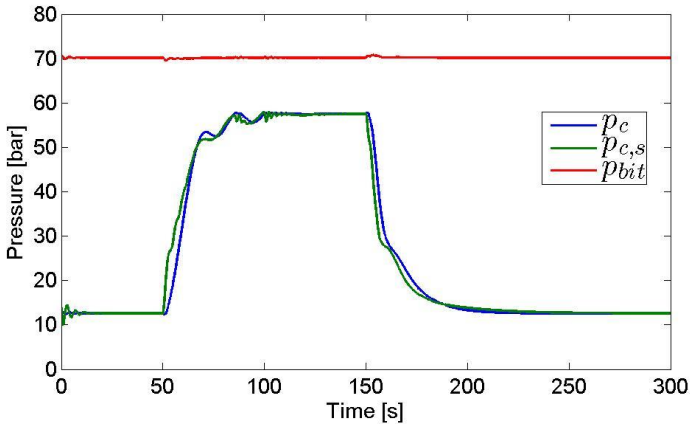
Setelah dilakukan simulasi sistem kontrol pada operasi *drilling* didapatkan data sebagai berikut :



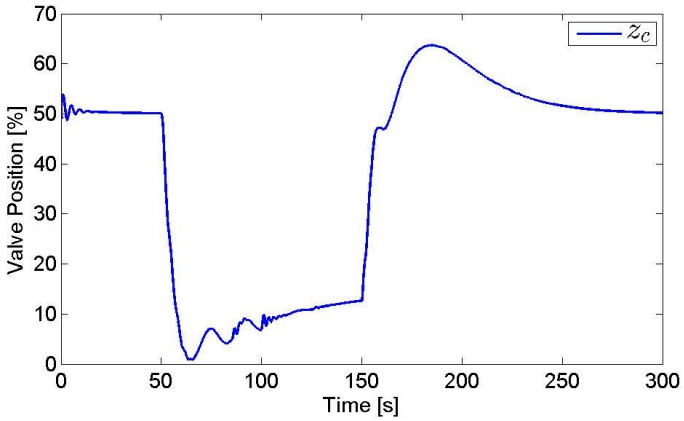
Gambar 4. 136 Grafik *density* campuran perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay*



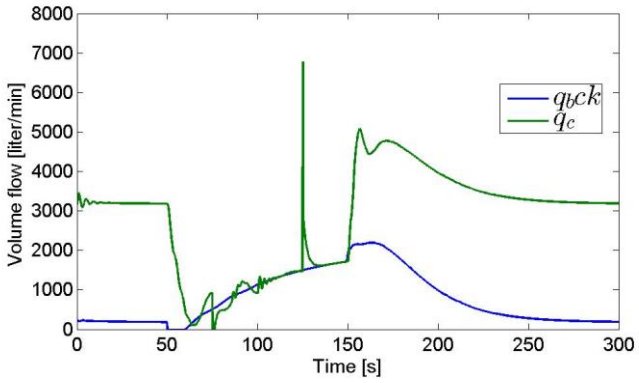
Gambar 4. 137 Grafik *pbit* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay*



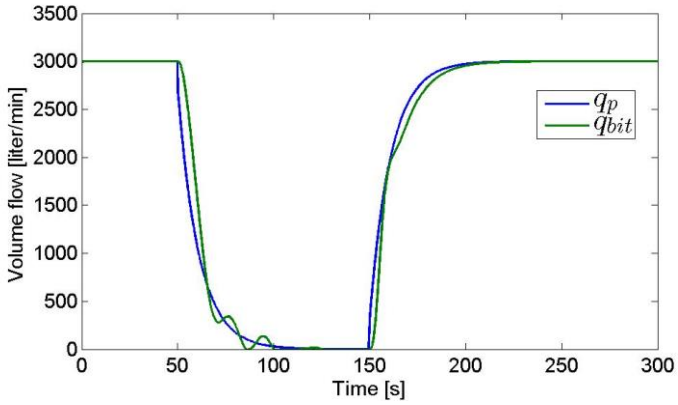
Gambar 4. 138 Grafik *pbit*, *pc* dan *pc setpoint* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay*



Gambar 4. 139 Grafik *zc* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay*



Gambar 4. 140 Grafik *qc* dan *qbck* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay*

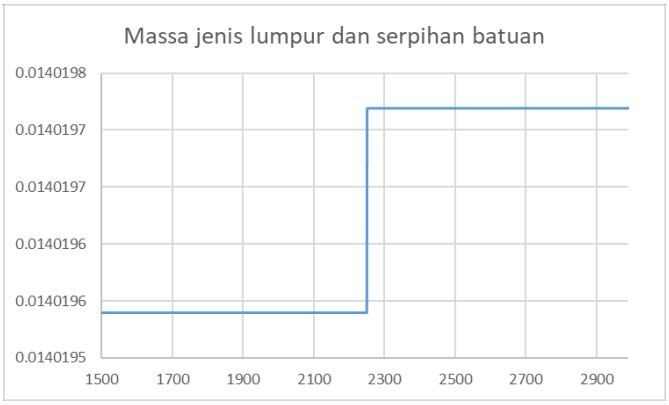


Gambar 4. 141 Grafik *qp* dan *qbit* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay*

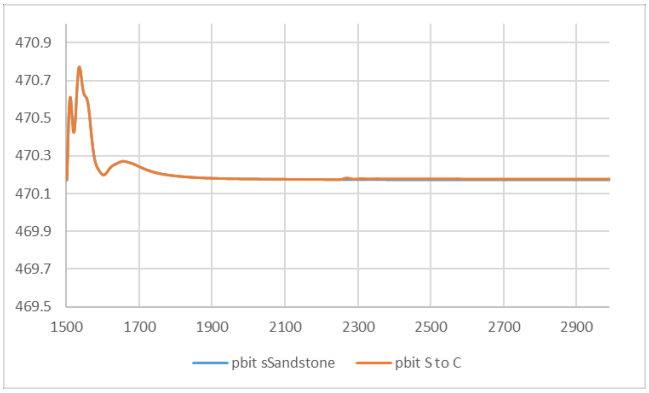
Gambar 4.136 – 4.141 menunjukkan hasil kontrol operasi *drilling* pada kondisi *pbit* naik dikarenakan perubahan massa jenis batuan dari *sandstone* menuju *clay*. Perubahan massa jenis batuan akan mempengaruhi perubahan *pbit*. Kontrol terhadap *pbit* akan merubah nilai *pressure* pada choke, perubahan *pressure* pada choke akan mempengaruhi perubahan nilai *zc*, *qc*, serta *qbck*. Nilai *qbit* dan *qp* konstan sebesar 3000 liter/min. Yang berarti nilai *disturbance* berupa perubahan massa jenis batuan tidak mempengaruhi besarnya nilai *pressure* dan *flowrate* pada *main pump* dikarenakan kesempurnaan penyaringan *mud* sebelum *mud* diinjeksikan kembali. Analisa lebih lanjut dilakukan pada waktu 150-300s, dimana diberikan disturbance perubahan massa jenis batuan pada waktu 225s, didapatkan hasil sebagai berikut :

a. Nilai *pbit* terhadap perubahan massa jenis batuan dan nilai *qp*

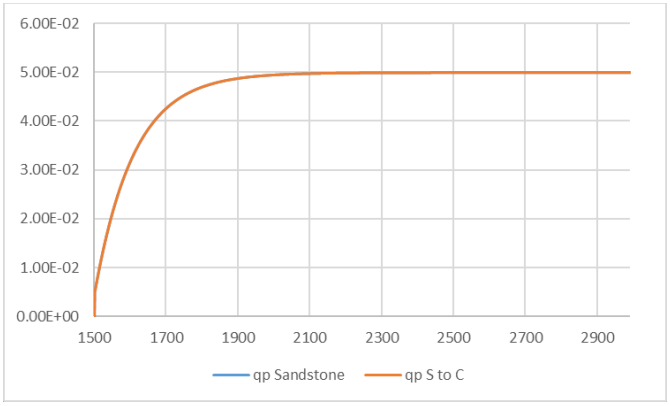
Dilakukan plot pada excel sebagai berikut :



Gambar 4. 142 Grafik *density* campuran saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay*



Gambar 4. 143 Grafik *pbit* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay*

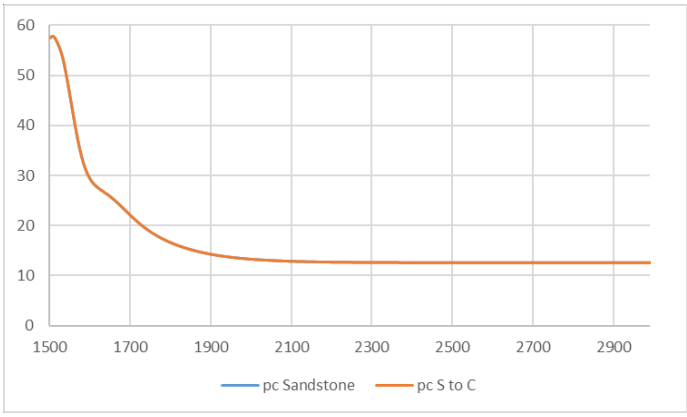


Gambar 4. 144 Grafik *qp* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay*

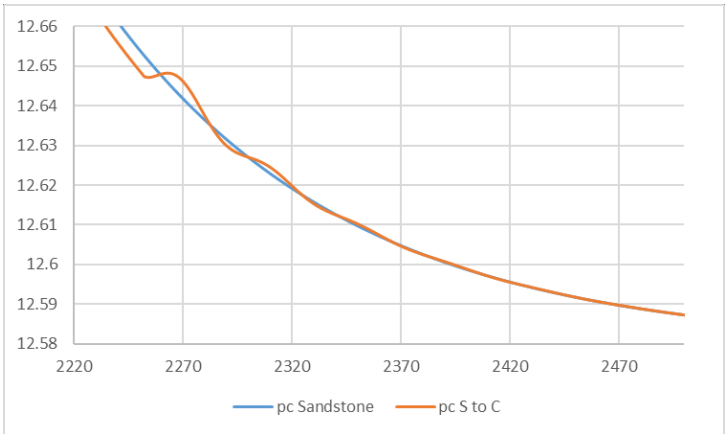
Dari gambar 4.142 dan 4.144 dapat diambil analisa ketika operasi drilling berlangsung hubungan antara massa jenis campuran lumpur dan serpihan dengan nilai *pressure* pada bit. Setelah diberikan perubahan massa jenis batuan dari *sandstone* menuju *clay* pada t=225s mempengaruhi nilai pada *pbit*, nilai *pbit* cenderung naik seiring dengan massa jenis campuran yang lebih besar. Selain itu nilai *qp* relative stabil namun mengalami penurunan dengan nilai *qp sandstone* sebesar 0.0499999161707708 dan *qp sandstone* menuju *clay* sebesar 0.0499999161645124. Oleh karena itu dilakukan pengontrolan terhadap variabel lain untuk menjaga nilai *pbit* tetap pada *setpoint* sebesar 470 bar.

b. Nilai *pc* terhadap perubahan *pbit*

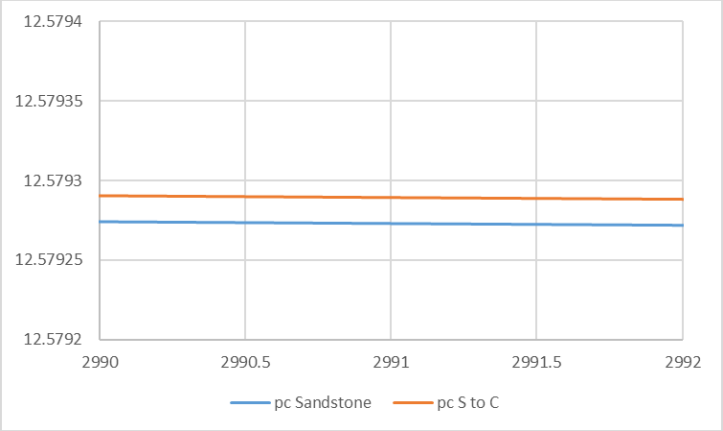
Dilakukan plot pada excel sebagai berikut :



Gambar 4. 145 Grafik *pc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay*



Gambar 4. 146 Grafik *pc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay*

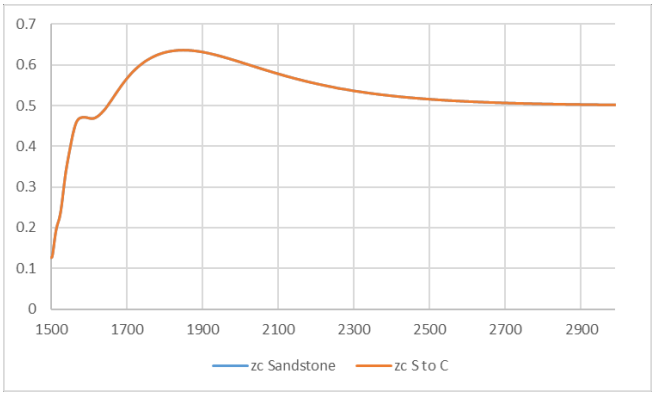


Gambar 4. 147 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay*

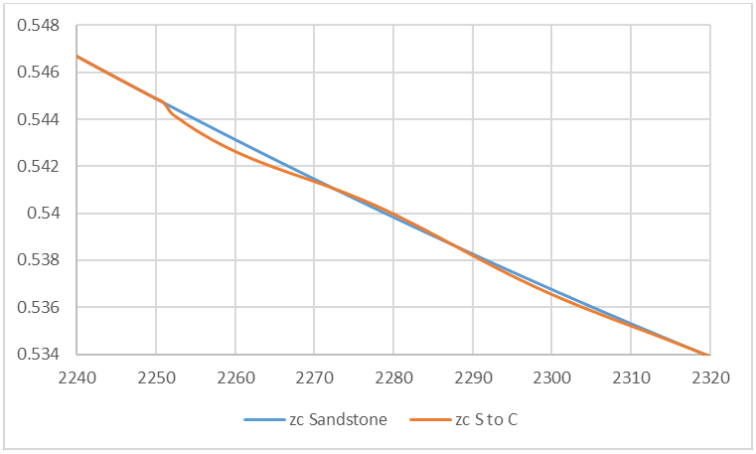
Dari gambar 4.145 dan 4.147 dapat diambil analisa ketika operasi drilling berlangsung nilai *pc* akan mengalami kenaikan untuk menjaga *pbit* tetap pada *setpoint*nya. Nilai *pc* untuk batuan *sandstone* sebesar 12.5792643410166 bar sedangkan *pc* setelah perubahan batuan *sandstone* menuju *clay* bernilai 12.579280684063 bar. Terjadi kenaikan *pc* sebesar +/- 0.00002 bar. Kenaikan *pbit* yang dipengaruhi oleh perubahan massa jenis batuan akan memberikan perubahan nilai *pc* dan *pc setpoint*, hal ini dikarenakan adanya kontrol dan penyesuaian agar *pbit* tetap pada *setpoint* dan lumpur serta serpihan yang terangkut dapat terangkat.

c. Nilai *zc, qc,* dan *qbck* terhadap perubahan *pc*

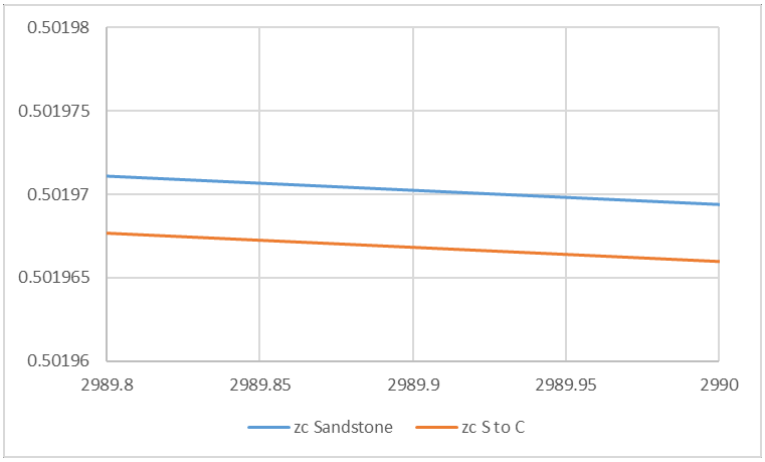
Dilakukan plot pada excel sebagai berikut :



Gambar 4. 148 Grafik *zc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay*

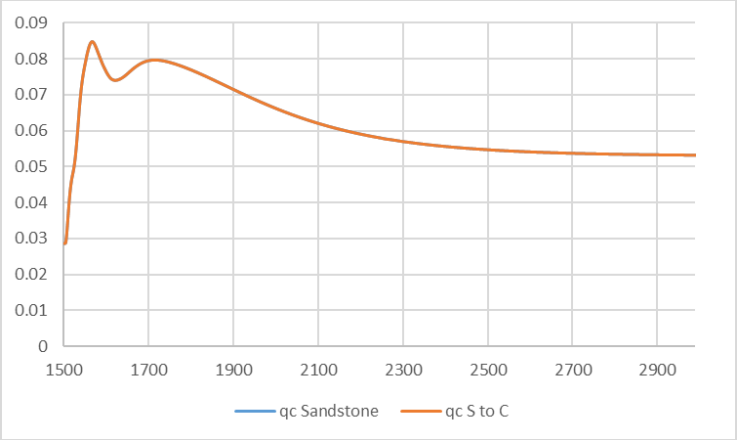


Gambar 4. 149 Grafik *zc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay*

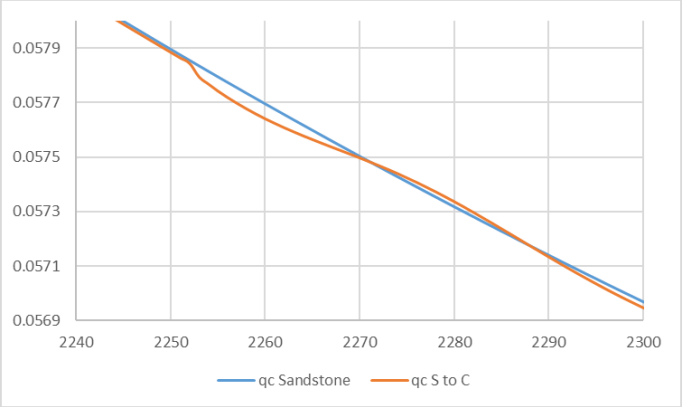


Gambar 4. 150 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay*

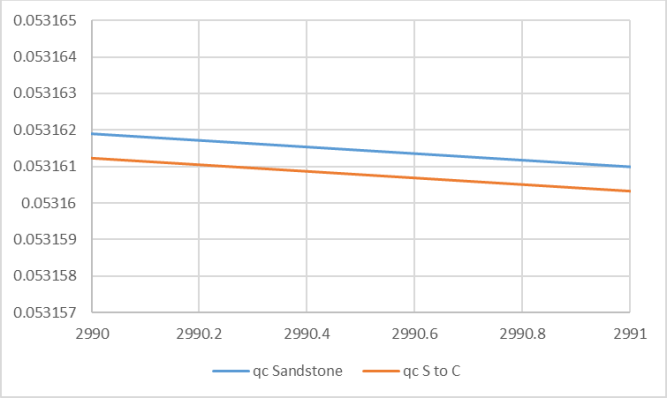
Dari gambar 4.148 – 4.150 dapat dianalisa bahwa nilai *zc* akan mengalami osilasi pada t=225s dan kemudian nilai *zc* akan cenderung mengalami penurunan, hal ini dikarenakan kenaikan nilai *pressure* pada chocke vlave. Nilai *zc* (bukaan *valve*) untuk batuan *sandstone* sebesar 0.501894460109261 atau sebesar 50.1894% sedangkan *pc* setelah perubahan batuan *sandstone* menuju *clay* bernilai 0.501891167919328 atau sebesar 50.1891% . Terjadi penurunan *zc* sebesar +/- 0.0003%. Semakin besar nilai *pc* diperlukan bukaan *valve* (*zc*) yang lebih kecil daripada kondisi sebelumnya untuk mendapatkan nilai *pressure* yang lebih besar pula.



Gambar 4. 151 Grafik *qc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay*

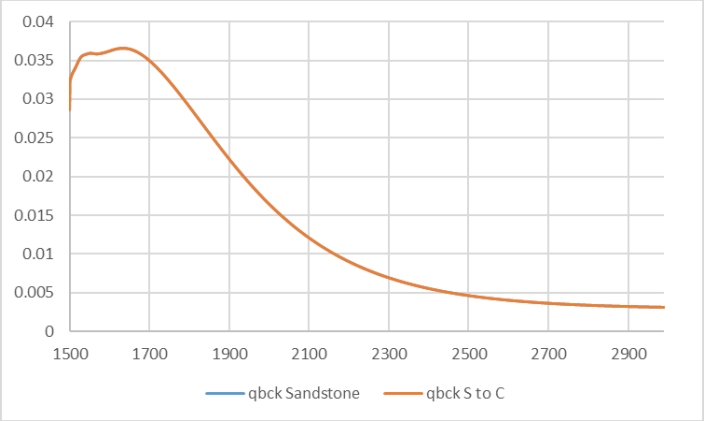


Gambar 4. 152 Grafik *qc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay*

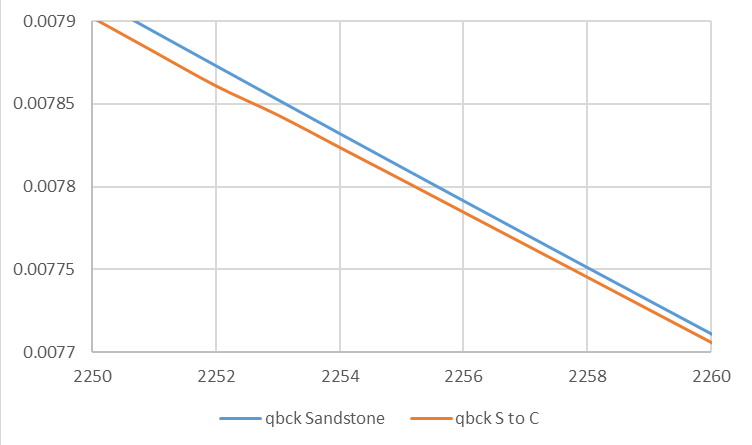


Gambar 4. 153 Grafik perbandingan *qc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay*

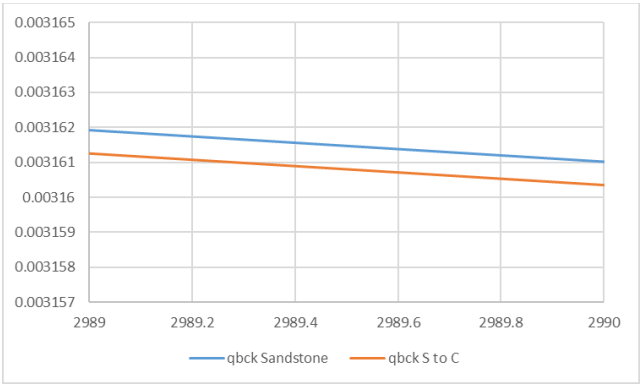
Dari gambar 4.151 – 4.153 dapat dianalisa bahwa nilai *qc* akan mengalami osilasi pada t=225s dan kemudian nilai *qc* akan cenderung akan mengalami penurunan, hal ini dikarenakan pengaruh perubahan massa jenis batuan dan kenaikan nilai *pc*. Nilai *qc* (*flowrate* pada *valve*) untuk batuan *sandstone* sebesar 0.0531539139254136 m3/s sedangkan *qc* setelah perubahan batuan *sandstone* menuju *clay* bernilai 0.0531532594163 m3/s. Terjadi penurunan *qc* sebesar +/- 0.000007 m3/s. Semakin besar nilai *pc* akan mempengaruhi nilai *qc* dimana keduanya berbanding terbalik, yang bearti semakin besar nilai *pc* akan diikuti dengan semakin kecilnya nilai *qc* dari kondisi sebelumnya.



Gambar 4. 154 Grafik *qbck* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay*



Gambar 4. 155 Grafik *qbck* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay*

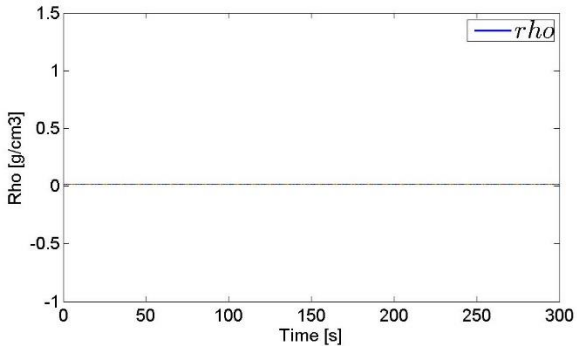


Gambar 4. 156 Grafik perbandingan *qbck* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *sandstone* menuju *clay*

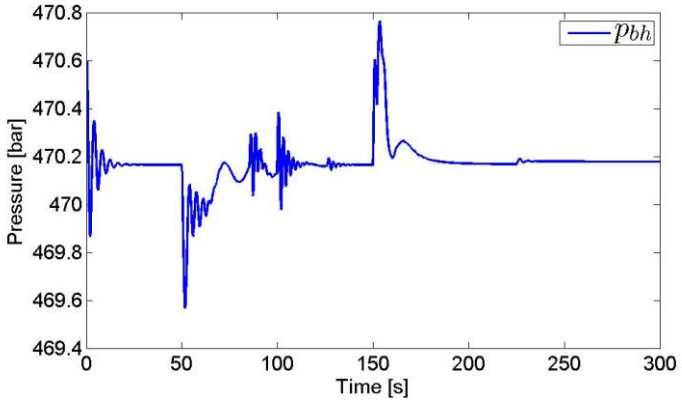
Dari gambar 4.154 – 4.156 dapat dianalisa bahwa nilai *qbck* akan cenderung akan mengalami penurunan, hal ini dikarenakan pengaruh perubahan nilai *pc*. Nilai *qbck* (*flowrate* pada *back pump*) untuk batuan *sandstone* sebesar 0.00315306202921625 m3/s sedangkan *qbck* setelah perubahan batuan *sandstone* menuju *clay* bernilai 0.00315240907316017 m3/s. Terjadi penurunan *qbck* sebesar +/- 0.000001 m3/s. Semakin besar nilai *pc* akan diikuti dengan semakin kecil nilai *qbck*, ini menandakan adanya kenaikan nilai pada *pbit* dan *pc*, sehinnga kurang memperlukan adanya *flowrate* tambahan dari *back pump*, sebaliknya *flowrate back pump* akan mengecil untuk menstabilkan *pbit*.

2. *Limestone* menuju *Clay*

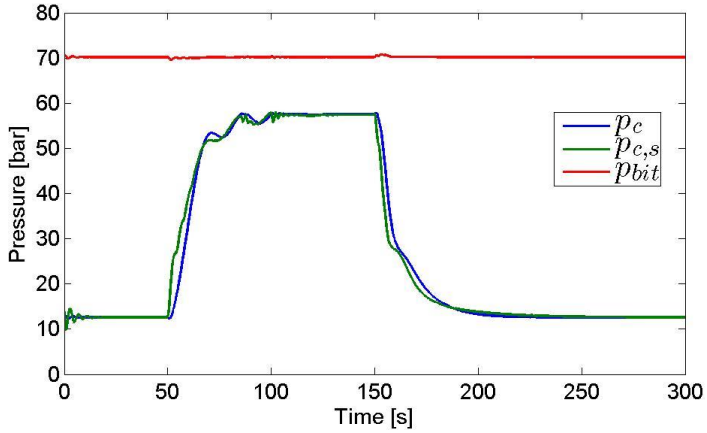
Setelah dilakukan simulasi sistem kontrol pada operasi *drilling* didapatkan data sebagai berikut :



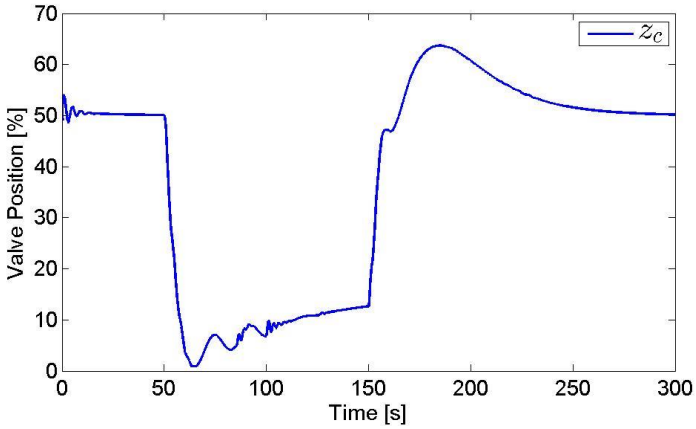
Gambar 4. 157 Grafik *density* campuran perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay*



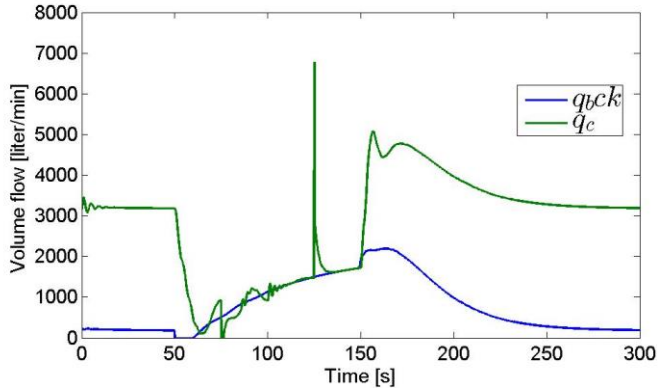
Gambar 4. 158 Grafik *pbit* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay*



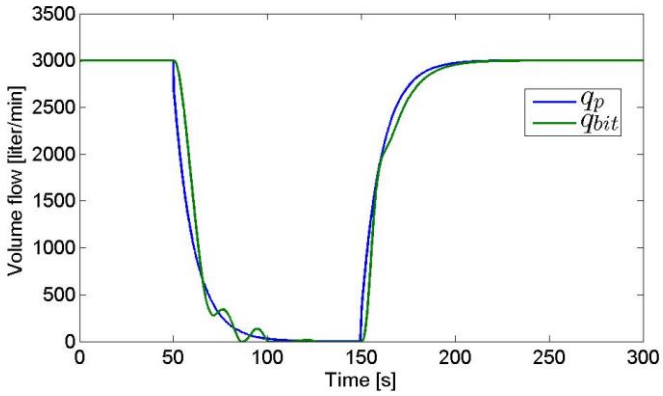
Gambar 4. 159 Grafik *pbit*, *pc* dan *pc setpoint* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay*



Gambar 4. 160 Grafik *zc* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay*



Gambar 4. 161 Grafik *qc* dan *qbck* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay*

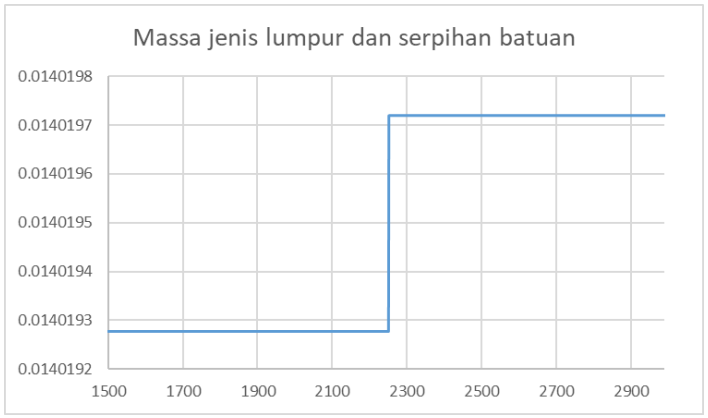


Gambar 4. 162 Grafik *qp* dan *qbit* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay*

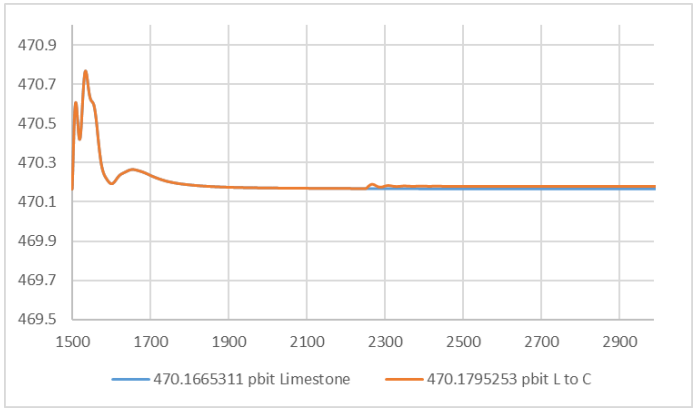
Grafik 4.157-4.162 menunjukkan hasil kontrol operasi *drilling* pada kondisi *pbit* naik dikarenakan perubahan massa jenis batuan dari *limestone* menuju *clay*. Perubahan massa jenis batuan akan mempengaruhi perubahan *pbit*. Kontrol terhadap *pbit* akan merubah nilai *pressure* pada choke, perubahan *pressure* pada choke akan mempengaruhi perubahan nilai *zc*, *qc*, serta *qbck*. Nilai *qbit* dan *qp* konstan sebesar 3000 liter/min. Yang berarti nilai *disturbance* berupa perubahan massa jenis batuan tidak mempengaruhi besarnya nilai *pressure* dan *flowrate* pada *main pump* dikarenakan kesempurnaan penyaringan mud sebelum mud diinjeksikan kembali. Analisa lebih lanjut dilakukan pada waktu 150-300s, dimana diberikan disturbance perubahan massa jenis batuan pada waktu 225s, didapatkan hasil sebagai berikut :

a. Nilai *pbit* terhadap perubahan massa jenis batuan dan nilai *qp*

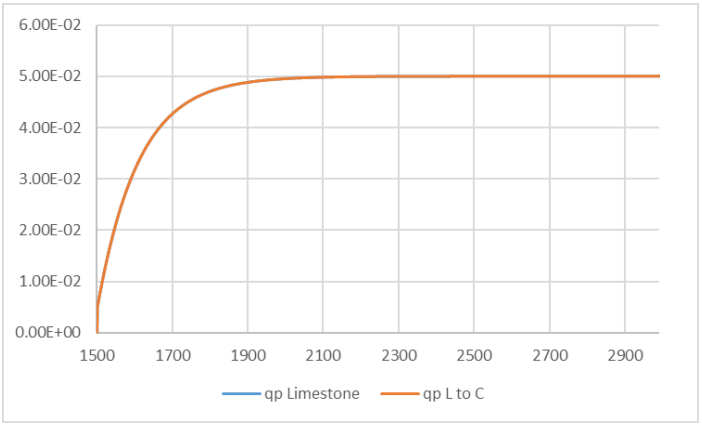
Dilakukan plot pada excel sebagai berikut :



Gambar 4. 163 Grafik *density* campuran saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay*



Gambar 4. 164 Grafik *pbit* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay*

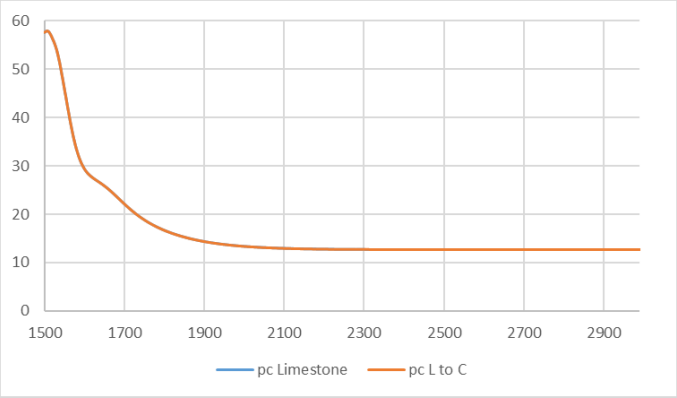


Gambar 4. 165 Grafik *qp* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay*

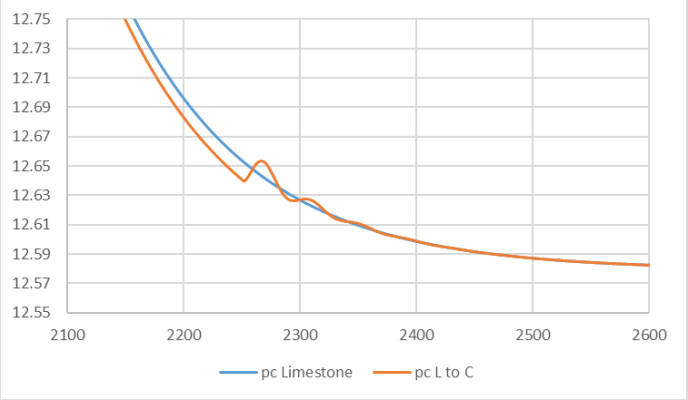
Dari gambar 4.163 dan 4.165 dapat diambil analisa ketika operasi drilling berlangsung hubungan antara massa jenis campuran lumpur dan serpihan dengan nilai *pressure* pada bit. Setelah diberikan perubahan massa jenis batuan dari *limestone* menuju *clay* pada t=225s mempengaruhi nilai pada *pbit*, nilai *pbit* cenderung naik seiring dengan massa jenis campuran yang lebih besar. Selain itu nilai *qp* relative stabil namun mengalami penurunan dengan nilai *qp limestone* sebesar 0.0499999161707708 dan *qp limestone* menuju *clay* sebesar 0.0499999161553782. Oleh karena itu dilakukan pengontrolan terhadap variabel lain untuk menjaga nilai *pbit* tetap pada *setpoint* sebesar 470 bar.

b. Nilai *pc* terhadap perubahan *pbit*

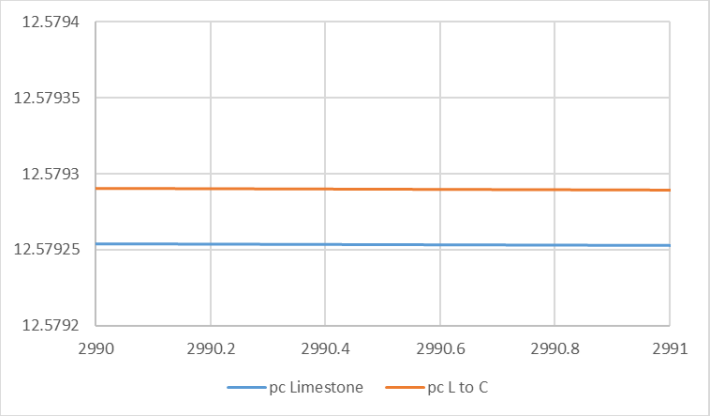
Dilakukan plot pada excel sebagai berikut :



Gambar 4. 166 Grafik *pc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay*



Gambar 4. 167 Grafik *pc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay*

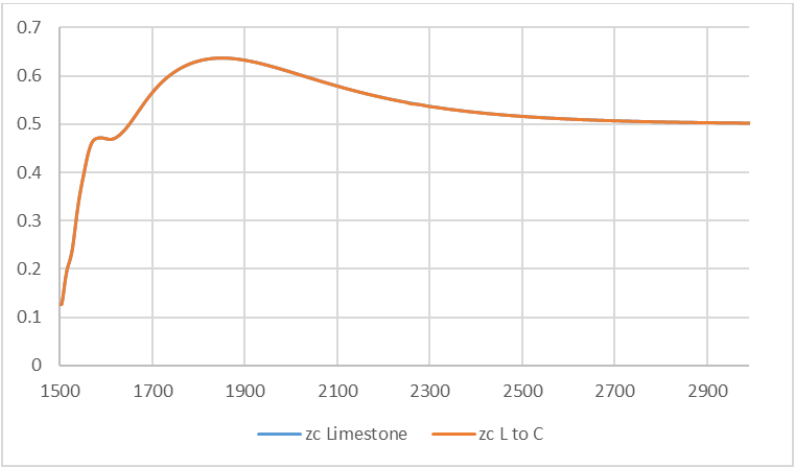


Gambar 4. 168 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay*

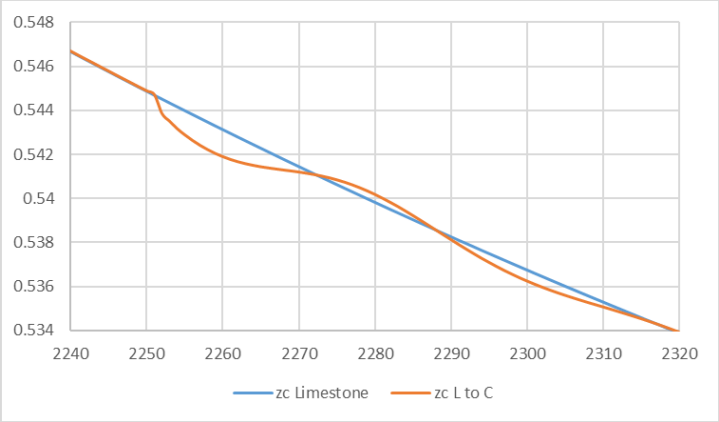
Dari gambar 4.165 dan 4.168 dapat diambil analisa ketika operasi drilling berlangsung nilai *pc* akan mengalami kenaikan untuk menjaga *pbit* tetap pada *setpoint*nya. Nilai *pc* untuk batuan *limestone* sebesar 12.5792444786816 bar sedangkan *pc* setelah perubahan batuan *limestone* menuju *clay* bernilai 12.5792804945907 bar. Terjadi kenaikan *pc* sebesar +/- 0.00004 bar. Kenaikan *pbit* yang dipengaruhi oleh perubahan massa jenis batuan akan memberikan perubahan nilai *pc* dan *pc setpoint*, hal ini dikarenakan adanya kontrol dan penyesuaian agar *pbit* tetap pada *setpoint* dan lumpur serta serpihan yang terangkut dapat terangkat.

c. Nilai *zc, qc,* dan *qbck* terhadap perubahan *pc*

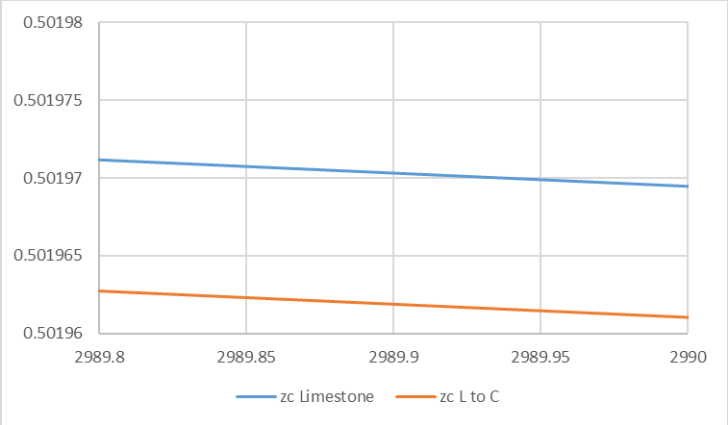
Dilakukan plot pada excel sebagai berikut :



Gambar 4. 169 Grafik *zc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay*

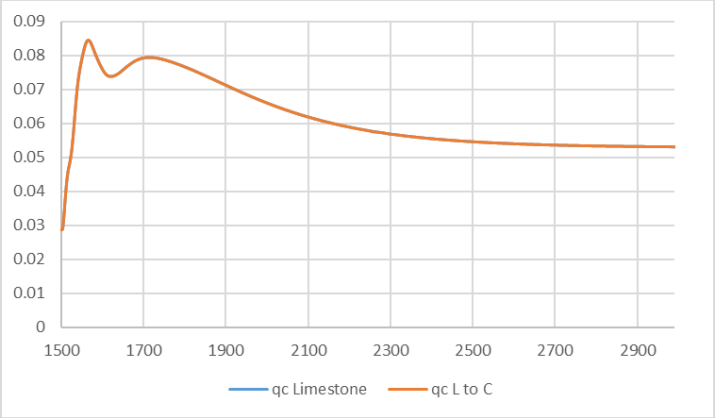


Gambar 4. 170 Grafik *zc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay*

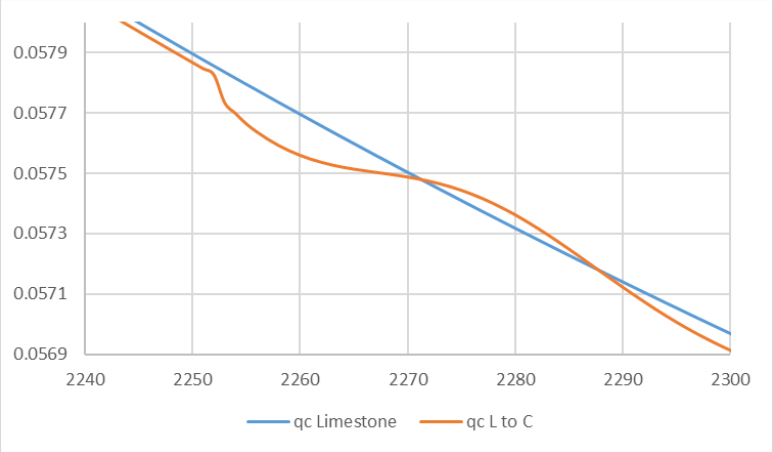


Gambar 4. 171 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay*

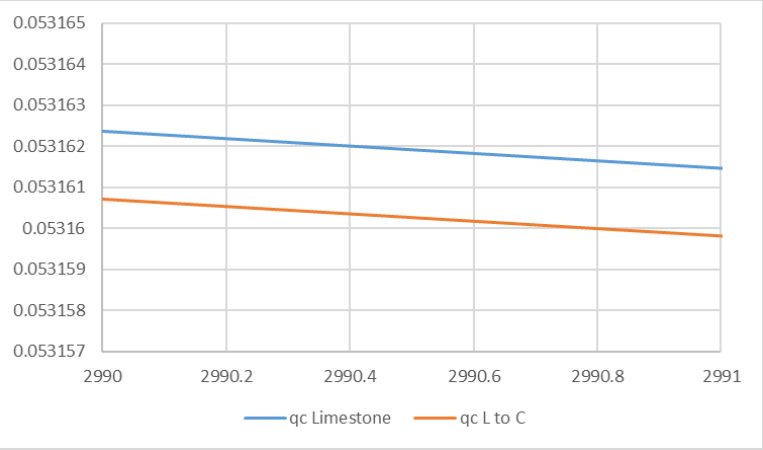
Dari gambar 4.169 – 4.171 dapat dianalisa bahwa nilai *zc* akan mengalami osilasi pada t=225s dan kemudian nilai *zc* akan cenderung mengalami penurunan, hal ini dikarenakan kenaikan nilai *pressure* pada chocke vlave. Nilai *zc* (bukaan *valve*) untuk batuan *limestone* sebesar 0.501894520392766 atau sebesar 50.1894% sedangkan *pc* setelah perubahan batuan *limestone* menuju *clay* bernilai 0.50188641131222 atau sebesar 50.1886% . Terjadi penurunan *zc* sebesar +/- 0.001%. Semakin besar nilai *pc* diperlukan bukaan *valve* (*zc*) yang lebih kecil daripada kondisi sebelumnya untuk mendapatkan nilai *pressure* yang lebih besar pula



Gambar 4. 172 Grafik *qc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay*

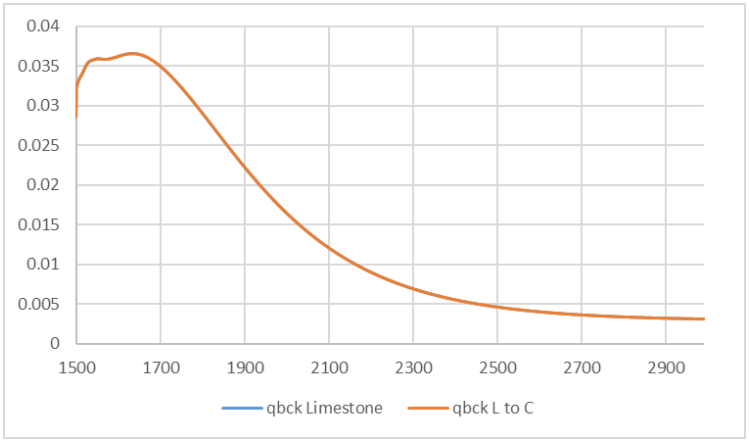


Gambar 4. 173 Grafik *qc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay*

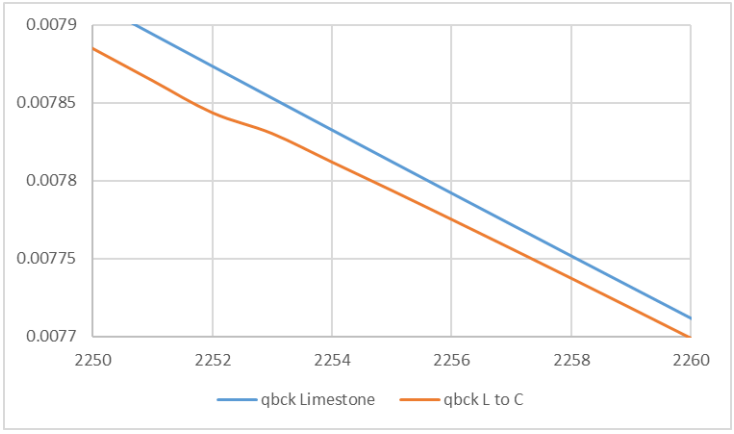


Gambar 4. 174 Grafik perbandingan *qc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay*

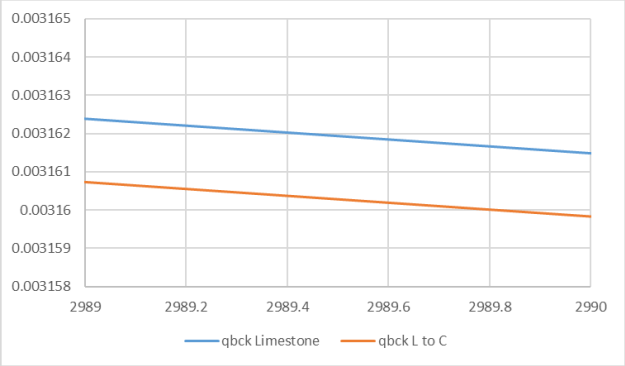
Dari gambar 4.172 – 4.174 dapat dianalisa bahwa nilai *qc* akan mengalami osilasi pada t=225s dan kemudian nilai *qc* akan cenderung akan mengalami penurunan, hal ini dikarenakan pengaruh perubahan massa jenis batuan dan kenaikan nilai *pc*. Nilai *qc* (*flowrate* pada *valve*) untuk batuan *limestone* sebesar 0.0531543741859841 m3/s sedangkan *qc* setelah perubahan batuan *limestone* menuju *clay* bernilai 0.0531527530891892 m3/s. Terjadi penurunan *qc* sebesar +/- 0.00002 m3/s. Semakin besar nilai *pc* akan mempengaruhi nilai *qc* dimana keduanya berbanding terbalik, yang bearti semakin besar nilai *pc* akan diikuti dengan semakin kecilnya nilai *qc* dari kondisi sebelumnya.



Gambar 4. 175 Grafik *qbck* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay*



Gambar 4. 176 Grafik *qbck* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay*

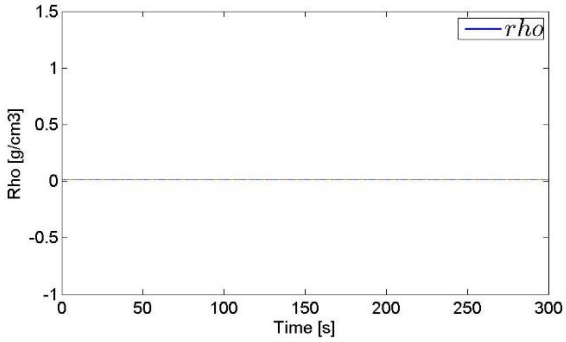


Gambar 4. 177 Grafik perbandingan *qbck* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *clay*

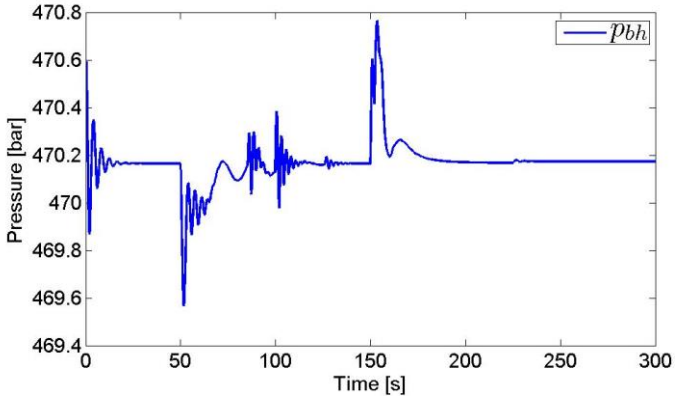
Dari gambar 4.175 – 4.177 dapat dianalisa bahwa nilai *qbck* akan cenderung akan mengalami penurunan, hal ini dikarenakan pengaruh perubahan nilai *pc*. Nilai *qbck* (*flowrate* pada *back pump*) untuk batuan *limestone* sebesar 0.0031535222613314 m3/s sedangkan *qbck* setelah perubahan batuan *limestone* menuju *clay* bernilai 0.00315190498991551 m3/s. Terjadi penurunan *qbck* sebesar +/- 0.000002 m3/s. Semakin besar nilai *pc* akan diikuti dengan semakin kecil nilai *qbck*, ini menandakan adanya kenaikan nilai pada *pbit* dan *pc*,sehingga kurang memperlukan adanya *flowrate* tambahan dari *back pump* untuk membantu menaikkan serpihan batuan, sebaliknya *flowrate back pump* akan mengecil untuk menstabilkan *pbit*.

3. *Limestone* menuju *Sandstone*

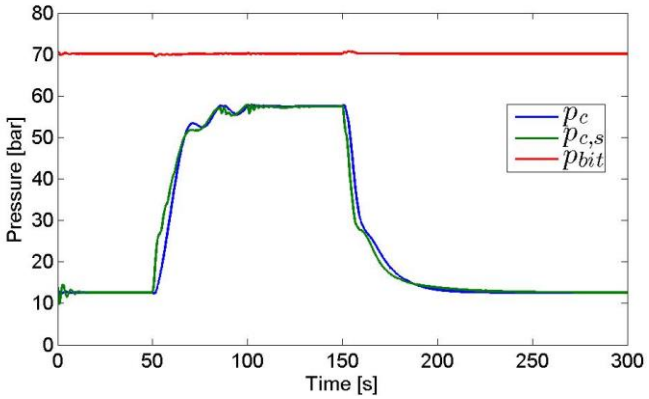
Setelah dilakukan simulasi didapatkan data sebagai berikut :



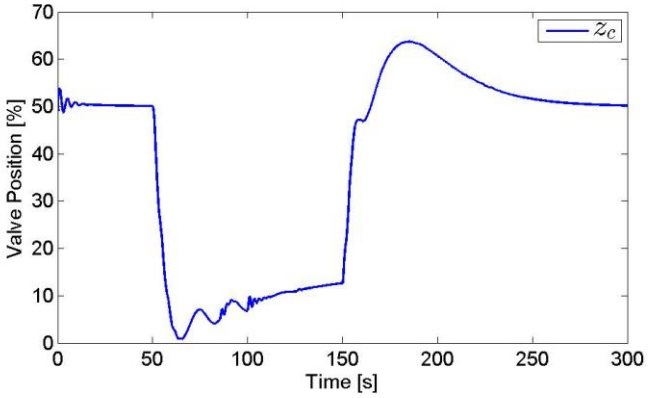
Gambar 4. 178 Grafik *density* campuran perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone*



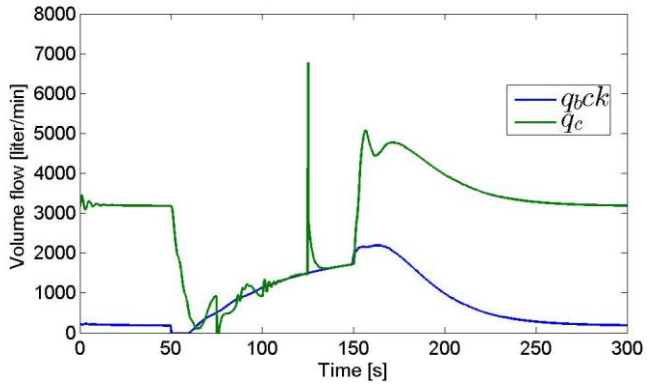
Gambar 4. 179 Grafik *pbit* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone*



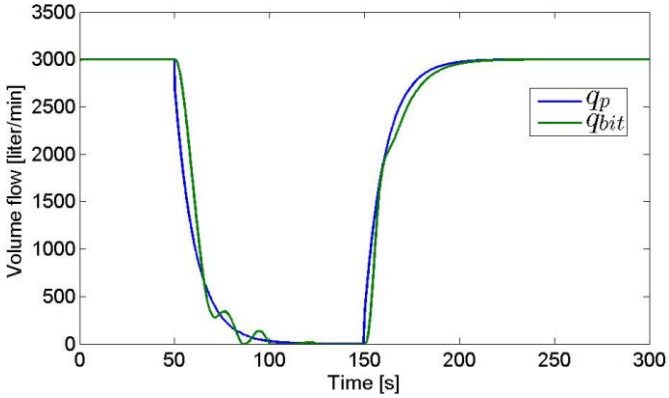
Gambar 4. 180 Grafik *pbit*, *pc* dan *pc setpoint* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone*



Gambar 4. 181 Grafik *zc* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone*



Gambar 4. 182 Grafik *qc* dan *qbck* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone*

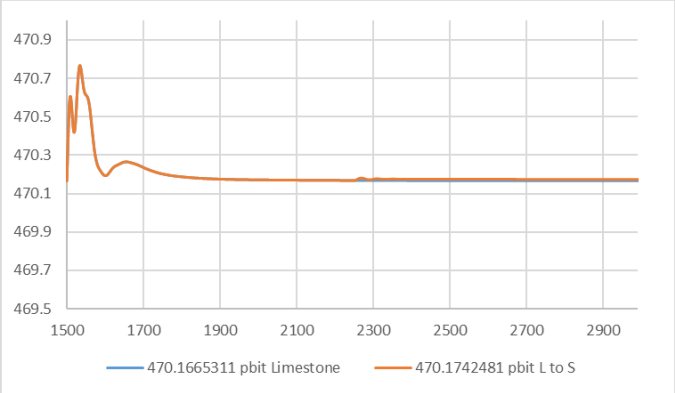


Gambar 4. 183 Grafik *qp* dan *qbit* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone*

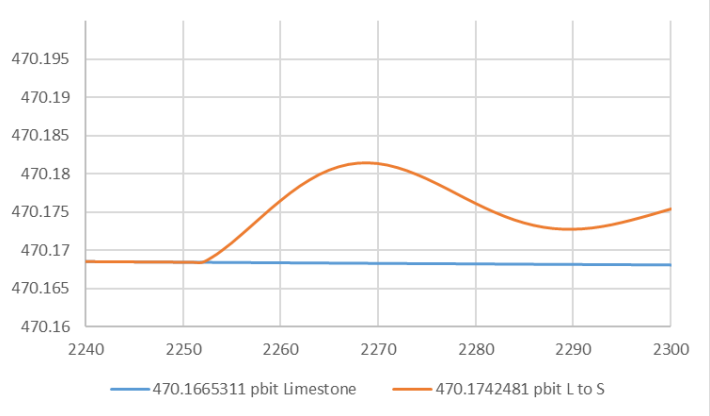
Grafik 4.178-4.183 menunjukkan hasil kontrol operasi *drilling* pada kondisi *pbit* naik dikarenakan perubahan massa jenis batuan dari *limestone* menuju *sandstone*. Perubahan massa jenis batuan akan mempengaruhi perubahan *pbit*. Kontrol terhadap *pbit* akan merubah nilai *pressure* pada choke, perubahan *pressure* pada choke akan mempengaruhi perubahan nilai *zc*, *qc*, serta *qbck.* Nilai *qbit* dan *qp* konstan sebesar 3000 liter/min. Yang berarti nilai *disturbance* berupa perubahan massa jenis batuan tidak mempengaruhi besarnya nilai *pressure* dan *flowrate* pada *main pump* dikarenakan kesempurnaan penyaringan mud sebelum mud diinjeksikan kembali. Analisa lebih lanjut dilakukan pada waktu 150-300s, dimana diberikan disturbance perubahan massa jenis batuan pada waktu 225s, didapatkan hasil sebagai berikut :

a. Nilai *pbit* terhadap perubahan massa jenis batuan dan nilai *qp*

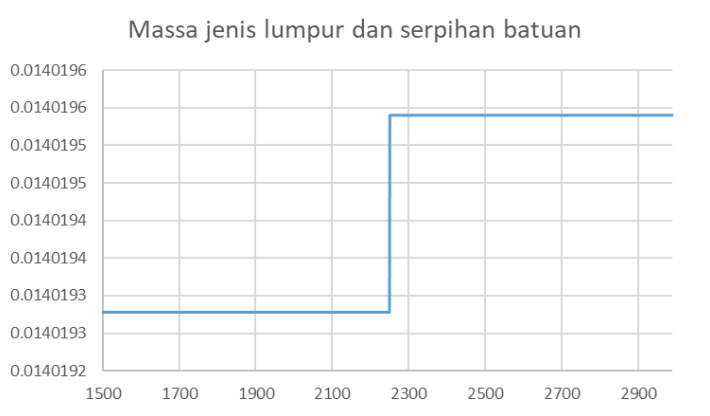
Dilakukan plot pada excel sebagai berikut :



Gambar 4. 184 Grafik *pbit* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone*



Gambar 4. 185 Grafik *pbit* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone*

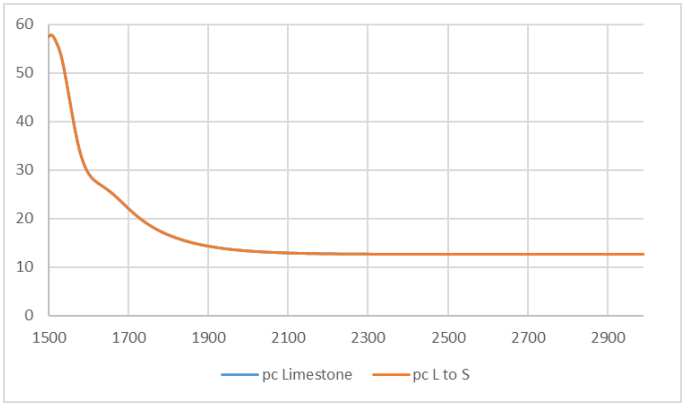


Gambar 4. 186 Grafik *density* campuran saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone*

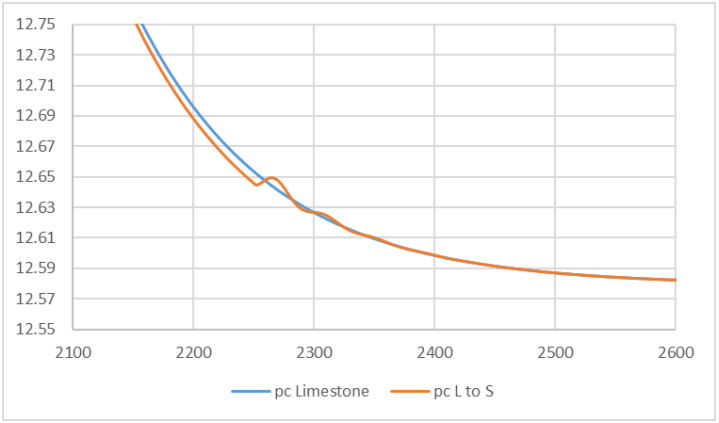
Dari gambar 4.142 dan 4.144 dapat diambil analisa ketika operasi drilling berlangsung hubungan antara massa jenis campuran lumpur dan serpihan dengan nilai *pressure* pada bit. Setelah diberikan perubahan massa jenis batuan dari *limestone* menuju *sandstone* pada t=225s mempengaruhi nilai pada *pbit*, nilai *pbit* cenderung naik seiring dengan massa jenis campuran yang lebih besar. Selain itu nilai *qp* relative stabil namun mengalami penurunan dengan nilai *qp limestone* sebesar 0.0499999161707708 dan *qp limestone* menuju *sandstone* sebesar 0.0499999161616396. Oleh karena itu dilakukan pengontrolan terhadap variabel lain untuk menjaga nilai *pbit* tetap pada *setpoint* sebesar 470 bar.

b. Nilai *pc* terhadap perubahan *pbit*

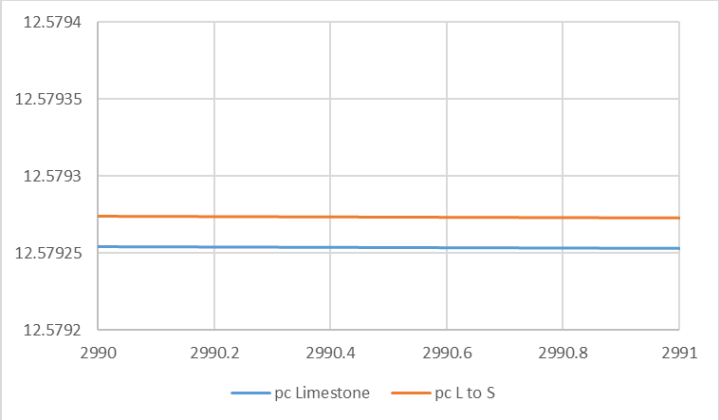
Dilakukan plot pada excel sebagai berikut :



Gambar 4. 187 Grafik *pc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone*



Gambar 4. 188 Grafik *pc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone*

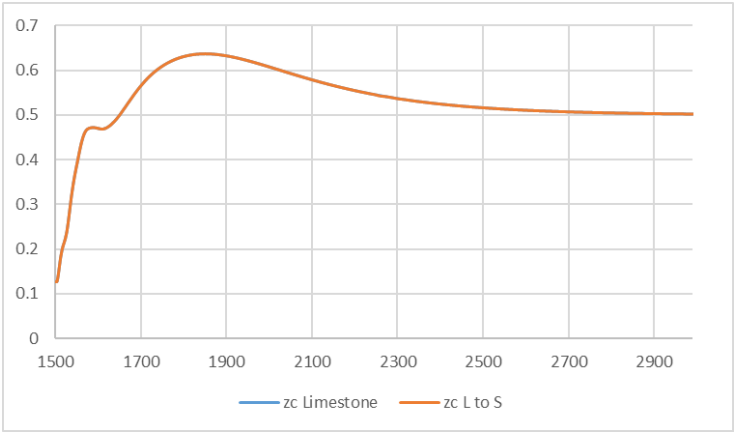


Gambar 4. 189 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone*

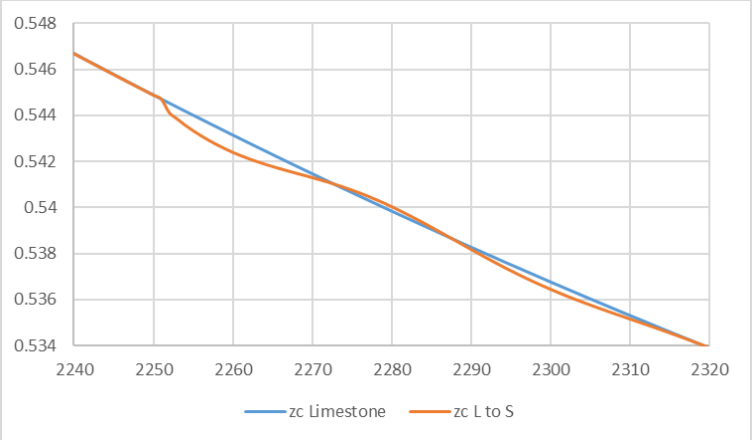
Dari gambar 4.187 dan 4.189 dapat diambil analisa ketika operasi drilling berlangsung nilai *pc* akan mengalami kenaikan untuk menjaga *pbit* tetap pada *setpoint*nya. Nilai *pc* untuk batuan *limestone* sebesar 12.5792444786816 bar sedangkan *pc* setelah perubahan batuan *limestone* menuju *sandstone* bernilai 12.5792641516044 bar. Terjadi kenaikan *pc* sebesar +/- 0.00002 bar. Kenaikan *pbit* yang dipengaruhi oleh perubahan massa jenis batuan akan memberikan perubahan nilai *pc* dan *pc setpoint*, hal ini dikarenakan adanya kontrol dan penyesuaian agar *pbit* tetap pada *setpoint* dan lumpur serta serpihan yang terangkut dapat terangkat.

c. Nilai *zc, qc,* dan *qbck* terhadap perubahan *pc*

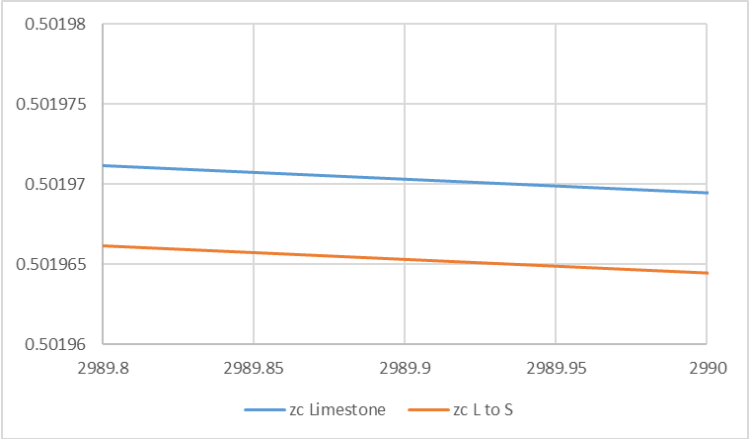
Dilakukan plot pada excel sebagai berikut :



Gambar 4. 190 Grafik *zc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone*

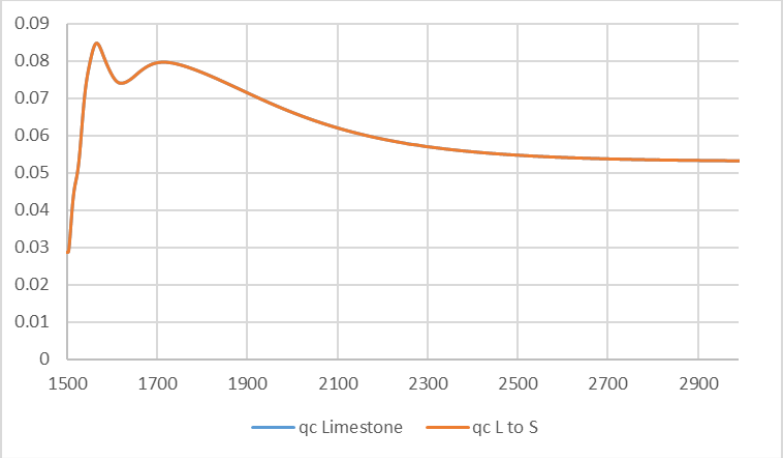


Gambar 4. 191 Grafik *zc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone*

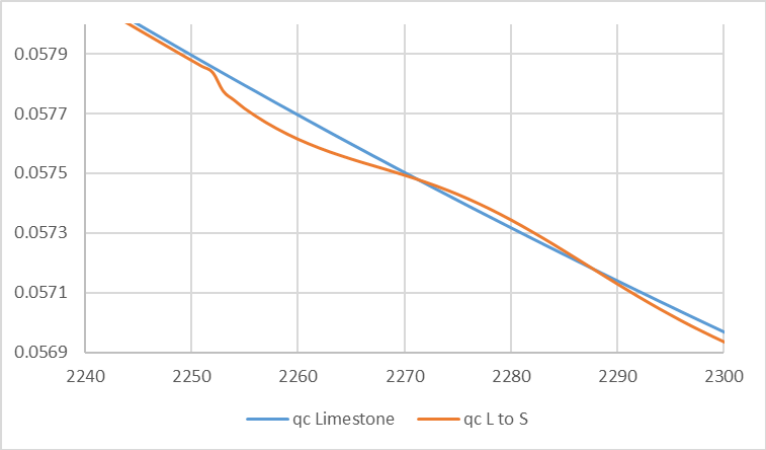


Gambar 4. 192 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone*

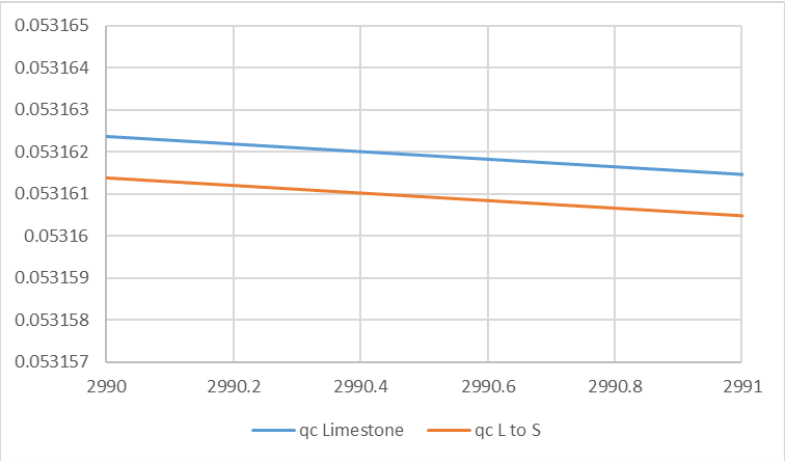
Dari gambar 4.190 – 4.192 dapat dianalisa bahwa nilai *zc* akan mengalami osilasi pada t=225s dan kemudian nilai *zc* akan cenderung mengalami penurunan, hal ini dikarenakan kenaikan nilai *pressure* pada chocke vlave. Nilai *zc* (bukaan *valve*) untuk batuan *limestone* sebesar 0.501894520392766 atau sebesar 50.1894% sedangkan *pc* setelah perubahan batuan *limestone* menuju *sandstone* bernilai 0.501889704962201 atau sebesar 50.1889% . Terjadi penurunan *zc* sebesar +/- 0.001%. Semakin besar nilai *pc* diperlukan bukaan *valve* (*zc*) yang lebih kecil daripada kondisi sebelumnya untuk mendapatkan nilai *pressure* yang lebih besar pula



Gambar 4. 193 Grafik *qc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone*

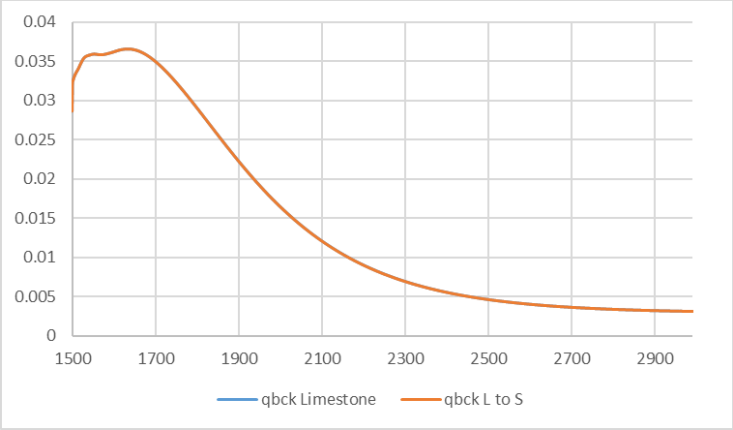


Gambar 4. 194 Grafik *qc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone*

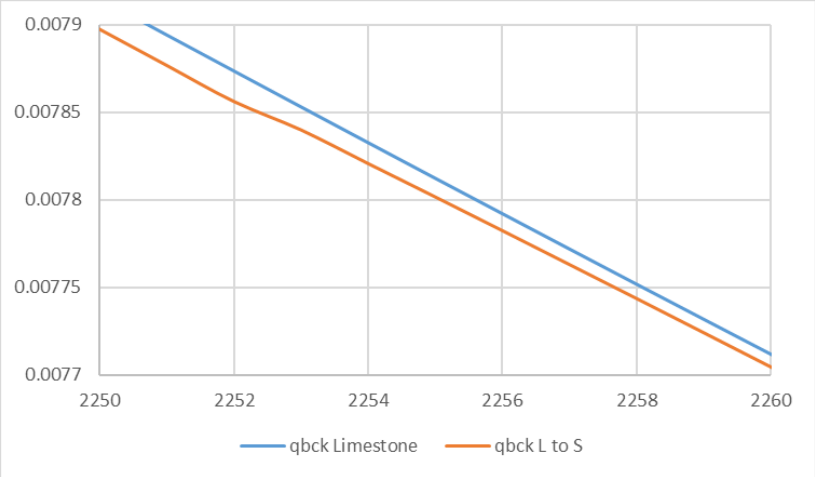


Gambar 4. 195 Grafik perbandingan *qc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone*

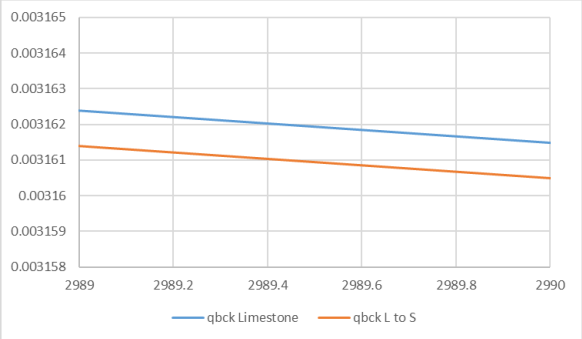
Dari gambar 4.193 – 4.195 dapat dianalisa bahwa nilai *qc* akan mengalami osilasi pada t=225s dan kemudian nilai *qc* akan cenderung akan mengalami penurunan, hal ini dikarenakan pengaruh perubahan massa jenis batuan dan kenaikan nilai *pc*. Nilai *qc* (*flowrate* pada *valve*) untuk batuan *limestone* sebesar 0.0531543741859841 m3/s sedangkan *qc* setelah perubahan batuan *limestone* menuju *sandstone* bernilai 0.0531534077508351 m3/s. Terjadi penurunan *qc* sebesar +/- 0.000001 m3/s. Semakin besar nilai *pc* akan mempengaruhi nilai *qc* dimana keduanya berbanding terbalik, yang bearti semakin besar nilai *pc* akan diikuti dengan semakin kecilnya nilai *qc* dari kondisi sebelumnya.



Gambar 4. 196 Grafik *qbck* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone*



Gambar 4. 197 Grafik *qbck* saat t=225s dengan perubahan massa jenis *limestone* menuju *sandstone*

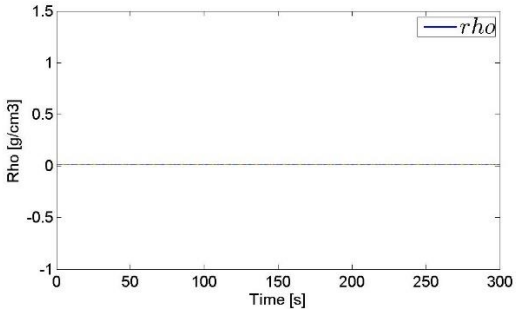


Gambar 4. 198 Grafik perbandingan *qbck* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *limestone* menuju *sandstone*

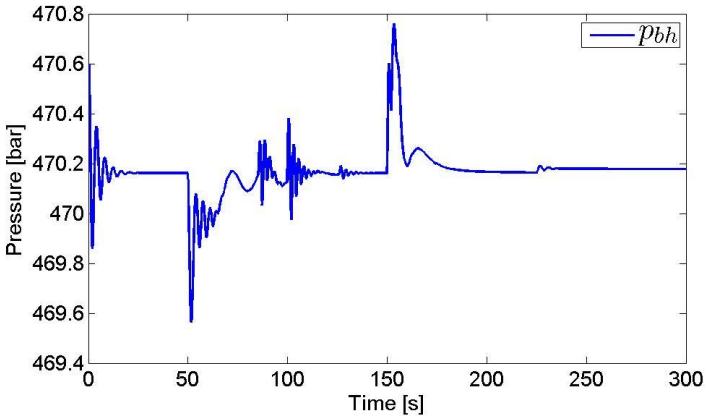
Dari gambar 4.196 – 4.198 dapat dianalisa bahwa nilai *qbck* akan cenderung akan mengalami penurunan, hal ini dikarenakan pengaruh perubahan nilai *pc*. Nilai *qbck* (*flowrate* pada *back pump*) untuk batuan *limestone* sebesar 0.0031535222613314 m3/s sedangkan *qbck* setelah perubahan batuan *limestone* menuju *sandstone* bernilai 0.00315255809781462 m3/s. Terjadi penurunan *qbck* sebesar +/- 0.000001 m3/s. Besarnya nilai *pc* akan mempengaruhi nilai *qbck*, semakin besar nilai *pc* akan diikuti dengan semakin kecil nilai *qbck*, ini menandakan adanya kenaikan nilai pada *pbit* dan *pc*,sehingga kurang memperlukan adanya *flowrate* tambahan dari *back pump* untuk membantu menaikkan serpihan batuan, sebaliknya *flowrate back pump* akan mengecil untuk menstabilkan *pbit*.

4. *Granite* menuju *Clay*

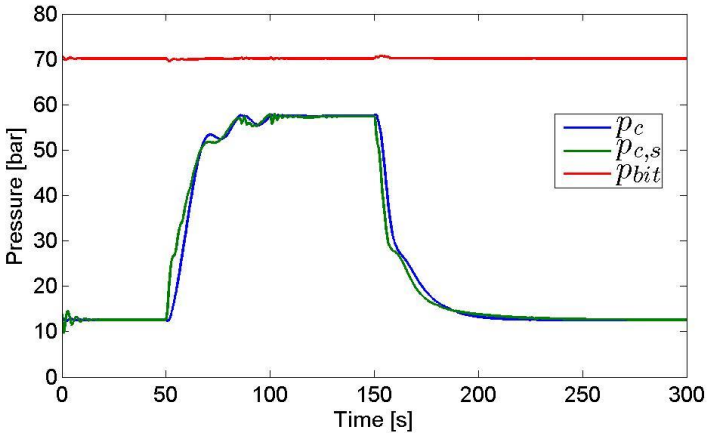
Setelah dilakukan simulasi sistem kontrol pada operasi *drilling* didapatkan data sebagai berikut :



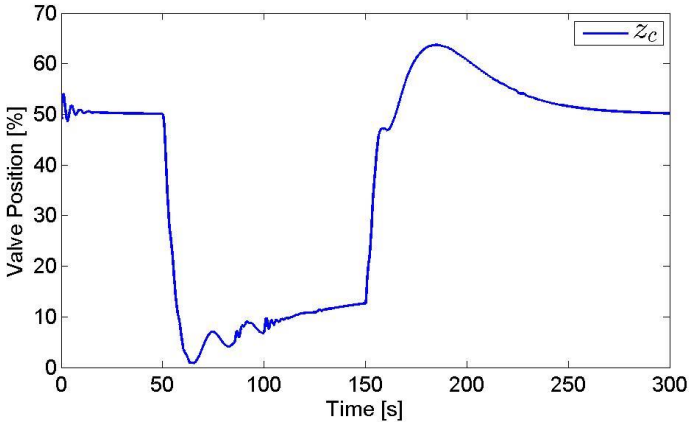
Gambar 4. 199 Grafik *density* campuran perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay*



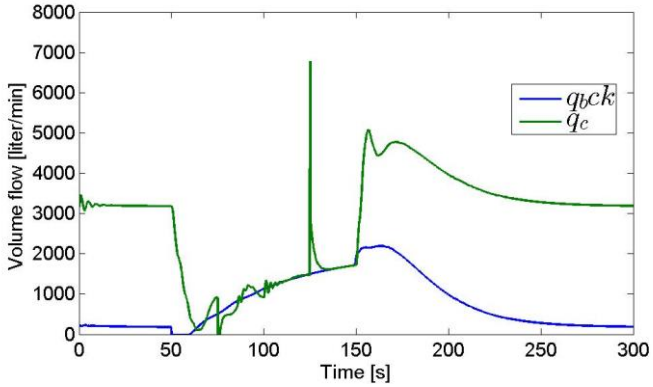
Gambar 4. 200 Grafik *pbit* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay*



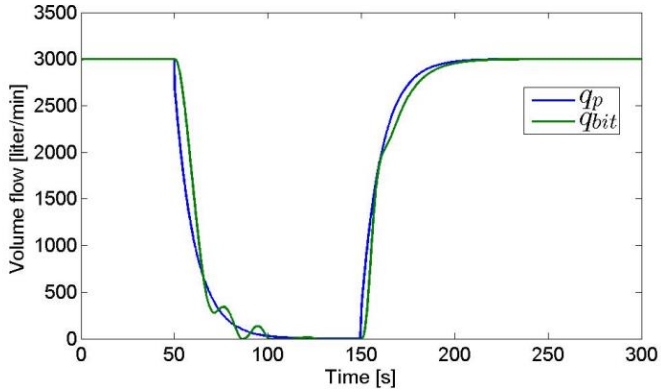
Gambar 4. 201 Grafik *pbit*, *pc* dan *pc setpoint* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay*



Gambar 4. 202 Grafik *zc* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay*



Gambar 4. 203 Grafik *qc* dan *qbck* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay*

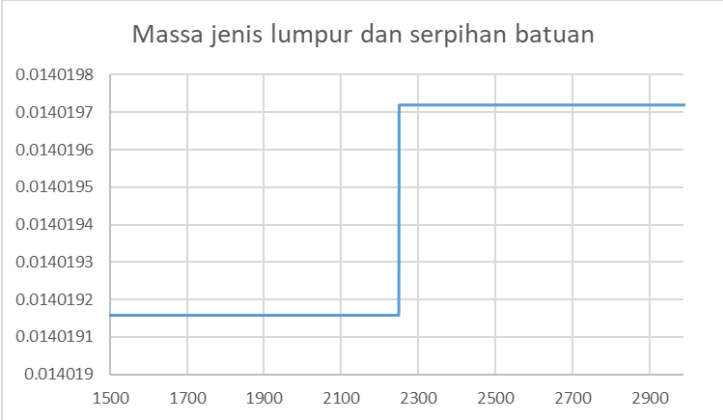


Gambar 4. 204 Grafik *qp* dan *qbit* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay*

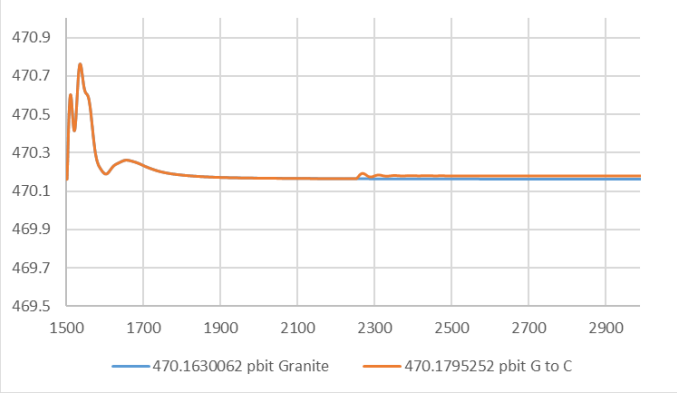
Grafik 4.199-4.204 menunjukkan hasil kontrol operasi *drilling* pada kondisi *pbit* naik dikarenakan perubahan massa jenis batuan dari *granite* menuju *clay*. Perubahan massa jenis batuan akan mempengaruhi perubahan *pbit*. Kontrol terhadap *pbit* akan merubah nilai *pressure* pada choke, perubahan *pressure* pada choke akan mempengaruhi perubahan nilai *zc*, *qc*, serta *qbck*. Nilai *qbit* dan *qp* konstan sebesar 3000 liter/min. Yang berarti nilai *disturbance* berupa perubahan massa jenis batuan tidak mempengaruhi besarnya nilai *pressure* dan *flowrate* pada *main pump* dikarenakan kesempurnaan penyaringan mud sebelum mud diinjeksikan kembali. Analisa lebih lanjut dilakukan pada waktu 150-300s, dimana diberikan disturbance perubahan massa jenis batuan pada waktu 225s, didapatkan hasil sebagai berikut :

a. Nilai *pbit* terhadap perubahan massa jenis batuan dan nilai *qp*

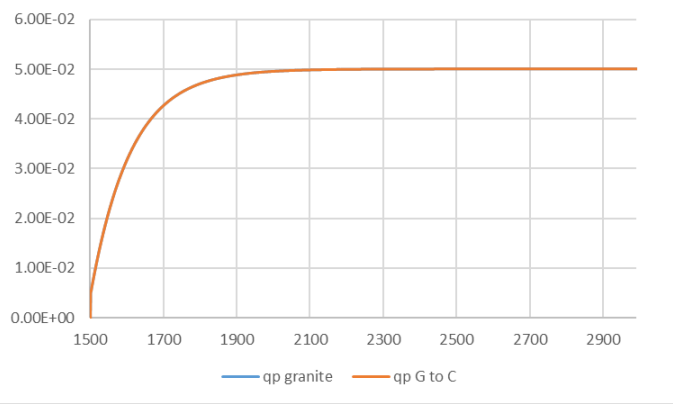
Dilakukan plot pada excel sebagai berikut :



Gambar 4. 205 Grafik *density* campuran saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay*



Gambar 4. 206 Grafik *pbit* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay*

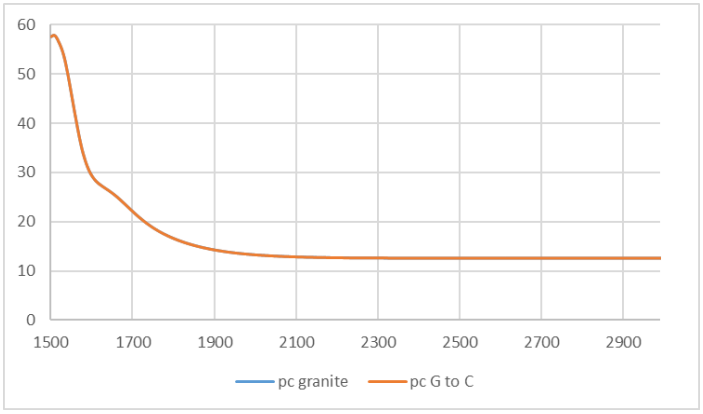


Gambar 4. 207 Grafik *qp* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay*

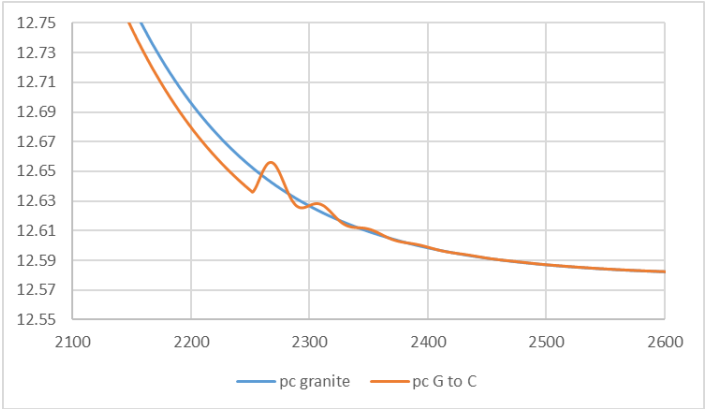
Dari gambar 4.205 dan 4.207 dapat diambil analisa ketika operasi drilling berlangsung hubungan antara massa jenis campuran lumpur dan serpihan dengan nilai *pressure* pada bit. Setelah diberikan perubahan massa jenis batuan dari *granite* menuju *clay* pada t=225s mempengaruhi nilai pada *pbit*, nilai *pbit* cenderung naik seiring dengan massa jenis campuran yang lebih besar. Selain itu nilai *qp* relative stabil namun mengalami penurunan dengan nilai *qp granite* sebesar 0.0499999161708012 dan *qp granite* menuju *clay* sebesar 0.0499999161512047. Oleh karena itu dilakukan pengontrolan terhadap variabel lain untuk menjaga nilai *pbit* tetap pada *setpoint* sebesar 470 bar.

b. Nilai *pc* terhadap perubahan *pbit*

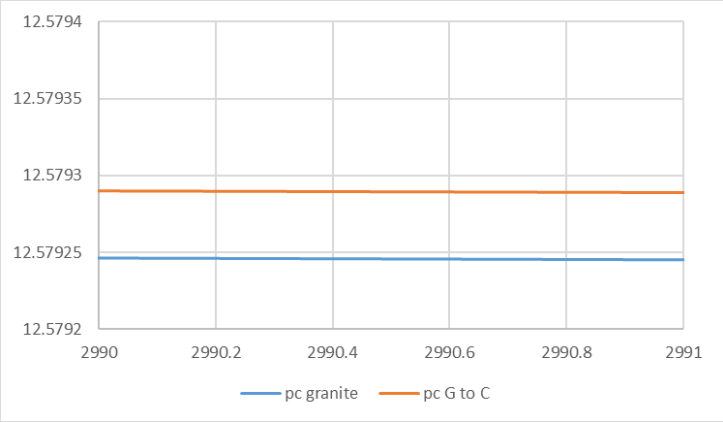
Dilakukan plot pada excel sebagai berikut :



Gambar 4. 208 Grafik *pc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay*



Gambar 4. 209 Grafik *pc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay*

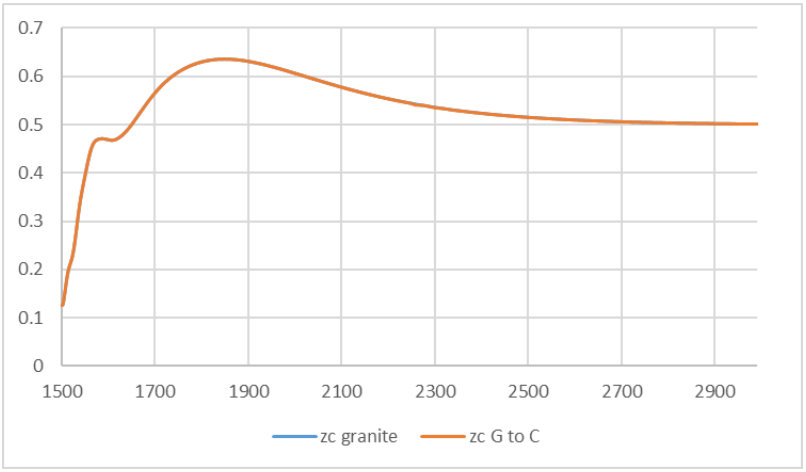


Gambar 4. 210 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay*

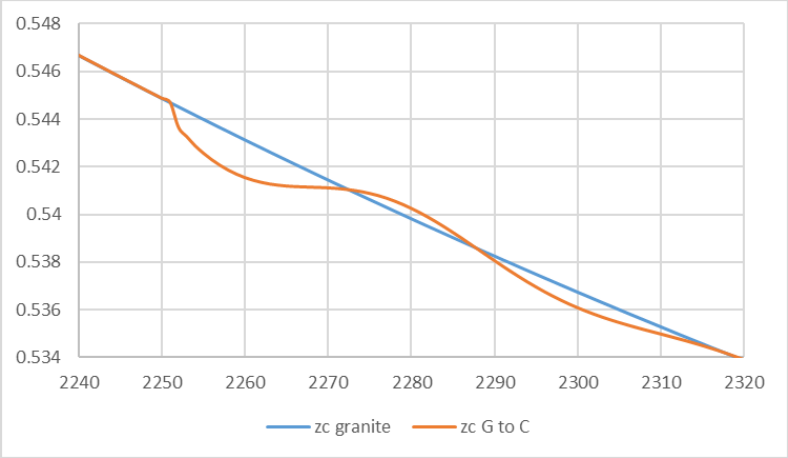
Dari gambar 4.208 dan 4.210 dapat diambil analisa ketika operasi drilling berlangsung nilai *pc* akan mengalami kenaikan untuk menjaga *pbit* tetap pada *setpoint*nya. Nilai *pc* untuk batuan *granite* sebesar 12.5792367121278 bar sedangkan *pc* setelah perubahan batuan *granite* menuju *clay* bernilai 12.5792804080171 bar. Terjadi kenaikan *pc* sebesar +/- 0.00005 bar. Kenaikan *pbit* yang dipengaruhi oleh perubahan massa jenis batuan akan memberikan perubahan nilai *pc* dan *pc setpoint*, hal ini dikarenakan adanya kontrol dan penyesuaian agar *pbit* tetap pada *setpoint* dan lumpur serta serpihan yang terangkut dapat terangkat.

c. Nilai *zc, qc,* dan *qbck* terhadap perubahan *pc*

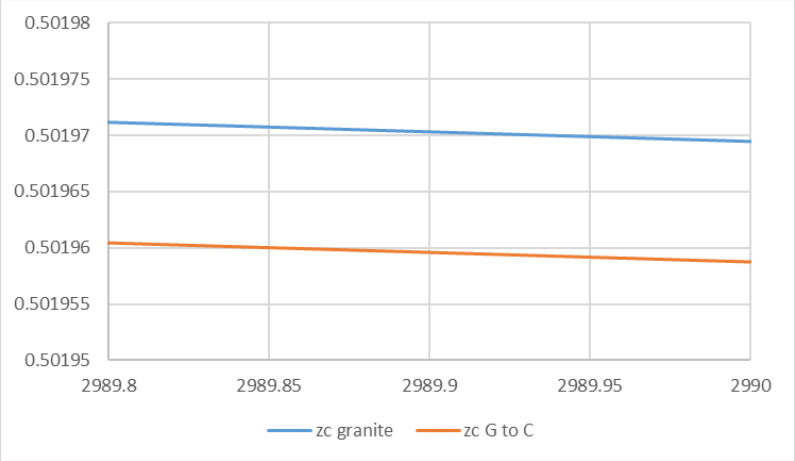
Dilakukan plot pada excel sebagai berikut :



Gambar 4. 211 Grafik *zc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay*

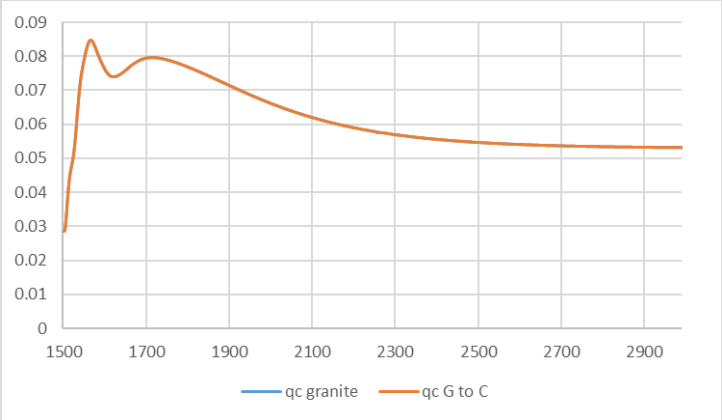


Gambar 4. 212 Grafik *zc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay*

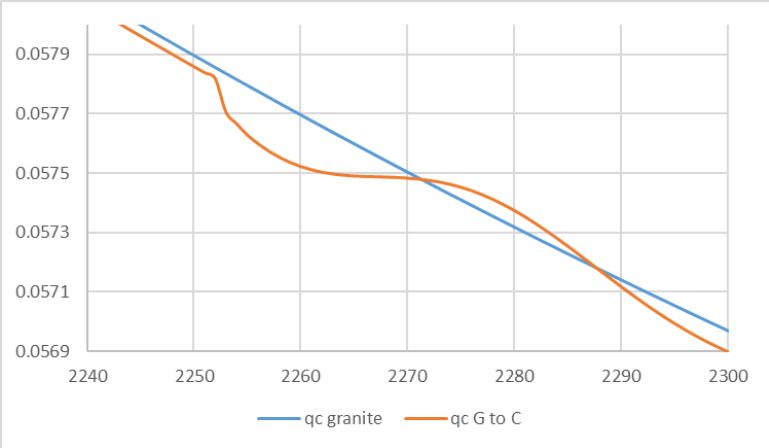


Gambar 4. 213 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay*

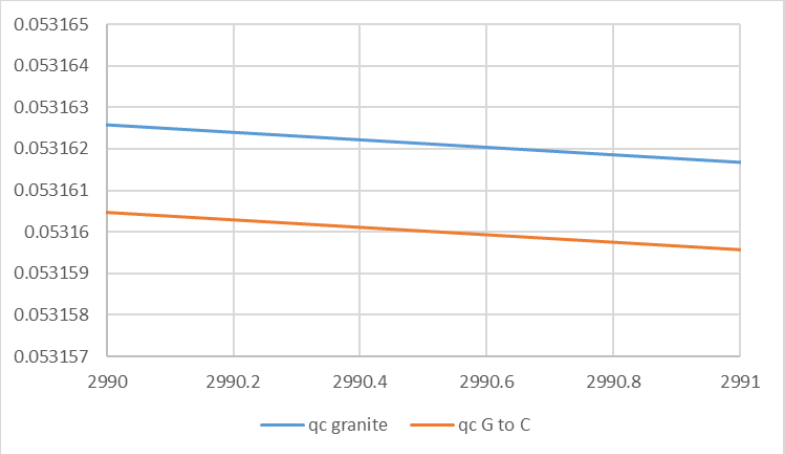
Dari gambar 4.211 – 4.213 dapat dianalisa bahwa nilai *zc* akan mengalami osilasi pada t=225s dan kemudian nilai *zc* akan cenderung mengalami penurunan, hal ini dikarenakan kenaikan nilai *pressure* pada chocke vlave. Nilai *zc* (bukaan *valve*) untuk batuan *granite* sebesar 0.501894548180805 atau sebesar 50.1894% sedangkan *pc* setelah perubahan batuan *granite* menuju *clay* bernilai 0.501884237927388 atau sebesar 50.1884% . Terjadi penurunan *zc* sebesar +/- 0.001%. Semakin besar nilai *pc* diperlukan bukaan *valve* (*zc*) yang lebih kecil daripada kondisi sebelumnya untuk mendapatkan nilai *pressure* yang lebih besar pula



Gambar 4. 214 Grafik *qc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay*

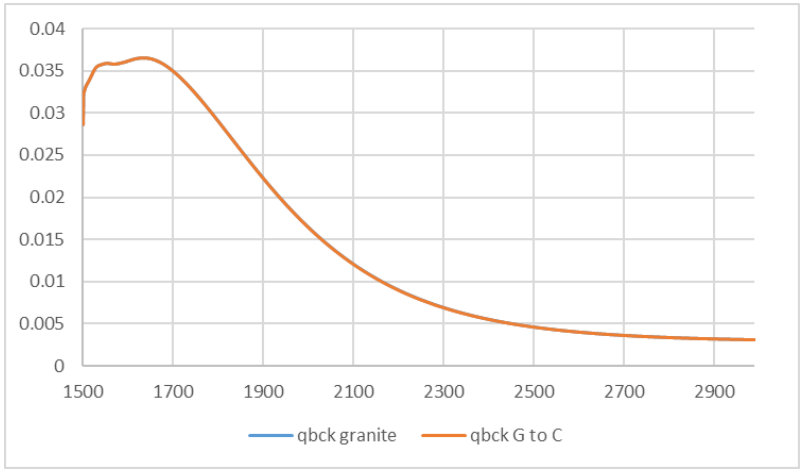


Gambar 4. 215 Grafik *qc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay*

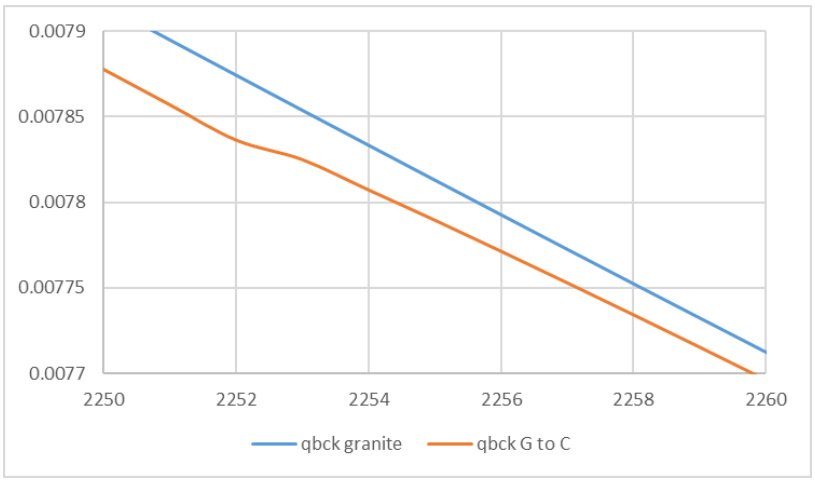


Gambar 4. 216 Grafik perbandingan *qc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay*

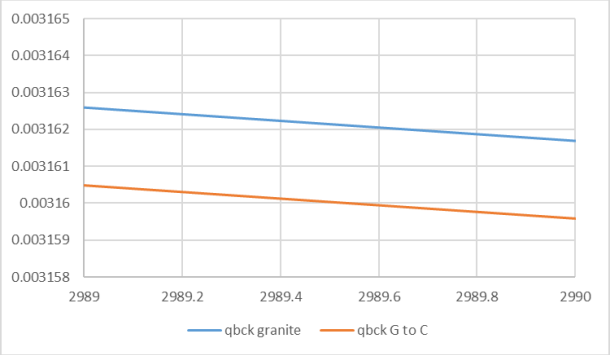
Dari gambar 4.214 – 4.216 dapat dianalisa bahwa nilai *qc* akan mengalami osilasi pada t=225s dan kemudian nilai *qc* akan cenderung akan mengalami penurunan, hal ini dikarenakan pengaruh perubahan massa jenis batuan dan kenaikan nilai *pc*. Nilai *qc* (*flowrate* pada *valve*) untuk batuan *granite* sebesar 0.0531545872887864 m3/s sedangkan *qc* setelah perubahan batuan *granite* menuju *clay* bernilai 0.0531525217386432 m3/s. Terjadi penurunan *qc* sebesar +/- 0.000002 m3/s. Semakin besar nilai *pc* akan mempengaruhi nilai *qc* dimana keduanya berbanding terbalik, yang bearti semakin besar nilai *pc* akan diikuti dengan semakin kecilnya nilai *qc* dari kondisi sebelumnya.



Gambar 4. 217 Grafik *qbck* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay*



Gambar 4. 218 Grafik *qbck* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay*

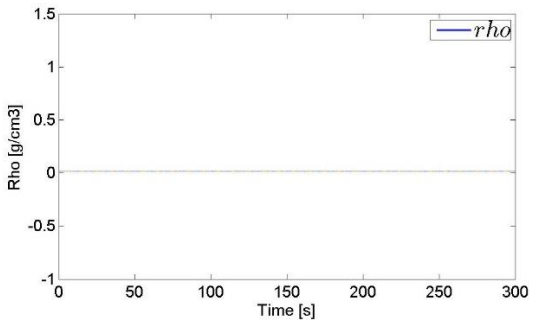


Gambar 4. 219 Grafik perbandingan *qbck* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *clay*

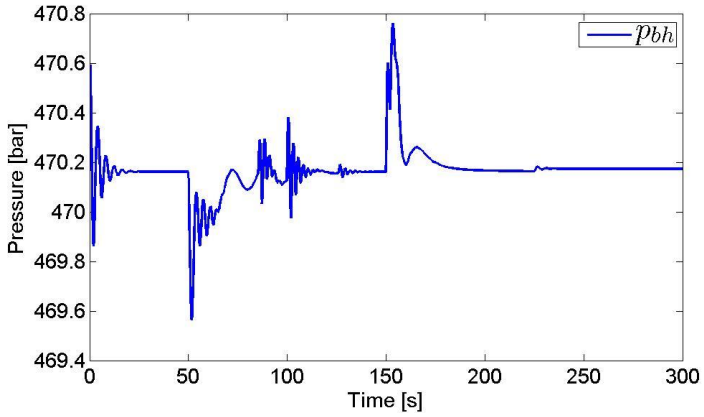
Dari gambar 4.217 – 4.219 dapat dianalisa bahwa nilai *qbck* akan cenderung akan mengalami penurunan, hal ini dikarenakan pengaruh perubahan nilai *pc*. Nilai *qbck* (*flowrate* pada *back pump*) untuk batuan *granite* sebesar 0.00315373535101678 m3/s sedangkan *qbck* setelah perubahan batuan *granite*e menuju *clay* bernilai 0.00315167466463505 m3/s. Terjadi penurunan *qbck* sebesar +/- 0.000002 m3/s. Semakin besar nilai *pc* akan diikuti dengan semakin kecil nilai *qbck*, adanya kenaikan nilai pada *pbit* dan *pc*,sehingga kurang memperlukan adanya *flowrate* tambahan dari *back pump* untuk membantu menaikkan serpihan batuan, sebaliknya *flowrate back pump* akan mengecil untuk menstabilkan *pbit*.

5. *Granite* menuju *Sandstone*

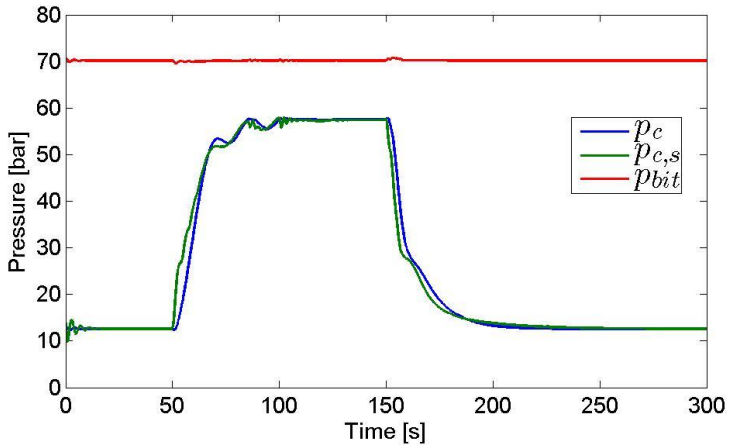
Setelah dilakukan simulasi sistem kontrol pada operasi *drilling* didapatkan data sebagai berikut :



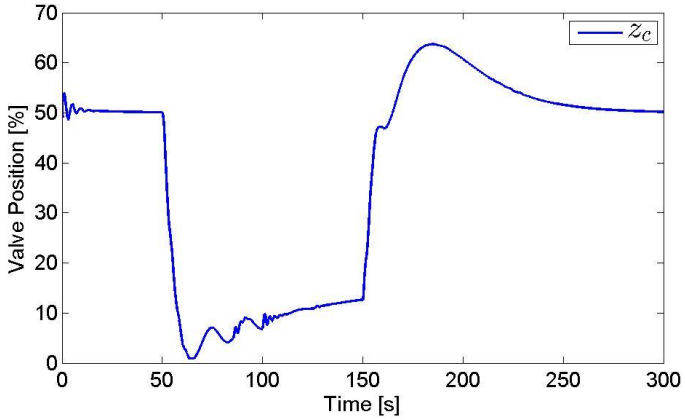
Gambar 4. 220 Grafik *density* campuran perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone*



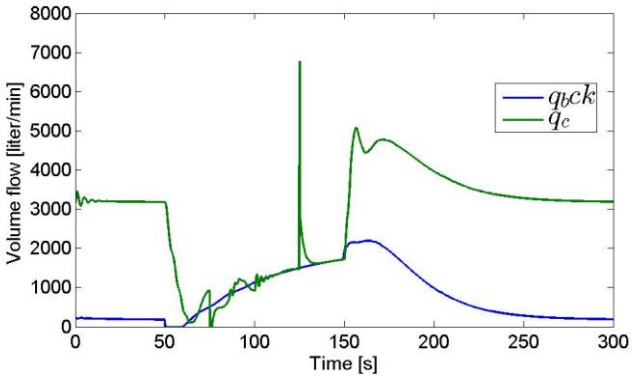
Gambar 4. 221 Grafik *pbit* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone*



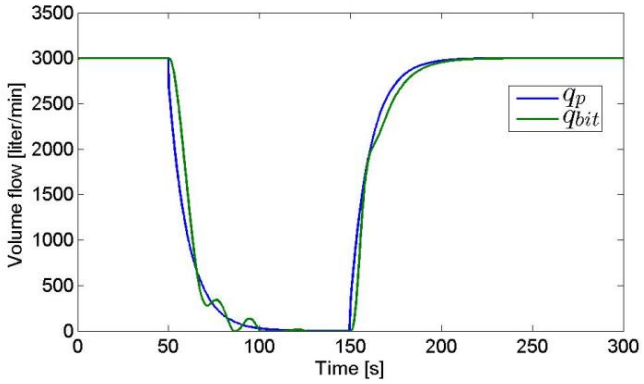
Gambar 4. 222 Grafik *pbit*, *pc* dan *pc setpoint* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone*



Gambar 4. 223 Grafik *zc* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone*



Gambar 4. 224 Grafik *qc* dan *qbck* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone*

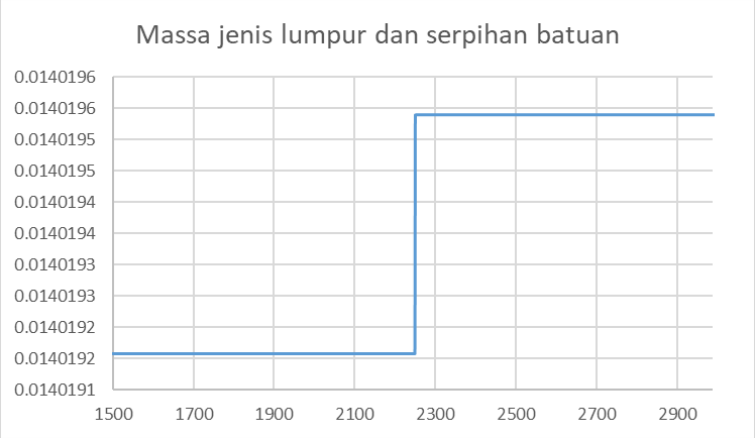


Gambar 4. 225 Grafik *qp* dan *qbit* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone*

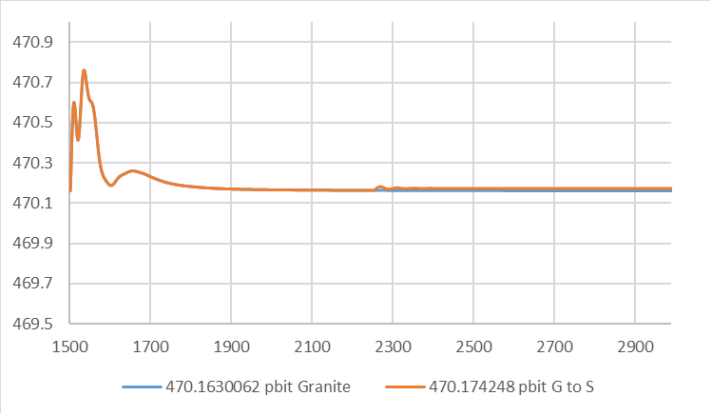
Grafik 4.220-4.225 menunjukkan hasil kontrol operasi *drilling* pada kondisi *pbit* naik dikarenakan perubahan massa jenis batuan dari *granite* menuju *sandstone*. Perubahan massa jenis batuan akan mempengaruhi perubahan *pbit*. Kontrol terhadap *pbit* akan merubah nilai *pressure* pada choke, perubahan *pressure* pada choke akan mempengaruhi perubahan nilai *zc*, *qc*, serta *qbck*. Nilai *qbit* dan *qp* konstan sebesar 3000 liter/min. Yang berarti nilai *disturbance* berupa perubahan massa jenis batuan tidak mempengaruhi besarnya nilai *pressure* dan *flowrate* pada *main pump* dikarenakan kesempurnaan penyaringan mud sebelum mud diinjeksikan kembali. Analisa lebih lanjut dilakukan pada waktu 150-300s, dimana diberikan disturbance perubahan massa jenis batuan pada waktu 225s, didapatkan hasil sebagai berikut :

a. Nilai *pbit* terhadap perubahan massa jenis batuan dan nilai *qp*

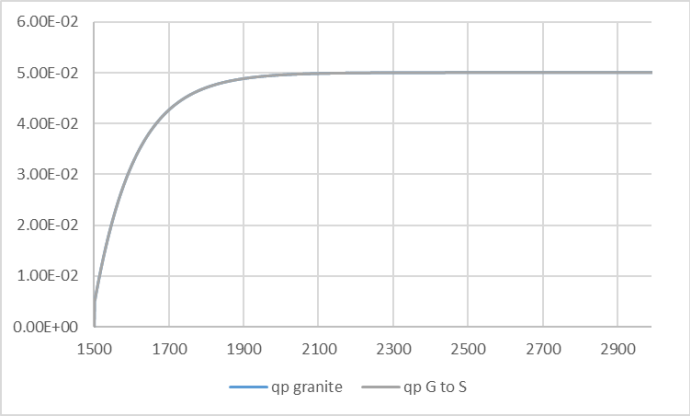
Dilakukan plot pada excel sebagai berikut :



Gambar 4. 226 Grafik *density* campuran saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone*



Gambar 4. 227 Grafik *pbit* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone*

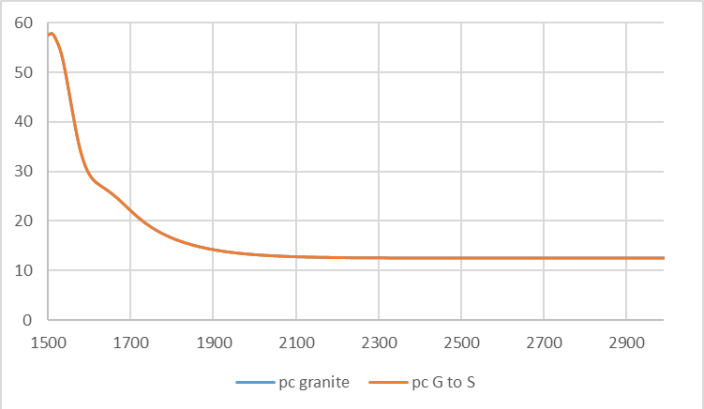


Gambar 4. 228 Grafik *qp* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone*

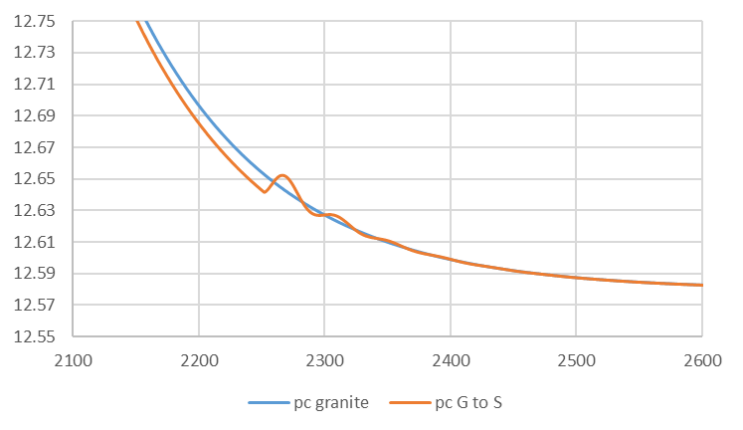
Dari gambar 4.142 dan 4.144 dapat diambil analisa ketika operasi drilling berlangsung hubungan antara massa jenis campuran lumpur dan serpihan dengan nilai *pressure* pada bit. Setelah diberikan perubahan massa jenis batuan dari *granite* menuju *sandstone* pada t=225s mempengaruhi nilai pada *pbit*, nilai *pbit* cenderung naik seiring dengan massa jenis campuran yang lebih besar. Selain itu nilai *qp* relative stabil namun mengalami penurunan dengan nilai *qp granite* sebesar 0.0499999161708012 dan *qp granite* menuju *sandstone* sebesar 0.0499999161574674. Oleh karena itu dilakukan pengontrolan terhadap variabel lain untuk menjaga nilai *pbit* tetap pada *setpoint* sebesar 470 bar.

b. Nilai *pc* terhadap perubahan *pbit*

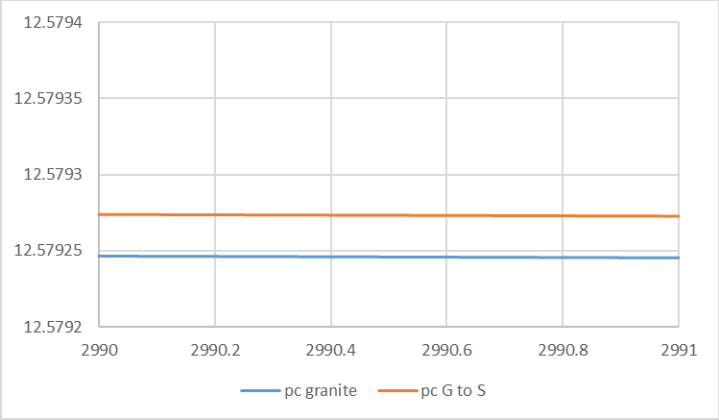
Dilakukan plot pada excel sebagai berikut :



Gambar 4. 229 Grafik *pc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone*



Gambar 4. 230 Grafik *pc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone*

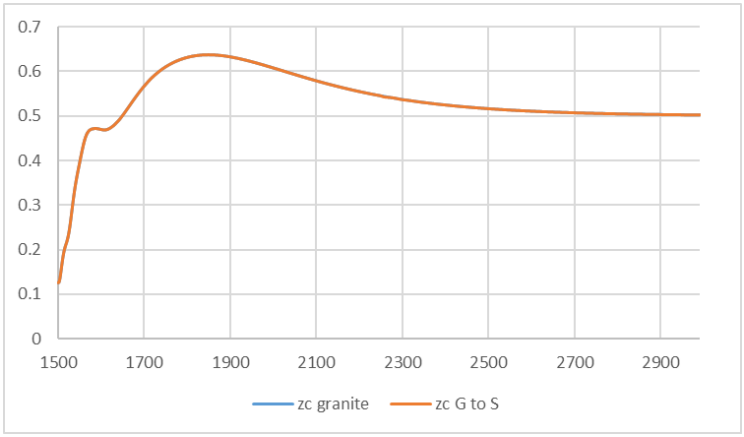


Gambar 4. 231 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone*

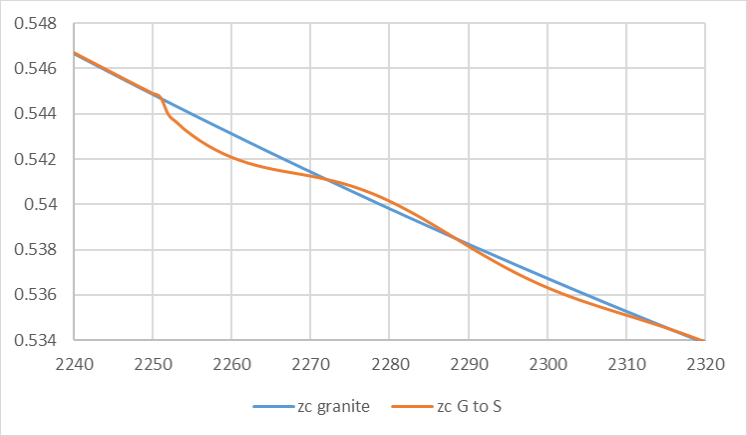
Dari gambar 4.229 dan 4.231 dapat diambil analisa ketika operasi drilling berlangsung nilai *pc* akan mengalami kenaikan untuk menjaga *pbit* tetap pada *setpoint*nya. Nilai *pc* untuk batuan *granite* sebesar 12.5792367121278 bar sedangkan *pc* setelah perubahan batuan *granite* menuju *sandstone* bernilai 12.5792640650584 bar. Terjadi kenaikan *pc* sebesar +/- 0.00003 bar. Kenaikan *pbit* yang dipengaruhi oleh perubahan massa jenis batuan akan memberikan perubahan nilai *pc* dan *pc setpoint*, hal ini dikarenakan adanya kontrol dan penyesuaian agar *pbit* tetap pada *setpoint* dan lumpur serta serpihan yang terangkut dapat terangkat.

c. Nilai *zc, qc,* dan *qbck* terhadap perubahan *pc*

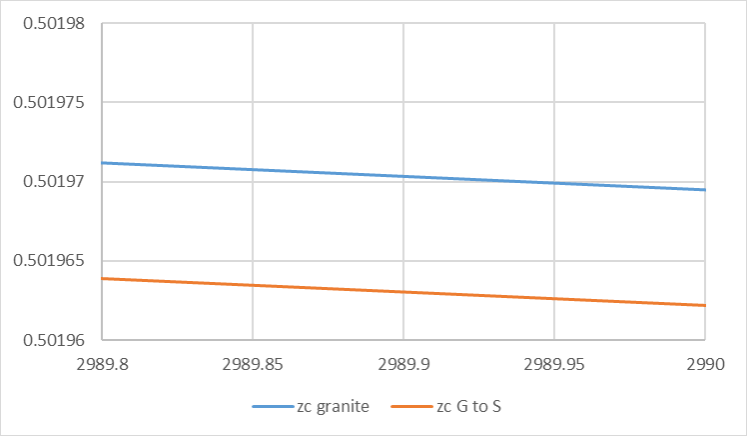
Dilakukan plot pada excel sebagai berikut :



Gambar 4. 232 Grafik *zc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone*

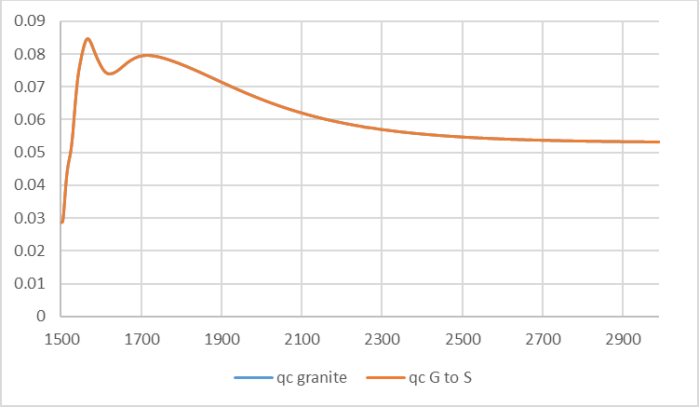


Gambar 4. 233 Grafik *zc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone*

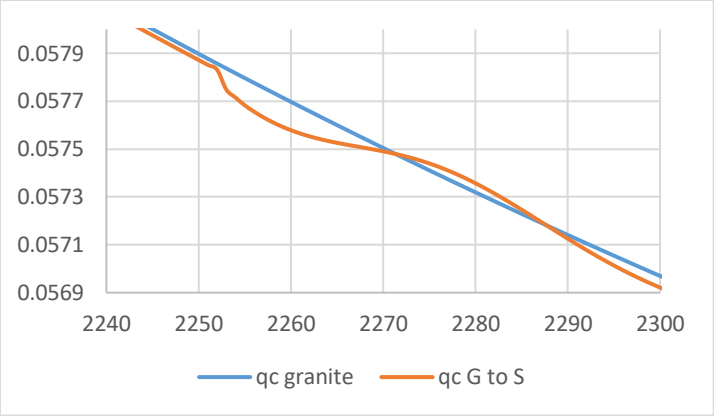


Gambar 4. 234 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone*

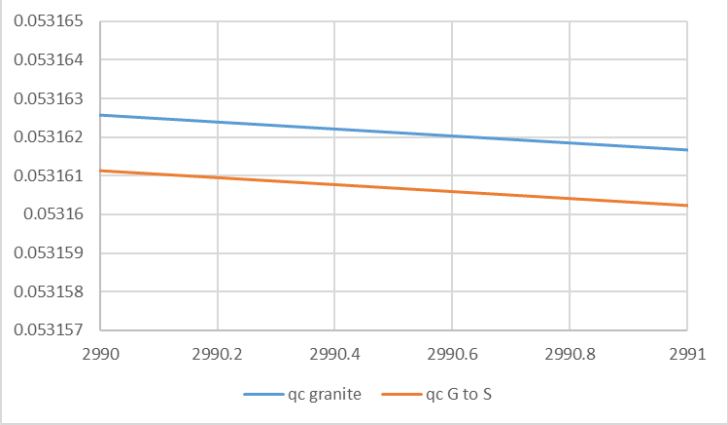
Dari gambar 4.232 – 4.234 dapat dianalisa bahwa nilai *zc* akan mengalami osilasi pada t=225s dan kemudian nilai *zc* akan cenderung mengalami penurunan, hal ini dikarenakan kenaikan nilai *pressure* pada chocke vlave. Nilai *zc* (bukaan *valve*) untuk batuan *granite* sebesar 0.501894548180805 atau sebesar 50.1894% sedangkan *pc* setelah perubahan batuan *granite* menuju *sandstone* bernilai 0.501887532244635 atau sebesar 50.1887% . Terjadi penurunan *zc* sebesar +/- 0.001%. Semakin besar nilai *pc* diperlukan bukaan *valve* (*zc*) yang lebih kecil daripada kondisi sebelumnya untuk mendapatkan nilai *pressure* yang lebih besar pula



Gambar 4. 235 Grafik *qc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone*

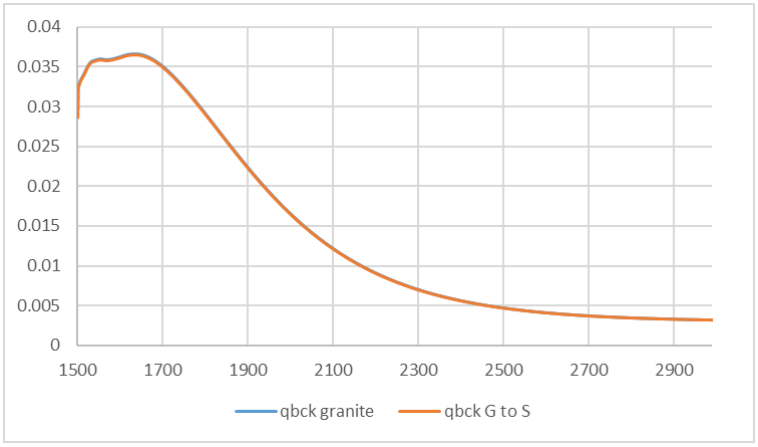


Gambar 4. 236 Grafik *qc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone*

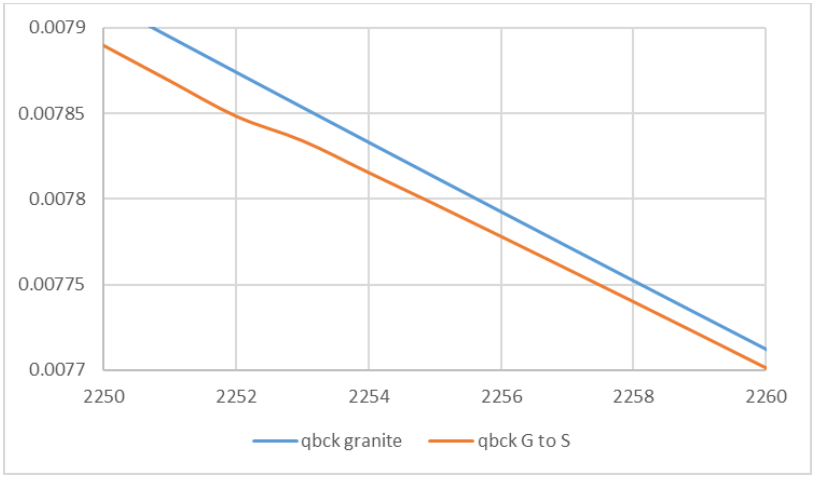


Gambar 4. 237 Grafik perbandingan *qc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone*

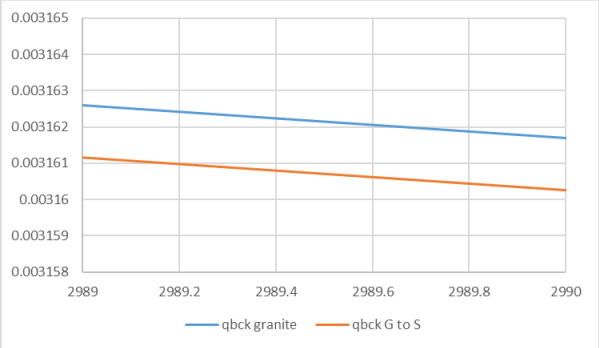
Dari gambar 4.235 – 4.237 dapat dianalisa bahwa nilai *qc* akan mengalami osilasi pada t=225s dan kemudian nilai *qc* akan cenderung akan mengalami penurunan, hal ini dikarenakan pengaruh perubahan massa jenis batuan dan kenaikan nilai *pc*. Nilai *qc* (*flowrate* pada *valve*) untuk batuan *granite* sebesar 0.0531545872887864 m3/s sedangkan *qc* setelah perubahan batuan *granite* menuju *sandstone* bernilai 0.0531531764699992 m3/s. Terjadi penurunan *qc* sebesar +/- 0.000001 m3/s. Semakin besar nilai *pc* akan mempengaruhi nilai *qc* dimana keduanya berbanding terbalik, yang bearti semakin besar nilai *pc* akan diikuti dengan semakin kecilnya nilai *qc* dari kondisi sebelumnya.



Gambar 4. 238 Grafik *qbck* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone*



Gambar 4. 239 Grafik *qbck* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone*

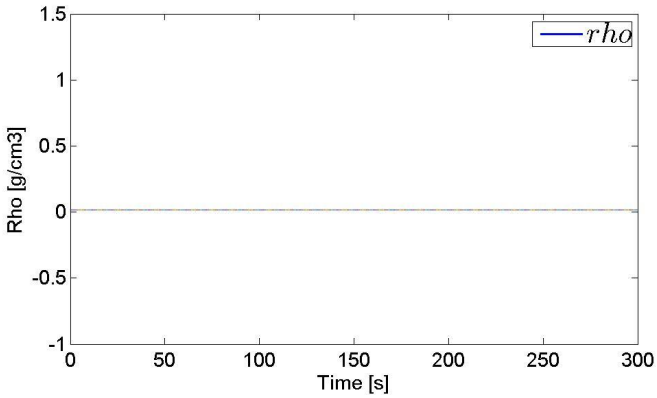


Gambar 4. 240 Grafik perbandingan *qbck* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *sandstone*

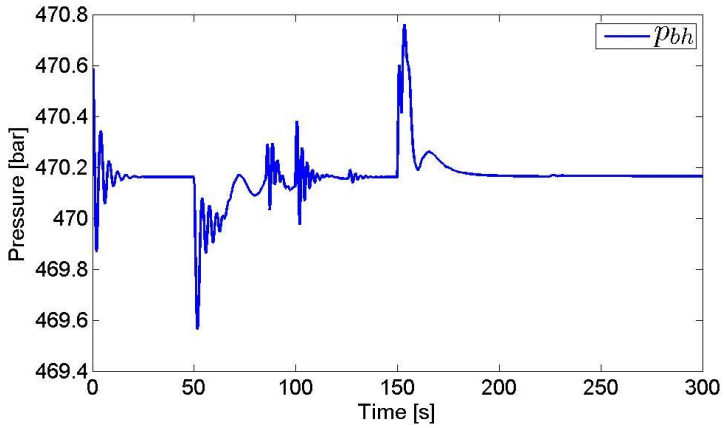
Dari gambar 4.238 – 4.240 dapat dianalisa bahwa nilai *qbck* akan cenderung akan mengalami penurunan, hal ini dikarenakan pengaruh perubahan nilai *pc*. Nilai *qbck* (*flowrate* pada *back pump*) untuk batuan *granite* sebesar 0.00315373535101678 m3/s sedangkan *qbck* setelah perubahan batuan *granite* menuju *sandstone* bernilai 0.00315232784192907 m3/s. Terjadi penurunan *qbck* sebesar +/- 0.000001 m3/s. Semakin besar nilai *pc* akan diikuti dengan semakin kecil nilai *qbck*, ini menandakan adanya kenaikan nilai pada *pbit* dan *pc*,sehingga *flowrate back pump* akan mengecil untuk menstabilkan *pbit*.

6. *Granite* menuju *Limestone*

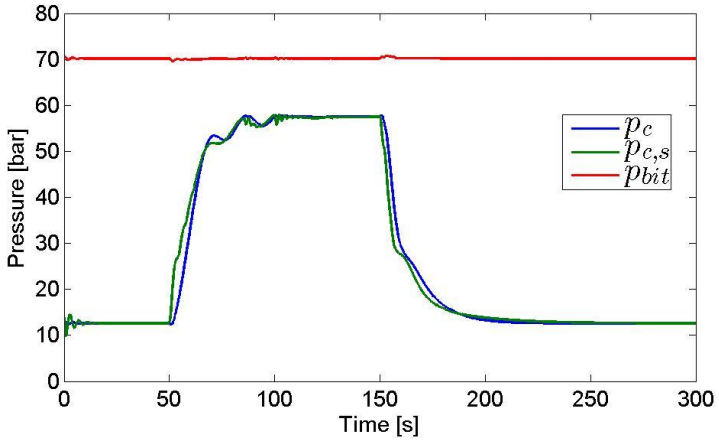
Setelah dilakukan simulasi sistem kontrol pada operasi *drilling* didapatkan data sebagai berikut :



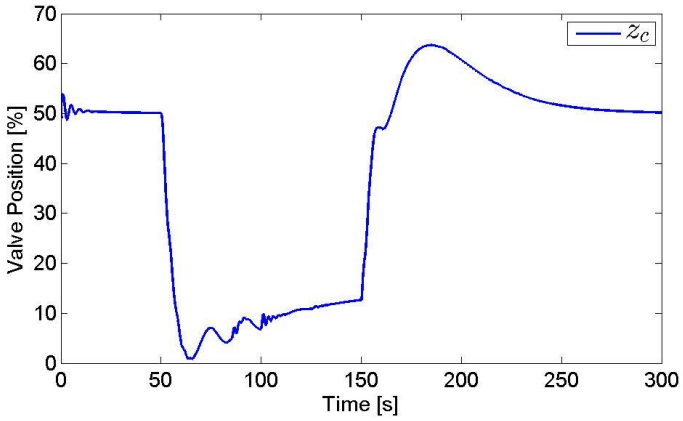
Gambar 4. 241 Grafik *density* campuran perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone*



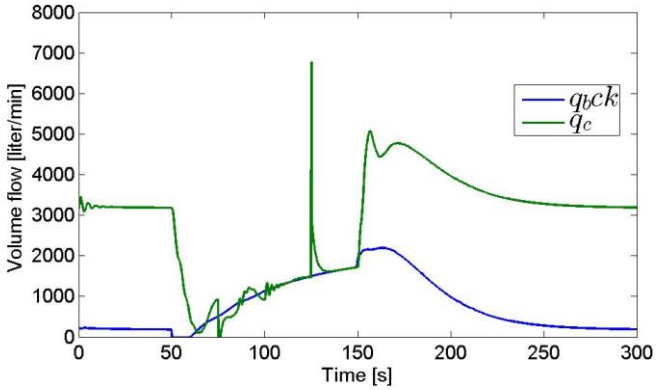
Gambar 4. 242 Grafik *pbit* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone*



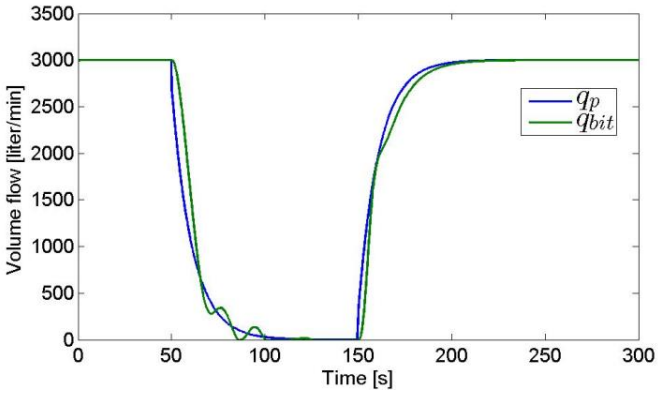
Gambar 4. 243 Grafik *pbit*, *pc* dan *pc setpoint* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone*



Gambar 4. 244 Grafik *zc* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone*



Gambar 4. 245 Grafik *qc* dan *qbck* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone*

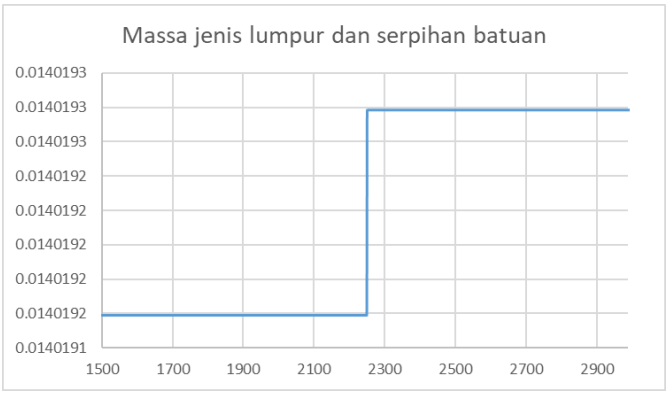


Gambar 4. 246 Grafik *qp* dan *qbit* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone*

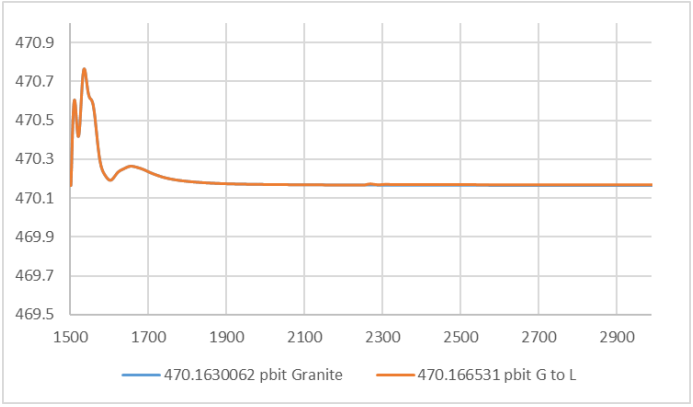
Grafik 4.241-4.246 menunjukkan hasil kontrol operasi *drilling* pada kondisi *pbit* naik dikarenakan perubahan massa jenis batuan dari *granite* menuju *limestone*. Perubahan massa jenis batuan akan mempengaruhi perubahan *pbit*. Kontrol terhadap *pbit* akan merubah nilai *pressure* pada choke, perubahan *pressure* pada choke akan mempengaruhi perubahan nilai *zc*, *qc*, serta *qbck*. Nilai *qbit* dan *qp* konstan sebesar 3000 liter/min. Yang berarti nilai *disturbance* berupa perubahan massa jenis batuan tidak mempengaruhi besarnya nilai *pressure* dan *flowrate* pada *main pump* dikarenakan kesempurnaan penyaringan mud sebelum mud diinjeksikan kembali. Analisa lebih lanjut dilakukan pada waktu 150-300s, dimana diberikan disturbance perubahan massa jenis batuan pada waktu 225s, didapatkan hasil sebagai berikut :

a. Nilai *pbit* terhadap perubahan massa jenis batuan dan nilai *qp*

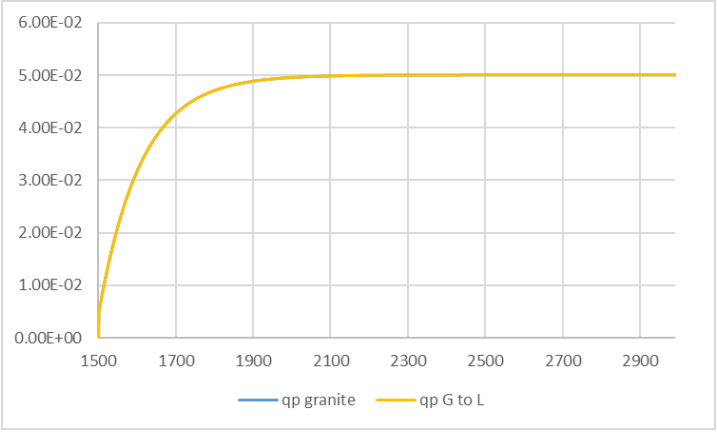
Dilakukan plot pada excel sebagai berikut :



Gambar 4. 247 Grafik *density* campuran saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone*



Gambar 4. 248 Grafik *pbit* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone*

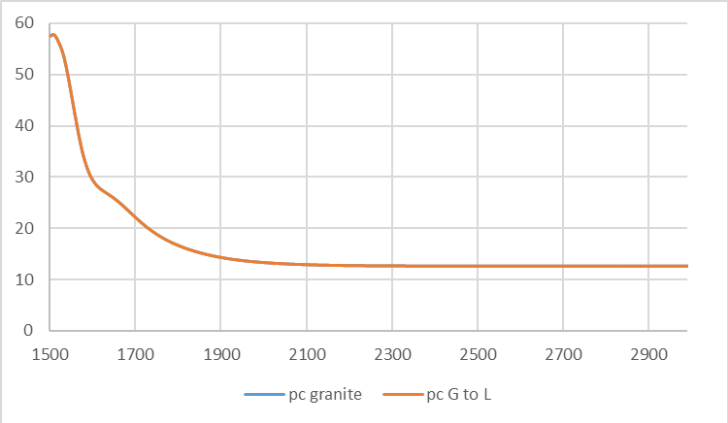


Gambar 4. 249 Grafik *qp* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone*

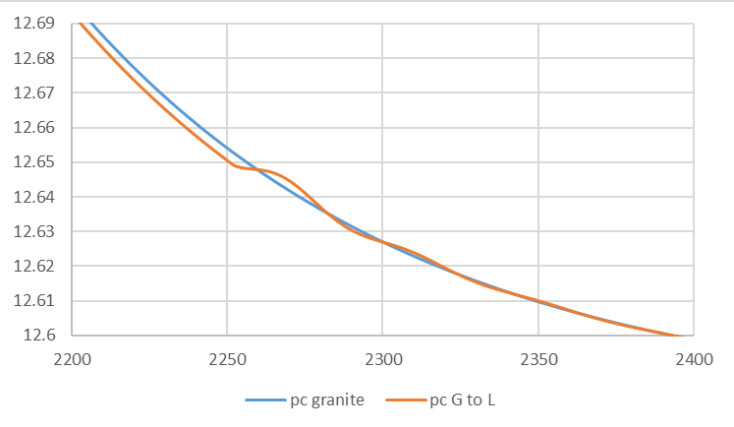
Dari gambar 4.247 dan 4.248 dapat diambil analisa ketika operasi drilling berlangsung hubungan antara massa jenis campuran lumpur dan serpihan dengan nilai *pressure* pada bit. Setelah diberikan perubahan massa jenis batuan dari *granite* meunju *limestone* pada t=225s mempengaruhi nilai pada *pbit*, nilai *pbit* cenderung naik seiring dengan massa jenis campuran yang lebih besar. Selain itu nilai *qp* relative stabil namun mengalami penurunan dengan nilai *qp granite* sebesar 0.0499999161708012 dan *qp granite* menuju *sandstone* sebesar 0.0499999161666215. Oleh karena itu dilakukan pengontrolan terhadap variabel lain untuk menjaga nilai *pbit* tetap pada *setpoint* sebesar 470 bar.

b. Nilai *pc* terhadap perubahan *pbit*

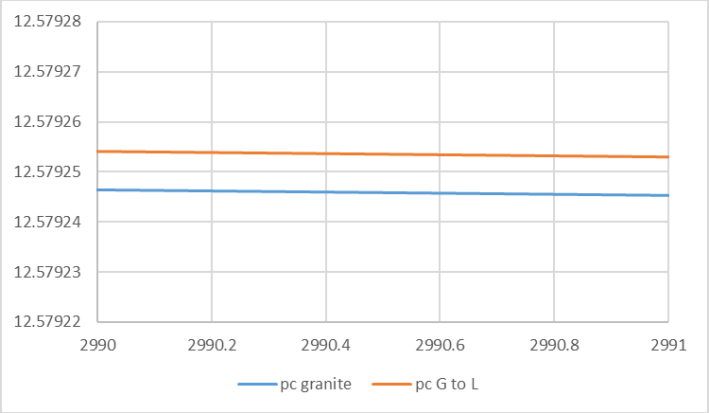
Dilakukan plot pada excel sebagai berikut :



Gambar 4. 250 Grafik *pc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone*



Gambar 4. 251 Grafik *pc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone*

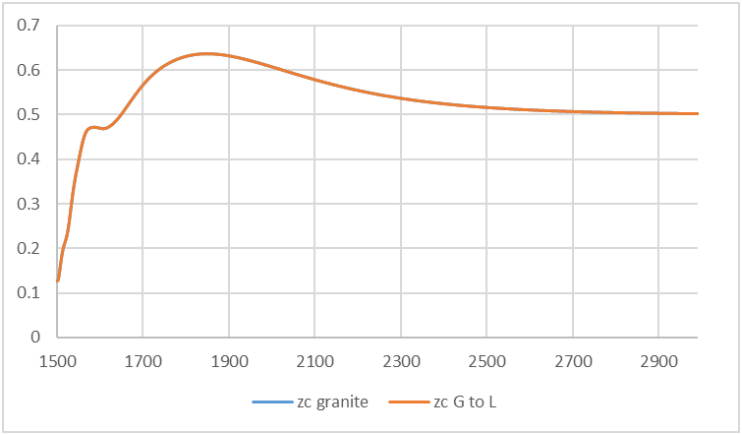


Gambar 4. 252 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone*

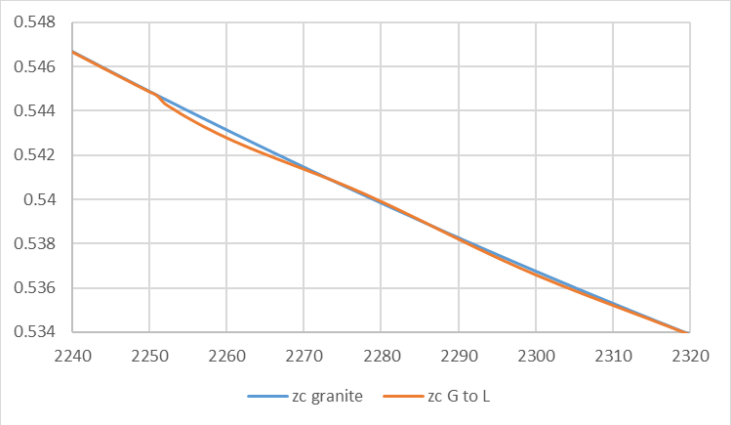
Dari gambar 4.250 dan 4.252 dapat diambil analisa ketika operasi drilling berlangsung nilai *pc* akan mengalami kenaikan untuk menjaga *pbit* tetap pada *setpoint*nya. Nilai *pc* untuk batuan *granite* sebesar 12.5792367121278 bar sedangkan *pc* setelah perubahan batuan *granite* menuju *limestone* bernilai 12.5792443921759 bar. Terjadi kenaikan *pc* sebesar +/- 0.00001 bar. Kenaikan *pbit* yang dipengaruhi oleh perubahan massa jenis batuan akan memberikan perubahan nilai *pc* dan *pc setpoint*, hal ini dikarenakan adanya kontrol dan penyesuaian agar *pbit* tetap pada *setpoint* dan lumpur serta serpihan yang terangkut dapat terangkat.

c. Nilai *zc, qc,* dan *qbck* terhadap perubahan *pc*

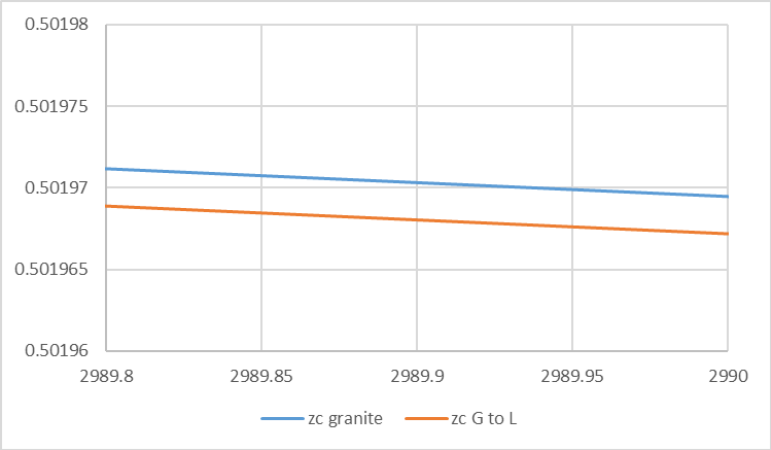
Dilakukan plot pada excel sebagai berikut :



Gambar 4. 253 Grafik *zc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone*

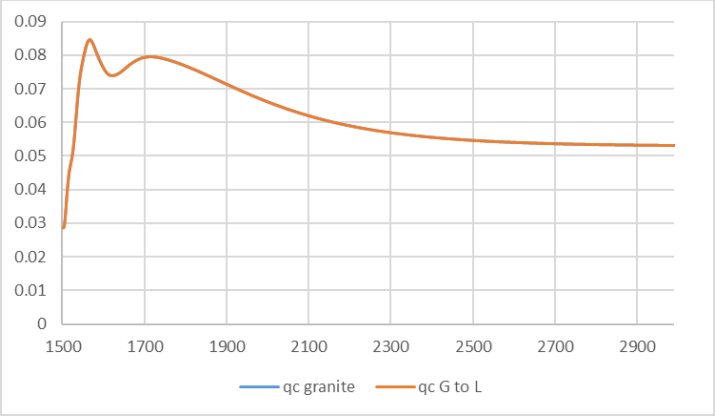


Gambar 4. 254 Grafik *zc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone*

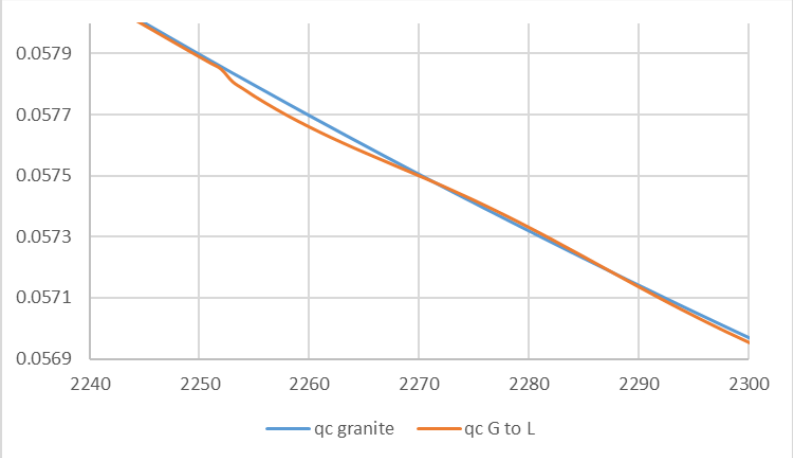


Gambar 4. 255 Grafik perbandingan *zc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone*

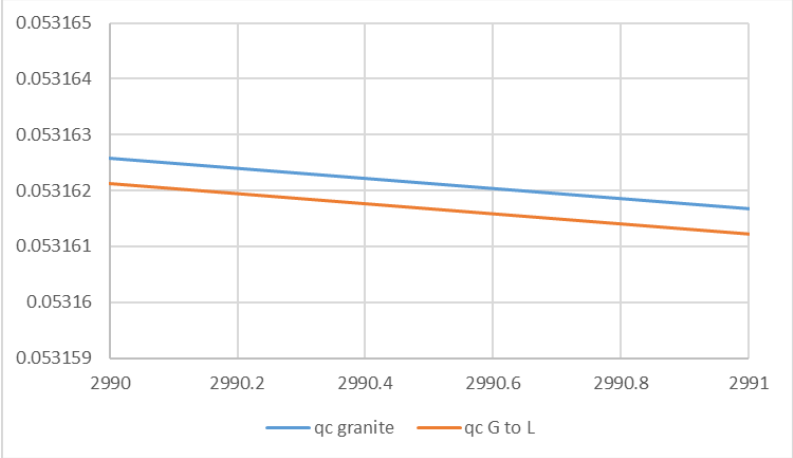
Dari gambar 4.253 – 4.255 dapat dianalisa bahwa nilai *zc* akan mengalami osilasi pada t=225s dan kemudian nilai *zc* akan cenderung mengalami penurunan, hal ini dikarenakan kenaikan nilai *pressure* pada chocke vlave. Nilai *zc* (bukaan *valve*) untuk batuan *granite* sebesar 0.501894548180805 atau sebesar 50.1894% sedangkan *pc* setelah perubahan batuan *granite* menuju *limestone* bernilai 0.501892348649993 atau sebesar 50.1892% . Terjadi penurunan *zc* sebesar +/- 0.0001%. Semakin besar nilai *pc* diperlukan bukaan *valve* (*zc*) yang lebih kecil daripada kondisi sebelumnya untuk mendapatkan nilai *pressure* yang lebih besar pula



Gambar 4. 256 Grafik *qc* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone*

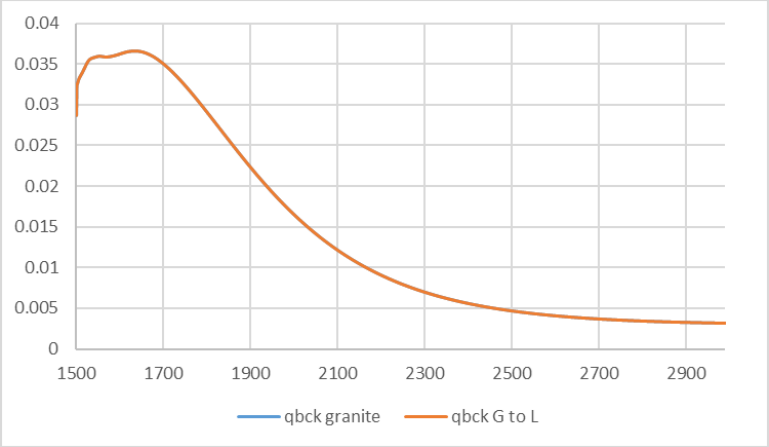


Gambar 4. 257 Grafik *qc* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone*

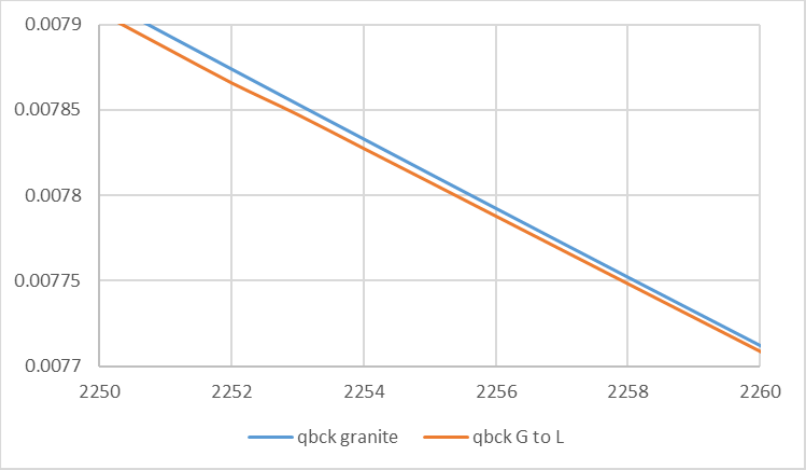


Gambar 4. 258 Grafik perbandingan *qc* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju limeston

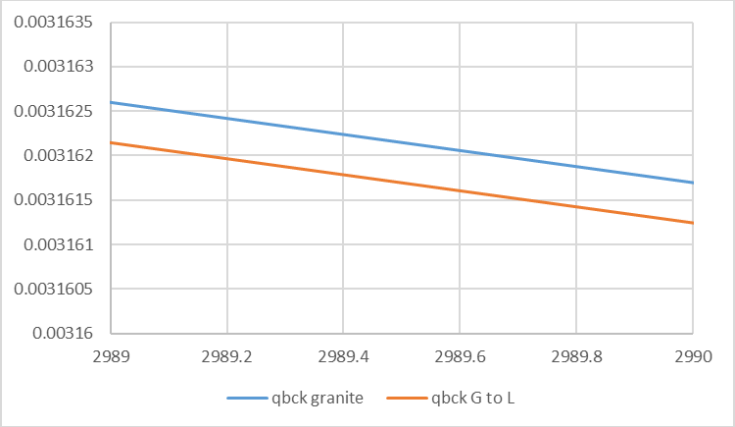
Dari gambar 4.256 – 4.258 dapat dianalisa bahwa nilai *qc* akan mengalami osilasi pada t=225s dan kemudian nilai *qc* akan cenderung akan mengalami penurunan, hal ini dikarenakan pengaruh perubahan massa jenis batuan dan kenaikan nilai *pc*. Nilai *qc* (*flowrate* pada *valve*) untuk batuan *granite* sebesar 0.0531545872887864 m3/s sedangkan *qc* setelah perubahan batuan *granite* menuju *limestone* bernilai 0.0531541430069459 m3/s. Terjadi penurunan *qc* sebesar +/- 0.0000004 m3/s. Semakin besar nilai *pc* akan mempengaruhi nilai *qc* dimana keduanya berbanding terbalik, yang bearti semakin besar nilai *pc* akan diikuti dengan semakin kecilnya nilai *qc* dari kondisi sebelumnya.



Gambar 4. 259 Grafik *qbck* saat t=150-300s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone*



Gambar 4. 260 Grafik *qbck* saat t=225s dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone*



Gambar 4. 261 Grafik perbandingan *qbck* saat batuan *clay* dengan perubahan massa jenis batuan *granite* menuju *limestone*

Dari gambar 4.259 – 4.261 dapat dianalisa bahwa nilai *qbck* akan cenderung akan mengalami penurunan, hal ini dikarenakan pengaruh perubahan nilai *pc*. Nilai *qbck* (*flowrate* pada *back pump*) untuk batuan *granite* sebesar 0.00315373535101678 m3/s sedangkan *qbck* setelah perubahan batuan *granite* menuju *limestone* bernilai 0.00315329210678366 m3/s. Terjadi penurunan *qbck* sebesar +/- 0.0000005 m3/s. Besarnya nilai *pc* akan mempengaruhi nilai *qbck*, semakin besar nilai *pc* akan diikuti dengan semakin kecil nilai *qbck*, ini menandakan adanya kenaikan nilai pada *pbit* dan *pc*,sehingga kurang memperlukan adanya *flowrate* tambahan dari *back pump* untuk membantu menaikkan serpihan batuan, sebaliknya *flowrate back pump* akan mengecil untuk menstabilkan *pbit*

4.6 Analisa Hasil Simulasi Sistem Kontrol pada Operasi *Drilling*

Setelah dilakukan simulasi terhadap 12 variansi perubahan massa jenis batuan didapatkan 2 kondisi, yaitu kondisi gangguan *pbit* turun dan kondisi gangguan *pbit* naik. Perubahan *pbit* disebabkan oleh perubahan massa jenis batuan, perubahan massa jenis batuan akan berdampak langsung terhadap jumlah fraksi batuan yang dihasilkan dari *cutting bi*t dan dinding batuan. Serpihan batuan akan bercampur dengan *mud* sehingga membentuk *mud* campuran dengan massa jenis yang baru baru. Nilai dari massa jenis *mud* campuran akan mempengaruhi nilai dari *pbit*. Perubahan nilai pada *Pbit* akan merubah nilai *pc* dan *pc setpoint*. Perubahan pada

nilai *pc* akan mengakibatkan nilai *zc* dan *qbck* (*manipulated variable*) akan berubah ubah bergantung pada nilai *pc*. Sedangkan nilai *qc* akan berbanding terbalik dengan nilai *pc*. Maka didapatkan hasil sebagai berikut :

a. Kondisi gangguan *pbit* turun

Ketika gagguan *Pbit* turun dikarenakan ada gangguan perubahan massa jenis batuan dari massa jenis batuan yang lebih kecil ke massa jenis batuan yang lebih tinggi. Hal ini disebabkan karenanya ROP, nilai ROP pada saat pengeboran batuan dengan massa jenis batuan yang lebih rendah cenderung lebih besar, ROP yang besar akan menghasilkan sisa *cutting* batuan berupa serpihan batuan yang semakin banyak. Serpihan yang semakin banyak akan membuat nilai massa jenis *mud* bertambah. Sehingga perubahan massa jenis batuan dari massa jenis yang lebih rendah ke tinggi akan memberikan gangguan nilai *pbit* turun. *Pbit* yang turun akan memberika pengaruh pada *pc*. Seperti pada simulasi perubahan batuan yang telah dilakukan dari 6 variansi perubahan batuan ketika kondisi *pbit* turun maka nilai *pc* akan ikut mengalam penurunan. Nilai *pc* yang turun akan memberikan respon pada nilai *zc* (besarnya bukaan *valve*) serta *qbck* (*flowrate back pump*) untuk naik. Nilai *qc* (*flowrate* pada choke *valve*) akan mengalami kenaikan seiring turunnya nilai *pressure* pada choke *valve*. Dari 6 simulasi sistem kontrol yang telah dilakukan dapat dikatakan kontrol mampu mengatasi perubahan massa jenis batuan. Kontrol terhadap nilai *zc* dan *qbck* telah sesuai dengan perubahan nilai *pc* dikarenakan penurunan *pbit*.

b. Kondisi gangguan *pbit* naik

Ketika gangguan *pbit* naik dikarenakan ada gangguan perubahan massa jenis batuan dari massa jenis batuan yang lebih tinggi ke massa jenis batuan yang lebih rendah. Hal ini disebabkan karenanya ROP, nilai ROP pada saat pengeboran batuan dengan massa jenis batuan yang lebih tinngi cenderung lebih kecil, ROP yang kecil akan mengahsilkan sisa *cutting* batuan berupa serpihan batuan yang semakin sedikit pula. Serpihan yang semakin sedikit akan membuat nilai massa jenis mud berkurang. Sehingga perubahan massa jenis batuan dari massa jenis yang lebih tinggi ke rendah akan memberikan

gangguan nilai *pbit* naik. *Pbit* yang naik akan memberika pengaruh pada *pc*. Seperti pada simulasi perubahan batuan yang telah dilakukan dari 6 variansi perubahan batuan ketika kondisi *pbit* naik maka nilai *pc* akan ikut mengalami kenaikan. Nilai *pc* yang naik akan memberikan respon pada nilai *zc* (besarnya bukaan *valve*) serta *qbck* (*flowrate back pump*) untuk turun. Sedangkan nilai *qc* (*flowrate* pada choke *valve*) akan mengalami penurunan seiring naiknya nilai *pressure* pada choke *valve*. Dari 6 simulasi sistem kontrol yang telah dilakukan dapat dikatakan kontrol mampu mengatasi perubahan massa jenis batuan. Kontrol terhadap nilai *zc* dan *qbck* telah sesuai dengan perubahan nilai *pc* dikarenakan kenaikan *pbit*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisa tugas akhir yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

a. Pemodelan kondisi operasi *drilling* untuk mengatasi perubahan massa jenis batuan diawali dengan dilakukanlah optimasi *ROP* kembali terhadap munculnya perubahan massa jenis batuan. Didapatkan hasil optimisasi *ROP* untuk batuan *clay*, *sandstone*, *limestone* dan granit masing masing 7.8111 bar, 6.5731 bar, 5.329 bar, dan 4.9006 bar. Nilai *ROP* tiap batuan akan berhubungan dengan fraksi batuan yang dihasilkan dari perputaran *bit*. Serpihan akan ikut terangkut bersama *mud* dalam proses pembersihan *bottom hole*, penambahan serpihan pada *mud* akan menaikkan nilai dari massa jenis *mud*. Nilai massa jenis *mud* awal adalah 1400 kg/m^3 sedangkan nilai massa jenis *mud* campuran akibat serpihan batuan *clay*, *sandstone*, *limestone* dan *granite* masing masing memiliki nilai 1401.97186643153 kg/m^3, 1401.95399033976 kg/m^3, 1401.92783583179 kg/m^3, serta 1401.91588506096 kg/m^3.

b. Metode kontrol yang digunakan adalah metode PI dengan penambahan feedforward. Dalam metode kontrol ini dilakukan pengontrolan terhadap *pressure* pada *bit* atau *bottom hole* akibat perubahan massa jenis batuan. Perubahan massa jenis batuan akan merubah nilai *pressure* pada *bottom hole*. Dikarenakan perubahan dari nilai *pressure* pada *bottom hole* dengan 2 kondisi yaitu *Pressure* pada bit (*Pbit*) mengalami kenaikan dan *pressure* pada *bit* (*Pbit*) mengalami penurunan, akan memberikan perubahan terhadap nilai *flowrate* pada *main pump* (*qp*), *pressure choke setpoint* (*pc setpoint*) serta nilai dari *pressure chocke* (*pc*), *flowrate* pada *choke valve* (*qc*) serta besarnya bukaan pada *choke valve* (*zc*) dan *flowrate back pump (qbck)*. Perubahan yang terjadi dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 5. 1 Nilai Variabel dengan Perubahan *Pbit*

No	Variabel	Deskripsi	Unit	*Pbit* Naik	*Pbit* Turun
1	*qp*	*Flowrate Main pump*	*liter/min*	Turun	Naik
2	*pc, s*	*Pressure choke valve setpoint*	*bar*	Naik	Turun
3	*pc*	*Pressure choke valve*	*bar*	Naik	Turun
4	*zc*	Bukaan *choke valve*	*%*	Turun	Naik
5	*qc*	*Flowrate choke valve*	*liter/min*	Turun	Naik
6	*qbck*	*Flowrate back pump*	*liter/min*	Turun	Naik

Dari 12 simulasi didapatkan nilai perubahan yang relative kecil dari batuan satu ke batuan lainya. Dengan ini dapat disimpulkan bahwa disturbance perubahan massa jenis batuan tidak terlalu berpengaruh pada operasional drilling, namun tetap perlu diperhatikan dan dilakukan pengontrolan. Dari hasil yang telah diperoleh dapat dikatakan metode kontrol PI dengan penambahan *feedforward* dapat mengatasi *disturbance* berupa perubahan massa jenis batuan pada operasi kondisi drilling.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya mengenai topik ini yaitu dapat menggunakan metode optimisasi dengan fungsi objektif dan penambahan kontrol yang lain, sehingga diharapkan mampu menghasilkan sistem *drilling* yang lebih aman, efisien, dan menguntungkan.

DAFTAR PUSTAKA

A. D. C. f. O. O. Operations, "ADCO Drilling Manual," 2010, pp. Hal 9-10.

A. Junaidi, "Internet of Things, Sejarah, Teknologi dan Penerapannya," *Jurnal Ilmiah Teknologi Informasi Terapan*, vol. 1, p. 64, 2015.

Dasar-dasar Teknik Pengeboran, Jakarta: Kementrian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia, 2014.

N.N, Hydraulics, An Overview: -, -. 2008

C. Gatlin, Drilling and Well Completion, Department of Petroleum Engineering The University of Texas: Englewood Cliffs, 2006.

I. IDM, Introduction to Drilling Fluids, 2007 Slumberger.

T. S. T. Centre, Drilling Practices Workshop : Student Reference Material & Workbook, Buku Paduan Training PT. Transocean, 2009.

R. F. Mitchel, "Fundamental of Drilling Engineering," *Society of Petroleum Engineers*, 2011.

M. T. E, Process Control, McMaster University, 2000.

D. Erik-Halgestad, The Drilling Process : A Plantwide Control Approach. Faculty of Natural Sciences and Technology Department of Chemichal Engineering-NTNU, Norwegia, 2010.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

Table A.1 – continued from previous page

Symbol	Description	Unit
p_c	Choke pressure	bar
p_f	Formation pressure	bar
q_{bit}	Mud flow rate at drill bit	$liter/s$
q_{in}	Main mud pump flow rate	$liter/s$
q_s	Feed of cuttings	m^3/s
R	Rate of penetration	m/hr
R_0	Drillability constant	m/hr
T	Torque	kN/m
t_c	Total connection time	$hours$
t_c^0	Single connection time	$hours$
t_d	Drilling time	$hours$
t_d^0	Drill bit life-time	$hours$
t_t	Total trip time	$hours$
t_t^0	Single trip time	$hours$
v_{sl}	Particle slip velocity	m/s
v_a	Annulus velocity	m/s
V_a	Annulus volume	m^3
V_d	Internal volume of drill string	m^3
V_s	Volume of drilled particle	m^3
v_T	Transport velocity	m/s
W	Weight on bit	$tons$
x_c	Fraction of cuttings in mud	%
z_c	Choke valve opening	%

Table A.1: Nomenclature

Symbol	Description	Unit
β	Bulk modulus	bar
μ	Viscosity	$Pa \cdot s$
ρ_f	Effective mud density	kg/m^3
ρ / ρ_m	Mud density	kg/m^3
ρ_s	Formation density	kg/m^3
θ_1	Annulus friction parameter	$kg/m^4\,s$
θ_2	Drill string friction parameter	kg/m^7
A_a	Cross-sectional area of annulus	m^2
D	Well depth	m
d_b	Drill bit diameter	m
d_H	Hydraulic diameter	m
d_i	Drill string inner diameter	m
d_p	Drilled particle diameter	m
d_s	Drill string outer diameter	m
F_{bo}	Buoyant force	N
F_c	Cutting force	N
F_g	Gravitational force	N
F_j	Hydraulic jet impact force	N
f	Friction factor	-
g	Acceleration due to Earth gravity	m/s^2
$J(u,d)$	Objective function value	$hours$
K	Bit life-time constant	$hours$
K_c	Valve flow constant	m^2
k_c^0	Specific cutting force constant	$N/ton\,m^2$
k_c	Specific cutting force	N/m^2
M	Mass coefficient	$10^5\,kg/m^4$
N_{Re}	Reynolds number	-
N	Drill string rotational speed	min^{-1}
P	Power	kW
p_{bh}	Bottom hole pressure	bar

LAMPIRAN B

fobdrilling.m

```
function ROP=fobdrilling(x)
%optimized variable
WOB=x(1); %weight on bit (tons)
RPM=x(2) %rotary speed (RPM)
qmud=x(3); %flow rate lumpur (L/s)
pc=x(4); %pressure choke (bar)

%Parameter drilling model
rho = 1400; %density lumpur (kg/m3)
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 outter diameter (m)
D=3000; %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=x(1)/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*((x(1)/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-x(1)/db)/(wdbmax-71.433); %bit life-
time
```

```
cost=D*((1/ROP)+(tt0/(ROP*td0))); %cost drilling
end
```

GAdrill.m

```
clear all
clc

Dimension = 4;                      % dimensi diganti sesuai dengan
jumlah variabel yang dioptimasi
UB = [200 200 50 100 ];             % Upper Bounds diganti sesuai
dengan constraint fungsi objektif
LB = [10 100 0.001 0.001 ];         % Lower Bounds diganti sesuai
dengan constraint fungsi objektif

Npop = 200;
Maxit = 100;
el = 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);
Individu1 = sort_fit(round((1-el)*Npop+1):Npop,:);
remain = sort_fit(round(el*Npop)+1:Npop,:);
X = Individu1;
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
```

Simulation_pru.m

```
%Script for simulating performance of an automated pressure
control
%structure using a simple dynamic pressure model.
%Script needs to use external functions calcf_pru.m.

clear all
close all
```

```
clc

% set up simulation
% stepsize
dT = 0.1;
% time vector
time=0:dT:300;
% sistem parameters
Va = 128.45;
Vd = 17.02;
VaDot = 0;
betaa = 20000;
betad = 20000;
M = 8382;
%massa jenis mud
rhoa = 0.0140;
rhod = 0.0140;
g = 9.81;
theta1= 900;
theta2= 60000;
hBit = 3000;
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 = 470;
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 setpoint
pbitref = 470;
Kppcref = 4;
Kipcref = 10;
eipcref = pcref0/Kipcref;

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

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

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

%PI controller to keep hpipe at a setpoint
hpiperef = 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)];

%Set inputs
    if time(i)<50 %P TRB (50)

    qpref = 3000/60000;
    hpiperef = 3000;
    %pbit(i) = 470; %dr TRB

    elseif time(i)<75
    %Ramp down pump
    qpref = 0;
    zcref = 0.15;
    %pbit(i)=469;

    elseif time(i)<125
    %Trip out drill string
    hpiperef = 2973;
    %pbit(i) = 470;
```

```
    elseif time(i)<150
    %%Trip in drill string
    hpiperef = 3000;
    %pbit(i)= 440;

    elseif time(i)<225
    qpref = 3000/60000;
    zcref = 0.5;

    elseif time(i)>=225
    %%Ramp up pump
    %pbit(i)= 470.179446763799;
    qpref = 3000/60000;
    zcref = 0.5;
    pbitref = 470.179446763799;
    %pbit(i) = 430;
% %
    end

%Controllers
if i >=2

%Cascade controller to keep pbit at setpoint by changing pcref
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)); %line
141-142 dr TRB
%qpref(i) = qpref;

%Controller to keep qp at setpoint, 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 setpoint, with switch
ehpipe = hpiperef - 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 setpoint 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_pru] =
calcf_pru(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_pru + 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;

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('Position',[1 scrsz(4)/2 scrsz(3)/2 scrsz(4)/2])
plot(time,pc,time,pcref,time,pbit-400)
```

```
h(1)=legend('$p_c$','$p_{c,s}$','$p_{bit}$','Location','Best'); %
di TRB gaada -400
xlabel('Time [s]');
ylabel('Pressure [bar]')
set(h,'Interpreter','latex','FontSize',legFontSize)
set(gcf, 'PaperPositionMode', 'auto')
% Use screen size
print -djpeg cascadecontrol % ? diganti -

figure('Position',[1 scrsz(4)/2 scrsz(3)/2 scrsz(4)/2])
plot(time,zc*100)
h(1)=legend('$z_c$');
%axis([0 600 0 100]); % TRB 600 jd 200
ylabel('Valve Position [%]');
xlabel('Time [s]');
set(h,'Interpreter','latex','FontSize',legFontSize)
set(gcf, 'PaperPositionMode', 'auto') % Use screen size
print -djpeg cascadecontrol2

figure('Position',[1 scrsz(4)/2 scrsz(3)/2 scrsz(4)/2])
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 cascadecontrol3

figure('Position',[1 scrsz(4)/2 scrsz(3)/2 scrsz(4)/2])
plot(time,qbck*60000,time,qc*60000)
h(1)=legend('$q_bck$','$q_c$','Location','Best'); %trb gapake $

%axis([0 600 0 6000]);  % line 254-280 gadipake TRB
ylabel('Volume flow [liter/min]');
xlabel('Time [s]');
set(h,'Interpreter','latex','FontSize',legFontSize)
set(gcf, 'PaperPositionMode', 'auto') % Use screen size
print -djpeg cascadecontrol4

figure('Position',[1 scrsz(4)/2 scrsz(3)/2 scrsz(4)/2])
plot(time,-hpipe)
h(1)=legend('$h_{bit}$');
%axis([0 200 3010 2960]);
xlabel('Time [s]');
ylabel('Height [m]')
set(h,'Interpreter','latex','FontSize',legFontSize)
set(gcf, 'PaperPositionMode', 'auto') % Use screen size
print -djpeg cascadecontrol5

figure('Position',[1 scrsz(4)/2 scrsz(3)/2 scrsz(4)/2])
plot(time,pbit)
h(1)=legend('$p_{bh}$');
%axis([0 200 0 500]);
xlabel('Time [s]');
ylabel('Pressure [bar]')
```

```
set(h,'Interpreter','latex','FontSize',legFontSize)
set(gcf, 'PaperPositionMode', 'auto') % Use screen size
print -djpeg cascadecontrol6

figure('Position',[1 scrsz(4)/2 scrsz(3)/2 scrsz(4)/2])
plot(time,rhoa)
h(1)=legend('$rho$');
%axis([0 300 0 0,5]);
xlabel('Time [s]');
ylabel('Rho [g/cm3]')
set(h,'Interpreter','latex','FontSize',legFontSize)
set(gcf, 'PaperPositionMode', 'auto') % Use screen size
print -djpeg cascadecontrol7
```

calcf_pru.m

```
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 sistem
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 postitif
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
```

$pbh = pressure\ bottom\ hole$

$pc = pressure\ pada\ choke\ valve\ karena\ aliran\ fluida$

$\theta_1 q_{bit} = pressure\ pada\ drill\ pipe\ karena\ aliran\ fluida$

$\rho g D = tekanan\ hidrostatik$

Dengan parameter berikut :

Parameter	Deskripsi	Nilai	Unit
$\boldsymbol{pc}$	*Pressure choke*	13	bar
$\boldsymbol{qbit}$	*Flowrate pada drill bit*	50	Liter/m
$\boldsymbol{D}$	*Depth of well*	3000	M
$\boldsymbol{g}$	*gravitas*	9.8	m/s^2
$\boldsymbol{\theta_1}$	*Annulus friction parameter*	900	kg/m^4s
$\boldsymbol{\rho}$	*Drilling mud density*	0,0140	10^5kg/m3

Perhitungan :

$pbh = p_c + \theta_1 q_{bit} + \rho g D$

$pbh = 13 + 900x0.05 + 1400x10^{-5}x9.8x3000$

$pbh = 469.6\ bar$ (pembulatan 470 bar)

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS

Penulis bernama lengkap Muhammad Ghofur R yang akrab disapa Ghopur. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Terlahir di kota Jember pada tanggal 1 Juni 1998 dari ayah bernama Mochammad Sainollah dan ibu bernama Alfiah. Penulis menempuh Pendidikan di SDN Jember Lor 3 dan lulus pada tahun 2011. Setelah itu penulis menempuh Pendidikan di SMPN 2 Jember lulus pada tahun 2013,. dan SMAN 1 Jember lulus pada tahun 2016. Pada tahun yang sama penulis terdaftar sebagai mahasiswa di Departemen Teknik Fisika ITS. Selama aktif menjadi mahasiswa penulis bergabung dalam organisasi intra kampus Himpunan Mahasiswa Teknik Fisika sebagai Staff Departemen Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa. Panitia ITS EXPO serta GERIGI ITS serta Peserta LKMM Pra TD - TL . Penulis terus mengembangkan minat dalam bidang keprofesian di Barunastra ITS sebagai Electrical Division 2017/2019 Penulis mempunyai pengalaman kerja praktik di PT Dirgantara Indonesia pada Juli-Agustus 2019. Mempelajari mengenai instrumentasi, kontrol dan proses di industri oil and gas, serta PT. Bagi pembaca yang memiliki kritik, saran atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini, dapat menghubungi penulis melalui email : dicokotantak@gmail.com.