TUGAS AKHIR - TF 181801

PERANCANGAN SISTEM PENGENDALIAN SUPLAI UDARA BERTEKANAN KE *COMBUSTION SECTION* MENGGUNAKAN *LOGIC SOLVER* PADA *COMBUSTION SECTION GAS TURBINE GENERATOR* (GTG) DI PT. SAKA INDONESIA PANGKAH LIMITED

MAULANA ERRYAN YAVIANDA
NRP. 02311640000078

Dosen Pembimbing:
Dr. Suyanto, S.T., M.T.

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

Halaman ini sengaja dikosongkan

FINAL PROJECT - **TF 181801**

DESIGNING PRESSURE AIR PRESSURE CONTROL SYSTEM TO COMBUSTION SECTION USING LOGIC SOLVER IN COMBUSTION SECTION GAS TURBINE GENERATOR (GTG) AT PT. SAKA INDONESIA PANGKAH LIMITED

MAULANA ERRYAN YAVIANDA
NRP. 02311640000078

Supervisors:
Dr. Suyanto, S.T., M.T.

Department Of Engineering Physics
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama	: Maulana Erryan Yavianda
NRP	: 02311640000078
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 "**PERANCANGAN SISTEM PENGENDALIAN SUPLAI UDARA BERTEKANAN KE *COMBUSTION SECTION* MENGGUNAKAN *LOGIC SOLVER* PADA *COMBUSTION SECTION GAS TURBINE GENERATOR* (GTG) DI PT. SAKA INDONESIA PANGKAH LIMITED**" 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, 23 Agustus 2020

Yang membuat pernyataan,

Maulana Erryan Yavianda

NRP. 02311640000078

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

PERANCANGAN SISTEM PENGENDALIAN SUPLAI UDARA BERTEKANAN KE *COMBUSTION SECTION* MENGGUNAKAN *LOGIC SOLVER* PADA *COMBUSTION SECTION GAS TURBINE GENERATOR* (GTG) DI PT. SAKA INDONESIA PANGKAH LIMITED

Oleh:

Maulana Erryan Yavianda

NRP. 02311640000078

Surabaya, 23 Agustus 2020

Menyetujui,

Pembimbing

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

NIP. 197111131995121002

Mengetahui,

Kepala Departemen

Teknik Fisika FTI RS-ITS

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

NIP. 197111131995121002

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

PERANCANGAN SISTEM PENGENDALIAN SUPLAI UDARA BERTEKANAN KE *COMBUSTION SECTION* MENGGUNAKAN *LOGIC SOLVER* PADA *COMBUSTION SECTION GAS TURBINE GENERATOR* (GTG) DI PT. SAKA INDONESIA PANGKAH LIMITED

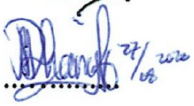
TUGAS AKHIR

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

Oleh:

Maulana Erryan Yavianda
NRP. 02311640000078

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Suyanto, S.T., M.T (Pembimbing)
2. Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc. (Ketua Penguji)
3. Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. (Penguji I)
4. Dr. Dhany Arifianto, S.T., M.Eng.  (Penguji II)
5. Moh Kamalul Wafi, S.T., MSc.DIC (Penguji III)

SURABAYA
2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERANCANGAN SISTEM PENGENDALIAN SUPLAI UDARA BERTEKANAN KE *COMBUSTION SECTION* MENGGUNAKAN *LOGIC SOLVER* PADA *COMBUSTION SECTION GAS TURBINE GENERATOR* (GTG) DI PT. SAKA INDONESIA PANGKAH LIMITED

Nama	**:**	**Maulana Erryan Yavianda**
NRP	**:**	**02311640000078**
Departemen	**:**	**Teknik Fisika FTIRS - ITS**
Dosen Pembimbing	**:**	**Dr. Suyanto, S.T., M.T.**

ABSTRAK

Berdasarkan data lapangan Gas Turbin Generator Centaur 40 yang telah didapatkan dari PT. Saka Indonesia Pangkah Limited diketahui bahwa gas turbin generator tersebut memiliki *combustion chamber* yang menghasilkan temperature pembakaran yang mendekati temperature maksimal yang dapat ditampung di *combustion chamber* yaitu1573 kelvin dimana untuk kondisi normal temperature maksimal yang dapat dicapai adalah 1211 kelvin. Oleh karena itu perlu diberikan sistem pengendalian laju aliran massa udara dan suplai bahan bakar berdasarkan data aktual yang berada di lapangan sehingga suplai udara dan bahan bakar dikendalikan supaya temperatur di *combustion chamber* tetap terjaga dibawah 1573 kelvin. Sistem pengendalian laju aliran massa udara menggunakan aktuator berupa *control valve* FV 7076 dimana pada tugas akhir ini menggunakan pengendalian dengan fungsi sebab akibat yaitu *logic solver*. *Logic solver* memberikan sinyal kendali agar aliran massa udara tetap konstan di nilai maksimal yang dihasilkan oleh kompresor 7.783 Kg/s. *Logic solver* sebagai pembuat keputusan berdasarkan masukan berupa *temperature transmitter* dimana apabila bacaan pada *temperature transmitter* berada di rentan 4 mA hingga 20 mA maka pembakaran di *combustion chamber* masih dalam kondisi yang aman namun apabila bacaan *temperature transmitter* melebihi itu maka akan di berikan sinyal kendali melalui *logic solver* agar suplai udara dan bahan bakar tetap di kondisi yang aman agar tempera maksimamaka laju aliran massa bahan bakar akan dikendalikan dengan mode pengendalian proportional integral (PI) agar pembakaran di *combustion chamber* sesuai *set point.*

Kata Kunci: GTG, *combustion chamber*, *logic solver*

Halaman ini sengaja dikosongkan

DESIGNING PRESSURE AIR PRESSURE CONTROL SYSTEM TO COMBUSTION SECTION USING LOGIC SOLVER IN COMBUSTION SECTION GAS TURBINE GENERATOR (GTG) AT PT. SAKA INDONESIA PANGKAH LIMITED

Name	**:**	**Maulana Erryan Yavianda**
NRP	**:**	**02311640000078**
Department	**:**	**Engineering Physics FTIRS - ITS**
Supervisors	**:**	**Dr. Suyanto, S.T., M.T.**

ABSTRACT

Based on field data from the Centaur 40 Gas Turbine Generator that has been obtained from PT. Saka Indonesia Pangkah Limited is known that the gas turbine generator has a combustion chamber that produces a combustion temperature that is close to the maximum temperature that can be accommodated in the combustion chamber which is 1573 kelvin where for normal conditions the maximum temperature that can be achieved is 1 211 kelvin. Therefore it is necessary to provide a system of controlling the flow rate of air mass and fuel supply based on actual data in the field so that the air supply and fuel are controlled so that the temperature in the combustion chamber is maintained below 1573 kelvin. The air mass flow rate control system uses an actuator in the form of a control valve FV 7076 which in this final project uses a control with a cause and effect function that is logic solver. Logic solver provides a control signal so that the mass flow of air remains constant at the maximum value generated by the compressor 7,783 Kg / s. Logic solver as a decision maker based on input in the form of a temperature transmitter where if the reading at the temperature of the transmitter is in the range of 4 mA to 20 mA then combustion chamber combustion is still in a safe condition, but if the transmitter temperature reading exceeds it, it will be given a control signal through the logic solver so that the air supply and fuel remain in safe conditions so that the temperature does not exceed the maximum limit and if the temperature is still below the maximum limit then the mass flow rate of the fuel will be controlled by proportional integral control mode (PI) so that combustion in the combustion chamber matches the set point

Keywords: GTG, *combustion chamber, air-fuel ratio, logic solver*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya serta shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW sehingga dapat terselesaikannya tugas akhir beserta laporan tugas akhir yang berjudul "**PERANCANGAN SISTEM PENGENDALIAN SUPLAI UDARA BERTEKANAN KE *COMBUSTION SECTION* MENGGUNAKAN *LOGIC SOLVER* PADA *COMBUSTION SECTION GAS TURBINE GENERATOR* (GTG) DI PT. SAKA INDONESIA PANGKAH LIMITED**".

Penulis telah banyak memperoleh bantuan dari berbagai pihak dalam penyelesaian tugas akhir dan laporan tugas akhir ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Mama, Papa dan Keluarga Besar atas segala, doa, perhatian, serta dukungan moril dan materiil yang telah diberikan.
2. Bapak Dr. Suyanto, S.T., M.T. selaku Ketua Departemen Teknik Fisika ITS yang telah memberikan ilmu, bimbingan serta sarana dan prasarana selama menempuh pendidikan di Teknik Fisika ITS.
3. Bapak Dr. Suyanto, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah dengan sabar memberikan petunjuk, ilmu, motivasi serta bimbingan dalam pengerjaan tugas akhir ini.
4. Seluruh dosen Teknik Fisika ITS atas segala ilmu, bimbingan, petunjuk, dan nasihat yang sangat bermanfaat serta seluruh civitas akademika Teknik Fisika ITS, terima kasih atas segala bantuan dan kerjasamanya.
5. Seluruh teman seperjuangan dalam tugas akhir terima kasih atas bantuan dan kerjasamanya.
6. Agresya Shafana Putri, atas motivasi dan semangat yang selalu diberikan kepada saya dalam mengerjakan tugas akhir ini.
7. Seluruh teman-teman asisten Lab. Workshop Instrumentasi, terimakasih.
8. Seluruh teman–teman mahasiswa Departemen Teknik Fisika ITS angkatan 2016 terima kasih telah menjadi teman seperjuangan dalam menuntut ilmu.
9. Teman-teman kelas A yang selalu menjadi teman belajar dari semester 1 sampai semester 8.

10. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terimakasih atas bantuannya

Penulis sadar bahwa penulisan laporan tugas akhir ini masih terdapat kekurangan. Namun, semoga laporan ini dapat memberikan kontribusi yang berarti dan menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembaca, keluarga besar Teknik Fisika ITS khususnya, dan civitas akademika ITS pada umumnya. Semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat sebagai referensi pengerjaan laporan tugas akhir bagi mahasiswa lainnya.

Magetan, 24 Juni 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL ..... **i**

COVER PAGE ..... **iii**

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI ..... **v**

LEMBAR PENGESAHAN ..... **vii**

LEMBAR PENGESAHAN ..... **ix**

ABSTRAK ..... **xi**

ABSTRACT ..... **xiii**

KATA PENGANTAR ..... **xv**

DAFTAR ISI ..... **xvii**

DAFTAR GAMBAR ..... **xix**

DAFTAR TABEL ..... **xxi**

BAB I PENDAHULUAN **1**

1.1 Latar Belakang 1

1.2 Rumusan Masalah 2

1.3 Tujuan Penelitian 2

1.4 Batasan Msalah 3

1.5 Sistematika Laporan 3

BAB II TINJAUAN PUSTAKA **5**

2.1 Gas Turbin 5

2.2 Kompresor (*compression section*) 6

2.3 Ruang Pembakaran (*combustion chamber*) 7

2.4 Sistem Pengendalian Suplai udara ke *combustion chamber* 11

2.5 Mode Pengendalian PI 15

2.6 *Controller* Berbasis *Logic Solver* 16

BAB III METODOLOGI PENELITIAN 19

3.1 Identifikasi Parameter *Compression Section* 19

3.2 Identifikasi Parameter *Combustion Chamber* 20

3.3 Pemodelan Sistem Pengendalian Suplai Udara ke *Combustion Chamber* .. 21

3.4 Perancangan *Sistem* Pengendalian Suplai Udara ke *Combustion Chamber* 28

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 33

5.1 Kesimpulan 37

5.2 Saran 37

DAFTAR PUSTAKA 39

LAMPIRAN A 41

LAMPIRAN B 43

LAMPIRAN C 45

BIODATA PENULIS 64

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Gambar gas turbin pada industri, dengani izin dari Siemens Energy, Inc. 5

Gambar 2.2 Diagram tekanan-volume pada gas turbin di industry dengan izin dari 6

Gambar 2. 3 Skema dari sebuah ruang bakar [3] 8

Gambar 2. 4 Contoh Film Pendingin Diterapkan pada Tabung Api Pembakaran**.** [3] 9

Gambar 2. 5 Diagram blok sistem pengendalian suplai udara dan bahan bakar . 11

Gambar 2. 6 *Control Valve* 12

Gambar 2. 7 *Thermocouple* Tipe K 14

Gambar 2. 8 Karakteristik Respon Sistem [13] 16

Gambar 2. 9 Tabel Kebenaran dalam *Stateflow* [15] 17

Gambar 3. 1 *Flowchart* Alur Penelitian 19

Gambar 3. 2 Pemodelan *Compression Section* pada Simulink 22

Gambar 3. 3 Pemodelan Combustion Chamber Menggunakan Aplikasi Simulink 23

Gambar 3. 4 Pemodelan Control Valve Suplai Udara Menggunakan Aplikasi Simulink 25

Gambar 3. 5 Pemodelan *Control Valve* Suplai Bahan Bakar Menggunakan Aplikasi Simulink 27

Gambar 3. 6 Pemodelan *Temperature Transmitter* pada Keluaran *Combustion* . 28

Gambar 3. 7 Diagram blok Sistem Pengendalian Udara ke *Combustion Chamber* 29

Gambar 3. 8 Tabel Aksi dan Tabel Kondisi pada *Logic Solver* 30

Gambar 4. 1 Kurva Reaksi Validasi Temperature *Combustion Chamber* pada Sistem Pengendalian Suplai Udara ketika Temperatur 1211 Kelvin 33

Gambar 4. 2 Kurva Reaksi Sstem Pengendalian Suplai Udara dengan Temperatur 1573 Kelvin. 35

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Identifikasi Parameter *Compression Section*.....20
Tabel 3. 2 Identifikasi Parameter *Combustion Chamber* 20
Tabel 3. 3 Data lapangan Flow Control Valve pada Compression Section Menuju *CombustionChamber* 24
Tabel 3. 4 Data lapangan Flow Control Valve bahan bakar Menuju Combustion26
Tabel 4. 1 Karakteristik Respon Sistem ketika Temperatur 1121 Kelvin…….34
Tabel 4. 2 Karakteristik Respon Sistem ketika Temperatur 1573 Kelvin……...36

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Gas turbine generator (GTG) memiliki 3 buah *section*: *compression section*, *combustion chamber* dan turbin. Pada *combustion chamber* terdapat proses pembakaran bahan bakar dan proses pendinginan menggunakan udara yang dihasilkan dari *compression section dengan* presentase udara yang digunakan untuk pembakaran (*primary air)* 70-75% dan untuk pendinginan (*secondary air)* 20-25% [1]. Rasio udara dan bahan bakar telah di setting pada nilai AFR (*air to fuel* ration tertentu) untuk menggerakan turbin akan tetapi jika suplai udara dan bahan bakar tidak sesuai akan menimbulkan dampak rasio udara dan bahan bakar tidak lagi memenuhi AFR sehingga berdampak pada kualitas kalor yang dihasilkan karena semakin tinggi tekanan menuju *combustion chamber* maka nyala api akan semakin meningkat [2]. Rendahnya suplai udara berdampak terhadap proses pembakaran di *combustion chamber,* dimana ketika kurangnya massa udara yang dibutuhkan untuk pembakaran akan mengakibatkan bahan bakar tidak terbakar dengan sempurna dibagian dalam *combustion chamber* [3]. Disisi lain metal pada bagian *combustion chamber* mampu meleleh pada suhu $1573\ kelvin$ [4]. Oleh karena itu diperlukan pengaturan temperature pada *combustion chamber*. Untuk menganstisipasi terjadinya hal tersebut maka di perlukan aksi untuk memanipulasi suplai udara dari *compression section* ke ruang bakar dengan mengatur bukaan *control valve* sehingga menghasilkan *air-fuel ratio* yang optimal.

Sehingga pada tugas akhir ini akan dilakukan rancangan suplai udara dengan memanipulasi udara di *control valve* agar dapat mengendalikan suplai udara dari *compression section* menuju *combustion chamber* apabila laju aliran massa udara yang dihasilkan tidak stabil dikarenakan perubahan daya kompresor [5]. Controller yang dipergunakan pada sistem pengendalian suplai udara menuju *combustion chamber* harus dapat melogika nilai optimum pembakaran natural gas yaitu dengan nilai *air-fuel ratio* maksimal 17.12 [3]. Pada P.T Saka Indonesia Pangkah Limited, *control valve* memiliki sistem pengendalian dengan menggunakan PID *controller*. Oleh sebab itu controller untuk tugas akhir ini akan mempergunakan mode yang

berbeda yaitu *logic solver* (sebuah algoritma yang dibangun atas dasar data record kondisi operasi di *combustion chamber* dan kondisi operasi di compression section). *Logic solver* berfungsi untuk mengendalikan *control valve* suplai udara guna mengatur laju aliran massa udara yang dihasilkan oleh *compression section* dan *control valve* suplai bahan bakar dimana *air-fuel ratio* maksimalnya adalah 17.12 antara bahan bakar dengan laju aliran massa udara agar temperature pembakaran yang dihasilkan untuk menggerakan turbin dapat mencapai nilai optimal dan temperature pembakaran yang dicapai pada *combustion chamber* tidak melebihi batas maksimal yaitu 1573 kelvin. Controller berbasis logic solver mempunyai *Data Based* (*Knowledge Based*) yang dibangun dari data *record* dan data hasil wawancara dengan operator yang berpengalaman, sehingga didapatkan langkah untuk memanipulasi besarnya suplai udara dan bahan bakar ke *combustion chamber* melalui aksi manipulasi di *control valve*. Dengan dirancanganya sistem pengendalian suplai udara ke *combustion chamber* berbasis *logic solver* diharapkan dapat mengoptimalakan pembakaran pada *combustion chamber* dan menjadi *safety* pada *combustion chamber*.

1.2 Rumusan Masalah

Dari paparan latar belakang diatas maka permasalahan pada tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana merancang controller berbasis logic solver pada system pengendalian suplai udara?
2. Bagaimana kinerja system pengendalian berbasis logic solver dari hasil simulasi?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang ada didapatkan tujuan dari tugas akhir ini adalah:

1. Mampu merancang *controller* berbasis *logic solver* pada sistem pengendalian suplai udara.
2. Mampu mengetahui kinerja hasil dari simulasi atas rancangan system pengendalian berbasis *logic solver*.

1.4 Batasan Msalah

Adapun Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Data *properties* udara dari *inlet compression section* menuju *combustion chamber* diperoleh dari PT. Saka Indonesia Pangkah Limited.
2. Gas Turbine Generator berada di PT. Saka Indonesia Pangkah Limited.
3. Perancangan sistem pengendalian suplai udara untuk memeuhi *fuel-air ratio* pada *combustion chamber.*
4. Untuk mengetahui kinerja sistem pengendalian suplai udara ke *combustion chamber* dengan menggunakan pengendalian *logic solver* maka digunakan pemodelan *simulink* pada *software* matlab.
5. Enthalpy dan temperature dianggap konstan.

1.5 Sistematika Laporan

Laporan tugas akhir ini terdiri dari lima bab dengan dilengkapi daftar pustaka sebagai sumber penulisan laporan tugas akhir ini. Secara umum, sistematika laporan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. BAB I PENDAHULUAN

   Bab ini berisikan tentang latar belakang pembuatan tugas akhir serta rumusan masalah, tujuan, Batasan masalah dan sistematika laporan itu sendiri.
2. BAB II TEORI PENUNJANG

   Bab ini berisikan tentang penjelasan secara umum serta persamaan model matematik dari gas turbin generator, *pressure transmitter, sleeve valve,* dan *combustion chamber.*
3. BAB III METODOLOGI PENELITIAN

   Bab ini berisikan tentang metodologi penelitian dalam merancang pengendalian *supply* udara bertekanan menuju *ombustion chamber* menggunakan *logic solver* dari awal hingga mendapatkan hasil yang diinginkan.
4. BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

   Bab ini berisikan tentang analisa data dan pembahasan dari hasil metodologi penelitian yang telah dilakukan sesuai dengan BAB III.
5. BAB V PENUTUP

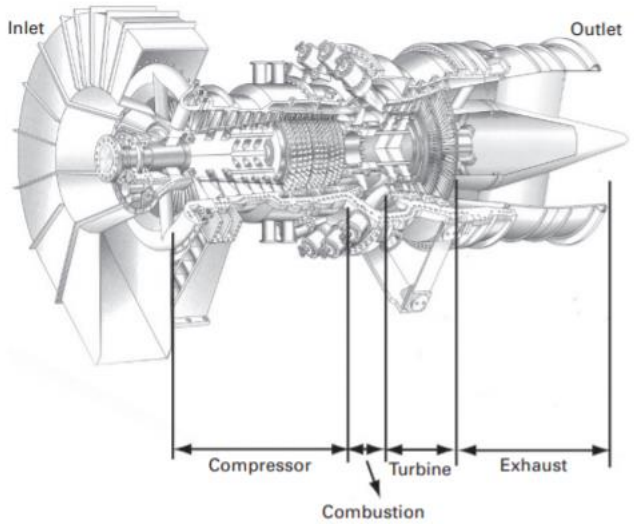
Pada BAB V ini berisikan tentang penutup dari hasil tugas akhir yang berisikan tentang kesimpulan dari hasil tugas akhir yang telah dilakukan dan saran untuk pengembangan tugas akhir pada penilitian selanjutnya.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Gas Turbin

Gas turbin di industri memiliki peran utama dalam pembangkit listrik, menyediakan sarana produksi listrik yang bersih, andal, dan efisien. Gas turbin memiliki keunggulan dibandingkan banyak bentuk peralatan pembangkit listrik lainnya karena turbin ini mampu memberikan daya dengan cepat pada saat permintaan energi listrik memuncak. Tidak seperti mesin pesawat terbang komersial yang beroperasi dengan daya yang memuncak hanya pada saat lepas landas dan mendarat, turbin gas industri dapat beroperasi terus-menerus pada beban dasar selama ribuan jam. Gas turbin di industri mampu beroperasi pada suhu sekitar jauh di bawah titik beku serta suhu setinggi 45 ° C. Meskipun gas turbin biasanya berbahan bakar gas alam, gas turbin ini dapat dikonfigurasikan untuk berjalan pada bahan bakar berbasis petrol, dan gas sintetis yang berasal dari batubara atau biomassa. [6]

Gas turbin memiliki 3 bagian utama diantaranya adalah: kompresor (*compression section*), ruang bakar (*combustion chamber*) dan turbin (meskipun dari sudut pandang materialnya, bagian utama yang lainnya adalah rotor, *casing*, dan *auxiliaries* merupakan bagian yang perlu diperhatikan juga). Bagian Kompresor, ruang bakar dan turbin dapat dilihat pada gambar 2.1.

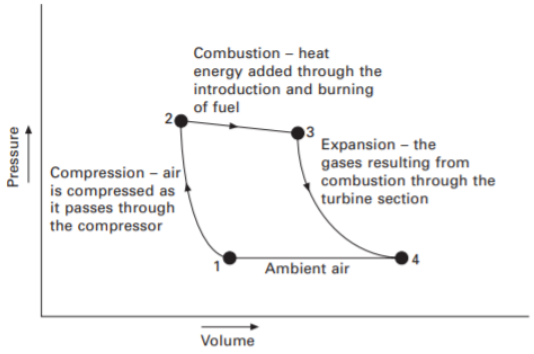


Gambar 2. 1 Gambar gas turbin pada industri, dengani izin dari Siemens Energy, Inc. [6]

Gas turbin memiliki 3 bagian utama diantaranya adalah: kompresor (*compression section*), ruang bakar (*combustion chamber*) dan turbin (meskipun dari sudut pandang materialnya, bagian utama yang lainnya adalah rotor, *casing*, dan *auxiliaries* merupakan bagian yang perlu diperhatikan juga). Bagian Kompresor, ruang bakar dan turbin dapat dilihat pada gambar 2.1.

2.2 Kompresor (*compression section*)

Pada awalnya udara pada lingkungan memasuki gas turbin pada lubang masuk kompresor. Sebagaimana udara melewati tahapan kompresi secara berurutan (lajur alternative dari airfoil statis yang dikenal sebagai baling-baling kompresor atau stator dan putaran dari airfoil itu sendiri disebut sebagai bilah kompresor) tekanan dan suhu meningkat karena kompresor memiliki tujuan untuk mengurangi volume udara. Udara yang sekarang telah terkompresi kemudian masuk menuju bagian pembakaran dimana sebagaian udara digunakan untuk pembakaran bahan bakar di zona utama (*primary zone*) *combustion chamber* dan Sebagian lagi digunakan untuk pendinginan melalui zona pengenceran (*dilution zone) combustion chamber*. Pada ruang bakar terjadi peningkatan volume udara namun tekanannya tetap relatif konstan. Gas yang telah dihasilkan selama pembakaran selanjutnya diperluas melalui bagian turbin (pada bagian turbin memilki persamaan dengan bagian kompresor dimana pada bagian turbin juga memiliki deretan jalur baling-baling statis dan bilah yang berputar). Gas yang mengembang kemudian menyebabkan bilah turbin berputar. Rotasi ini menggerakkan kompresor dan generator eksternal. Pada akhirnya gas yang telah terbakar akan keluar dari turbin melalui saluran pembuangan. Siklus ini dapat dilihat pengaruh tekanan dan volumenya pada gambar 2.2 [6]



Gambar 2.2 Diagram tekanan-volume pada gas turbin di industry dengan izin dari Siemens Energy, Inc. [6]

Model matematik yang digunakan untuk kompresor berdasarkan *performance map* kompresor dan hubungan energi diamana untuk suplai udara dari kompresor dibagi menjadi dua yang berfungsi untuk pembakaran pada *ombustion chamber* dan pendinginan pada dinding *combustion chamber* [1]. Fluida masuk menuuju kompesor melalui *inlet* kompresor kemudian didistribusikan menuju *combustion chamber* dengan tekanan tinggi. Tekanan pada fluida yang tinggi dikarenakan torsi yang ditimbulkan oleh bilah pada kompresor. Oleh karena itu persamaan karakteristik pada kompresor adalah sebagai berikut [5]:

$$\dot{W}_c = \dot{m} * (h(T_{out}) - h(T_{in})) \quad (2.1)$$

Dimana:

$\dot{W}_c$ = Daya kompresor (W)

$\dot{m}$ = Laju aliran massa (kg/s)

h = Enthalpy (J/kg)

T = Temperatur

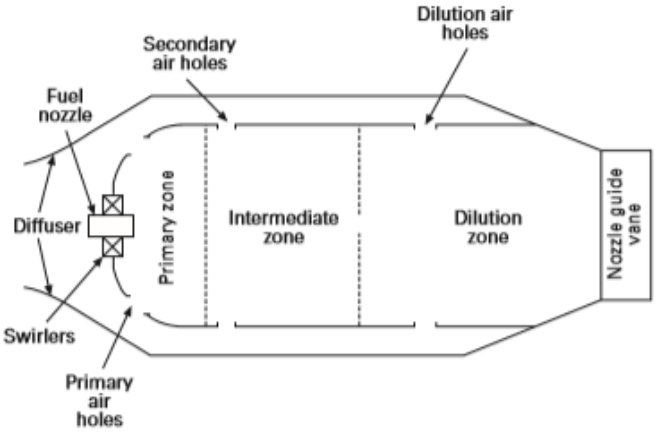
2.3 Ruang Pembakaran (*combustion chamber*)

Daya keluaran dari gas turbin dikendalikan oleh input panas yang diberikan, dimana panas tersebut dihasilkan dengan membakar bahan bakar pada ruang bakar dengan menggunakan udara dari hasil bagian kompresor. Penggunaan bahan bakar hidrokarbon telah tersebar luas pada penggunaan gas turbin. Bahan bakar cair seperti minyak tanah atau bahan bakar gas seperti gas alam, adalah contoh dan penggunaan gas alam yang menjadi semakin umum penggunaannya pada gas turbin di industri. Jumlah input panas sering disebut sebagai net input termal. Daerah untuk temperatur keluar pada ruang bakar harus dikontrol hingga sesuai dengan apa yang dibutuhkan oleh turbin agar masa mulur komponen pada turbin tidak terganggu. Hal ini dapat dilakukan dengan membagi proses pembakaran dengan dua atau tiga bagian berbeda [3]. Bagian-bagian itu adalah:

1. Zona utama: tempat bahan bakar bakar dibakar dan panas dari bahan bakar dilepaskan
2. Zona menengah: dimana tambahan udara dimasukkan untuk menyempurnakan pembakaran
3. Zona penipisan: udara yang tersisa dimasukkan untuk mengurangi temperatur keluar dari ruang bakar yang dibutuhkan oleh turbin

Sistem ruang pembakaran pada gas turbin memiliki beberapa bagian atau skema yang ditunjukan oleh gambar 2.3 yang diantaranya adalah:

1. *Diffuser*
2. *Fuel nozzle*
3. *Primary zone*
4. *Intermediate zone*
5. *Dilution zone*



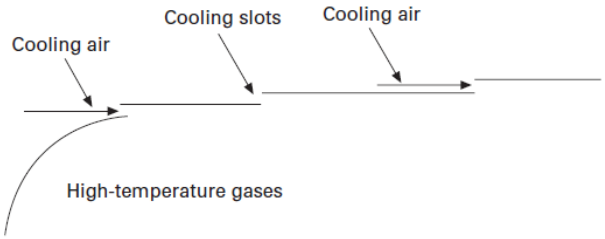
Gambar 2. 3 Skema dari sebuah ruang bakar [3]

Gas pembakaran yang meninggalkan zona menengah (*intermediate* zone) akan berada di suhu sekitar 1800K dan mungkin masih terlalu panas untuk turbin di bagian hilir [3]. Zona pengenceran harus memastikan bahwa suhu gas yang memasuki turbin memuaskan dan hal ini dpat dicapai dengan menambahkan udara yang tersisa untuk bercampur dengan produk pembakaran.

Suhu tinggi yang berlaku di dalam ruang bakar selama pembakaran menyebabkan tabung nyala api mencapai suhu yang sangat tinggi. Meskipun udara yang melewati proses pembakaran (*dilution zone*) memberikan pendinginan pada tabung api, pendinginan tambahan biasanya diperlukan. Pendinginan tabung nyala tambahan ditambahkan dengan memasukkan sejumlah slot di sepanjang nyala api untuk menghasilkan film udara pendingin di atas bahan *combustion chamber*. Film udara pendingin ini bertindak sebagai penghalang panas dan melindungi tabung api, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.

Teknik-teknik seperti pendinginan transpirasi, dapat diterapkan pada pendinginan tabung api. Teknik pendinginan tersebut menghasilkan pengurangan yang signifikan

dalam kebutuhan udara pendingin dan diklaim bahwa sekitar 50% pengurangan udara pendingin tabung api terjadi dengan teknik tersebut.



Gambar 2. 4 Contoh Film Pendingin Diterapkan pada Tabung Api Pembakaran**.** [3]

Suhu dalam zona pembakaran *combustion chamber* dapat mencapai lebih dari 1900° Celcius, jauh lebih tinggi daripada kebanyakan material yang dapat bertahan. Untuk mengendalikan ini, sebagian udara dari kompresor dapat digunakan untuk mendinginkan dinding liner pembakaran *combustion chamber*. Ini juga akan mencairkan gas pembakaran yang sangat panas untuk meredam suhu dinding c*ombustion chamber*. Aliran udara melalui semua bagian *combustion chamber* harus dikelola untuk menghindari ketidakstabilan api dan turbulensi yang akan menyebabkan hilangnya energi. Tujuannya adalah untuk menghasilkan aliran udara yang lancar, meskipun penambahan energi panas akan meningkatkan suhunya dan meningkatkan tekanan total. [7]

Udara mengandung 1 molekul (mol) O2 dan 3,76 molekul (mol) nitrogen (N2). Jumlah karbon dioksida dan argon diabaikan karena jumlah ini sangat kecil dibandingkan dengan jumlah oksigen dan nitrogen di udara. Molekul bahan telah dinyatakn sebagai berikut:

$$C_xH_y + ms(O_2 + 3.76N_2) = xCO_2 + \left(\frac{y}{2}\right)H_2O + 3.76\,ms\,N_2 \quad (2.2)$$

dan

$$CxHy + msO2 = xCO2 + (\frac{y}{2})H2O \quad (2.3)$$

Di mana ms adalah mol udara yang dibutuhkan untuk pembakaran sempurna. Untuk kombinasi sempurna, jumlah mol O2 per mol bahan bakar adalah ms = x + y / 4

(Persamaan 2.5a) Rasio massa bahan bakar-udara stoikiometrik $(FAR)_s$ dinyatakan sebagai berikut [3]:

$$(FAR)_s = \frac{12{,}01x + 1{,}008y}{ms\ (32 + 3{,}76 \times 28{,}013)} \quad (2.4)$$

di mana 12,01 adalah berat atom karbon, 1,008 adalah berat atom H2, 32 adalah berat mol O2 dan 28.013 adalah berat mol N2. Oleh karena itu, rasio massa bahan bakar-udara stoikiometrik adalah [3]:

$$(FAR)s = \frac{12{,}01x + 1{,}008y}{137{,}33(x + \frac{y}{4})} \quad (2.5)$$

Jika kita membakar metana (CH4, x = 1 dan y = 4) di udara, bahan bakar-udara stoikiometrik adalah 0,0584. Jadi untuk pembakaran total kita membutuhkan, 17,12 kg udara digunakan untuk membakar 1 kg metana. Jika kita membakar minyak tanah, yang dapat direpresentasikan sebagai C12H24, di mana x = 12 dan y = 24, rasio bahan bakar-udara stoikiometrik adalah 0,068 dan kita membutuhkan 14,71 kg udara untuk membakar 1 kg minyak tanah.

Pembakaran di udara berlebih akan menghasilkan keberadaan oksigen dalam produk pembakaran dan merupakan kasus normal dalam turbin gas. Persamaan 2.8 memberikan keseimbangan molar untuk kasus ini [3]:

$$CxHy + m(O2 + 3.76N2) = xCO2 + (y/2)H2O + (m - x - y/4)O2 + 3.76N2 \quad (2.6)$$

Performa pembakaran ditentukan dengan banyaknya panas yang dihasilkan dan *pressure loss* saat melewati ruang pembakaran. Untuk kondisi *inlet* yang telah diketahui, *outlet* dari temperature dan *pressure loss* dapat dihitung dengan persamaan dibawah ini. Persamaan (2.9) menunjukan ratio dari perubahan enthalpy pada panas yang ditambahkan ke system dan hal tersebut didefinisikan sebagai temperature keluar pada ruang pembakan (*combustion chamber*) [8]:

$$\frac{\eta_b * m_f * HV + (\dot{m}_{02} h(T_{02}))}{\dot{m}_{out} * h_{out}} = T_{out} \quad (2.7)$$

$$\eta_b = \frac{\left((\dot{m}_2 + \dot{m}_f) hT_{03}\right) - (\dot{m}_2 hT_{02})}{m_f * HV} \quad (2.8)$$

$$\dot{m}_{out} = \dot{m}_{02} + \dot{m}_f \quad (2.9)$$

Dimana:

$H_v = Heat\ Value\ Natural\ Gas$

$\dot{m}_{out} = laju\ aliran\ massa\ keluar\ dari\ combustion\ chamber$

$\dot{m}_f = laju\ aliran\ massa\ bahan\ bakar$

$\dot{m}_2 = laju\ aliran\ massa\ udara$

$\eta_b = efisiensi\ ruang\ bakar$

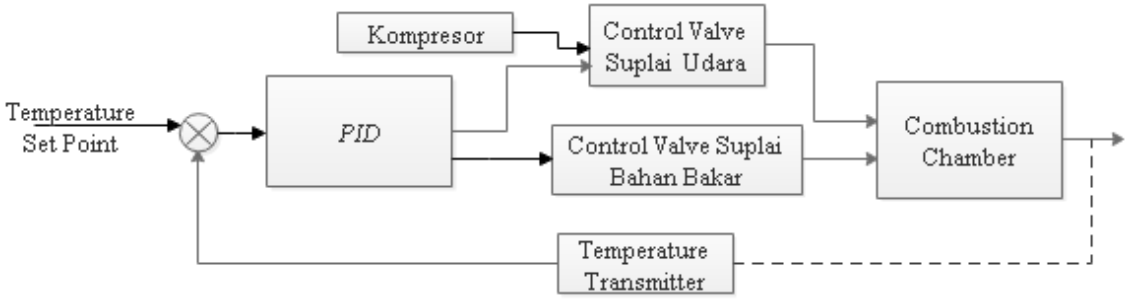
$T_{03} = Temperature\ keluar\ pada\ combustion\ chamber$

$T_{02} = Temperature\ masuk\ pada\ combustion\ chamber$

Berdasarkan teori-teori penunjang yang telah dijelaskan diatas maka suplai udara dari kompresor sangat berpengaruh dalam proses pembakaran pada *combustion chamber*, dimana ketika suplai udara rendah maupun terlalu tinggi dapat mengkibatkan terjadinya *flameout* atau hilangnya proses pembakaran pada *combustion chamber* maka dapat dilakukan pengendalian suplai udara terhadap bahan bakar agar memenuhi laju aliran *air-fuel ratio* optimum dengan nilai 17.12 untuk bahan bakar natural gas. Namun pengendalian yang dilakukan disini menggunakan *control valve* yang diletakkan pada keluaran *compression section* dengan variable kontrolnya adalah laju aliran massa udara.

2.4 Sistem Pengendalian Suplai udara ke *combustion chamber*

Diketahui bahwa pada Gas Turbine Generator Centaur 40 milik PT. Saka Indonesia Pangkah *Limited* memiliki *control valve* dengan PID sebagai pengendalinya yang ditunjukan oleh gambar 2.5. Oleh karena itu digunaka system pengendalian yang berbeda untuk dapat mengatur bukaan *control vavlve* pada suplai udara *compression section* menuju *combustion chamber* untuk mengoptimalkan pembakaran pada *combustion chamber* dikarenakan suplai udara menuju *combustion chamber* tidak memenuhi *fuel-air ratio.*



Gambar 2. 5 Diagram blok sistem pengendalian suplai udara dan bahan bakar

Compression section menyuplai udara melalui *control valve* dengan fungsi untuk pembakaran dan pendinginan. Dimana pada *control valve* disuplai 75% udara yang berfungsi untuk mendinginkan dinding pada c*ombustion chamber* pada gas turbin generator dan 25% digunakan untuk memenuhi *fuel-air ratio* pada c*ombustion chamber*

yang telah dijelaskan pada bab 2. Pembakaran pada *combustion chamber* akan menghasilkan udara panas bertekanan tinggi yang kemudian disalurkan untuk menggerakan turbin. Turbin yang telah menerima udara yang bertekanan akan bergerak diikuti dengan bergeraknya shaft yang akan menghasilkan energi listrik pada generator.

2.4.1 *Control Valve* Suplai Baham Bakar (FCV 7065)

Control valve adalah katup yang digunakan untuk mengontrol aliran fluida dengan memvariasikan ukuran aliran yang diarahkan oleh sinyal dari pengontrol. Hal Ini memungkinkan mengontrol langsung laju aliran dan kontrol konsekuensial dari beberapa proses seperti tekanan, suhu, dan tingkat cairan, bentuk dari *control valve* ditunjukan pada gambar 2.6. [10].

Gambar 2. 6 *Control Valve*

C*ontrol valve* pada ssstem pengendalian suplai udara menggunakan aktuator elektrik yang berarti aktuator tersebut menggunakan motor elektrik untuk menggerakan gir untuk mengendalikan bukaan pada *control vavle* secara linear [11] yang berfungsi sebagi output dari *logic solver* yang bertindak untuk mengatur suplai bahan bakar menuju *combustion chamber* berdasarkan input dari *logic solver* yang berupa nilai tekanan dari *compression section* menuju *combustion chamber.* Oleh karena itu diperlukan fungsi transfer *control valve.* Aksi *control valve* yang digunakan adalah ATO / FO. Sehingga saat sinyal dari controller 4 mA *control valve* akan menutup dan saat 20 mA maka *control valve* akan membuka penuh. Sehingga didapatkan fungsi *control valve* sebagai berikut :

$$\frac{\dot{m}_s(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau_v s+1} \qquad (2.10)$$

Keterangan:

$\dot{m}_s(s)$ = laju aliran bahan bakar $\left(\frac{Kg}{s}\right)$

$U(s)$ = *sinyal masukan ke control valve* (mA)

$K = gain\ control\ valve$

$\tau_v = time\ constant\ control\ valve\ (s)$

Gain control valve daapat diketahui dengan menggunakan model matematis sebagai berikut:

$$K = \frac{Laju\ aliran\ maksimum - Laju\ aliran\ minimum}{Perubahan\ Masukkan} \quad (2.11)$$

karena *sleeve valve* terbuka 30% *gain* I/P dapat dihitung dengan:

$$Gt = \frac{Span\ Output\ (mA)}{Span\ Input\ (Psi)} \quad (2.12)$$

Maka *gain* total dari *control valve* adalah:

$$Kv = Gt * Kc \quad (2.13)$$

Mencari nilai *time constant sleeve valve:*

$$\Delta Q = \frac{Aliran\ Max - Airan\ Min}{Aliran\ Max} \quad (2.14)$$

$$\lambda cv = TV(\Delta Q + R) \quad (2.15)$$

Λcv = Time Constant Valve

TV = Waktu stroke penuh

R = Konstanta inherent terhadap stroke penuh

Dari data-data yang didapat maka model matematika *control valve* adalah sebagai berikut:

$$Gcv = \frac{Kv}{\lambda s+1} \quad (2.16)$$

2.4.2 Control Valve Suplai Udara (FV 7076)

Pada *control valve* FV 7076 digunakan untuk mengatur laju aliran massa udara yang berasal dari kompresor. *Control valve* diatur dengan menggunakan *logic solver* agar memenuhi *air-fuel ratio* berdasarkan laju aliran massa udara dengan laju aluran massa bahan bakar yang diautur oleh *control valve* FCV 7065. Berdasarkan P&ID gas turbin generator centaur 40, *control valve* 7076 menggunakan positioner untuk mengatur presentase dari laju aliran massa udadra. Oleh karena itu didapatkan fungsi *control valve* sebagai berikut:

Gain I/P : $G_{I/P} = \frac{\Delta output}{\Delta input}$ (2.17)

Gain Positioner : $G_P = \frac{\Delta Output}{\Delta input}$ (2.18)

Gain Valve : $Gv = \frac{\Delta Output}{\Delta Input}$ (2.19)

Gain Proses : $G_{Pr} = \frac{\Delta Output}{\Delta Input}$ (2.20)

Sehingga diperoleh gain total control valve sebagai berikut :

$Kv = G_{I/P} * G_P * G_v * G_{Pr}$ (2.21)

2.4.3 *Temperature Transmitter* (TT 1501)

Temperature transmitter yang digunakan pada PT. Saka Indonesia Pangkah Limited adalah *Thermocouple* tipe K. *Thermocouple* tipe K biasanya bekerja di sebagian besar penggunakan di industry minyak dan gas karena berbasis nikel dan memiliki ketahanan korosi yang baik. *Thermocouple* tipe k adalah tipe kalibrasi sensor paling umum yang menyediakan kisaran suhu pengoperasian terluas. Karena keandalan dan keakuratannya, *thermocouple* tipe K digunakan secara luas pada suhu hingga 2300 ° F (1260 ° C). Jenis *thermocouple* ini harus dilindungi dengan tabung pelindung logam atau keramik yang cocok, terutama dalam mengurangi atmosfer. Tipe K umumnya akan bertahan lebih lama dari Tipe J karena kawat JP cepat teroksidasi, terutama pada suhu yang lebih tinggi. [14]. Bentuk dari *thermocouple* tipe K dapat dilihat pada gambar 2.7.

Gambar 2. 7 *Thermocouple* Tipe K

Fungsi transfer yang dimiliki oleh *thermocouple* tipe K ini adalah sebagai berikut:

$\frac{T(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau_v s+1}$ (2.24)

Dengan K adalah sebagai berikut :

$K = \frac{\Delta Output}{\Delta Input}$ (2.25)

Keterangan :

K = *Gain Flow Transmitter*

$\Delta Output$ = $I_{Maksimum} - I_{minimum}$

$\Delta Input$ = $T_{maksimum} - T_{minimum}$

τ = *Time Constant* (s)

2.5 Mode Pengendalian PI

Variasi kontrol Proportional Integral Derivative (PID) adalah dengan menggunakan hanya istilah proporsional dan integral sebagai kontrol PI. Pengontrol PI adalah variasi yang sering digunakan, bahkan lebih dari pengontrol PID lengkap. Nilai keluaran pengontrol u (t) dimasukkan ke dalam sistem sebagai input variabel yang dimanipulasi.

$$e\,(t) = SP - PV \tag{2.26}$$

$$u\,(t) = ubias + Kce\,(t) + Kc\tau I \int t0e\,(t)\,dt \tag{2.27}$$

Ubias adalah konstanta yang biasanya disetel ke nilai u (t) saat pengontrol pertama kali dialihkan dari mode manual ke otomatis. Ini memberikan transfer "bumpless" jika kesalahannya nol ketika controller dihidupkan. Dua nilai tuning untuk kontroler PI adalah gain kontroler, Kc dan konstanta waktu integral τI. Nilai Kc merupakan pengali pada kesalahan proporsional dan suku integral dan nilai yang lebih tinggi membuat pengontrol lebih agresif dalam merespon kesalahan jauh dari set point. Set point (SP) adalah nilai target dan variabel proses (PV) adalah nilai terukur yang mungkin menyimpang dari nilai yang diinginkan. Kesalahan dari set point adalah perbedaan antara SP dan PV dan didefinisikan sebagai e (t) = SP - PV [12]

Spesifikasi respons transien atau karakteristi dari sistem kontrol praktis sering menunjukkan osilasi yang kemudian teredam sebelum mencapai kondisi tunak. Dalam menentukan karakteristik respon transien dari sistem kontrol berdasarkan input unit *step*, ada beberapa karakteristik sebagai berikut [13] :

1. *Delay time*, t_d

   Delay time adalah waktu yang diperlukan untuk respons mencapai setengah dari nilai akhir pada kali pertama.

2. *Rise time*, t_r

   Rise time adalah waktu yang diperlukan untuk respon naik dari 10% menjadi 90%, 5% menjadi 95%, atau 0% menjadi 100% dari nilai akhirnya.

3. *Peak time*, t_p

   Peak time adalah waktu yang diperlukan respons untuk mencapai puncak pertama dari *overshoot*.

4. *Maximum overshoot*, M_p

Maximum overshoot adalah nilai puncak maksimum dari kurva respon [kurva c(t) dengan t], diukur dari c (∞). Jika c (∞) = 1, persentase *maximum overshoot* adalah M_p X 100%.

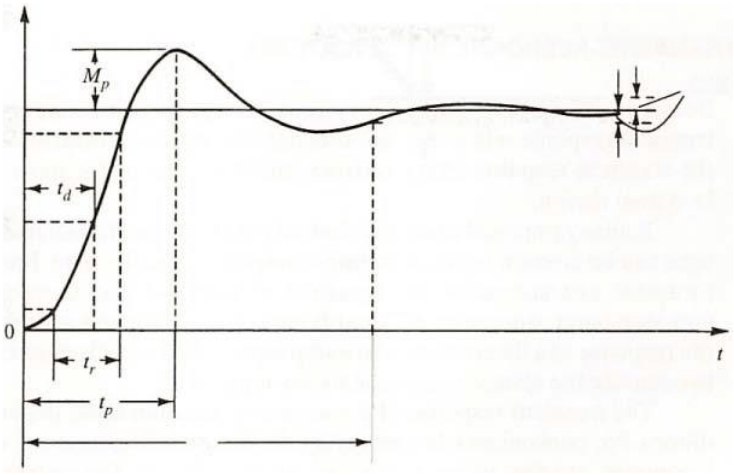
Presentase *overshoot* maksimum = $\frac{c(t_p)-c(\infty)}{c(\infty)} * 100\%$ (2.28)

Jumlah dari overshoot maksimum (persen) secara langsung menunjukkan stabilitas relatif sistem.

5. *Settling time*, t_s

Settling time adalah waktu yang diperlukan ketika kurva respons mencapai dan konstan dalam 2% dari nilai akhir.

Spesifikasi ini ditampilkan secara grafis pada Gambar 2.8 yang ditunjukan sebagai berikut:



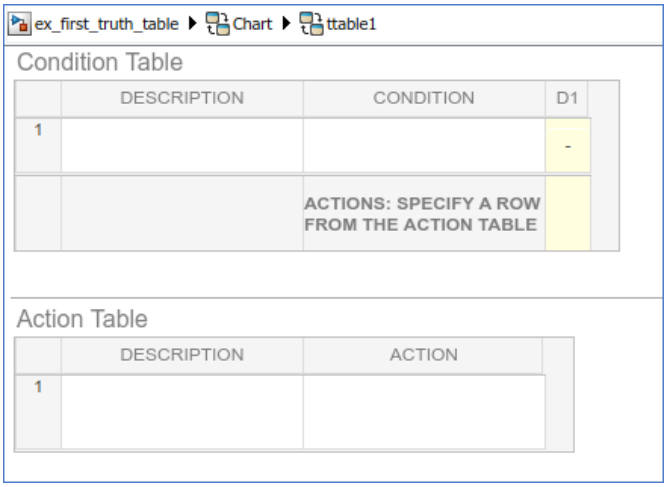
Gambar 2. 8 Karakteristik Respon Sistem [13]

2.6 *Controller* Berbasis *Logic Solver*

Berdasarkan informasi dari *engineer* PT. Saka Indonesia Pangkah *Limited* dan P&ID Gas Turbin Generator Centaur 40 diketahui *control* yang digunakan untuk mengendalikan *control valve* untuk mengatur suplai udara menuju *combustion chamber* menggunakan PID *controller*. Oleh karena itu diperlukannya suatu pengendalian untuk mengatur *control valve* yang sesuai dengan kondisi operasi gas turbin di lapangan agar apabila terdapat temperatur yang terlalu panas hingga mencapaia 1573 kelvin di *combustion chamber* dapat dengan mudah teratasi.

Logic solver merupakan sebuah fungsi sebab akibat yang terdapat pada Simulink di *software* matlab. Kontroler pembuat keputusan ini dapat digunakan dengan tools

diagram table kebenaran aljabar Boolean klasik pada *library* Simulink. Sel dipilih tergantung pada nilai-nilai ekspresi boolean terkait dengan nilai input variabel. Sel berisi tindakan, yang dieksekusi ketika sel tertentu dipilih [15]. *Logic solver* pada simulink merupakan blok *truth table* yang ditunjukan oleh gambar 2.9.



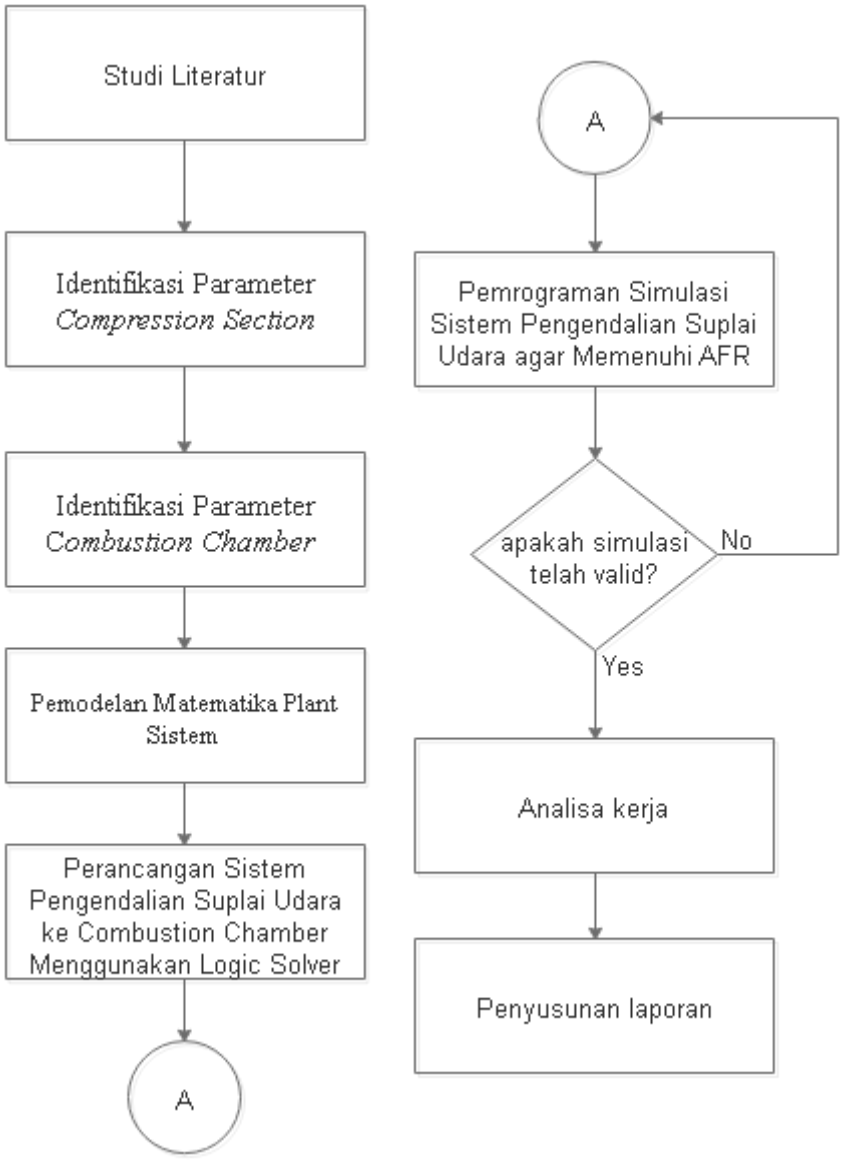
Gambar 2. 9 Tabel Kebenaran dalam *Stateflow* [15]

Pada table kebenaran terdapat dua tabel yaitu tabel kondisi dan tabel aksi. Setiap kondisi yang dimasukkan dalam kolom Kondisi harus dievaluasi ke true (nilai bukan nol) atau false (nilai nol) dimana pada pengendalian suplai udara kondisi yang harus terpenuhi adalah kondisi laju aliran massa pada keluaran *compression section* untuk pembakaran dan pendinginan yang memiliki rasio 30:70 dengan nilai maksimal laju aliran massanya adalah 7.783 Kg/s. Hasil untuk setiap kondisi ditentukan sebagai T (benar), F (salah), atau - (benar atau salah). Setiap kolom keputusan menggabungkan hasil untuk setiap kondisi dengan logika AND ke dalam kondisi gabungan, yang disebut sebagai keputusan. Tabel aksi pada *truth table* berguna sebagai tindakan yang akan dilakukan oleh *logic solver* dimana untuk tugas akhir ini keluaran pada *logic solver* berupa sinyal analog untuk mengendalikan *control valve* yang mengatur suplai laju aliran massa udara untuk pembakaran dan pendinginan.

Pada tugas akhir ini diberikannya *logic solver* berguna sebagai pemberi *safety* ketika temperature di *combustion chamber* melebihi batas temperatur normal yang mampu ditampung oleh *combustion chamber* yaitu 1573 kelvin. Sehingga akan diberi dua kondisi dan dua aksi pada *logic solver* yaitu kondisi ketika temperature berada di kondisi yang normal yaitu dibawah 1573 kelvin beserta aksinya serta ketika temperature di *combustion chamber*

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN



Gambar 3. 1 *Flowchart* Alur Penelitian

3.1 Identifikasi Parameter *Compression Section*

Studi literatur dilakukan untuk mengetahui parameter fisis yang terjadi di *compression section* yang kemudian diterapkan pada persamaan matematika yang terjadi di *compression section* untuk mengetahui laju aliran massa yang keluar dari *compression section* berdasarkan masukan daya untuk kompresor. Dari data

yang didapatkan dari *engineer* PT. Saka Energi Pangkah Limited didapatkan data yang ditunjukan pada tabel 3.1 sebagai berikut:

Tabel 3. 1 Identifikasi Parameter *Compression Section*

h1 (kj/kg)	298.0113
h2 (kj/kg)	609.37848
Laju aliran massa udara (kg/s)	2,658495019 − 7,783079829

Digunakan sampel data laju aliran massa udara yang dihasilkan kompresor ketika kecepatan kompresor mencapai 100% yang dijaga konstan yaitu 7.786 kg/s. Kemudian apabila model simulasi telah tervalidasi yang ditunjukan dengan laju aliran massa udara yang dihasilkan kompresor adalah 7.786 kg/s dengan *air-fuel ratio* 15.624 dan temperature pembakaran yang terjadi di *combustion chamber* 1211.07558 kelvin maka akan dilihat perbandingannya ketika temperatur mencapai batas maksimal yang mampu ditampung di *combustion chamber* yaitu 1573 kelvin.

3.2 Identifikasi Parameter *Combustion Chamber*

Setelah melakukan studi literatur dan pengambilan data berdasarkan keadaan di lapangan selanjutnya didapatkan data *combustion chamber* yaitu laju aliran massa bahan bakar, laju aliran massa udara, temperature serta enthalpy *combustion chamber*, efisiensi *combustion chamber* dan *heat value* dari gas alam yang telah fitampilkan pada tabel 3.2. Dimana penentuan parameter tersebut berdasarkan persamaan matematik yang telah dijabarkan pada persamaan (2.9). Sehingga didapatkan data parameter pembakaran yang trejadi di *combustion chamber* dari *engineer* PT. Saka Indonesia Pangkah Limited sebagai berikut:

Tabel 3. 2 Identifikasi Parameter *Combustion Chamber*

T3 (K)	1211.07558
h3 (kj/kg)	2154,951418
AFR	15.624
Kslor pada *combustion chamber*	4.970226741
Laju aliran massa udara (kg/s)	1,945769957
Laju aliran massa bahan bakar (kg/s)	0,124536

Tabel 3.2 merupakan data berdasarkan kondisi operasi di lapangan dimana untuk efisiensi dari *combustion chamber* berasal dari perhitungan yang didapatkan dari *air-fuel ratio* terendah dari kondisi operasi Gas Turbin Generator Centaur 40 PT, Saka Indonesia Pangkah Limited. Sampel data laju aliran massa bahan bakar yang digunakan untuk validasi model Simulink adalah 0.124536 kg/s. Setelah tervalidasi maka akan dibandingkan ketika temperature di *combustion chamber* mencapai batas maksimal yang mampu ditampung yaitu 1573 kelvin.

3.3 Pemodelan Sistem Pengendalian Suplai Udara ke *Combustion Chamber*

Pemodelan disini menjabarkan model matematik dari tiap-tiap komponen yang ada pada sistem pengendalian suplai udara melaui *control vavle* ke *combustion chamber*. Model matematik diberikan berdasarkan persamaan-persamaan yang mendasar yang telah disajikan pada bab 2.

3.3.1 Pemodelan *Compression Section*

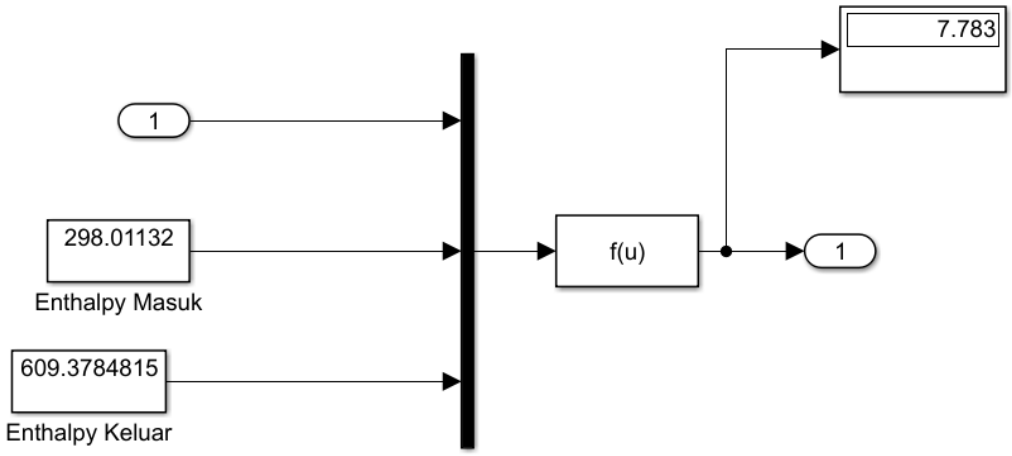
Pemodelan *compression section* menggunakan persamaan hubungan antara daya yang diberikan kepada kompresor dengan laju aliran massa udara yang dapat dihasilkan. Digunakan sampel data laju aliran massa udara maksimum yang dihasilkan oleh kompresor dilapangan yaitu 7.783 kg/s untuk mengetahui daya yang diperlukan sehingga berdasarkan persamaan dan data lapangan yang telah diketahui didapatkan perhitungan dari persamaan kompresor sebagai berikut:

$$\dot{W}_c = \dot{m} * (h(T_{out}) - h(T_{in})) \quad (3.1)$$

$$\dot{W}_c = 7.783 * (609.37848 - 298.0113) \quad (3.2)$$

$$\dot{W}_c = 2423.395474 \quad (3.3)$$

Dari perhitungan diatas didapatkan daya yang perlu diberikan agar kompresor menghasilkan laju aliran massa udara terendah yaitu $7.783\ kg/s$ adalah 2423.395474Watt, dari laju aliran massa udara yang telah diketahui berdasarkan daya kompresor maka dapat dilakukan validasi model melalui Simulink yang ditunjukan pada gambar 3.2. Setelah tervalidasi maka dikendalikan *control valve* suplai bahan bakar agar memenuhi mencapai batas maksimal temperature yang mampu ditampung oleh *combustion chamber* yaitu 1573 kelvin.



Gambar 3. 2 Pemodelan *Compression Section* pada Simulink

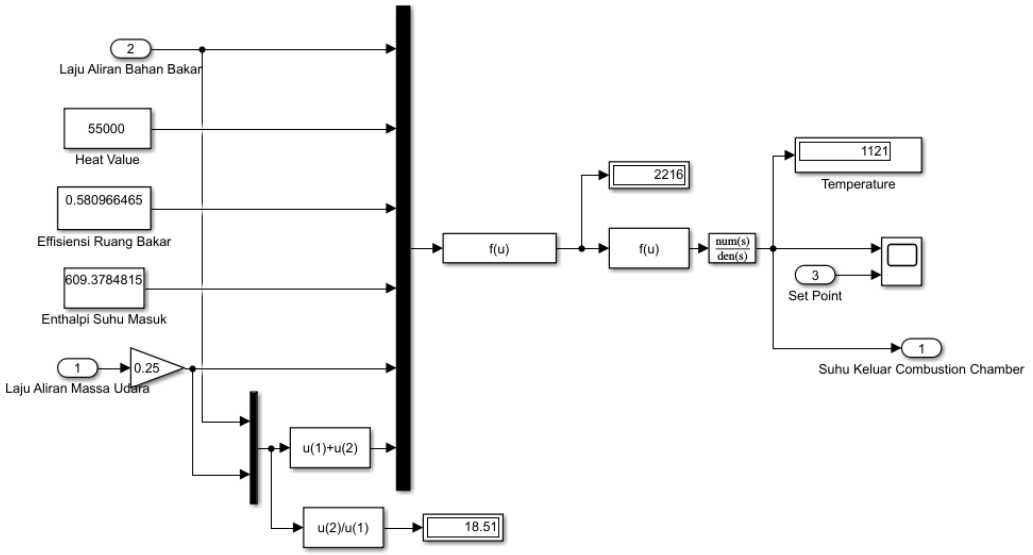
3.3.2 Pemodelan Ruang Pembakaran (*Combustion Chamber*)

Pemodelan *combustion chamber* mengacu pada laju aliran massa (ṁ) sebagai input *combustion chamber* yaitu laju aliran massa udara dari kompresor dan laju aliran bahan bakar *combustion chamber*. Kedua laju aliran massa tersebut menghasilkan *fuel-air ratio* untuk bahan bakar gas alam, dengan nilai optimum *fuel-air ratio* 17.2. Persamaan laju udara dan bahan bakar pada *combustion chamber* adalah sebagai berikut:

$$\eta_b = \frac{1}{0.1245*55000}\left((2.070306 * 2494.8157) - (1.94577 * 609.37848)\right) \quad (3.4)$$

$$\frac{\frac{0.581}{\frac{1}{0.1245*55000}}+(1.94577*609.37848))}{2.070306*2494.8157} = T_{out} \quad (3.5)$$

Dari efisiensi *combustion chamber* yang telah didapatkan maka diperoleh pemodelan Simulink *combustion chamber* sebagai berikut:



Gambar 3. 3 Pemodelan Combustion Chamber Menggunakan Aplikasi Simulink

Berdasarkan gambar 3.3 dengan masukan laju aliran massa udara dan laju aliran massa bahan bakar didapatkan nilai suhu keluaran c*ombustion chamber* 1121 kelvin.

3.3.3 Pemodelan *Control Valve* Suplai Udara (FV 7076)

Terdapat dua *Control valve* sebagai pengatur suplai laju aliran massa menuju *combustion chamber* yaitu *control valve* yang menggunakan aktuator berupa motor elektrik sebagai pengatur suplai udara dan *control valve* untuk suplai bahan bakar. Pada *control valve* suplai udara yaitu *control valve* FV 7076 didapatkan fungsi transfer sebagai berikut:

$$\frac{\dot{m}_s(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau_v s+1} \quad (3.6)$$

Keterangan:

$\dot{m}_s(s)$ = laju aliran udara $\left(\frac{Kg}{s}\right)$

$U(s)$ = *sinyal masukan ke control valve* (mA)

$K = gain\ control\ valve$

$\tau_v = time\ constant\ control\ valve\ (s)$

Diketahui *control valve* suplai udara dari *compression section* menuju *combustion chamber* memiliki data lapangan yang ditunjukan pada tabel 3.3 sebagai berikut:.

Tabel 3. 3 Data lapangan Flow Control Valve pada Compression Section Menuju *CombustionChamber*

Range laju aliran massa	$0 - 7{,}783079829\ kg/s$
Sinyal analog	$(4 - 20)\ mA$
$Time\ constant\ (\tau_s)$	$0.85\ detik$
Sinyal Pneumatic	$(3 - 15)\ Psi$

Gain control valve dapat diketahui dengan menggunakan model matematis sebagai berikut:

Gain I/P : $G_{I/P} = \frac{15-3\ psi}{20-4\ mA} = 0.75$ (3.7)

Gain Positioner : $G_P = \frac{300-100\ psi}{15-3\ psi} = 16.666666$ (3.8)

Gain Valve : $Gv = \frac{100\%-0}{300-100} = 0.005$ (3.9)

Gain Proses : $G_{Pr} = \frac{8.661008-0\ kg/s}{100-0\ \%} = \frac{7{,}783079829}{100\%}$ (3.10)

Sehingga diperoleh gain total control valve sebagai berikut :

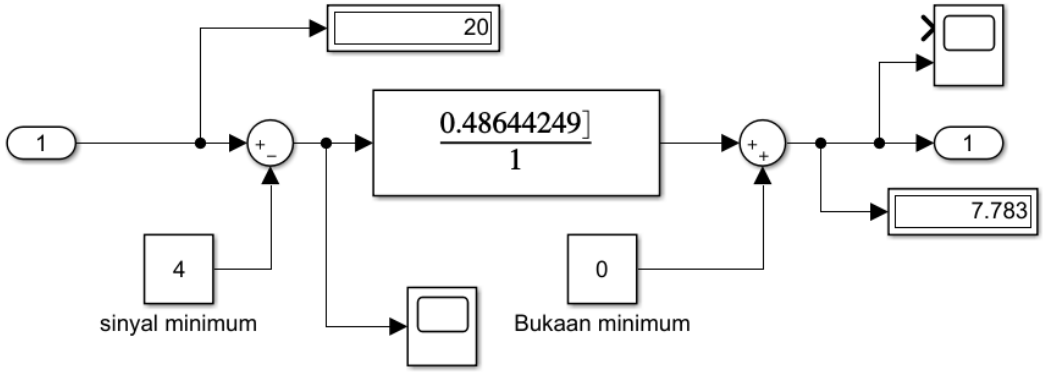
$Kv = G_{I/P} * G_P * G_v * G_{Pr}$ (3.11)

$Kv = 0.75 * 16.6666667 * 0.005 * \frac{7{,}783079829}{100\%} = 0.48644249$ (3.12)

Dari perhitungan yang telah dilakukan maka didapatkan fungsi transfer *control valve* sebagai berikut:

$Gcv = \frac{0.48644249}{0.85s+1}$ (3.13)

Setelah didapatkan fungsi transfer c*ontrol valve* maka dilakukan pemodelan menggunakan Simulink dan didapatkan hasil sebagai berikut:



Gambar 3. 4 Pemodelan Control Valve Suplai Udara Menggunakan Aplikasi Simulink

Masukan yang ditunjukan pada model simulink yang ditunjukan oleh gambar 3.4 merupakan laju aliran massa udara yang dikendalikan *control valve* untuk memberikan bukaan yang sesuai dengan laju aliran massa udara yang dihasilkan kompresor. Sinyal pengendali yang dihasilkan oleh *logic solver* menghasilkan bukaan pada *control valve* untuk memberikan bukaan yang sesuai dengan laju aliran massa udara yang dihasilkan kompresor. Dengan menggunakan masukan sinyal analog dari *logic solver* dengan nilai 20 mA didapatkan keluaran berupa laju aliran massa udara 7.783 kg/s. Namun ketika udara telah memasuki *combustion chamber* terdapat *diffuser* yang berfungsi sebagai pembagi laju aliran massa udara yang akibatnya untuk pembakaran hanya digunakanan 25% dari suplai udara yang dihasilkan oleh kompresor dan sisanya digunakan untuk pendinginan. Laju aliran massa udara tersebut digunakan sebagai sampel data untuk validasi model. Setelah model telah tervalidasi maka akan digunakan laju aliran massa udara ketika temperature 1573 kelvin.

3.3.4 Pemodelan *Control Valve* Suplai Bahan Bakar (FCV 7065)

Control valve pada suplai bahan bakar menggunakan aktuator elektrik yang digunakan untuk mengatur suplai laju aliran massa bahan bakar agar memenuhi *air-fuel ratio* pada c*ombustion chamber* dan temperatur yang sesuai *dengan set point.* Digunakan persamaan yang sama dengan control valve suplai udara dan didapat fungsi transfer sebagai berikut:

$$\frac{\dot{m}_s(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau_v s+1} \qquad (3.14)$$

Keterangan:

$\dot{m}_s(s)$ = laju aliran bahan bakar $\left(\frac{Kg}{s}\right)$

$U(s)$ = *sinyal masukan ke control valve* (mA)

$K = gain\ control\ valve$

$\tau_v = time\ constant\ control\ valve\ (s)$

Diketahui *control valve* suplai bahan bakar menuju *combustion chamber* memiliki data lapangan yang ditunjukan dpada tabel 3.4 sebagai berikut:

Tabel 3. 4 Data lapangan Flow Control Valve bahan bakar Menuju Combustion

Range laju aliran massa	$0 - 0.126475\ kg/s$
Sinyal analog	$(4 - 20)\ mA$
$Time\ constant\ (\tau_s)$	$0.103\ detik$

Gain control valve dapat diketahui dengan menggunakan model matematis sebagai berikut:

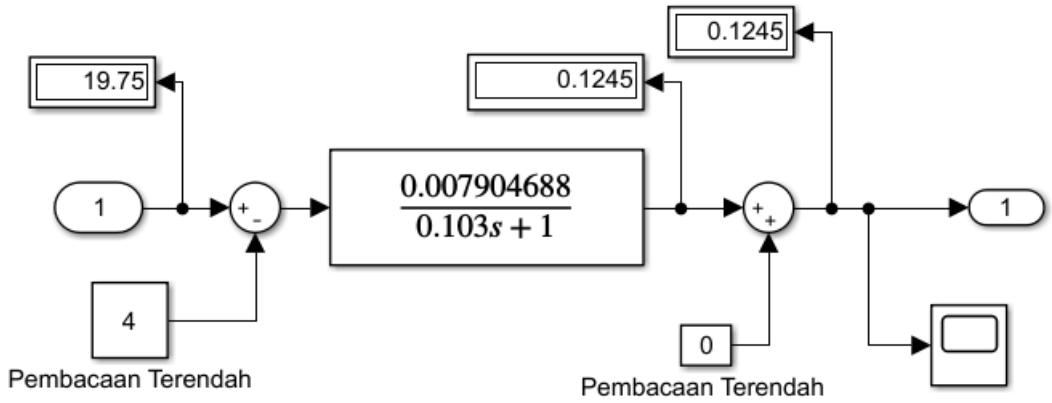
$$K = \frac{Laju\ aliran\ maksimum - Laju\ aliran\ minimum}{Perubahan\ Masukkan} \quad (3.15)$$

$$k = \frac{0.126475-0}{20-4} = 0.007904688 \quad (3.16)$$

Dari data-data yang didapat maka fungsi transfer *control valve* adalah sebagai berikut:

$$Gcv = \frac{0.007904688}{0.103s+1} \quad (3.17)$$

Dari fungsi transfer yang telah didapatkan maka dilakukan pemodelan *control valve* suplai bahan bakar dengan menggunakan sampel data suplai bahan bakar 0.1245 kg/s yang ditunjukan dengan model simulink pada gambar 3.5 sebagai berikut:



Gambar 3. 5 Pemodelan *Control Valve* Suplai Bahan Bakar Menggunakan Aplikasi Simulink

Dapat dilihat dari pemodelan Simulink diatas, *logic solver* memberikan sinyal pengendali 19.75 mA yang kemudian menghasilkan bukaan pada *control valve* sehingga menghasilkan laju aliran massa bahan bakar 0.1245 kg/s. Sampel data tersebut digunakan sebagai validasi model sistem pada simulink.

3.3.5 Pemodelan *Temperature Transmitter* (TT 1501)

Pengukuran suhu dilakukan dengan menggunakan *temperature transmitter thermocouple* tipe k dengan keluaran sinyal analog 4-20 mA dan masukan suhu yang diukur 3−1533 kelvin maka didapatkan fungsi transfer *temperature transmitter* sebagai berikut:

$$\frac{f(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau_v s+1} \tag{3.18}$$

Dengan K adalah sebagai berikut :

$$K = \frac{\Delta Output}{\Delta Input} \tag{3.19}$$

Keterangan :

K = *Gain Flow Transmitter*

$\Delta Output$ = $I_{Maksimum} - I_{minimum}$

$\Delta Input$ = $f_{maksimum} - f_{minimum}$

τ = 1 detik

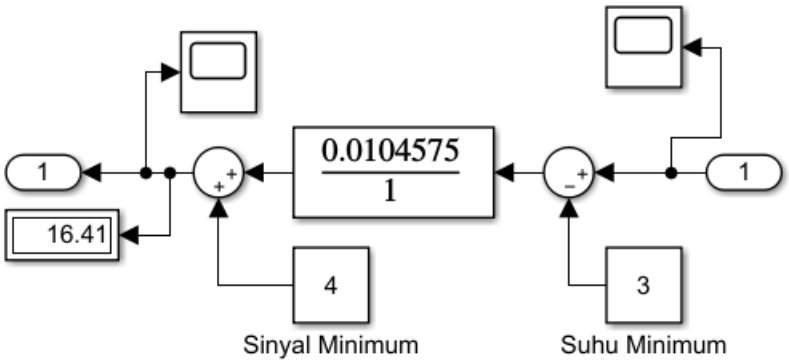
Gain flow transmitter dapat diketahui dengan menggunakan model matematis sebagai berikut:

$$K = \frac{Perubahan\ Keluaran}{Laju\ Aliran\ Maksimum - Laju\ Aliran\ Minimum} \quad (3.20)$$

$$k = \frac{20-4}{1533-3} = 0.0104575 \quad (3.21)$$

Dari data-data yang didapat maka fungsi transfer *flow transmitter* adalah sebagai berikut:

$$\frac{U(s)}{f(s)} = \frac{0.0104575}{1} \quad (3.22)$$



Gambar 3. 6 Pemodelan *Temperature Transmitter* pada Keluaran *Combustion Chamber* Menggunakan Aplikasi Simulink

Dapat dilihat dari gambar 3.6, ketika *combustion chamber* menghasilkan temperature 1190 kelvin *temperature transmitter* menghasilkan sinyal analog dengan nilai 16.41 mA.

3.4 Perancangan *Sistem* Pengendalian Suplai Udara ke *Combustion Chamber*

Pertama dilakukan perancangan sistem pengendalian tememperature pada *combustion chamber.* Variabel control pada pengendalian ini adalah temperature pembakaran di *combustion chamber* dan variabel manipulasinya adalah suplai bahan baakr dengan menggunakan mode pengendalian proportional integral (PI). Sehingga didapatkan fungsi transfer sistem sebagai berikut:

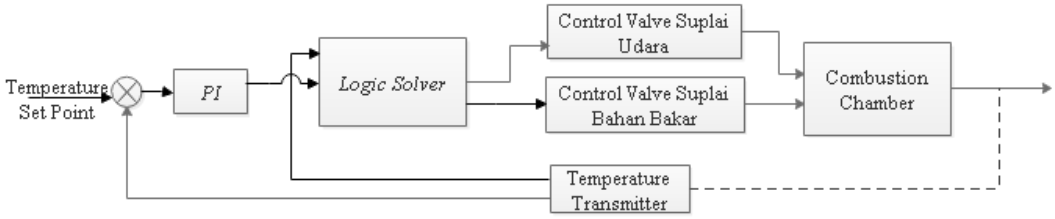
$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K\left(\frac{0.007904688}{0.103s+1}\right)\left(\frac{20032.888}{1.5s}\right)}{1+k(0.0104575)\left(\frac{0.007904688}{0.103s+1}\right)\left(\frac{20032.888}{1.5s}\right)} = \frac{158.3537K}{0.1545s^2+1.603s+1.655984K} \quad (3.23)$$

Sehingga dari fungsi transfer sistem tersebut didapatkan nilai Kp dan Ti sebagai berikut:

$Kp = 0.701821$

$Ti = 1.308333$

Perancangan sistem pengendalian dilakukan dengan mengacu pada diagram blok sitem pengendalian mode *feed back* atau *close loop*. Perancangan sistem pengendalian dilakukan agar suplai udara menuju *combustion chamber* memiliki batas maksimal *air-fuel* yaitu 17.12 untuk gas alam dan memberikan *safety* pada pembakaran di *combustion chamber* untuk tidak mencapai di temperature 1573 kelvin. Dengan kata lain massa laju udara dan bahan bakar adalah variable proses sedangkat pengendalian suplai udara menggunakan *control valve* adalah variable control. Pada sistem pengendalian ini digunakan mode *control* proportional integral (PI) untuk mengendalikan temperature pembakaran di *combustion chamber* dengan variabel manipulasinya adalah suplai bahan bakar dengan suplai udaranya dikendalikan di laju aliran massa yang maksimal secara konstan dengan *logic solver.* Namun apabila temperature di *combustion chamber* terlalu panas maka *logic solver* akan memberikan sinyal kendali pada suplai bahan bakar dengan sinyal analog yang bernilai 5 mA agar suplai bahan bakar berkurang dikarenakan bukaan *control valve* yang hampir menutup sehingga suhu pembakaran di *combustion chamber* masih di temperature yang aman dibawah 1573 kelvin. Kemudian diambil beberapa data yang digunakan sebagai variable untuk membuktikan bahwa sistem pengendalian suplai udara bekerja dengan baik dalam menjaga temperature tetap dibawah 1573 kelvin.



Gambar 3. 7 Diagram blok Sistem Pengendalian Udara ke *Combustion Chamber*

Logic solver berfungsi sebagai pengendali c*ontrol valve* suplai udara untuk pembakaran dan bahan bakar dimana masukan yang digunakan untuk menentukan aksi *logic solver* berdasarkan data pembacaan error *temperature transmitter* dengan *set point* dan *temperature transmitter* dari temeperatur pembakaran yang dihasilkan

combustion chamber, aksi yang dilakukan berdasarkan logika yang telah diatur sebagai berikut:

Condition Table

	DESCRIPTION	CONDITION	D1	D2	D3
1	suhu dibahawah 1573 kelvin	t>=4&&t<20	T	F	-
2	suhu diatas atau sama dengan 1573 kelvin	t>=20	F	T	-
		ACTIONS: SPECIFY A ROW FROM THE ACTION TABLE	u1	u2	u1

Action Table

	DESCRIPTION	ACTION

1	suhu dibahawah 1573 kelvin	u1:
		u=e;
		y=20;

2	suhu diatas 1573 kelvin	u2:
		u=5;
		y=20;

Gambar 3. 8 Tabel Aksi dan Tabel Kondisi pada *Logic Solver*

Tabel kondisi yang digunakan pada *logic solver* ketika suhu dibawah 1573 kelvin adalah ketika kondisi temperature pembakaran di *combustion chamber* memiliki rentan $3 - 1573\ kelvin$ atau ketika dibaca oleh *temperature transmitter* memiliki rentan $4 - 20\ mA$. Jadi maksud dari tabel kondisi di baris pertama yang ditunjukan dengan "t>=4&&t<=20" adalah ketika bacaan *temperature transmitter* yang ditunjukan dengan variabel 't' lebih dari sama dengan 4 dan kurang dari sama dengan 20 maka pada kolom 'D1' atau *decision* 1 pada baris pertama akan diberikan huruf T yang berarti *true* atau terpenuhi sedangan pada kolom 'D1' pada baris kedua diberikan 'F' yang berarti tidak terpenuhi sehingga pada baris paling terakhir pada kolom 'D1' akan diberi aksi 'u1' yang kemudian akan berlanjut pada tabel aksi. Pada tabel aksi dilihat pada deskripsi "suhu dibawah 1573 kelvin'' maka pada

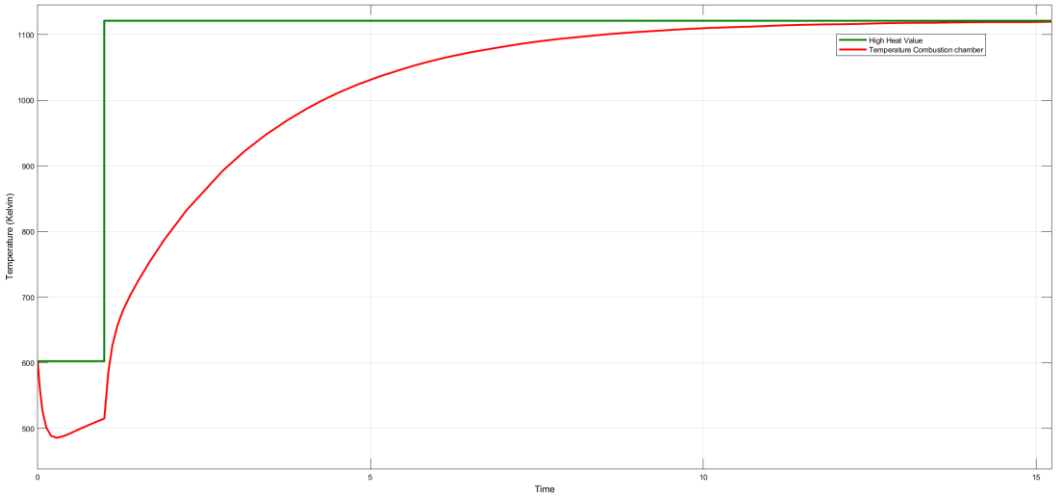
kolom ‘ACTION’ terdapat aksi ‘u1’ yang berarti meneruskan dari kondisi yang terpenuhi di tabel kondisi dengan memberikan aksi berupa u=e dan y=20 yang berarti e adalah variabel untuk error *temperature transmitter* terhadap *set point* yang dengan kata lain sinyal kendali dari PI akan mengendalikan *control valve* suplai bahan bakar sehingga temperature pada *combustion chamber* sesuai dengan *set point* dibahwah 1573 kelvin dan diatas 3 kelvin sedangkan y=20 berarti *control valve* membuka 100% sehingga laju aliran massa udara yang dihasilkan adalah 7.783 kg/s. Diberikan bukaan 100% karena kompresor di lapangan memiliki kecepatan yang mencapai 100% yang menghasilkan laju aliran massa udara 7.783 kg/s yang secara teori ketika kecepatan putaran turbin pada kompresor dijaga konstan 100% maka laju aliran massa udara yang dihasilkan juga konstan [5].

Untuk kondisi yang kedua yang ditunjukan pada baris kedua dari tabel kondisi menunjukan temperature melebihi batas maksimum yang bisa diterima oleh *combustion chamber* yaitu diatas 1573 kelvin yang ditunjukan dengan kondisi pada tabel ‘t>20’ dimana variabel ‘t’ menunjukan bacaan *temperature transmitter* yang melebihi 20 mA sehingga tabel kondisi pada kolom ‘D2’ baris kedua akan menunjukan ‘T’ yang berati kondisi temperature pembakaran di *combustion chamber* memenuhi kondisi tersebut oleh karena itu *logic solver* akan berfungsi sebagai *safety* dengan memberikan aksi ‘u2’ dimana pada tabel aksi, ‘u2’ akan memberikan sinyal kendali u=5mA dan y=20 mA yang berarti suplai bahan bakar akan menutup sekecil mungkin dan suplai udara tetap mengalirkan udara secara konstan. Hal ini digunakan untuk menghinadri temperature yang berlibahan pada pembakaran di *combustion chamber*

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

Telah diberikan data *record* dari gas turbin generator mulai dari kompresor hingga *combustion chamber* yang telah disajikan pada metodologi penelitian. Sehingga dilakukan validasi dari data lapangan yang ada dengan melakukan simulasi mnggunakan Simulink. Data validasi yang digunakan berdasarkan daya yang diberikan ketika kecepatan pada kompresor mencapai 100% yang dijaga konstan yaitu $2423.395474\ watt$ menghasilkan laju aliran massa udara $7.783\ kg/s$. Kemudian *Temperature transmitter* pada sistem ini mampu membaca temperature pada *combustion chamber* dengan rentan $3 - 1573\ kelvin$ atau pada sinyal analog adalah $4 - 20\ mA$. Dimana pada kondisi *logic solver* diharuskan sinyal analog yang dapat diterima oleh *logic solver* pada keadaan temperature yang aman adalah ketika temperature dibawah 1573 kelvin. Dan ketikan temperature diatas 1573 kelvin maka akan diberi aksi *safety* oleh *logic solver* dengan memberikan sinyal kendali pada *control valve* suplai udara 4 mA, sehingga didapatkan hasil simulasi yang ditunjukan pada gambar 4.1 sebagai berikut:



Gambar 4. 1 Kurva Reaksi Validasi Temperature *Combustion Chamber* pada Sistem Pengendalian Suplai Udara ketika Temperatur 1211 Kelvin

Kurva reaksi diatas terjadi ketika temperature di *combustion chamber* mencapai 1211 kelvin dan *air-fuel ratio* 15.64. Simulasi tersebut sesuai dengan data yang terjadi pada saat kondisi normal di lapangan ketika laju aliran massa udara yang dihasilkan kompresor mancapai maksimal yaitu 7.783 kg/s. Sehingga dapat

dikatakan model pada simulink telah tervalidasi. Berdasarkan kurva reaksi diatas didapatkan karakteristik respon sistem yang ditunjukan pada tabel 4.1 sebagai berikut:

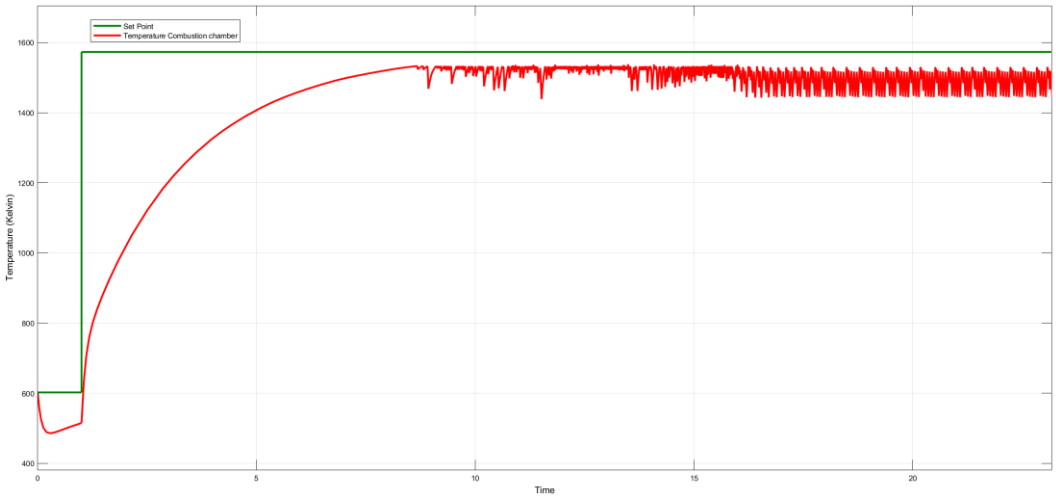
Tabel 4. 1 Karakteristik Respon Sistem ketika Temperatur 1121 Kelvin

Maksimum overshoot	0.505%
Rise time	3.909 detik
Settling Time	13.405 detik

Dibutuhkan waktu yang lama dalam mencapai *set point* dikarenakan pembakaran pada *combustion chamber* memang memerlukan waktu dalam mencapai pembakaran yang sempurna disisi lain pada *combustion chamber* juga diberikan pematik yang berlangsung hingga 10 detik agar pembakaran dapat terjadi dengan sempurna. Terjadi penurunan temperature sebelum mencapai *set point* dikarenakan pembakaran yang terjadi di *combustion chamber* masih belum sempurna dikarenakan suplai udara yang lebih cepat masuk dari bahan bakar yang dikarenakan pengaruh beda laju aliran massa. Sehingga udara yang lebih cepat masuk ke *combustion chamber* membuat temperature menurun. Berdasarkan tabel 4.1 respon sistem ketika temperatur mencapai 1121 kelvin mengalami maksimum *overshoot* 0.505% yang berarti pembakaran pada *combustion chamber* sempat mecapai tambahan 0.505% dari 1121 kelvin dengan kata lain temperatur pembakaran di *combustion chamber* ketika maksimum *overshoot* adalah 1126.6 kelvin. Kemudian *rise time* atau waktu yang diperlukan pembakaran dari 10% hingga 90% dari nilai nilai akhirnya pada kurva reaksi menunjukan 3.9 detik.

Kemudian waktu yang diperlukan ketika kurva respons mencapai dan konstan dalam 2% atau *settling time* dari nilai akhir adalah13.405 detik.

Kemudian dilakukan simulasi dengan set point yang melebihi batas normal temperature yang mampu ditampung oleh *combustion chamber* yaitu 1573 kelvin dan didapatkan kurva reaksi sistem sebagai berikut:



Gambar 4. 2 Kurva Reaksi Sstem Pengendalian Suplai Udara dengan Temperatur 1573 Kelvin.

Kurva reaksi pada gambar 4.2 terjadi ketika temperature di *combustion chamber* mencapai 1573 kelvin dan *air-fuel ratio* 15.06. Simulasi tersebut digunakan untuk membuktikan apakah *logic solver* mampu mengurangi temperature yang diberi set point 1573 kelvin dimana temperature tersebut merupakan temperature maksimal yag dapat ditampung oleh *combustion chamber* dengan laju aliran massa udara yang dihasilkan kompresor mancapai maksimal yaitu 7.783 kg/s. Berdasarkan kurva reaksi diatas temperature yang dihasilkan oleh *combustion chamber* berkurang dari set point 1573 kelvin menjadi 1531 kelvin, dengan ini berarti *logic solver* berhasil menjaga temperature di *combustion chamber* tetap dalam keadaan yang aman. Didapatkan karakteristik respon sistem yang ditunjukan pada tabel 4.2 sebagai berikut:

Tabel 4. 2 Karakteristik Respon Sistem ketika Temperatur 1573 Kelvin

overshoot	0.403%
Rise time	3.783 detik
Settling Time	-

Berdasarkan tabel 4.2 karakteristik respon sistem ketika temperatur mencapai 1573 kelvin mengalami maksimum *overshoot* 0.403% yang berarti pembakaran pada *combustion chamber* sempat mecapai tambahan 0.403% dari 1573 kelvin dengan kata lain temperatur pembakaran di *combustion chamber* ketika maksimum *overshoot* adalah 1579.3 kelvin. Kemudian *rise time* atau waktu yang diperlukan pembakaran dari 10% hingga 90% dari nilai nilai akhirnya pada kurva reaksi menunjukan 3.783 detik. Kemudian waktu yang diperlukan ketika kurva respons mencapai dan konstan dalam 2% atau *sttling time* dari nilai akhir tidak didapatkan karena kurva reaksi dari sistem yang terus berosilasi.

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan Analisa data dari penelitian yang telah dilakukan maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem pengendalian suplai udara menuju *combustion chamber* dengan menggunakan *control valve* suplai udara dan bahan bakar dapat dilakukan dengan mendapatkan data *record* dari kondisi yang terjadi di lapangan seperti temperature, enthalpy dan laju aliran massa yang terjadi pada3 januari hingga 4 februari. Data yang sudah didapatkan akan diolah dan didapatkan fungsi transfer dari sistem pengendalian mode PI. Kemudain dari sistem pengendalian mode PI diberikan *safety* agar temperature di *combustion chamber* tidak mencapai batas maksimal temperature yang dapat ditampung yaitu 1573 kelvin dengan menggunakan *logic solver.* Dengan menggunakan bacaan *temperature transmitter* sebagai masukan *logic solver* temperature di *combustion chamber* tetap terjaga dibawah 1573 kelvin.
2. Berdasarkan hasil dari simulasi sistem pengendalian suplai udara menuju *combustion chamber* dengan Simulink, didapatkan temperature pada *combustion chamber* ketika laju aliran massa udara maksimal dari kompresor 7.783 kg/s dan suplai bahan bakar 0.1245 kg/s didapatkan temperature 1121 kelvin dimana hal ini sesuai dengan data operasi ketika kondisi normal di lapangan. Kemudian set point pada sistem pengendalian ditingkatkan hingga ke batas maksimal yaitu 1573 kelvin dan didapatkan temperature yang dihasilkan di *combustion chamber* menjadi 1531 kelvin, yang berarti *logic solver* berhasil menurunkan temperature dari batas maksimal temperature pembakaran.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan pada tugas akhir ini adalah alangkah baiknya pada perushaan yang bersangkutan pada tugas akhir ini memberikan data yang lengkap baik datasheet dari setiap instrument maupun data lapangan yang aktual dan untuk penelitian kedepannya dapat diberikan pemodelan sistem gas turbin generator lebih detail dengan menambahkan komponen turbin dan kompresor pada simulasinya

sehingga simulasi dapat memberikan hasil yang lebih akurat dengan kondisi yang sebenarnya di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

[1] B. Triyono, 11 November 2015. [Online]. Available: https://documents.pub/document/2-industrial-gas-turbine-engine.html.

[2] R. T. Sujono, "SimulasiNumerik Karakteristik Pembakaran Bahan Bakar Cair pada Aliran Double Concentric Diffusion Jet Flame Dengan CFD," 2002.

[3] A. Razak, "Gas Turbine Combustion," dalam *Industrial Gas Turbines Performance and Operability*, Cambridge, Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, 2007, pp. 137-146.

[4] cs.stanford.edu, 16 3 2004. [Online]. Available: https://cs.stanford.edu/people/eroberts/courses/ww2/projects/jet-airplanes/how.html.

[5] S. R. Gaudet, "Development of Dynamic Modeling and Control System Design Methodology for Gas Turbines," *Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Carleton University,*, 2007.

[6] A. W. James dan S. Rajagopalan, "Structural Alloys for Power Plants Operational Challenges and High-Temperature Materials," *Woodhead Publishing Series in Energy,* p. 3, 2014.

[7] P. Breeze, "Gas Turbines," dalam *Gas Turbines Power Generation*, Amsterdam, Academic Press, 2016, pp. 31-42.

[8] E. Thirunavukarasu , "Modeling and Simulation Study of A Dynamic Gas Turbine System In A Virtual Test Bed Environment," *Theses and Dissertations University of South Carolina Scholar Commons,* p. 18, 2013.

[9] i. PT. Saka, 2007.

[10] " "Fisher control valve handbook" fourth edition 1977," dalam *Instrument Society of America Standard S561.1,*, 1976.

[11] instrumentationtoolbox.com, "Learning Instrumentation and Control Engineering," 10 Juni 2020. [Online]. Available: https://www.instrumentationtoolbox.com/2014/03/control-valve-actuators-basic-types-and.html.

[12] S. BasuAjay dan K. Debnath, “General Instruments,” dalam *Power Plant Instrumentation and Control Handbook,* Academic press, 2015, pp. 229-296.

[13] W. Milligan, D. Muir dan D. Harrison, “Oil level measurement in oil-injected screw compressor packages used in the petroleum, petrochemical, refrigeration and fuel gas market,” dalam *8th International Conference on Compressors and their Systems,* London, 2013.

[14] “Thermometrics Corporation,” 2012. [Online]. Available: www.thermometricscorp.com.

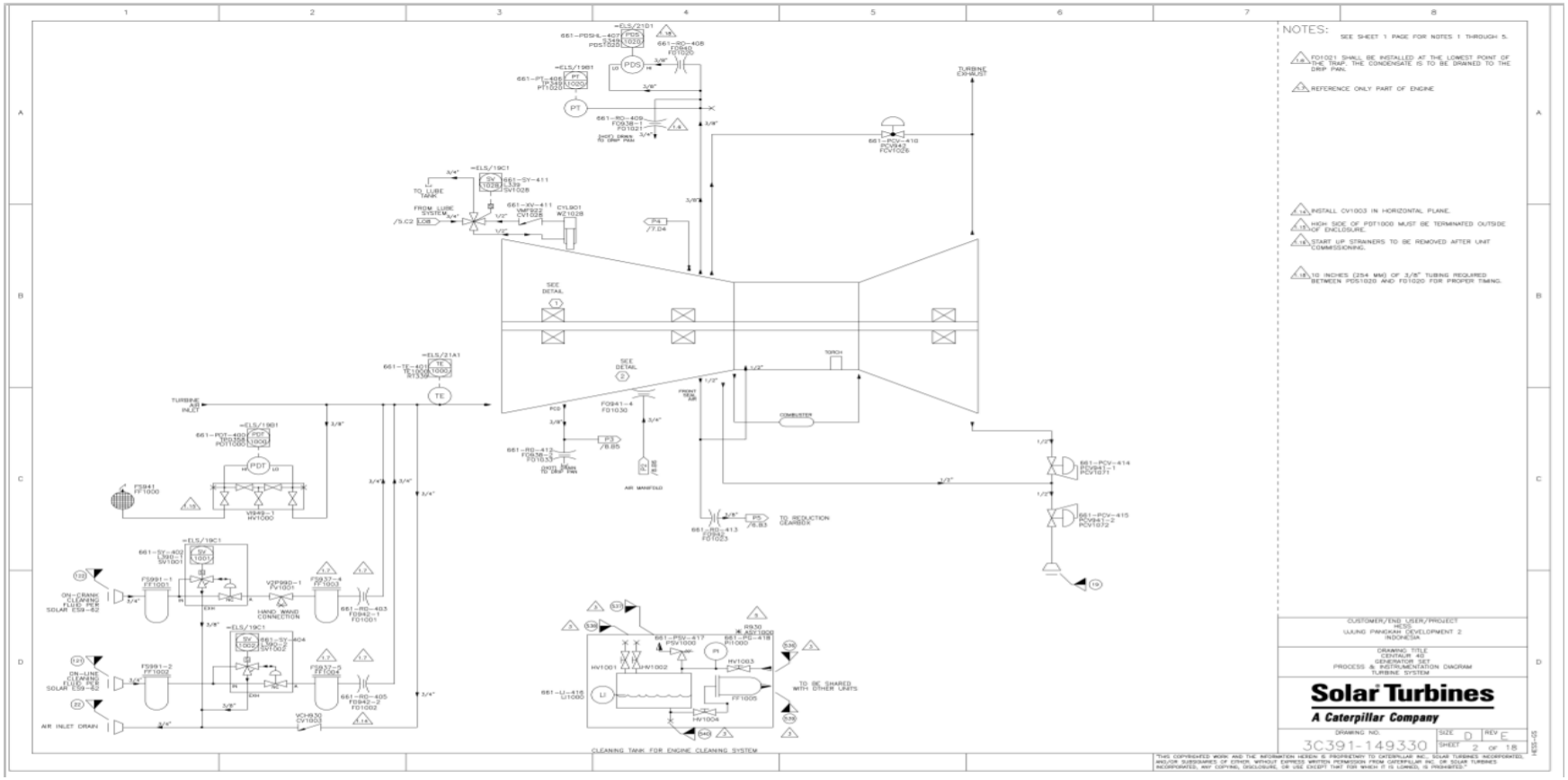
[15] MathWorks, “The MathWorks, Inc.,” 2020. [Online]. Available: https://www.mathworks.com/help/stateflow/ug/programming-a-truth-table.html.

[16] P. Garrison, “2020 Air & Space Magazine,” September 2006. [Online]. Available: https://www.airspacemag.com/flight-today/flameout-9043856/.

[17] www.mathworks.com, “The MathWorks, Inc.,” 1994-2020 . [Online]. Available: https://www.mathworks.com/help/simulink/ug/what-is-a-matlab-function-block.html. [Diakses 19 July 2020].

LAMPIRAN A

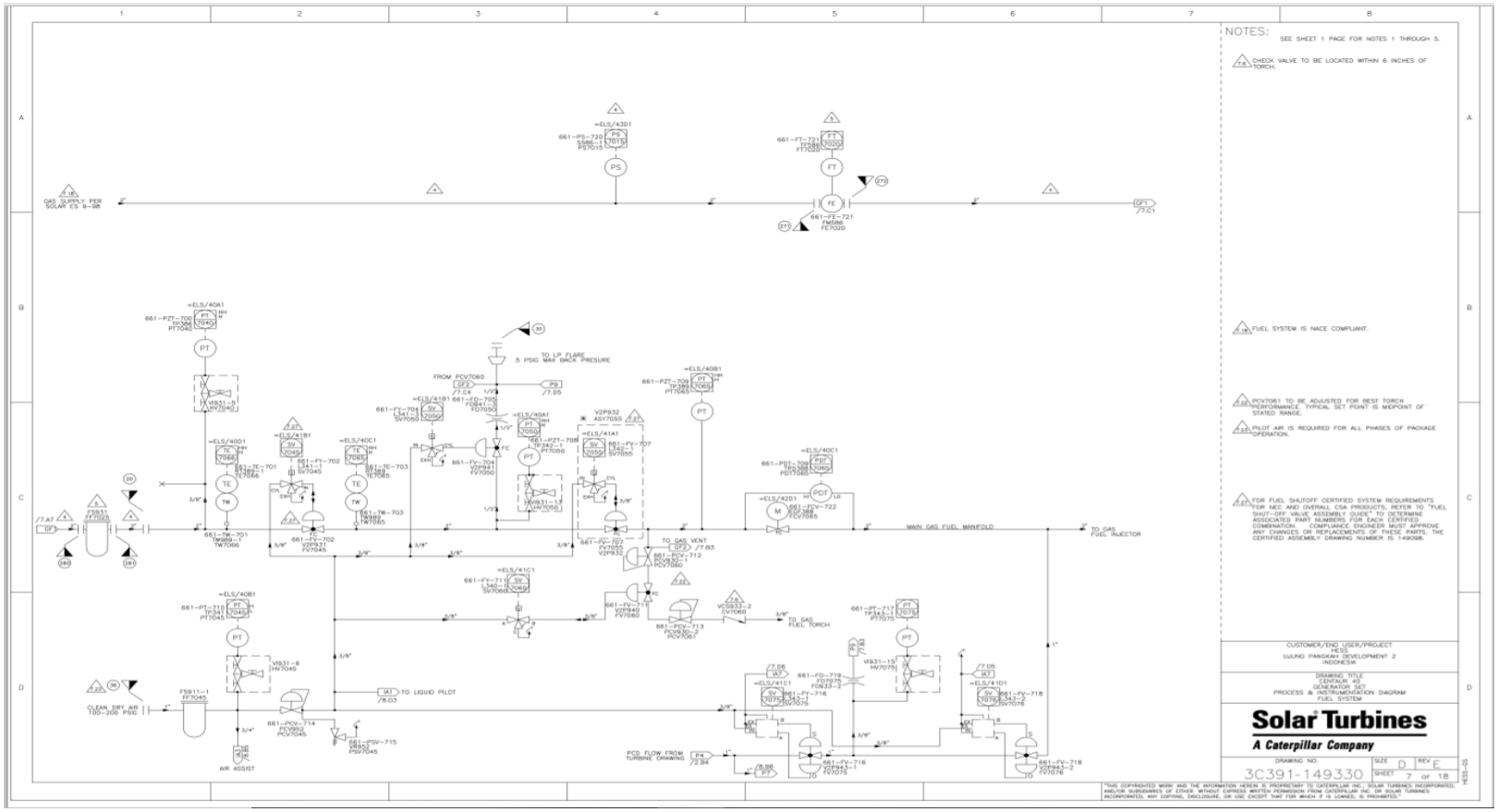
P&ID Gas Turbine Generator *Cemtaur* 40



Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN B

P&ID Sistem Bahan Bakar Gas Turbine Generator *Cemtaur* 40



Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN C

Data Operasi Gas Turbine Generator Centaur 40 (3 Januari – 4 februari 2020)

T2 (K)	h2	T3 (K)	h3	Mfuel (kg/s)	Mudara (kg/s)	AFR
602,1469	609,2764	1101,952	1724,841	0,098375	1,355140512	**13,77525**
603,7463	610,9573	1103,551	1726,522	0,10273333	1,439006855	**14,0072**
602,2428	609,3772	1102,048	1724,942	0,10321944	1,457038474	**14,11593**
602,3034	609,4409	1102,108	1725,005	0,10418889	1,552849066	**14,90417**
603,4949	610,6931	1103,3	1726,258	0,10273333	1,453624835	**14,1495**
603,5665	610,7684	1103,371	1726,333	0,10564167	1,527512503	**14,45938**
602,8044	609,9674	1102,609	1725,532	0,10564167	1,57002694	**14,86182**
603,2752	610,4623	1103,08	1726,027	0,10661111	1,542164339	**14,46532**
605,1309	612,4126	1104,936	1727,977	0,10709444	1,583654916	**14,78746**
604,8484	612,1157	1104,653	1727,68	0,106125	1,512027009	**14,2476**
604,7726	612,036	1104,578	1727,601	0,10273333	1,481774498	**14,4235**
603,2745	610,4615	1103,079	1726,026	0,10273333	1,440113301	**14,01798**
602,3431	609,4826	1102,148	1725,047	0,10321944	1,541687382	**14,93602**
602,0526	609,1773	1101,858	1724,742	0,10273333	1,427776134	**13,89789**
602,684	609,8409	1102,489	1725,405	0,10467222	1,487938998	**14,21522**
601,9019	609,0189	1101,707	1724,583	0,10418889	1,492733019	**14,32718**
603,025	610,1993	1102,83	1725,764	0,10709444	1,515077725	**14,14712**
600,1169	607,1428	1099,922	1722,707	0,10370278	1,449304852	**13,97556**
600,6201	607,6718	1100,425	1723,236	0,10225	1,424853654	**13,935**
600,3375	607,3747	1100,142	1722,939	0,10321944	1,441978706	**13,97003**
600,3659	607,4045	1100,171	1722,969	0,10467222	1,476586702	**14,10677**
602,1225	609,2507	1101,927	1724,815	0,10273333	1,432917235	**13,94793**
602,0222	609,1453	1101,827	1724,71	0,10321944	1,529393936	**14,81692**
602,8445	610,0096	1102,649	1725,574	0,10418889	1,425887355	**13,6856**
602,7137	609,872	1102,519	1725,437	0,10273333	1,414371952	**13,76741**
603,5517	610,7529	1103,357	1726,317	0,10370278	1,447659145	**13,95969**
		499,8049	1115,565	0,10273333		
603,626	610,831	1103,431	1726,395	0,10661111	1,52003828	**14,25778**
602,8138	609,9773	1102,619	1725,542	0,10564167	1,556545904	**14,7342**
604,0557	611,2826	1103,861	1726,847	0,10467222	1,501610875	**14,34584**
603,1468	610,3273	1102,952	1725,892	0,10079722	1,477325691	**14,65641**
603,2456	610,4311	1103,051	1725,996	0,10709444	1,565181818	**14,61497**
603,8465	611,0626	1103,651	1726,627	0,106125	1,513592357	**14,26235**
601,7669	608,877	1101,572	1724,442	0,10709444	1,529565808	**14,2824**
602,2087	609,3413	1102,014	1724,906	0,10709444	1,527178347	**14,26011**

602,9047	610,0728	1102,71	1725,637	0,10515556	1,488530861	**14,15551**
602,684	609,8409	1102,489	1725,405	0,106125	1,566577977	**14,76163**
603,1543	610,3352	1102,959	1725,9	0,10467222	1,48477907	**14,18503**
602,5239	609,6726	1102,329	1725,237	0,10467222	1,503359298	**14,36254**
603,025	610,1993	1102,83	1725,764	0,106125	1,564013948	**14,73747**
601,5609	608,6605	1101,366	1724,225	0,10515556	1,492618536	**14,19439**
602,1832	609,3145	1101,988	1724,879	0,10467222	1,468560658	**14,03009**
601,0511	608,1247	1100,856	1723,689	0,10225	1,470523029	**14,38164**
601,3015	608,3878	1101,106	1723,952	0,10273333	1,499319657	**14,59429**
601,4606	608,5551	1101,266	1724,12	0,10467222	1,471470667	**14,05789**
603,4056	610,5993	1103,21	1726,164	0,10370278	1,49400018	**14,40656**
603,8465	611,0626	1103,651	1726,627	0,10370278	1,544430112	**14,89285**
604,1843	611,4177	1103,989	1726,982	0,10321944	1,463444545	**14,17799**
604,2761	611,5142	1104,081	1727,079	0,10273333	1,431959748	**13,93861**
603,6518	610,8581	1103,457	1726,423	0,10321944	1,457224903	**14,11774**
603,6518	610,8581	1103,457	1726,423	0,10370278	1,513001079	**14,58978**
603,2115	610,3953	1103,016	1725,96	0,10321944	1,504028343	**14,57117**
602,1469	609,2764	1101,952	1724,841	0,10128056	1,471061051	**14,52461**
600,7105	607,7668	1100,515	1723,331	0,10321944	1,492976918	**14,46411**
598,1925	605,1221	1097,997	1720,687	0,10176667	1,510660648	**14,84436**
597,5357	604,4325	1097,341	1719,997	0,10370278	1,51525015	**14,61147**
598,1925	605,1221	1097,997	1720,687	0,10321944	1,42455629	**13,80124**
598,2527	605,1853	1098,058	1720,75	0,10418889	1,48133203	**14,21775**
601,0841	608,1594	1100,889	1723,724	0,10418889	1,524221374	**14,6294**
601,7946	608,9061	1101,6	1724,471	0,106125	1,602512298	**15,10023**
602,1516	609,2813	1101,957	1724,846	0,10564167	1,521245003	**14,40005**
602,55	609,7001	1102,355	1725,265	0,106125	1,535275745	**14,46667**
603,025	610,1993	1102,83	1725,764	0,10564167	1,512767669	**14,3198**
600,4871	607,532	1100,292	1723,097	0,09885833	1,349128092	**13,64709**
600,8107	607,8721	1100,616	1723,437	0,10128056	1,392110443	**13,74509**
		499,8049	1115,565	0,10128056		
601,4606	608,5551	1101,266	1724,12	0,10273333	1,443704104	**14,05293**
601,5609	608,6605	1101,366	1724,225	0,10321944	1,466453935	**14,20715**
602,8137	609,9772	1102,619	1725,542	0,10467222	1,457315153	**13,92265**
602,303	609,4404	1102,108	1725,005	0,10394444	1,474794293	**14,18829**
604,3074	611,5471	1104,112	1727,112	0,10418889	1,500807635	**14,40468**
605,0466	612,324	1104,851	1727,888	0,10225	1,437940559	**14,06299**
604,5565	611,8089	1104,361	1727,373	0,10249167	1,430186683	**13,95418**
603,0341	610,2089	1102,839	1725,773	0,10176667	1,497492999	**14,71497**
602,4036	609,5462	1102,209	1725,111	0,10273333	1,434375362	**13,96212**

601,3403	608,4286	1101,145	1723,993	0,10467222	1,44373933	**13,79296**
601,4918	608,5878	1101,297	1724,152	0,10418889	1,502695993	**14,4228**
601,9906	609,1122	1101,796	1724,677	0,10273333	1,491010217	**14,5134**
602,7137	609,872	1102,519	1725,437	0,10370278	1,432263957	**13,81124**
602,593	609,7453	1102,398	1725,31	0,106125	1,590184418	**14,98407**
596,9983	603,8682	1096,803	1719,433	0,10709444	1,509751372	**14,09738**
596,0423	602,8644	1095,847	1718,429	0,10564167	1,435618015	**13,58951**
		499,8049	1115,565	0,10564167		
598,3192	605,2551	1098,124	1720,82	0,10370278	1,495509903	**14,42112**
597,5357	604,4325	1097,341	1719,997	0,10467222	1,520900578	**14,53013**
598,1744	605,1031	1097,979	1720,668	0,10806389	1,544812704	**14,29536**
598,5917	605,5413	1098,397	1721,106	0,10661111	1,483220157	**13,91244**
600,0801	607,1042	1099,885	1722,669	0,106125	1,512569496	**14,25272**
598,7547	605,7125	1098,56	1721,277	0,10370278	1,491553592	**14,38297**
597,0679	603,9413	1096,873	1719,506	0,10273333	1,429520944	**13,91487**
597,9716	604,8902	1097,776	1720,455	0,10273333	1,45290743	**14,14251**
597,7507	604,6582	1097,556	1720,223	0,10176667	1,496434812	**14,70457**
600,7901	607,8504	1100,595	1723,415	0,10661111		
598,5008	605,4459	1098,306	1721,01	0,08965278	1,123427386	**12,53087**
603,7463	610,9573	1103,551	1726,522	0,10321944	1,484735896	**14,38427**
604,3762	611,6194	1104,181	1727,184	0,10225		
602,7737	609,9352	1102,579	1725,5	0,10297778	1,484410898	**14,41487**
602,6241	609,7779	1102,429	1725,342	0,10225	1,466147276	**14,33885**
601,4918	608,5878	1101,297	1724,152	0,10321944	1,429749095	**13,85155**
602,4634	609,6091	1102,268	1725,174	0,106125	1,612901299	**15,19813**
602,4033	609,5458	1102,208	1725,11	0,10782222	1,543963031	**14,31953**
602,4634	609,6091	1102,268	1725,174	0,10757778	1,518283549	**14,11336**
602,7443	609,9043	1102,549	1725,469	0,106125	1,517504964	**14,29922**
602,4036	609,5462	1102,209	1725,111	0,10370278	1,557393499	**15,01786**
598,9213	605,8873	1098,726	1721,452	0,10515556	1,561795253	**14,85224**
597,8076	604,7179	1097,612	1720,282	0,10854722	1,5338012	**14,13027**
601,1197	608,1968	1100,925	1723,761	0,10418889	1,493922764	**14,3386**
		499,8049	1115,565	0,10467222		
601,3403	608,4286	1101,145	1723,993	0,10515556	1,498539866	**14,2507**
600,4863	607,5311	1100,291	1723,096	0,10515556	1,542741096	**14,67104**
599,076	606,0498	1098,881	1721,614	0,10515556	1,492076651	**14,18923**
599,5553	606,5531	1099,36	1722,118	0,10467222	1,441997884	**13,77632**
600,0166	607,0374	1099,821	1722,602	0,10370278	1,44063419	**13,89195**
599,5553	606,5531	1099,36	1722,118	0,10321944	1,434386733	**13,89648**
599,3627	606,3508	1099,168	1721,915	0,10515556	1,450012814	**13,78922**

598,9213	605,8873	1098,726	1721,452	0,10370278	1,526842562	**14,72326**
601,3403	608,4286	1101,145	1723,993	0,106125	1,512211233	**14,24934**
602,1516	609,2813	1101,957	1724,846	0,106125		
603,4949	610,6931	1103,3	1726,258	0,10321944	1,52163499	**14,74175**
598,9756	605,9444	1098,781	1721,509	0,10515556	1,477138713	**14,04718**
601,1116	608,1883	1100,916	1723,753	0,10757778	1,533863521	**14,25818**
602,7709	609,9322	1102,576	1725,497	0,10854722	1,534866057	**14,14008**
602,3723	609,5133	1102,177	1725,078	0,10806389	1,540674941	**14,25707**
602,593	609,7453	1102,398	1725,31	0,10709444	1,567227899	**14,63407**
601,5219	608,6195	1101,327	1724,184	0,10418889	1,4999404	**14,39636**
601,0194	608,0914	1100,824	1723,656	0,10467222	1,464469223	**13,991**
598,4798	605,4238	1098,285	1720,988	0,10418889	1,470162864	**14,11055**
600,4578	607,5012	1100,263	1723,066	0,10467222	1,459623895	**13,94471**
603,7463	610,9573	1103,551	1726,522	0,10661111	1,505229757	**14,11888**
600,5581	607,6066	1100,363	1723,171	0,10515556	1,522570056	**14,47922**
600,1169	607,1428	1099,922	1722,707	0,10564167	1,547908596	**14,65244**
599,8041	606,8143	1099,609	1722,379	0,10564167	1,533432219	**14,51541**
599,5379	606,5348	1099,343	1722,099	0,10515556	1,555235937	**14,78986**
598,6404	605,5924	1098,445	1721,157	0,10418889	1,458840624	**14,00188**
598,2591	605,1921	1098,064	1720,757	0,10515556	1,46514928	**13,93316**
598,2929	605,2275	1098,098	1720,792	0,10467222	1,450631848	**13,8588**
598,7932	605,7528	1098,598	1721,317	0,10418889	1,435601143	**13,77883**
600,5782	607,6276	1100,383	1723,192	0,10418889	1,450126761	**13,91825**
603,8465	611,0626	1103,651	1726,627	0,10564167	1,483633094	**14,04401**
598,9756	605,9444	1098,781	1721,509	0,10418889	1,472050192	**14,12867**
602,0513	609,1759	1101,856	1724,74	0,10564167	1,479701092	**14,00679**
602,5239	609,6726	1102,329	1725,237	0,10467222	1,463014197	**13,9771**
603,1548	610,3357	1102,96	1725,9	0,106125	1,540663917	**14,51745**
604,1871	611,4207	1103,992	1726,985	0,10564167	1,568938583	**14,85151**
607,3809	614,7773	1107,186	1730,342	0,10709444	1,637900606	**15,29398**
605,2776	612,5668	1105,083	1728,131	0,106125	1,587672283	**14,9604**
604,7482	612,0104	1104,553	1727,575	0,10709444	1,524757695	**14,23751**
604,6897	611,9488	1104,495	1727,513	0,10757778	1,598926457	**14,86298**
603,2854	610,4729	1103,09	1726,037	0,10854722	1,615486576	**14,8828**
601,8425	608,9565	1101,647	1724,521	0,10709444	1,52784719	**14,26635**
602,8044	609,9674	1102,609	1725,532	0,10709444	1,506932647	**14,07106**
604,2484	611,4851	1104,053	1727,05	0,10709444	1,542615173	**14,40425**
602,2087	609,3413	1102,014	1724,906	0,10806389	1,5922684	**14,73451**
600,9837	608,0539	1100,789	1723,618	0,10709444	1,494530937	**13,95526**
600,5018	607,5473	1100,307	1723,112	0,10806389	1,598171285	**14,78913**

600,1452	607,1726	1099,95	1722,737	0,10515556	1,565100419	**14,88367**
599,8041	606,8143	1099,609	1722,379	0,106125	1,470096697	**13,8525**
599,0416	606,0137	1098,847	1721,578	0,10418889	1,504498699	**14,44011**
599,142	606,1191	1098,947	1721,684	0,10418889	1,551865027	**14,89473**
598,7005	605,6556	1098,505	1721,22	0,10467222	1,558931229	**14,89346**
600,8991	607,9649	1100,704	1723,529	0,10467222	1,523909331	**14,55887**
599,796	606,8058	1099,601	1722,37	0,10467222	1,452069034	**13,87253**
599,3236	606,3098	1099,129	1721,874	0,10709444	1,579030179	**14,74428**
599,2232	606,2043	1099,028	1721,769	0,10661111	1,510140137	**14,16494**
599,2969	606,2818	1099,102	1721,846	0,10515556	1,520399124	**14,45857**
599,8592	606,8721	1099,664	1722,437	0,10564167	1,482321171	**14,0316**
602,684	609,8409	1102,489	1725,405	0,10467222	1,542525592	**14,73672**
604,2484	611,4851	1104,053	1727,05	0,10467222	1,565111866	**14,9525**
601,7102	608,8174	1101,515	1724,382	0,10467222	1,534164873	**14,65685**
601,5219	608,6195	1101,327	1724,184	0,10418889	1,506692854	**14,46117**
601,5609	608,6605	1101,366	1724,225	0,106125	1,587500023	**14,95878**
602,0513	609,1759	1101,856	1724,74	0,10757778	1,556846398	**14,47182**
601,5919	608,6931	1101,397	1724,258	0,10467222	1,469339826	**14,03753**
598,6342	605,586	1098,439	1721,15	0,10370278	1,500965944	**14,47373**
600,6201	607,6718	1100,425	1723,236	0,10467222	1,531350032	**14,62996**
602,8044	609,9674	1102,609	1725,532	0,10757778	1,506285247	**14,00183**
603,4662	610,663	1103,271	1726,228	0,10661111	1,492757842	**14,0019**
603,1253	610,3047	1102,93	1725,869	0,10661111	1,553456948	**14,57125**
600,0449	607,0671	1099,85	1722,632	0,10564167	1,473697926	**13,94997**
598,7666	605,725	1098,572	1721,289	0,10757778	1,543859885	**14,3511**
598,3705	605,3091	1098,175	1720,874	0,10661111	1,570356248	**14,72976**
599,076	606,0498	1098,881	1721,614	0,10418889	1,487596833	**14,27788**
		499,8049	1115,565	0,10370278		
600,1071	607,1326	1099,912	1722,697	0,10661111	1,620360175	**15,19879**
600,2656	607,2991	1100,07	1722,864	0,10467222	1,50222774	**14,35173**
600,4578	607,5012	1100,263	1723,066	0,10418889	1,555350207	**14,92818**
599,8861	606,9004	1099,691	1722,465	0,10661111	1,533175992	**14,38102**
598,9213	605,8873	1098,726	1721,452	0,10370278	1,537217639	**14,8233**
599,8592	606,8721	1099,664	1722,437	0,10418889	1,462333616	**14,03541**
600,7628	607,8217	1100,568	1723,386	0,10564167	1,490780857	**14,11167**
602,0513	609,1759	1101,856	1724,74	0,10515556	1,461212981	**13,89573**
604,0377	611,2636	1103,843	1726,828	0,10661111	1,50146159	**14,08354**
604,8202	612,086	1104,625	1727,651	0,10757778	1,588864181	**14,76945**
603,8465	611,0626	1103,651	1726,627	0,10564167	1,48334144	**14,04125**
603,1555	610,3364	1102,96	1725,901	0,10515556	1,511437816	**14,37335**

601,8673	608,9825	1101,672	1724,547	0,10709444	1,566506094	**14,62733**
601,3015	608,3878	1101,106	1723,952	0,10370278	1,518171285	**14,63964**
601,09	608,1656	1100,895	1723,73	0,10370278		
602,3723	609,5133	1102,177	1725,078	0,10806389	1,525705103	**14,11855**
597,0436	603,9158	1096,848	1719,48	0,11193889		
598,2231	605,1543	1098,028	1720,719	0,10854722	1,516711722	**13,97283**
598,8129	605,7735	1098,618	1721,338	0,10661111	1,490479385	**13,98053**
600,8495	607,9129	1100,654	1723,477	0,10903333	1,542033453	**14,14277**
600,8274	607,8896	1100,632	1723,454	0,10467222	1,447632191	**13,83015**
601,1484	608,227	1100,953	1723,791	0,10661111	1,559455914	**14,62752**
603,1548	610,3357	1102,96	1725,9	0,10709444	1,500637733	**14,01228**
600,5496	607,5976	1100,354	1723,162	0,10128056	1,370513437	**13,53185**
599,6383	606,6402	1099,443	1722,205	0,10661111	1,502416134	**14,09249**
599,9293	606,9458	1099,734	1722,51	0,10225	1,372402596	**13,42203**
601,2688	608,3535	1101,074	1723,918	0,106125	1,486653352	**14,00851**
600,8906	607,956	1100,695	1723,521	0,10951667	1,551373674	**14,16564**
600,2543	607,2873	1100,059	1722,852	0,10903333	1,533078034	**14,06064**
599,8438	606,856	1099,649	1722,421	0,10854722	1,596425638	**14,7072**
600,6423	607,6951	1100,447	1723,26	0,10709444	1,523845809	**14,22899**
602,3091	609,4468	1102,114	1725,011	0,10854722		
602,1516	609,2813	1101,957	1724,846	0,10564167	1,428967292	**13,52655**
603,872	611,0894	1103,677	1726,654	0,10418889	1,418048116	**13,61036**
603,3116	610,5005	1103,116	1726,065	0,10128056	1,458190126	**14,39753**
602,8713	610,0377	1102,676	1725,602	0,10370278	1,436583029	**13,85289**
603,3116	610,5005	1103,116	1726,065	0,10370278	1,440322908	**13,88895**
602,6511	609,8063	1102,456	1725,371	0,10370278	1,507091689	**14,5328**
602,3669	609,5076	1102,172	1725,072	0,10370278	1,468386897	**14,15957**
		499,8049	1115,565	0,10757778		
602,9647	610,1359	1102,77	1725,7	0,10661111		
603,2745	610,4615	1103,079	1726,026	0,10564167	1,566950246	**14,83269**
604,0669	611,2943	1103,872	1726,859	0,10854722		
603,1543	610,3352	1102,959	1725,9	0,10564167	1,490666168	**14,11059**
603,3747	610,5668	1103,18	1726,131	0,10564167	1,517630164	**14,36583**
604,5966	611,851	1104,401	1727,416	0,10515556	1,532270465	**14,57146**
603,8465	611,0626	1103,651	1726,627	0,10806389	1,56783853	**14,50844**
602,7712	609,9325	1102,576	1725,497	0,10467222	1,461452093	**13,96218**
602,7069	609,8649	1102,512	1725,429	0,10418889	1,486435465	**14,26674**
		499,8049	1115,565	0,10467222		
		499,8049	1115,565	0,10467222		
600,8406	607,9034	1100,645	1723,468	0,10467222	1,53898992	**14,70294**

602,593	609,7453	1102,398	1725,31	0,10757778	1,524213228	**14,16848**
603,2127	610,3966	1103,018	1725,961	0,11000278	1,5580962	**14,16415**
602,272	609,4079	1102,077	1724,972	0,10757778	1,512863482	**14,06297**
602,8445	610,0096	1102,649	1725,574	0,10564167	1,502061618	**14,21846**
603,9921	611,2157	1103,797	1726,78	0,10515556	1,54347294	**14,678**
604,7168	611,9773	1104,522	1727,542	0,10661111	1,492615575	**14,00056**
602,8138	609,9773	1102,619	1725,542	0,10321944	1,475978908	**14,29943**
602,7137	609,872	1102,519	1725,437	0,10370278	1,551159608	**14,95774**
602,027	609,1503	1101,832	1724,715	0,10321944	1,38284917	**13,39718**
603,2745	610,4615	1103,079	1726,026	0,10757778	1,526520208	**14,18992**
602,6511	609,8063	1102,456	1725,371	0,10515556	1,518432483	**14,43987**
		499,8049	1115,565	0,10418889		
602,5935	609,7457	1102,398	1725,31	0,10709444	1,499421002	**14,00092**
		499,8049	1115,565	0,10515556		
602,4933	609,6405	1102,298	1725,205	0,106125	1,475025772	**13,89895**
602,7443	609,9043	1102,549	1725,469	0,10661111	1,561457678	**14,64629**
602,8445	610,0096	1102,649	1725,574	0,10757778	1,562989292	**14,52892**
603,2456	610,4311	1103,051	1725,996	0,10854722	1,519818595	**14,00145**
602,7443	609,9043	1102,549	1725,469	0,106125	1,545639561	**14,56433**
602,273	609,4089	1102,078	1724,973	0,10467222	1,460785921	**13,95581**
603,0341	610,2089	1102,839	1725,773	0,10564167		
602,6511	609,8063	1102,456	1725,371	0,10418889	1,44619081	**13,88047**
601,7102	608,8174	1101,515	1724,382	0,10806389	1,533578011	**14,1914**
600,0801	607,1042	1099,885	1722,669	0,10854722	1,513620603	**13,94435**
600,2656	607,2991	1100,07	1722,864	0,10467222	1,488676357	**14,22227**
		499,8049	1115,565	0,10370278		
599,6182	606,6191	1099,423	1722,184	0,10225	1,390849374	**13,60244**
596,4562	603,299	1096,261	1718,864	0,08529167	1,121468372	**13,14863**
598,227	605,1583	1098,032	1720,723	0,0882	1,086266265	**12,31594**
597,561	604,4591	1097,366	1720,024	0,08577778	0,94445346	**11,01047**
600,246	607,2786	1100,051	1722,843	0,08626111	0,994158922	**11,525**
599,6595	606,6625	1099,464	1722,227	0,08916944	1,128138362	**12,65162**
597,387	604,2764	1097,192	1719,841	0,08626111	1,114675292	**12,92211**
596,9503	603,8178	1096,755	1719,382	0,08674722	0,988672643	**11,39717**
598,479	605,423	1098,284	1720,987	0,08577778		
598,9917	605,9613	1098,797	1721,526	0,08868333	1,045913701	**11,7938**
598,5546	605,5023	1098,359	1721,067	0,08626111	1,013658905	**11,75105**
598,2168	605,1476	1098,022	1720,712	0,08529167	1,058461218	**12,4099**
598,4552	605,398	1098,26	1720,962	0,08577778	1,009314471	**11,76662**
599,9609	606,979	1099,766	1722,543	0,08916944	1,098903771	**12,32377**

598,9917	605,9613	1098,797	1721,526	0,08626111	1,044612154	**12,10989**
597,7796	604,6886	1097,584	1720,253	0,08529167	1,084811036	**12,71884**
597,3316	604,2182	1097,137	1719,783	0,08723056	1,105500504	**12,67332**
596,4209	603,2619	1096,226	1718,826	0,08529167	0,992547927	**11,6371**
597,0046	603,8749	1096,81	1719,439	0,084325	0,983642196	**11,66489**
597,0133	603,884	1096,818	1719,448	0,08868333	1,095804146	**12,35637**
597,5744	604,4731	1097,379	1720,038	0,08723056	1,060563754	**12,15817**
596,4209	603,2619	1096,226	1718,826	0,08577778	0,936254121	**10,91488**
595,291	602,0755	1095,096	1717,64	0,0882	1,119406317	**12,69168**
595,2979	602,0828	1095,103	1717,647	0,0882	1,142639427	**12,9551**
597,0653	603,9385	1096,87	1719,503	0,09013889	1,148621807	**12,7428**
598,736	605,6928	1098,541	1721,257	0,08965278	1,168367207	**13,03214**
599,71	606,7155	1099,515	1722,28	0,08626111	0,972072547	**11,26895**
599,8859	606,9002	1099,691	1722,465	0,084325	1,064328657	**12,62175**
598,9917	605,9613	1098,797	1721,526	0,08529167	1,094148846	**12,82832**
599,1541	606,1318	1098,959	1721,696	0,08577778	0,986032068	**11,49519**
598,7173	605,6731	1098,522	1721,238	0,08529167	0,963423413	**11,29563**
599,5035	606,4987	1099,308	1722,063	0,08771389	1,141208251	**13,01058**
598,2223	605,1534	1098,027	1720,718	0,08529167	1,086253411	**12,73575**
597,7047	604,6099	1097,51	1720,174	0,08626111		
598,0422	604,9643	1097,847	1720,529	0,08723056	1,093667107	**12,53766**
598,2903	605,2248	1098,095	1720,789	0,08674722	1,098442909	**12,66257**
597,4153	604,306	1097,22	1719,871	0,08529167	1,059517661	**12,42229**
597,5359	604,4327	1097,341	1719,997	0,08916944	1,091700844	**12,24299**
596,221	603,0521	1096,026	1718,617	0,08965278	1,193971257	**13,31773**
594,7849	601,5441	1094,59	1717,109	0,08577778	0,979737566	**11,42181**
594,6339	601,3855	1094,439	1716,95	0,08626111	1,066331335	**12,36167**
594,0288	600,7503	1093,834	1716,315	0,08529167	1,071277124	**12,56016**
594,3127	601,0484	1094,118	1716,613	0,08577778	0,934257257	**10,8916**
593,7758	600,4845	1093,581	1716,049	0,084325	1,02259561	**12,12684**
593,7901	600,4996	1093,595	1716,064	0,08480833	0,970328989	**11,44143**
595,0058	601,7761	1094,811	1717,341	0,0882	1,050549723	**11,91099**
594,4666	601,2099	1094,271	1716,774	0,08577778	0,98732918	**11,51031**
595,291	602,0755	1095,096	1717,64	0,08626111	0,978801161	**11,34696**
595,7996	602,6096	1095,605	1718,174	0,08577778	0,943981413	**11,00496**
598,2903	605,2248	1098,095	1720,789	0,08529167	0,96284916	**11,2889**
599,8092	606,8197	1099,614	1722,384	0,08529167	0,994988219	**11,66571**
602,3105	609,4483	1102,115	1725,013	0,08480833	0,952823901	**11,23503**
602,9065	610,0747	1102,711	1725,639	0,08771389	1,127215177	**12,85105**
601,1384	608,2165	1100,943	1723,781	0,08529167	0,941268818	**11,03588**

600,3651	607,4038	1100,17	1722,968	0,08626111	0,954304407	**11,06297**
600,6615	607,7152	1100,466	1723,28	0,08529167	1,06480514	**12,48428**
599,691	606,6955	1099,496	1722,26	0,08480833	0,977476693	**11,52572**
598,9963	605,9661	1098,801	1721,531	0,08674722	1,062762985	**12,25126**
598,7173	605,6731	1098,522	1721,238	0,08916944	1,137629914	**12,75807**
599,9236	606,9398	1099,729	1722,504	0,088925	1,096855827	**12,33462**
598,5981	605,548	1098,403	1721,113	0,08577778	1,017383343	**11,86069**
598,3797	605,3187	1098,185	1720,883	0,08626111	0,953646974	**11,05535**
598,336	605,2728	1098,141	1720,837	0,08674722	1,047922105	**12,08018**
597,1128	603,9884	1096,918	1719,553	0,0882	1,009089768	**11,44093**
594,7155	601,4713	1094,52	1717,036	0,07899444	0,789527375	**9,99472**
596,4681	603,3115	1096,273	1718,876	0,08577778	1,010796749	**11,7839**
595,6931	602,4978	1095,498	1718,062	0,084325	0,951289859	**11,28123**
595,864	602,6772	1095,669	1718,242	0,08529167	1,001960469	**11,74746**
595,2077	601,9881	1095,013	1717,553	0,08577778	0,987919815	**11,5172**
595,0058	601,7761	1094,811	1717,341	0,08965278	1,007324843	**11,23585**
594,1958	600,9255	1094,001	1716,49	0,08674722	1,039030773	**11,97768**
594,4666	601,2099	1094,271	1716,774	0,08529167	1,013570435	**11,88358**
596,3368	603,1737	1096,142	1718,738	0,08577778	1,090797623	**12,71655**
599,4407	606,4327	1099,246	1721,997	0,0882	1,053282863	**11,94198**
602,8248	609,9889	1102,63	1725,553	0,09013889	1,096682275	**12,16658**
601,8739	608,9894	1101,679	1724,554	0,08529167	1,003842445	**11,76953**
601,7928	608,9042	1101,598	1724,469	0,08480833	1,021831742	**12,04872**
601,7548	608,8643	1101,56	1724,429	0,08674722	1,098035022	**12,65787**
600,6633	607,7171	1100,468	1723,282	0,08723056	0,990271843	**11,35235**
600,2068	607,2374	1100,012	1722,802	0,08674722	0,978653706	**11,28167**
600,0276	607,049	1099,833	1722,614	0,0882	1,095930959	**12,42552**
		499,8049	1115,565	0,08529167		
598,9357	605,9024	1098,741	1721,467	0,08626111	1,117175138	**12,95109**
598,7173	605,6731	1098,522	1721,238	0,08674722	1,056490739	**12,17896**
598,7173	605,6731	1098,522	1721,238	0,08674722	0,991379502	**11,42837**
599,6228	606,624	1099,428	1722,188	0,08868333	1,153362317	**13,0054**
599,9978	607,0177	1099,803	1722,582	0,08916944	1,165259818	**13,06793**
597,3424	604,2296	1097,147	1719,794	0,08577778	1,012482141	**11,80355**
595,6802	602,4843	1095,485	1718,049	0,08674722	0,992073277	**11,43637**
591,622	598,2231	1091,427	1713,788	0,0882	0,937659588	**10,63106**
592,762	599,4201	1092,567	1714,985	0,08626111	0,955570038	**11,07765**
595,9681	602,7865	1095,773	1718,351	0,08771389	1,04053343	**11,86281**
596,0532	602,8759	1095,858	1718,44	0,08723056	1,084636529	**12,43414**
596,0185	602,8394	1095,823	1718,404	0,08626111	0,944834582	**10,95319**

595,7996	602,6096	1095,605	1718,174	0,08529167	0,95657013	**11,21528**
594,7849	601,5441	1094,59	1717,109	0,08626111	1,053255322	**12,21008**
595,7828	602,5919	1095,588	1718,156	0,08868333	1,050110315	**11,84112**
		499,8049	1115,565	0,08577778		
599,9284	606,9448	1099,733	1722,509	0,08674722	0,977995928	**11,27409**
602,3102	609,448	1102,115	1725,013	0,0882	1,042288802	**11,81733**
601,0195	608,0915	1100,824	1723,656	0,08529167	1,053498125	**12,35171**
		499,8049	1115,565	0,08577778		
600,5442	607,592	1100,349	1723,156	0,08577778	0,966455881	**11,26697**
600,147	607,1745	1099,952	1722,739	0,08577778	0,952842924	**11,10827**
599,71	606,7155	1099,515	1722,28	0,08771389	1,003687713	**11,44275**
599,4717	606,4653	1099,277	1722,03	0,08771389	1,148662967	**13,09557**
598,5597	605,5077	1098,365	1721,072	0,08480833	0,981207	**11,5697**
599,3295	606,316	1099,134	1721,881	0,08723056	1,153908002	**13,22825**
598,3414	605,2784	1098,146	1720,843	0,084325	0,938063477	**11,12438**
598,9917	605,9613	1098,797	1721,526	0,08674722	1,129452074	**13,02004**
600,0503	607,0729	1099,855	1722,637	0,09110556	1,114243233	**12,23024**
599,066	606,0393	1098,871	1721,604	0,08723056	1,04520334	**11,98208**
598,7732	605,7318	1098,578	1721,296	0,08626111	1,048028802	**12,14949**
597,8238	604,735	1097,629	1720,3	0,08480833	1,05938774	**12,49155**
598,7173	605,6731	1098,522	1721,238	0,08577778	0,967391172	**11,27788**
596,3368	603,1737	1096,142	1718,738	0,08723056	0,994261784	**11,39809**
595,256	602,0388	1095,061	1717,603	0,08480833	0,964314452	**11,37052**
595,7646	602,5728	1095,569	1718,137	0,08529167	0,990259076	**11,61027**
595,6802	602,4843	1095,485	1718,049	0,08529167	1,009776581	**11,8391**
596,6593	603,5123	1096,464	1719,077	0,08771389	1,073785456	**12,24191**
598,2132	605,1439	1098,018	1720,708	0,09013889	1,117846561	**12,40138**
600,1797	607,2088	1099,985	1722,773	0,08674722	1,025641727	**11,82334**
602,6478	609,8029	1102,453	1725,367	0,08626111	0,974567867	**11,29788**
602,7873	609,9495	1102,592	1725,514	0,08771389	1,077143947	**12,2802**
603,0795	610,2566	1102,884	1725,821	0,08383889	1,01693978	**12,12969**
601,8705	608,9859	1101,675	1724,55	0,08480833	1,105354611	**13,03356**
601,1966	608,2777	1101,002	1723,842	0,08529167	0,933982814	**10,95046**
603,0844	610,2617	1102,889	1725,826	0,08916944	1,193173888	**13,38097**
601,5689	608,6689	1101,374	1724,233	0,08626111	1,096368794	**12,70988**
599,7696	606,7781	1099,575	1722,343	0,08480833	0,987439128	**11,64319**
599,671	606,6746	1099,476	1722,239	0,08577778	1,038474706	**12,10657**
600,3985	607,4388	1100,203	1723,003	0,09062222	1,150889619	**12,69986**
604,7168	611,9773	1104,522	1727,542	0,10757778	1,557012243	**14,47336**
604,3762	611,6194	1104,181	1727,184	0,10515556		

604,4076	611,6524	1104,212	1727,217	0,10709444	1,55731653	**14,54152**
601,4531	608,5472	1101,258	1724,112	0,10951667	1,545499151	**14,112**
600,9608	608,0298	1100,766	1723,594	0,10467222	1,495243547	**14,28501**
601,6221	608,7248	1101,427	1724,289	0,10515556	1,449867576	**13,78784**
602,0907	609,2173	1101,896	1724,782	0,10418889	1,442905862	**13,84894**
604,0278	611,2532	1103,833	1726,818	0,10806389	1,616425964	**14,95806**
602,0526	609,1773	1101,858	1724,742	0,10467222	1,531119977	**14,62776**
600,7105	607,7668	1100,515	1723,331	0,10467222	1,432264788	**13,68333**
600,6201	607,6718	1100,425	1723,236	0,10467222	1,557620856	**14,88094**
601,9878	609,1091	1101,793	1724,674	0,10854722	1,525025415	**14,04942**
602,0222	609,1453	1101,827	1724,71	0,10515556	1,462675509	**13,90964**
602,7443	609,9043	1102,549	1725,469	0,10467222	1,503988941	**14,36856**
606,6059	613,9628	1106,411	1729,527	0,10951667	1,587521785	**14,49571**
605,5532	612,8564	1105,358	1728,421	0,10467222	1,460620032	**13,95423**
606,0465	613,3748	1105,851	1728,939	0,10515556	1,462461305	**13,9076**
605,5865	612,8914	1105,391	1728,456	0,10564167	1,547590322	**14,64943**
605,0689	612,3474	1104,874	1727,912	0,10806389	1,526108402	**14,12228**
605,2776	612,5668	1105,083	1728,131	0,11000278	1,548268066	**14,07481**
		499,8049	1115,565	0,10564167		
603,3668	610,5585	1103,172	1726,123	0,10467222	1,484614086	**14,18346**
603,4662	610,663	1103,271	1726,228	0,10951667	1,55518942	**14,20048**
599,7857	606,795	1099,591	1722,359	0,10757778	1,596866656	**14,84383**
603,1253	610,3047	1102,93	1725,869	0,10757778	1,494862527	**13,89564**
601,8945	609,0111	1101,699	1724,576	0,09740556	1,40783648	**14,45335**
604,9999	612,2749	1104,805	1727,839	0,11096944		
603,2745	610,4615	1103,079	1726,026	0,10709444	1,532291036	**14,30785**
601,0481	608,1215	1100,853	1723,686	0,10564167	1,522313805	**14,41016**
596,9474	603,8148	1096,752	1719,379	0,10806389	1,502584501	**13,90459**
599,034	606,0057	1098,839	1721,57	0,11048611	1,523699538	**13,79087**
598,9213	605,8873	1098,726	1721,452	0,106125	1,491214794	**14,05149**
599,142	606,1191	1098,947	1721,684	0,10564167	1,486808635	**14,07407**
599,5834	606,5825	1099,388	1722,147	0,10709444	1,501075557	**14,01637**
599,7857	606,795	1099,591	1722,359	0,11000278	1,625267407	**14,77479**
599,4831	606,4772	1099,288	1722,042	0,10564167	1,554762773	**14,71733**
599,5446	606,5418	1099,35	1722,106	0,10661111	1,470674213	**13,79476**
601,7547	608,8642	1101,56	1724,429	0,11193889	1,65440449	**14,77953**
		499,8049	1115,565	0,10709444		
603,7463	610,9573	1103,551	1726,522	0,10564167	1,465824106	**13,87544**
603,5258	610,7257	1103,331	1726,29	0,106125	1,47568107	**13,90512**
603,7463	610,9573	1103,551	1726,522	0,106125	1,486229596	**14,00452**

603,2854	610,4729	1103,09	1726,037	0,10661111	1,50850661	**14,14962**
603,5665	610,7684	1103,371	1726,333	0,10903333	1,55852991	**14,29407**
602,5935	609,7457	1102,398	1725,31	0,106125	1,465459208	**13,8088**
602,7137	609,872	1102,519	1725,437	0,10467222	1,470568373	**14,04927**
		499,8049	1115,565	0,10370278		
		499,8049	1115,565	0,11048611		
603,7871	611,0003	1103,592	1726,565	0,10661111	1,519205677	**14,24998**
603,0341	610,2089	1102,839	1725,773	0,10467222		
603,4056	610,5993	1103,21	1726,164	0,10467222	1,496700868	**14,29893**
604,0377	611,2636	1103,843	1726,828	0,10854722	1,542044873	**14,20621**
603,7871	611,0003	1103,592	1726,565	0,10661111	1,509289351	**14,15696**
603,7152	610,9247	1103,52	1726,489	0,10515556	1,471065769	**13,98943**
600,8107	607,8721	1100,616	1723,437	0,10418889	1,449109636	**13,90849**
601,4017	608,4932	1101,207	1724,058	0,10467222		
601,3251	608,4127	1101,13	1723,977	0,10854722	1,60748719	**14,8091**
599,9588	606,9768	1099,764	1722,541	0,10515556	1,537425351	**14,62049**
600,4261	607,4678	1100,231	1723,032	0,10709444	1,484925719	**13,86557**
600,6784	607,733	1100,483	1723,298	0,10564167	1,507888542	**14,27362**
601,7423	608,8512	1101,547	1724,416	0,10370278	1,458952147	**14,06859**
605,0609	612,3391	1104,866	1727,904	0,10854722	1,586049063	**14,6116**
605,7733	613,0878	1105,578	1728,652	0,10467222	1,452291536	**13,87466**
608,8187	616,2885	1108,624	1731,853	0,10564167	1,527634806	**14,46053**
608,9385	616,4144	1108,743	1731,979	0,10515556	1,470250306	**13,98167**
609,4861	616,9898	1109,291	1732,554	0,10806389	1,561575445	**14,45048**
608,0398	615,4698	1107,845	1731,034	0,10467222	1,557786119	**14,88252**
		499,8049	1115,565	0,10661111		
606,5661	613,9209	1106,371	1729,485	0,10418889	1,540917371	**14,78965**
606,8741	614,2447	1106,679	1729,809	0,10903333	1,649144037	**15,12514**
604,8066	612,0718	1104,612	1727,636	0,10564167	1,458571741	**13,80678**
604,4598	611,7072	1104,265	1727,272	0,1054	1,502470791	**14,25494**
604,7126	611,9729	1104,517	1727,537	0,106125	1,560809852	**14,70728**
605,4095	612,7054	1105,214	1728,27	0,11000278	1,557842051	**14,16184**
603,7068	610,9158	1103,512	1726,48	0,10370278	1,440092382	**13,88673**
603,9921	611,2157	1103,797	1726,78	0,10467222	1,547846547	**14,78756**
603,872	611,0894	1103,677	1726,654	0,10467222	1,567878764	**14,97894**
601,0511	608,1247	1100,856	1723,689	0,10418889	1,555094233	**14,92572**
600,9608	608,0298	1100,766	1723,594	0,106125	1,528779915	**14,40546**
600,5904	607,6405	1100,395	1723,205	0,10418889	1,463977755	**14,05119**
599,3685	606,3569	1099,173	1721,921	0,10467222	1,543685365	**14,7478**
599,8292	606,8406	1099,634	1722,405	0,10418889	1,447561631	**13,89363**

601,0194	608,0914	1100,824	1723,656	0,10661111	1,511465688	**14,17737**
601,1484	608,227	1100,953	1723,791	0,10951667	1,544859088	**14,10616**
601,5609	608,6605	1101,366	1724,225	0,10661111	1,515462898	**14,21487**
603,1253	610,3047	1102,93	1725,869	0,10757778	1,484189792	**13,79643**
601,7121	608,8194	1101,517	1724,384	0,10515556	1,430785464	**13,60637**
604,3667	611,6094	1104,172	1727,174	0,10467222	1,471055931	**14,05393**
605,8734	613,193	1105,678	1728,757	0,106125	1,606760583	**15,14026**
603,7407	610,9514	1103,546	1726,516	0,09982778	1,406171538	**14,08597**
600,246	607,2786	1100,051	1722,843	0,08965278	1,105082104	**12,32625**
		499,8049	1115,565	0,10854722		
605,3835	612,678	1105,188	1728,243	0,10467222	1,528925281	**14,60679**
604,6045	611,8594	1104,409	1727,424	0,10370278	1,535490204	**14,80664**
603,5536	610,7549	1103,359	1726,319	0,10467222	1,510881154	**14,4344**
604,5966	611,851	1104,401	1727,416	0,10854722	1,540474899	**14,19175**
603,9921	611,2157	1103,797	1726,78	0,106125	1,541478027	**14,52512**
604,2122	611,447	1104,017	1727,012	0,106125	1,478295052	**13,92975**
604,0921	611,3208	1103,897	1726,885	0,10564167	1,528795261	**14,47152**
604,5278	611,7787	1104,333	1727,343	0,10854722	1,633542812	**15,04914**
603,3668	610,5585	1103,172	1726,123	0,10564167	1,562558735	**14,79112**
601,9906	609,1122	1101,796	1724,677	0,10370278	1,541267255	**14,86235**
602,5239	609,6726	1102,329	1725,237	0,10757778	1,552988638	**14,43596**
601,6504	608,7546	1101,455	1724,319	0,10467222		
601,4918	608,5878	1101,297	1724,152	0,10467222	1,564604585	**14,94766**
600,8698	607,9342	1100,675	1723,499	0,10467222	1,461180336	**13,95958**
601,0511	608,1247	1100,856	1723,689	0,10467222	1,461336733	**13,96107**
602,7134	609,8718	1102,518	1725,436	0,10903333	1,647166755	**15,107**
603,1543	610,3352	1102,959	1725,9	0,10370278	1,469142483	**14,16686**
604,5525	611,8046	1104,357	1727,369	0,10418889	1,518145035	**14,57108**
605,1574	612,4405	1104,962	1728,005	0,106125	1,573698499	**14,82873**
		499,8049	1115,565	0,10370278		
604,7726	612,036	1104,578	1727,601	0,10757778	1,519253992	**14,12238**
603,0468	610,2222	1102,852	1725,787	0,10467222	1,455253265	**13,90296**
604,2667	611,5043	1104,072	1727,069	0,10564167	1,504111996	**14,23787**
603,4537	610,6498	1103,259	1726,214	0,10564167	1,49084232	**14,11226**
603,7068	610,9158	1103,512	1726,48	0,10661111	1,521451876	**14,27104**
602,894	610,0616	1102,699	1725,626	0,10273333	1,451854796	**14,13227**
603,8154	611,0299	1103,62	1726,594	0,10806389	1,593272317	**14,7438**
602,027	609,1503	1101,832	1724,715	0,10564167	1,444608207	**13,67461**
603,9075	611,1267	1103,712	1726,691	0,10854722	1,54223252	**14,20794**
603,0341	610,2089	1102,839	1725,773	0,10564167	1,458754417	**13,80851**

		499,8049	1115,565	0,10418889		
603,2854	610,4729	1103,09	1726,037	0,10854722		
		499,8049	1115,565	0,10321944		
603,0649	610,2412	1102,87	1725,806	0,10709444	1,514684298	**14,14344**
601,807	608,9191	1101,612	1724,484	0,10370278	1,521627563	**14,67297**
598,7683	605,7267	1098,573	1721,291	0,10467222	1,420195514	**13,56803**
597,7507	604,6582	1097,556	1720,223	0,10806389	1,514408162	**14,01401**
597,5769	604,4758	1097,382	1720,04	0,10418889	1,470685416	**14,11557**
		499,8049	1115,565	0,10709444		
598,7005	605,6556	1098,505	1721,22	0,10467222	1,475994563	**14,10111**
600,7988	607,8595	1100,604	1723,424	0,10370278	1,526624921	**14,72116**
601,9906	609,1122	1101,796	1724,677	0,10321944	1,4761999	**14,30157**
605,2666	612,5552	1105,071	1728,12	0,10321944	1,45110636	**14,05846**
604,2333	611,4692	1104,038	1727,034	0,10321944	1,431760689	**13,87104**
603,4537	610,6498	1103,259	1726,214	0,10321944	1,519910911	**14,72504**
603,3747	610,5668	1103,18	1726,131	0,10661111	1,492209357	**13,99675**
602,2343	609,3683	1102,039	1724,933	0,10418889	1,424852393	**13,67567**
602,9913	610,1639	1102,796	1725,728	0,10564167	1,555866636	**14,72777**
602,3669	609,5076	1102,172	1725,072	0,10370278	1,425897088	**13,74984**
601,5547	608,654	1101,36	1724,219	0,10273333	1,475187671	**14,35939**
602,0526	609,1773	1101,858	1724,742	0,106125	1,531405007	**14,4302**
601,2101	608,2918	1101,015	1723,856	0,10515556	1,43564884	**13,65262**
602,5239	609,6726	1102,329	1725,237	0,10709444	1,509439155	**14,09447**
603,0914	610,2691	1102,896	1725,834	0,10467222	1,525229016	**14,57148**
603,0649	610,2412	1102,87	1725,806	0,10661111	1,516760725	**14,22704**
602,4927	609,6398	1102,298	1725,204	0,10903333	1,545812538	**14,17743**
600,3997	607,4401	1100,205	1723,005	0,10564167	1,451525483	**13,74009**
599,6182	606,6191	1099,423	1722,184	0,10418889	1,431057872	**13,73523**
599,4831	606,4772	1099,288	1722,042	0,10757778	1,528407851	**14,20747**
598,7932	605,7528	1098,598	1721,317	0,10515556	1,48391368	**14,11161**
598,5802	605,5292	1098,385	1721,094	0,10709444	1,483125403	**13,84876**
599,2232	606,2043	1099,028	1721,769	0,10854722	1,528051141	**14,07729**
597,8347	604,7464	1097,64	1720,311	0,10370278	1,523812738	**14,69404**
599,6383	606,6402	1099,443	1722,205	0,10757778	1,509477375	**14,0315**
600,2995	607,3348	1100,104	1722,899	0,10515556	1,44869408	**13,77668**
602,5935	609,7457	1102,398	1725,31	0,10467222	1,464329553	**13,98967**
605,5981	612,9036	1105,403	1728,468	0,10709444	1,518169311	**14,17599**
604,8929	612,1624	1104,698	1727,727	0,10321944	1,422955445	**13,78573**
607,5863	614,9932	1107,391	1730,558	0,10757778	1,510132138	**14,03758**
605,0439	612,3212	1104,849	1727,886	0,10467222	1,539944026	**14,71206**

604,9441	612,2162	1104,749	1727,781	0,10467222	1,4759641	**14,10082**
605,9935	613,3192	1105,798	1728,884	0,10951667	1,657208133	**15,13202**
603,4537	610,6498	1103,259	1726,214	0,10564167	1,523771545	**14,42396**
603,9921	611,2157	1103,797	1726,78	0,10709444	1,605909944	**14,99527**
603,3394	610,5297	1103,144	1726,094	0,10685278	1,544583041	**14,45524**
601,4069	608,4986	1101,212	1724,063	0,09885833	1,433866797	**14,50426**
604,0557	611,2826	1103,861	1726,847	0,10757778	1,543635818	**14,34902**
603,4868	610,6846	1103,292	1726,249	0,10515556	1,475076275	**14,02756**
603,7068	610,9158	1103,512	1726,48	0,10515556	1,455952681	**13,8457**
603,2668	610,4534	1103,072	1726,018	0,10370278	1,560980337	**15,05244**
602,4869	609,6337	1102,292	1725,198	0,10564167	1,453223623	**13,75616**
603,5517	610,7529	1103,357	1726,317	0,10661111	1,540739578	**14,45196**
600,9271	607,9944	1100,732	1723,559	0,10370278	1,492867141	**14,39563**
601,09	608,1656	1100,895	1723,73	0,10564167	1,492366335	**14,12668**
600,2094	607,24	1100,014	1722,805	0,10467222	1,46431386	**13,98952**
601,3403	608,4286	1101,145	1723,993	0,10854722	1,575072873	**14,51049**
600,37	607,4089	1100,175	1722,973	0,10564167	1,503207605	**14,22931**
600,8406	607,9034	1100,645	1723,468	0,106125	1,487849937	**14,01979**
		499,8049	1115,565	0,10370278		
601,1197	608,1968	1100,925	1723,761	0,106125	1,520577634	**14,32818**
599,9588	606,9768	1099,764	1722,541	0,10564167	1,510173788	**14,29525**
602,2669	609,4025	1102,072	1724,967	0,10370278	1,494110796	**14,40763**
604,5966	611,851	1104,401	1727,416	0,10757778	1,530239679	**14,2245**
606,0936	613,4243	1105,898	1728,989	0,10709444		
604,6045	611,8594	1104,409	1727,424	0,10467222	1,511830586	**14,44347**
603,4868	610,6846	1103,292	1726,249	0,10515556		
603,4317	610,6267	1103,237	1726,191	0,10806389	1,53368492	**14,19239**
602,794	609,9565	1102,599	1725,521	0,10564167	1,497509866	**14,17537**
602,8069	609,97	1102,612	1725,535	0,10564167	1,465388998	**13,87132**
602,7069	609,8649	1102,512	1725,429	0,10467222	1,454940733	**13,89997**
602,8713	610,0377	1102,676	1725,602	0,10467222	1,526244258	**14,58118**
602,8713	610,0377	1102,676	1725,602	0,10418889	1,453177352	**13,94753**
603,626	610,831	1103,431	1726,395	0,10903333	1,544072622	**14,16147**
602,4869	609,6337	1102,292	1725,198	0,10467222	1,47087231	**14,05217**
603,7719	610,9843	1103,577	1726,549	0,10515556	1,534637095	**14,59397**
601,707	608,8141	1101,512	1724,379	0,10467222	1,447478199	**13,82868**
602,7443	609,9043	1102,549	1725,469	0,11048611	1,664743051	**15,06744**
601,2101	608,2918	1101,015	1723,856	0,10515556	1,468408835	**13,96416**
599,9293	606,9458	1099,734	1722,51	0,10418889	1,453965279	**13,95509**
600,5866	607,6365	1100,391	1723,201	0,10951667	1,557008621	**14,21709**

600,0791	607,1031	1099,884	1722,668	0,10661111	1,482788409	**13,90839**
600,3997	607,4401	1100,205	1723,005	0,10709444	1,512633634	**14,1243**
601,9628	609,0829	1101,768	1724,647	0,10661111	1,506099725	**14,12704**
603,0914	610,2691	1102,896	1725,834	0,106125	1,553534831	**14,63873**
606,0588	613,3878	1105,864	1728,952	0,10854722	1,536713287	**14,15709**
606,7216	614,0844	1106,527	1729,649	0,10467222	1,499507434	**14,32574**
606,7216	614,0844	1106,527	1729,649	0,10564167	1,475232595	**13,9645**
606,1269	613,4593	1105,932	1729,024	0,10467222	1,525782424	**14,57677**
607,1117	614,4944	1106,917	1730,059	0,10903333	1,536863719	**14,09536**
606,1269	613,4593	1105,932	1729,024	0,10564167	1,48672404	**14,07327**
604,7893	612,0535	1104,594	1727,618	0,10467222	1,505340131	**14,38147**
605,1466	612,4291	1104,951	1727,994	0,10661111	1,536826841	**14,41526**
		499,8049	1115,565	0,10515556		
603,7068	610,9158	1103,512	1726,48	0,10564167	1,451309945	**13,73804**
604,8169	612,0826	1104,622	1727,647	0,10951667	1,589804709	**14,51655**
603,4868	610,6846	1103,292	1726,249	0,10515556	1,55926042	**14,82813**
603,872	611,0894	1103,677	1726,654	0,10661111	1,479054861	**13,87337**
603,5517	610,7529	1103,357	1726,317	0,10515556	1,576398997	**14,99111**
603,2668	610,4534	1103,072	1726,018	0,10564167	1,523079468	**14,41741**
604,2761	611,5142	1104,081	1727,079	0,10806389	1,538329123	**14,23537**
602,1469	609,2764	1101,952	1724,841	0,10467222	1,468036347	**14,02508**
601,3101	608,397	1101,115	1723,961	0,106125	1,483552234	**13,97929**
601,6221	608,7248	1101,427	1724,289	0,10903333	1,547995965	**14,19746**
601,4302	608,5232	1101,235	1724,088	0,106125	1,474753294	**13,89638**
600,2094	607,24	1100,014	1722,805	0,10564167	1,524691084	**14,43267**
601,1512	608,2299	1100,956	1723,794	0,10661111	1,542996734	**14,47313**
603,3747	610,5668	1103,18	1726,131	0,10709444	1,597039787	**14,91244**
605,3778	612,672	1105,183	1728,237	0,10661111	1,531452218	**14,36485**
606,159	613,4931	1105,964	1729,058	0,10951667	1,535683256	**14,02237**
604,8929	612,1624	1104,698	1727,727	0,10564167	1,493990373	**14,14206**
605,5532	612,8564	1105,358	1728,421	0,10806389	1,554100816	**14,38131**
604,4531	611,7002	1104,258	1727,265	0,106125	1,503007081	**14,16261**
604,3332	611,5742	1104,138	1727,139	0,10709444	1,543164857	**14,40938**
605,0466	612,324	1104,851	1727,888	0,10951667	1,544163421	**14,0998**
604,8066	612,0718	1104,612	1727,636	0,10806389	1,576870371	**14,59202**
603,3862	610,5789	1103,191	1726,143	0,10370278	1,444887384	**13,93297**
603,3337	610,5238	1103,139	1726,088	0,10661111	1,595421923	**14,96487**
603,3337	610,5238	1103,139	1726,088	0,10515556	1,473210175	**14,00982**
603,2338	610,4187	1103,039	1725,983	0,10564167	1,511163938	**14,30462**
603,3668	610,5585	1103,172	1726,123	0,106125		

603,7068	610,9158	1103,512	1726,48	0,106125	1,491473694	**14,05393**
600,0893	607,1138	1099,894	1722,678	0,10467222	1,53923054	**14,70524**
600,3997	607,4401	1100,205	1723,005	0,10806389	1,526064498	**14,12187**
600,6497	607,7028	1100,455	1723,267	0,10467222	1,455945153	**13,90957**
600,7698	607,829	1100,575	1723,394	0,10370278	1,443591251	**13,92047**
600,9899	608,0604	1100,795	1723,625	0,10564167	1,470104258	**13,91595**
601,1471	608,2256	1100,952	1723,79	0,10467222	1,441390133	**13,77051**
602,273	609,4089	1102,078	1724,973	0,10854722	1,524220201	**14,042**
600,7698	607,829	1100,575	1723,394	0,10564167	1,484839482	**14,05543**
602,047	609,1714	1101,852	1724,736	0,10467222	1,525711439	**14,57609**
603,9355	611,1563	1103,74	1726,721	0,10903333		
603,3116	610,5005	1103,116	1726,065	0,10709444	1,566678195	**14,62894**
		499,8049	1115,565	0,11048611		
605,0128	612,2885	1104,818	1727,853	0,10661111	1,501879428	**14,08746**
602,9272	610,0965	1102,732	1725,661	0,09885833	1,420368541	**14,36772**
602,7444	609,9043	1102,549	1725,469	0,12066111	1,798014061	**14,90136**
602,989	610,1614	1102,794	1725,726	0,12356667	1,862836799	**15,07556**
604,5419	611,7935	1104,347	1727,358	0,12259722	1,833360514	**14,95434**
604,2927	611,5316	1104,098	1727,096	0,12211389	1,868040771	**15,29753**
604,0975	611,3265	1103,902	1726,891	0,12259722	1,858774277	**15,16163**
603,6066	610,8105	1103,411	1726,375	0,12066111	1,856271669	**15,38418**
604,1475	611,379	1103,952	1726,944	0,12066111	1,926197145	**15,96369**
603,6759	610,8834	1103,481	1726,448	0,12259722	1,799206016	**14,67575**
604,663	611,9209	1104,468	1727,485	0,12356667	1,938902246	**15,69114**
606,3353	613,6784	1106,14	1729,243	0,11920556	1,805124665	**15,14296**
607,5309	614,935	1107,336	1730,5	0,12114444	1,860643392	**15,35888**
608,8601	616,332	1108,665	1731,896	0,12163056	1,864877234	**15,33231**
609,7553	617,2728	1109,56	1732,837	0,12356667	1,914682582	**15,49514**
608,6739	616,1363	1108,479	1731,701	0,120175	1,844369989	**15,34737**
609,3233	616,8188	1109,128	1732,383	0,12308333	1,890491847	**15,35945**
608,0747	615,5065	1107,88	1731,071	0,12211389	1,923362851	**15,75057**
607,4101	614,808	1107,215	1730,373	0,12211389	1,845497039	**15,11292**
606,4562	613,8055	1106,261	1729,37	0,12066111	1,885471596	**15,62617**
605,7911	613,1064	1105,596	1728,671	0,12066111	1,821313639	**15,09445**
606,7066	614,0687	1106,512	1729,633	0,12598889	1,896529533	**15,05315**
608,0283	615,4578	1107,833	1731,022	0,12163056	1,820251788	**14,96542**
602,1842	609,3156	1101,989	1724,88	0,126475	1,843090811	**14,57277**
600,9685	608,0379	1100,773	1723,602	0,12308333	1,789169023	**14,53624**
601,211	608,2927	1101,016	1723,857	0,12211389	1,851452597	**15,16169**
602,244	609,3785	1102,049	1724,943	0,12453611	1,945769957	**15,62414**

602,3222	609,4607	1102,127	1725,025	0,12259722	1,815699205	**14,81028**
601,0235	608,0957	1100,828	1723,66	0,12066111	1,826081634	**15,13397**
600,5796	607,6291	1100,384	1723,194	0,12114444	1,839660418	**15,18568**
601,8777	608,9935	1101,683	1724,558	0,12308333	1,848347873	**15,01704**
602,4665	609,6123	1102,271	1725,177	0,12114444	1,841632335	**15,20195**
603,8428	611,0588	1103,648	1726,623	0,12501944	1,895060201	**15,15812**
603,8982	611,117	1103,703	1726,682	0,12308333	1,829119757	**14,86082**
606,9758	614,3515	1106,781	1729,916	0,12598889		
606,2384	613,5765	1106,043	1729,141	0,12308333	1,924303181	**15,63415**
600,3904	607,4303	1100,195	1722,995	0,09885833	1,392888851	**14,08975**
600,9271	607,9944	1100,732	1723,559	0,10128056	1,404155171	**13,86402**
600,5102	607,5562	1100,315	1723,121	0,09982778	1,363765799	**13,66119**
599,7313	606,7378	1099,536	1722,302	0,10031111	1,365215213	**13,60981**
599,9181	606,934	1099,723	1722,498	0,10079722	1,359224044	**13,48474**
593,0497	599,7222	1092,855	1715,287	0,07608611	0,664623755	**8,735152**
601,5498	**608,6494**	**1077,816**	**1700,397**	**0,10264329**	**1,42895926**	**13,85433**

Halaman ini sengaja dikosongk

BIODATA PENULIS

Penulis bernama lengkap Maulana Erryan Yavianda yang akrab disapa Erryan. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Lahir di kota Magetan pada tanggal 25 Maret 1998. Penulis menempuh pendidikan di SD Muhammadiyah Magetan lulus tahun 2008, SMPN 1 Magetan lulus tahun 2013, dan SMAIT Abu Bakar Yogyakarta lulus tahun 2016. Pendidikan Sarjana ditempuh di Departemen Teknik Fisika, FTI ITS melalui jalur SBMPTN 2016. Selama aktif menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam mengikuti organisasi Laboratorium Workshop Instrumentasi di Teknik Fisika ITS sebagai Koordinator Laboratorium. Selain aktif dalam bidang akademik, penulis juga aktif dalam pelatihan dalam beberapa lomba serta sedang aktif dalam berlatih di bidang olahraga yaitu kalistenik. Pengalaman internship program selama satu bulan di Pertamina Hulu Sanga-sanga Kalimantan Timur. Bidang minat penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir adalah rekayasa instrumentasi dan kontrol. Apabila terdapat saran, kritik, ataupun diskusi terhadap Tugas Akhir ini, penulis dapat dihubungi melalui email erryanmaulana@gmail.com.