



SKRIPSI (ME – 141501)

**ANALISA TRANSIENT RESPON *SECOND ORDER* AKIBAT VARIASI
PEREDAMAN DAN KEKENTALAN OLI PADA INSTRUMEN
PENGENDALIAN FEEDBACK TIPE PCM140**

**IBNU MULYANSYAH
0421154500015**

**DOSEN PEMBIMBING
Ir. Sardono Sarwito, M.Sc.**

**DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2018**

“Halaman Sengaja Dikosongkan”



THESIS (ME – 141501)

ANALYSIS OF SECOND ORDER RESPONSE TRANSIENT DUE TO VARIATION OF DAMPING AND LUBRICANT OIL VISCOSITY IN PNEUMATIC CONTROL SYSTEM USING FEEDBACK INSTRUMENT TYPE PCM140

IBNU MULYANSYAH
04211545000015

ACADEMIC SUPERVISOR
Ir. Sardono Sarwito, M.Sc.

DEPARTMENT OF MARINE ENGINEERING
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY
INSTITUTE OF TECHNOLOGY SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2018

“Halaman Sengaja Dikосongkan”

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISA TRANSIENT RESPON SECOND ORDER AKIBAT VARIASI PEREDAMAN DAN KEKENTALAN OLI PADA INSTRUMEN PENGENDALIAN FEEDBACK TIPE PCM140

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi *Marine Electrical and Automation System* (MEAS)
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Ibnu Mulyansyah
NRP. 04211545000015

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Skripsi :

Ir. Sardono Sarwito, M.Sc.
NIP. 1960 0319 1987 01 1001

()

Surabaya
Januari, 2018

“Halaman Sengaja Dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISA TRANSIENT RESPON SECOND ORDER AKIBAT VARIASI PEREDAMAN DAN KEKENTALAN OLI PADA INSTRUMEN PENGENDALIAN FEEDBACK TIPE PCM140

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu persyaratan

Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada

Bidang Studi *Marine Electrical and Automation System (MEAS)*

Program Studi S-1 Jurusan Teknik Sistem Perkapalan Fakultas Teknologi Kelautan

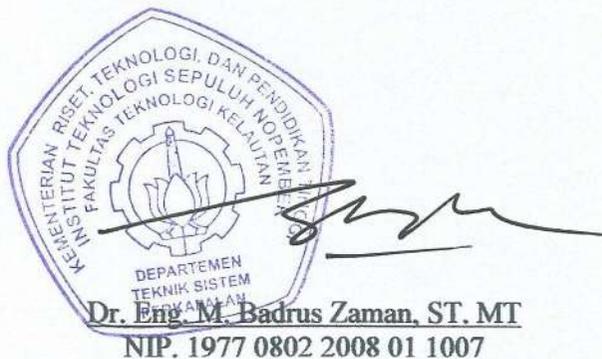
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Ibnu Mulyansyah

NRP. 0421154500015

Disetujui oleh Kepala Departemen Teknik Sistem Perkapalan :



"Halaman Sengaja Dikosongkan"



ANALISA TRANSIENT RESPON SECOND ORDER AKIBAT VARIASI PEREDAMAN DAN KEKENTALAN OLI PADA INSTRUMEN PENGENDALIAN FEEDBACK TIPE PCM140

Nama Mahasiswa : Ibnu Mulyansyah
NRP : 04211545000015
Departemen : Teknik Sistem Perkapalan
Dosen Pembimbing : Ir. Sardono Sarwito, M.Sc

Abstrak

Untuk pengaplikasian sistem pneumatis biasanya dijumpai hampir pada seluruh sektor-sektor industri, seperti bidang perkapalan sendiri, salah satu sistem kontroler pneumatis dapat ditemukan adalah pada bagian *ramp door* kapal. Secara sederhana prinsip dari kontrol otomatis, yaitu membandingkan nilai yang sebenarnya dari keluaran (*output*) sistem secara keseluruhan (*plant*) dengan mengacu pada masukan (*input*). Berdasarkan proses pengendaliannya, sistem kontrol dibedakan menjadi rangkaian terbuka (*open loop*) dan tertutup (*closed loop*) Untuk menguji performa dari instrumen feedback tipe PCM140 dapat menggunakan sinyal uji untuk mengetahui respon sistem, diantaranya adalah sinyal step, ramp, dan sinusoidal. Pada sistem orde kedua menggunakan peredaman pada sistem sehingga muncul karakteristik berupa *damping ratio* dan *overshoot*. Pada penelitian ini lebih terfokus pada teori *second order*, dimana pada penelitian ini akan dilakukan variasi gaya redam pada settingan dashpot (1 sampai 12) terhadap respon sistem serta variasi kekentalan oli terhadap gaya redam dengan menggunakan teori second order pada instrumen feedback tipe PCM140. Pada hasil analisa 3 jenis oli (SAE 10 w 30 L, SAE 10 w 40 L dan 15 w 50 L), didapatkan hasil pada pengujian step respon bahwa semakin besar peredaman maka *overshoot* yang terjadi akan semakin kecil. Pada pengujian ramp respon bahwa semakin besar peredaman yang dihasilkan maka semakin lama waktu delay yang terjadi. Kemudian pada pengujian sinusoidal respon bahwa semakin besar peredaman yang dihasilkan maka semakin besar nilai frekuensi sinusoidalnya juga semakin besar juga sudut fase dan amplitudonya. Dan juga ketiga jenis oli yang digunakan merupakan peredaman *underdamped*.

Kata Kunci : *sistem kontrol, pnuematis, respon sistem, step, input, sinusoidal, variasi, damping ratio, overshoot, frekuensi, underdamped*

“Halaman Sengaja Dikosongkan”

ANALYSIS OF SECOND ORDER RESPONSE TRANSIENT DUE TO VARIATION OF DAMPING AND LUBRICANT OIL VISCOSITY IN PNEUMATIC CONTROL SYSTEM USING FEEDBACK INSTRUMENT TYPE PCM140

Student Name : Ibnu Mulyansyah
NRP : 04211545000015
Departement : Teknik Sistem Perkapalan
Academic Supervisor : Ir. Sardono Sarwito, M.Sc.

Abstract

For the application of pneumatic systems usually found in almost all industrial sectors, such as the field of shipping itself, one of the pneumatic controller systems can be found is on the ship's ramp door. In simple terms the principle of automatic control, which is to compare the actual value of the output (output) system as a whole (plant) with reference to the input (input). Based on the control process, the control system is divided into open loop and closed loop. To test the performance of the feedback instrument PCM140 type can use the test signal to determine the system response, including step, ramp and sinusoidal signals. In the second-order system using the damping on the system so that the characteristics appear in the form of damping ratio and overshoot. In this research more focused on second order theory, where in this research will be done variation of dammy style at dashpot setting (1 to 12) to system response and variation of oil viscosity to force of red by using second order theory on feedback instrument type PCM140. In the analysis of 3 types of oil (SAE 10 w 30 L, SAE 10 w 40 L and 15 w 50 L), the results obtained on the step response test that the greater the damping then the overshoot will happen the smaller. In testing the ramp response that the greater the resulting damping the longer the delay time. Then on the test sinusoidal response that the greater the resulting damping the greater the frequency value sinusoidal also the greater the phase angle and its amplitude. And also the three types of oil used is Underdamped damping.

Keywords: control system, pnuematis, system response, step, input, sinusoidal, variation, damping ratio, overshoot, frequency, underdamped

“Halaman Sengaja Dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadiran Allah S.W.T berkat limpahan rahmat, hidayah dan bimbingan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“analisa transient respon second order akibat variasi peredaman dan kekentalan oli pada instrumen pengendalian feedback tipe PCM140 ”** dengan baik dan lancar. Sholawat serta salam juga tercurah atas junjungan nabi besar Muhammad S.A.W. yang diharapkan syafaatnya hingga diakhir kiamat.

Penulis menyadari bahwa keberhasilan dalam penyelesaian tugas akhir ini tidak lepas dari dukungan dan doa berbagai pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Untuk itu penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada :

1. Bapak Ir. Sardono Sarwito, M.Sc. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan semangat, arahan, masukan, dan ilmu kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
2. Bapak Dr. Eng. M. Badrus Zaman, S.T. M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Sistem Perkapalan.
3. Bapak Ir. Agung Zuhdi Muhammad Fathallah, M.Eng, PhD. selaku dosen wali penulis, atas nasehat dan bimbingannya selama ini.
4. Bapak Agus dan bapak Heru, selaku teknisi laboratorium MEAS yang telah membantu penulis dalam melakukan pengerjaan tugas akhir ini dari mulai memperbaiki peralatan hingga penulis dapat melakukan eksperimen hingga selesai.
5. Hamdani dan Sani'ah, selaku kedua orang tua penulis yang tidak henti hentinya memberikan doa, semangat, nasehat, dan segala bentuk dukungan kepada penulis sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir ini.
6. Teman – teman seperjuangan sekaligus sahabat penulis, Ridhwan, Topik, Sigit, Bayu, yang selalu memberikan bantuan hiburan dan semangat kepada penulis.
7. Kawan seperjuangan dan seangkatan mahasiswa Lintas Jalur Genap 2015 serta member MEAS angkatan 2014 yang selalu mendukung dan memberikan solusi kepada penulis sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir ini.
8. Serta semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu per satu.

Penulis menyadari pula bahwa penyusunan tugas akhir ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu perlunya saran dan masukan demi membangun kebaikan dan kemajuan tugas akhir ini untuk kedepannya agar dapat berguna untuk jurusan maupun bagi diri penulis pribadi. Akhir kata semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi yang membutuhkannya, amin.

Surabaya, Januari 2018

Penulis

“Halaman Sengaja Dikosongkan”

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR GRAFIK	xv
DAFTAR TABEL	xvii
BAB I	
PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	2
1.3. Tujuan	2
1.4. Manfaat	2
1.5. Batasan Masalah	2
BAB II	
TINJAUAN PUSTAKA.....	3
2.1. Pengertian sistem kontrol secara umum.....	3
2.2. Sistem Kontrol Otomatis.....	3
2.3. Pengertian Sistem Pneumatik	4
2.4. Tanggapan Sistem (<i>System Response</i>).....	5
2.4.1. Karakteristik Respon Waktu (<i>Time Response</i>).....	5
2.4.2. Karakteristik Respon Frekuensi (<i>Frequency Response</i>).....	7
2.4.3. Macam – macam sinyal uji.....	7
2.5. Teori susunan kedua (<i>Second order theory</i>)	7
2.6. Karakteristik respon untuk step input	9
2.7. Karakteristik respon untuk ramp input	12
2.8. Karakteristik respon untuk sinusoidal input	13
2.9. Mekanikal Lag unit.....	14
2.10. Fungsi pemindahan putaran tertutup.....	15
2.11. Setingan Dashpot.....	16
2.12. Teori Kekentalan Oli.....	17
2.14. Konsep Viskositas	18
BAB III	
METODOLOGI	19
3.1. Metode penelitian.....	20
3.2. Identifikasi masalah	20
3.3. Studi literatur.....	20
3.4. Persiapan alat	20
3.5. Set up peralatan.....	20

3.6. Uji eksperimen	21
3.7. Analisa dan pembahasan	21
3.8. Kesimpulan dan saran	22
BAB IV	
ANALISA DAN PEMBAHASAN	23
4.1. Pengambilan data	23
4.1.1. <i>First order – open loop & closed loop</i>	25
4.1.2. <i>Oli SAE 10 w 30 L</i>	25
4.1.3. <i>Oli SAE 10 w 40 l</i>	26
4.1.4. <i>Oli SAE 15 w 50 l</i>	26
4.2. Perhitungan	27
4.2.1. <i>Open Loop</i>	27
4.2.2. <i>Closed Loop</i>	27
4.2.3. <i>Oli SAE 10 w 30 l</i>	27
4.2.4. <i>Oli SAE 10 w 40 l</i>	34
4.2.5. <i>Oli SAE 15 w 50 l</i>	41
4.3. Analisa Grafik	48
4.3.1. <i>SAE 10 w 30 l</i>	48
4.3.2. <i>SAE 10 w 40 l</i>	52
4.3.3. <i>SAE 15 w 50 l</i>	55
4.4. Pembahasan	59
BAB V	
KESIMPULAN DAN SARAN	61
5.1. Kesimpulan	61
5.2. Saran	61
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Grafik fungsi step dan ramp	5
Gambar 2.2. Tanggapan Transien dan Tanggapan Steady State	6
Gambar 2.3. Diagram Second Order	7
Gambar 2.4. Foto rangkaian Second Order	8
Gambar 2.5. Bearagam Tipe Damping ratio sesuai sifat peredamannya.....	9
Gambar 2.6. Osilasi underdamped pada persamaan $\theta_0 = H_i$	10
Gambar 2.7. Grafik nilai ζ terhadap first overshoot (%)	12
Gambar 2.8. Perbandingan θ_0 terhadap waktu	13
Gambar 2.9. Sinusoidal respon.....	13
Gambar 2.10. Nilai $\tan \phi$	14
Gambar 2.11. Susunan pada second order theory	14
Gambar 2.12. Pengurangan sinyal eror dengan waktu konstan.....	15
Gambar 2.13. Closed loop transfer function second order.	15
Gambar 2.14. Gambar Dashpot.....	17
Gambar 3.1. Diagram alir penelitian	19
Gambar 3.2. Foto Rangkaian Second Order A.....	21
Gambar 3.3. Rangkaian second order A.....	21
Gambar 4.1. Hasil triangular trace dari output dan displacement flapper	23
Gambar 4.2. Perhitungan amplitudo ratio dan phase lags pada recorder	24
Gambar 4.3. Susunan Second Order Theory	25

“Halaman Sengaja Dikosongkan”

DAFTAR GRAFIK

Grafik 4.1. Sinyal step respon pada MATLAB-closed loop SAE 10 w 30 L	49
Grafik 4.2. Sinyal ramp respon pada MATLAB-closed loop SAE 10 w 30 L.....	50
Grafik 4.3. Sinyal sinusoidal respon pada MATLAB-closed loop SAE 10 w 30 L.....	51
Grafik 4.4. Sinyal step respon pada MATLAB-closed loop SAE 10 w 40 L	52
Grafik 4.5. Sinyal ramp respon pada MATLAB-closed loop SAE 10 w 40 L.....	54
Grafik 4.6. Sinyal sinusoidal respon pada MATLAB-closed loop SAE 10 w 40 l.....	55
Grafik 4.7. Sinyal step respon pada MATLAB-closed loop SAE 15 w 50 l.....	56
Grafik 4.8. Sinyal ramp respon pada MATLAB-closed loop SAE 15 w 50 l.....	57
Grafik 4.9. Sinyal sinusoidal respon pada MATLAB-closed loop SAE 15 w 50 l.....	58

“Halaman Sengaja Dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1. Tabel Pengamatan <i>open loop</i>	23
Tabel 4.2. Tabel Pengamatan <i>closed loop</i>	24
Tabel 4.3. Tabel pengamatan second order SAE 10 w 30 L	25
Tabel 4.4. Tabel pengamatan second order SAE 10 w 40 L	26
Tabel 4.5. Tabel pengamatan second order SAE 15 w 50 L	26
Tabel 4.6. Hasil perhitungan frekuensi natural dan rasio peredaman SAE 10 w 30 L..	29
Tabel 4.7. Hasil perhitungan nilai step dan overshoot pada <i>second order</i> SAE 10 w 30 L	30
Tabel 4.8. Hasil perhitungan nilai ramp SAE 10 w 30 L	32
Tabel 4.9. Hasil perhitungan amplitudo ratio dan phase lag SAE 10 w 30 L	34
Tabel 4.10. Hasil perhitungan frekuensi natural dan rasio peredaman SAE10w 40L..	36
Tabel 4.11. Hasil perhitungan nilai step dan overshoot pada <i>second order</i> SAE 10 w 40 L	37
Tabel 4.12. Hasil perhitungan nilai ramp SAE 10 w 40 L	39
Tabel 4.13. Hasil perhitungan amplitudo ratio dan phase lag SAE 10 w 40 L	40
Tabel 4.14. Hasil perhitungan frekuensi natural dan rasio peredaman. SAE15w 50L.	42
Tabel 4.15. Hasil perhitungan nilai step dan overshoot pada <i>second order</i> SAE 15 w 50 L	44
Tabel 4.16. Hasil perhitungan nilai ramp SAE 15 w 50 L	46
Tabel 4.17. Hasil perhitungan amplitudo ratio dan phase lag SAE 15 w 50 L	47

“Halaman Sengaja Dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Perkembangan zaman yang semakin maju dan berkembang saat ini menuntut cara berfikir manusia yang semakin maju dan berkembang pula. Tidaklah mungkin jika kemajuan zaman tidak diikuti oleh perkembangan pola pikir manusia karena semuanya harus saling mendukung. Seiring dengan kemajuan itu bisa dilihat saat ini telah banyak teknologi yang semakin canggih yang diciptakan dengan tujuan untuk memudahkan pekerjaan manusia, salah satunya adalah sistem kontrol. Jika sebuah sistem yang tadinya membutuhkan tenaga manusia sebagai masukan (*input*) dan ketidaksesuaian (*error*) pada hasilnya (*output*) sangat dipengaruhi oleh operator, maka dengan adanya sebuah sistem kontrol hal ini diharapkan dapat meminimalisir terjadinya eror tersebut, selain itu dengan pengoperasiannya yang lebih mudah, sehingga tenaga manusia yang digunakan akan lebih sedikit. Berdasarkan sumber penggerakannya, sistem kontrol dapat dibedakan menjadi 4 macam, diantaranya adalah sistem kontrol mekanik, elektrik, maupun yang menggunakan fluida seperti hidrolis ataupun pneumatis.

Untuk pengaplikasian sistem pneumatis biasanya dijumpai hampir pada seluruh sektor- sektor industri, seperti pada bidang otomotif, bidang permesinan, bidang perkapalan dan khususnya pada bidang - bidang kontruksi lainnya yang membutuhkan gerakan linier maupun rotasi. Pada bidang otomatisasi mesin – mesin produksi dan dalam bidang kontroler otomatis, misalnya pada rangkain pneumatis yang mengubah energi udara dan dimanfaatkan menjadi energi mekanik yang digunakan secara luas. Sedangkan bidang perkapalan sendiri, salah satu sistem kontroler pneumatis dapat ditemukan adalah pada bagian *ramp door* kapal.

Pada penelitian sebelumnya melakukan analisa transien respon dengan menggunakan teori first order dan second order. Dari hasil penelitian yang di lakukan , didapatkan kendala pada teori second order sedangkan pada first order sendiri tidak mengalami kendala. Dimana hasil penelitian pada bagian peredaman tidak menunjukkan hasil yang diinginkan . Hasil peredaman yang didapatkan yakni adalah Under-damped, dimana untuk menghasilkan peredaman tersebut , yang terbaca hanya 3 jenis settingan dashpot. Hal tersebutlah yang membuat pada penelitian ini lebih terfokus pada teori second order, dimana pada penelitian ini akan dilakukan variasi gaya redam pada settingan dashpot (1 sampai 12) terhadap respon sistem serta variasi kekentalan oli terhadap gaya redam dengan menggunakan teori second order pada instrumen feedback tipe PCM140. Dimana hasil yang diharapkan dengan melakukan variasi gaya redam dan kekentalan oli dapat dapat menghasilkan performa yang baik seperti grafik (step , ramp dan sinusoidal) respon sesuai dan juga pada bagian peredaman menghasilkan peredaman yang diinginkan yakni peredaman *over-damped* bahkan *critically-damped*

1.2. Perumusan Masalah

- 1.2.1. Bagaimana pengaruh variasi gaya redam terhadap respon sistem menggunakan teori second order pada instrumen feedback tipe PCM140, dengan variasi 3 oli (SAE 10 w 30 L, SAE 10 w 40 L, SAE 15 w 50 L)
 - a. Step Respon
 - b. Ramp Respon
 - c. Sinusoidal Respon
- 1.2.2. Bagaimana pengaruh variasi kekentalan oli (*viscositas*) terhadap gaya redam pada instrumen feedback tipe PCM140.
 - a. *Critically-damped case*
 - b. *Under-damped case*
 - c. *Over-damped case*

1.3. Tujuan Skripsi

- 1.3.1. Mengetahui pengaruh besarnya variasi gaya redam terhadap respon sistem menggunakan teori second order pada instrumen feedback tipe PCM140. (Step Respon, Ramp Respon, Sinusoidal Respon) dengan menggunakan variasi 3 oli (SAE 10 w 30 L, SAE 10 w 40 L, SAE 15 w 50 L)
- 1.3.2. Mengetahui pengaruh besarnya variasi kekentalan oli (*viscositas*) terhadap gaya redam yang muncul (*Critically Damped, Under Damped, Over Damped*) pada instrumen feedback tipe PCM140

1.4. Manfaat

- 1.4.1. Mengetahui bagaimana performa dari suatu sistem kontrol pnuematis berdasarkan variasi kekentalan oli
- 1.4.2. Sebagai acuan pembelajaran mengenai sistem kontrol pnuematis menggunakan intrumen feedback tipe PCM140

1.5. Batasan Masalah

- 1.5.1. Penelitian ini menggunakan intrumen feedback kontroler pnuematis yang ada pada laboratorium listrik kapal dan sistem otomatisasi
- 1.5.2. Acuan pengambilan data pada penelitian ini mengikuti percobaan dan prosedur yang disarankan sesuai dengan teori pada modul feedback PCM140
- 1.5.3. Pembuatan grafik dan simulasi model rangkaian sederhana menggunakan software MATLAB

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pengertian Sistem Kontrol Secara Umum

Sistem kontrol adalah proses pengaturan ataupun pengendalian terhadap satu atau beberapa besaran (*variabel, parameter*) sehingga berada pada suatu harga atau dalam suatu rangkuman harga (*range*) tertentu. Di dalam dunia industri, dituntut suatu proses kerja yang aman dan berefisiensi tinggi untuk menghasilkan produk dengan kualitas dan kuantitas yang baik serta dengan waktu yang telah ditentukan. Otomatisasi sangat membantu dalam hal kelancaran operasional, keamanan (investasi, lingkungan), ekonomi (biaya produksi), mutu produk, dll. Ada banyak proses yang harus dilakukan untuk menghasilkan suatu produk sesuai standar, sehingga terdapat parameter yang harus dikontrol atau di kendalikan antara lain tekanan (*pressure*), aliran (*flow*), suhu (*temperature*), ketinggian (*level*), kerapatan (*intensity*), dll. Gabungan kerja dari berbagai alat-alat kontrol dalam proses produksi dinamakan sistem pengontrolan proses (*process control system*). Sedangkan semua peralatan yang membentuk sistem pengontrolan disebut pengontrolan instrumentasi proses (*process control instrumentation*).

2.2. Sistem Kontrol Otomatis

Suatu sistem kontrol otomatis dalam suatu proses kerja berfungsi mengendalikan proses tanpa adanya campur tangan manusia .
Secara umum sistem kontrol dapat dikelompokkan sebagai berikut:

1. Berdasarkan pelaksanaannya : dengan operator manual dan otomatis.
2. Berdasarkan proses pengendaliannya : Jaringan tertutup (*closed-loop*) dan jaringan terbuka (*open-loop*).
3. Berdasarkan tujuan pengendaliannya : Servo dan regulator.
4. Berdasarkan sumber penggerakannya : mekanik, elektrik, pneumatis (udara), dan hidarulis (cairan).
5. Berdasarkan Aksi Kontrolnya dapat dibedakan menjadi :

1. *Kontroler dua posisi ON-OFF*

Sistem kontroler ini merupakan elemen pembangkit yang hanya mempunyai dua posisi, yaitu ON dan OFF. Kontrol ini juga relatif murah dan sederhana.

2. *Kontroler Proposional*

Sistem ini berhubungan dengan masukan kontroler $u(t)$ dan sinyal pembangkit kesalahan $e(t)$.

$$u(t) = e(t)$$

3. *Kontroler Integral*

Pada kontrol ini nilai masukan kontroler $u(t)$ diubah pada laju proposional dengan sinyal pembangkit kesalahan $e(t)$.

$$\frac{du}{dt}(t) = K, e(t)$$

4. *Kontroler proposional ditambah integral*

Kontroler ini didefinisikan dalam persamaan :

$$u(t) = K, e(t) + \frac{Kp}{Ki} \int_0^t e(t) dt$$

5. *Kontroler proposional ditambah turunan*

Didefinisikan dalam persamaan :

$$u(t) = K, e(t) + K, Td \frac{de(t)}{dt}$$

6. *Kontroler proposional ditambah integral dan turunan*

Sistem ini merupakan kombinasi dari kontroler proposional, kontroler integral, dan kontroler turunan dengan persamaan :

$$u(t) = K, e(t) + \frac{Kp}{Ti} \int_0^t e(t) dt + K, Td \frac{de(t)}{dt}$$

2.3. Pengertian Sistem Pnuematik

Sistem pneumatik yang dalam bahasa Yunani 'pneuma' yang artinya udara atau angin. Dengan kata lain pneumatik adalah semua sistem yang menggunakan tenaga yang disimpan dalam bentuk udara yang dimampatkan. Pneumatik merupakan teori atau pengetahuan tentang udara yang bergerak, keadaan-keadaan keseimbangan udara dan syarat-syarat keseimbangan. Pneumatik menggunakan hukum-hukum aerodinamika yang menentukan keadaan keseimbangan gas dan uap.

Pneumatik dalam pelaksanaan teknik udara mampat dalam industri merupakan ilmu pengetahuan dari semua proses mekanik dimana udara memindahkan suatu gaya atau gerakan. Jadi pneumatik meliputi semua komponen mesin atau peralatan, dalam mana terjadi proses-proses pneumatik. Dalam bidang kejuruan teknik pneumatik dalam pengertian yang lebih sempit lagi adalah teknik udara mampat (udara bertekanan).

Memang sistem elektronik mempunyai respon yang sangat cepat terhadap sinyal control. Tetapi sistem pneumatik mempunyai daya tahan yang lebih baik. Dalam beberapa aplikasi sistem pneumatik dapat bekerja dalam atmosfer yang tidak bisa dilakukan oleh sistem elektronik dan sistem pneumatik juga dapat digunakan dalam kondisi basah

Pneumatik merupakan ilmu yang mempelajari teknik pemakaian udara bertekanan. Sistem udara bertekanan merupakan upaya mengendalikan aktuatur baik berupa silinder maupun motor pneumatik, agar dapat bekerja sebagaimana yang di harapkan. Masukan (

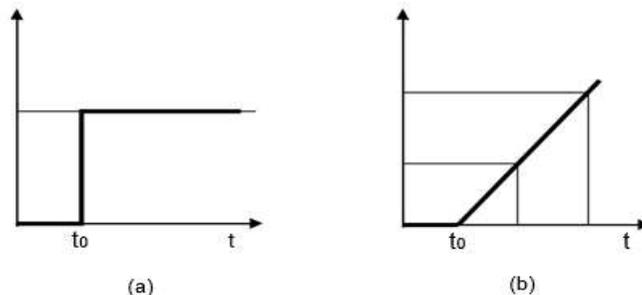
input) diperoleh dari katup sinyal, selanjutnya diproses melalui katup pemroses sinyal kemudian katup ke katup kendali sinyal. Bagian kontrol akan mengatur gerakan aktuator (output) agar sesuai dengan kebutuhan. Sistem Kontrol pneumatik merupakan bagian pokok sistem pengendalian yang menjadikan sistem pneumatik dapat bekerja secara otomatis. Adanya sistem kontrol pneumatik ini akan mengatur hasil kerja baik gerakan, kecepatan, urutan gerak, arah, gerakan maupun kekuatannya. Dengan sistem kontrol pneumatik ini sistem pneumatik dapat di desain untuk tujuan otomatis dalam suatu mesin industri.

2.4. Tanggapan sistem (System Response)

Tahapan pertama dalam menganalisa suatu sistem kontrol adalah dengan menurunkan model matematik dari sistem tersebut. Sekali suatu model telah ditentukan, maka berbagai metode dapat diterapkan untuk menganalisa kinerja sistem tersebut.

Salah satu cara untuk menguji dan menganalisa suatu sistem adalah dengan memberikan suatu sinyal uji (*test signal*) sebagai masukan dan mengamati serta menganalisa keluarannya. Berbagai sinyal masukan dapat digunakan untuk keperluan analisa yang berbeda-beda. Jika sistem yang digunakan untuk keperluan masukan dengan kenaikan gradual sepanjang waktu, maka digunakan sinyal uji fungsi *ramp*. Sinyal fungsi *step* digunakan untuk menguji keandalan terhadap gangguan luar, dsb. Gambar 2.1 memberikan gambaran contoh sinyal uji fungsi step dan fungsi ramp.

Keluaran yang dihasilkan merupakan tanggapan (*response*) dari sistem yang diberikan sinyal uji. Bila analisa yang dilakukan merupakan analisa dalam lingkup waktu dan masukan yang diberikan bukan merupakan fungsi periodik (mempunyai frekuensi), maka analisa tersebut merupakan analisa tanggapan waktu (*time response*).



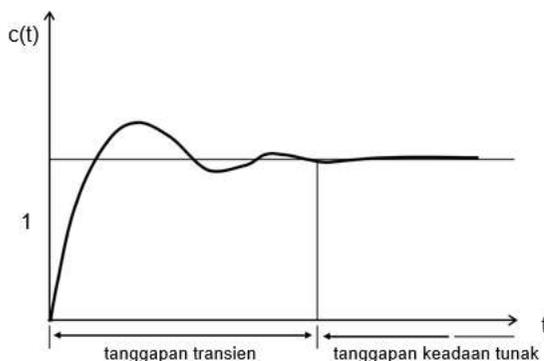
Gambar 2.1 (a). Grafik Fungsi *Step*, dan (b) Grafik Fungsi *Ramp*

Berdasarkan sinyal bentuk sinyal uji yang digunakan, karakteristik respon sistem dapat diklasifikasikan atas dua macam, yaitu karakteristik respon waktu (*time response*) dan karakteristik respon frekuensi (*frequency response*)

2.4.1. Karakteristik respon waktu (Time response)

Tanggapan waktu dari suatu sistem kontrol dibagi menjadi dua bagian : tanggapan transien (*transient response*) dan tanggapan keadaan tunak (*steady-state response*). Tanggapan transien berlangsung dari saat mulai hingga tanggapan sistem mencapai nilai

akhir yang diinginkan (*final state*). Tanggapan keadaan tunak dimulai pada saat tanggapan mulai pertama kali mendekati nilai akhir hingga waktu yang tak terhingga. Tanggapan transien digunakan untuk menganalisa sifat naik atau permulaan dari suatu sistem bila diberikan sinyal uji. Sedangkan tanggapan keadaan tunak digunakan untuk menganalisa karakteristik sistem pada saat mencapai harga akhirnya.



Gambar 2.2 Tanggapan Transien dan Tanggapan Keadaan tunak (Steady State)

Spesifikasi Respon *Transient*, adalah spesifikasi respon sistem yang diamati mulai saat terjadinya perubahan sinyal input/gangguan/beban sampai respon masuk dalam keadaan *steady state*. Tolak ukur yang digunakan untuk mengukur kualitas respon *transient* ini antara lain:

- **Time constan (T)** = Ukuran waktu yang menyatakan kecepatan respon, diukur mulai $t = 0$ s/d respon mencapai 63,2% dari respon *steady state*.
- **Rise time (T_R)** = Ukuran waktu yang menyatakan keberadaan suatu respon, yang diukur mulai respon 5% s/d 95% dari respon *steady state*.
- **Settling time (T_s)** = Ukuran waktu yang menyatakan respon telah masuk $\pm 0,5\%$, $\pm 2\%$, atau $\pm 5\%$ dari respon *steady state*
- **Delay time (T_D)** = Ukuran waktu yang menyatakan factor keterlambatan respon output terhadap input, diukur mulai $t = 0$ s/d respon mencapai 50% dari respon *steady state*.
- **Overshoot** = Nilai relatif yang menyatakan perbandingan harga maksimum respon yang melampaui harga *steady state* dibanding nilai *steady state*.
- **Time peak (T_p)** = Ukuran waktu yang diukur mulai dari $t = 0$ sampai mencapai nilai puncak maksimum.

Spesifikasi Respon *Steady State*, adalah spesifikasi respon sistem yang diamati mulai saat respon masuk dalam keadaan *steady state* sampai waktu tak terbatas (dalam praktek waktu pengamatan dilakukan saat $T_s \leq t \leq 5T_s$). Tolak ukur yang digunakan untuk mengukur kualitas respon *steady state* ini antara lain; *error steady state*.

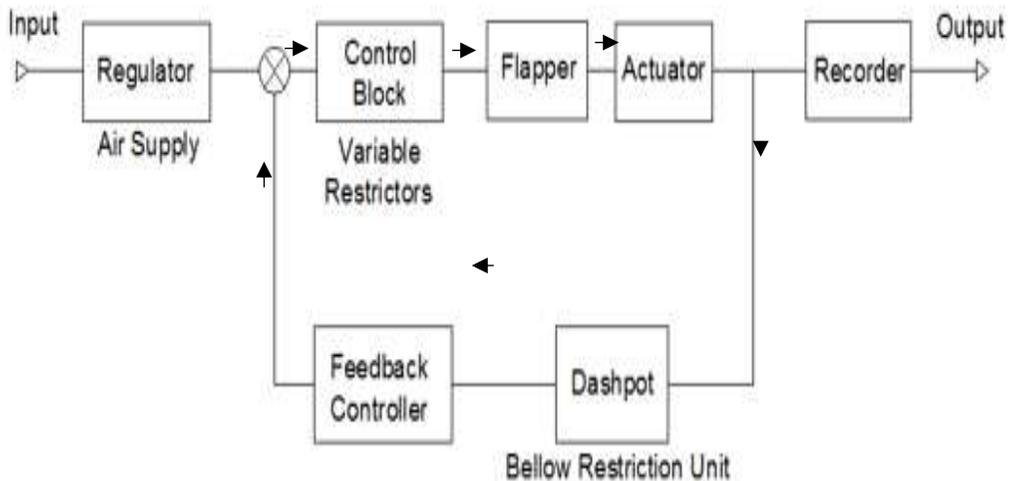
2.4.2. Karakteristik Respon Frekuensi (*Frequency Respons*)

Karakteristik Respon Frekuensi, adalah karakteristik respon yang spesifikasi performansinya didasarkan pengamatan magnitude dan sudut fase dari penguatan/gain (*output/input*) sistem untuk masukan sinyal sinus ($A \sin \omega t$), pada rentang frekuensi $\omega = 0$ s/d $\omega = \infty$.

2.4.3. Macam macam sinyal uji

- Fungsi Step, berguna untuk menguji respon terhadap gangguan yang muncul tiba – tiba, dan melihat kemampuan sistem kontrol dalam memposisikan respon.
- Fungsi Ramp, fungsi berubah – ubah terhadap waktu, dan berguna untuk melihat kemampuan sistem kontrol untuk melacak target yang bergerak dengan kecepatan konstan.
- Fungsi Sinusoidal, berguna untuk menguji respon yang menerima input berupa sinyal sinus.
- Fungsi Impuls, berguna untuk menguji respon terhadap gangguan sesaat yang muncul.
- Fungsi Parabolik, berguna untuk mnguji kebutuhan akselerasi, dan kemampuan system untuk melacak objek yang bergerak dengan kecepatan yang berubah ubah.

2.5. Teori susunan kedua (Second Order Theory)



Gambar 2.3. Diagram Second Order



Gambar 2.4. Foto rangkaian Second Order

Gambar diatas merupakan sebuah sistem kontrol sederhana dari peralatan *pneumatic controller feedback* PCM140 yang dirangkai dengan susunan tertutup (*close loop*) dari sistem orde kedua (*second order theory*). Input yang dimaksud merupakan tekanan angin dari kompresor yang kemudian dialirkan menuju regulator untuk diatur tekanannya (20 psi pada regulator dan 10 psi pada salah satu sisi jack silinder). Pengaturan input yang dimaksud adalah input tersebut akan dialirkan menuju sistem dengan cara dioperasikan menggunakan putaran motor yang terhubung pada *input member* yang dihubungkan langsung dengan flapper

Pergerakan putaran motor ini akan mengatur pergerakan dari flapper dan akan mengatur posisi buka – tutup nozzle yang mengatur aliran pada sisi silinder jack dan kemudian akan menggerakkan aktuator. Hasil gerakan aktuator ini terhubung pada recorder yang kemudian akan membentuk trace untuk di analisa. Input yang diberikan oleh putaran motor akan membentuk trace pada recorder dan akan muncul berupa sinyal sinusoidal. Pada saat kondisi awal switch input dinyalakan, dapat terlihat adanya keterlambatan pada output (*output lags*) untuk melihat respon sistem pada kondisi awal (*initial condition*), respon transient serta performa dari sistem tersebut ini maka perlu dilakukan perhitungan sinyal uji step.

Setelah beberapa detik kecepatan aliran pada sisi output akan mulai menjadi konstan, berdasarkan hasil percobaan kecepatan konstan akan diperoleh ketika terbentuk 1 gelombang. Untuk melakukan pengujian pada kecepatan konstan maka digunakan perhitungan sinyal uji ramp. Performa sistem juga dapat dianalisa dengan melakukan pengujian ramp yaitu berupa seberapa besar delay dari sistem sebelum memasuki kondisi konstan. Dikarenakan menerima input berupa sinyal sinusoidal, maka pengujian respon sinusoidal juga perlu dilakukan serta untuk mengetahui bagaimana kondisi respon

transient, seberapa besar amplitudo dan frekuensi yang dihasilkan untuk mengetahui apakah sistem tersebut stabil atau tidak.

Seberapa besar peredaman yang dihasilkan pada sistem akan mempengaruhi karakteristik dari pengujian stepnya. Dikarenakan terdapat peredaman pada sistem, secara tidak langsung hal ini juga mempengaruhi nilai ramp sehingga delay pada sistem juga akan semakin besar tergantung dari jenis rasio peredaman tadi. Begitu pula dengan nilai respon sinusoidal, dengan adanya peredaman seharusnya frekuensi sinusoidal dan juga amplitudo rasio dapat ditekan sehingga sudut fase dari gelombang yang dihasilkan akan semakin kecil dan sistem tersebut memiliki gangguan berupa getaran yang lebih kecil

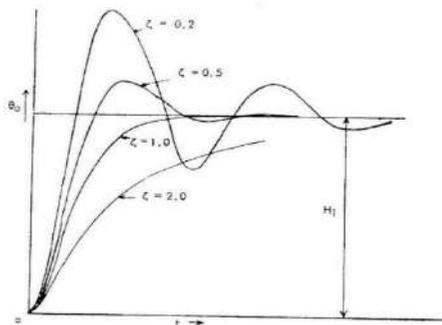
2.6. Karakteristik Respon untuk Step Input

Adalah karakteristik sistem yang didapatkan dari spesifikasi respon output terhadap masukan Step.

$$\theta_0 = H_i + e^{-\zeta\omega_n t} \left[A_1 e^{+(\sqrt{\zeta^2-1})\omega_n t} + A_2 e^{-(\sqrt{\zeta^2-1})\omega_n t} \right]$$

Sifat dari persamaan bergantung pada seberapa banyak jumlah $(\zeta^2 - 1)$. Jika nilainya melebihi 1, ini termasuk dalam kategori *overdamped* yang berarti terjadi peredaman yang berlebihan sehingga sistem tidak akan pernah atau membutuhkan waktu lama untuk mencapai nilai inputnya. Jika nilainya kurang dari 1 maka ini termasuk pada kategori *underdamped* sehingga memiliki karakteristik nilai outputnya akan mengalami overshoot lalu kemudian perlahan lahan mencapai titik stabilnya pada input. Jika nilainya sama dengan satu maka sistem ini dikategorikan sebagai *critically damped* yang berarti sistem tersebut memiliki ketepatan output yang sama dengan inputnya.

Beragam tipe peredaman diperlihatkan pada Gambar 2.5



Gambar 2.5 Beragam tipe damping ratio sesuai dengan sifat peredamannya.
(sumber : modul feedback PCM140)

- The Overdamped Case ($\zeta^2 > 1$)

Persamaannya adalah :

$$\theta_0 = H_i \left[1 - e^{-\zeta\omega t} \left[\cos(\sqrt{\zeta^2 - 1})\omega t + \frac{\zeta}{\sqrt{\zeta^2 - 1}} \sin(\sqrt{\zeta^2 - 1})\omega t \right] \right]$$

ketika kondisi awal pemasangan, respon tidak berisolasi.

- The Critically-Damped Case ($\zeta^2 = 1$)

Respon hanya pada yang tidak berisolasi. Akar m_1 dan m_2 sama sehingga persamaan menjadi :

$$\theta_0 = H_i [1 - e^{-\omega t}(1 + \omega t)]$$

- The Underdamped Case ($\zeta^2 < 1$)

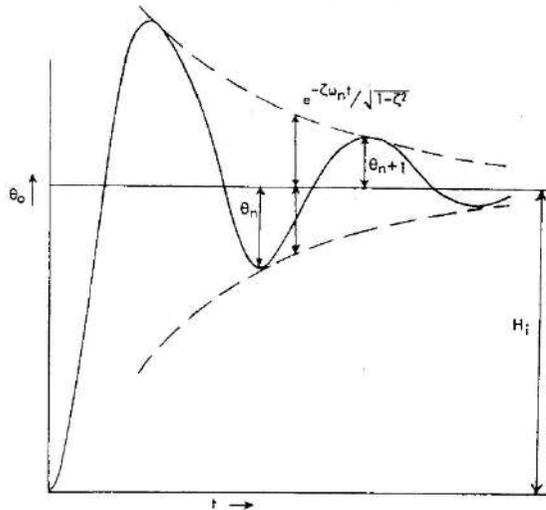
$$\sqrt{\zeta^2 - 1} = i\sqrt{1 - \zeta^2}$$

dimana $(1 - \zeta^2) > 0$ dan $i^2 = -1$

Persamaan lengkapnya menjadi :

$$\theta_0 = H_i \left[1 - e^{-\zeta\omega t} \left[\cos(\sqrt{1 - \zeta^2})\omega t + \frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin(\sqrt{1 - \zeta^2})\omega t \right] \right]$$

respon ini mengilangkan osilasi pada keadaan diam pada persamaan $\theta_0 = H_i$



Gambar 2.6. Osilasi *underdamped* pada persamaan $\theta_0 = H_i$
(sumber : modul feedback PCM140)

Gambar 2.6 menunjukkan bagaimana keadaan respon transient pada sistem *underdamped*. Underdamped bisa saja memiliki overshoot lebih dari satu dengan nilai yang berbeda. Idealnya semakin lama akan semakin kecil dan mendekati nilai inputnya.

Envelopenya adalah :

$$\theta_0 = H_i \left[1 \pm \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \right]$$

dan frekuensi dari damped oscillation adalah :

$$\omega_0 = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$$

Pembeda persamaan 7 dengan memberikan nilai t, maka :

$$\frac{d\theta_0}{dt} = H_i \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\sqrt{1-\zeta^2}) \omega_n t$$

θ_0 menjadi maksimum atau minimum ketika ;

$$(\sqrt{1-\zeta^2}) \omega_n t = 0, \pi, 2\pi, \dots \dots$$

Jarak waktu antara nilai maksimum berturut – turut dari overshoots dan undershoots adalah

$$\Delta t = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}}$$

Perbandingan dari maksimum displacement berturut – turut dari kondisi diam, nilai H_i adalah :

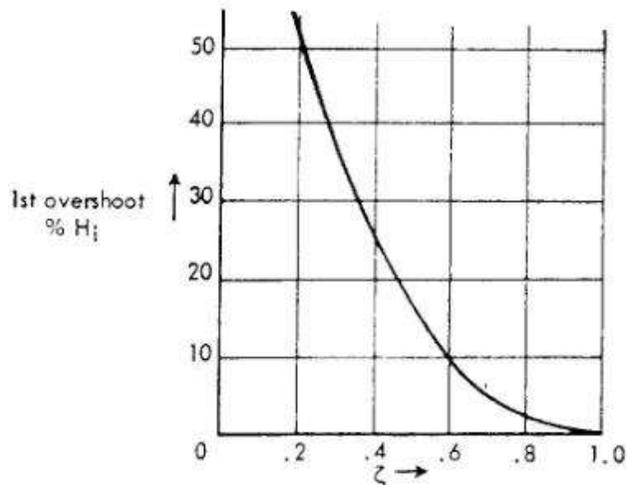
$$\begin{aligned} \frac{\theta_{n+1}}{\theta_n} &= \frac{e^{-\zeta\omega_n t(t_n+\Delta t)} \cos[\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} (t_n + \Delta t)]}{e^{-\zeta\omega_n t} \cos[(\sqrt{1-\zeta^2}) \omega_n t_n]} \\ &= e^{-\zeta\omega_n \Delta t} \\ &= \exp \left[\frac{-\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \right] \end{aligned}$$

Pengurangan logaritmik (λ):

$$\begin{aligned} \lambda &= \log e \left| \frac{\theta_n}{\theta_{n+1}} \right| \\ &= \frac{\zeta\pi}{(\sqrt{1-\zeta^2})} \end{aligned}$$

Overshoot pertama pada sistem adalah : $H_i \cdot e^{\frac{\pi\zeta}{(\sqrt{1-\zeta^2})}}$.

Beragam variasi overshoot dengan ζ diperlihatkan pada gambar 2.6.



Gambar 2.7. Grafik nilai ζ terhadap first overshoot (%)
(sumber : modul feedback PCM140)

Gambar 2.7 memperlihatkan perbandingan nilai *overshoot* terhadap rasio peredaman, semakin kecil peredamannya maka overshoot yang terjadi akan semakin besar.

2.7. Karakteristik respon untuk ramp input (kecepatan aliran konstan)

Persamaannya menjadi :

$$(D^2 + 2\zeta\omega_n D + \omega_n^2)\theta = \omega_n^2 \Omega t$$

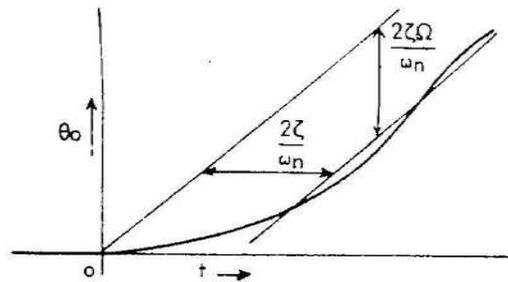
Yang dilengkapi dengan : $\theta_0 = \Omega \left(t - \frac{2\zeta}{\omega_n} \right)$

Persamaan untuk Particular Integral (P.I.)

Persamaan pelengkapnya adalah :

$$\theta_0 = \Omega \left(t - \frac{2\zeta}{\omega_n} \right) + e^{-\zeta\omega_n t} \cdot \frac{2\zeta\Omega}{\omega_n} \cos \left[(\sqrt{1-\zeta^2})\omega_n t + \frac{2\zeta^2-1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\sqrt{1-\zeta^2})\omega_n t \right]$$

ketidak sesuaian kecepatan aliran untuk sementara waktu menjadi demikian $\frac{2\zeta}{\omega_n}$ ketika mengalami kerusakan, terjadi output lag setelah input dengan waktu $\frac{2\zeta}{\omega_n}$, kebebasan dari Ω dapat dilihat pada gambar 2.7.

Gambar 2.8. Perbandingan θ_0 terhadap waktu.

Keterangan :

Ω = velocity input

ω = frekuensi sinusoidal input

ϕ = phase lags output

2.8. Karakteristik respon untuk sinusoidal input

Persamaan menjadi :

$$(D^2 + 2\zeta\omega_n D + \omega_n^2)\theta = \omega_n^2 |\theta_i| \sin \omega t$$

Nilai C.F. akhirnya hilang, meninggalkan sinyal sinusoidal pada respon keadaan diam pada frekuensi ω .

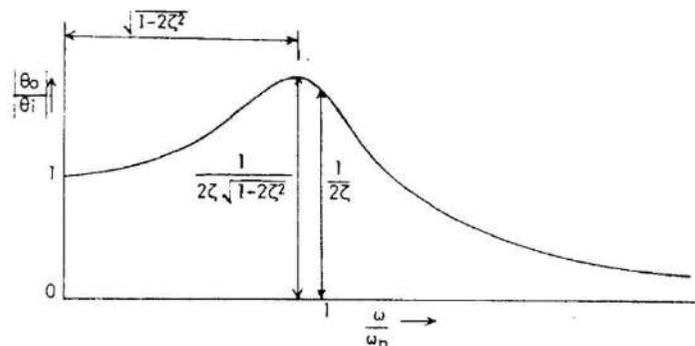
$$\theta_o = |\theta_o| \sin(\omega t - \phi)$$

dan disubstitusikan pada persamaan berikut

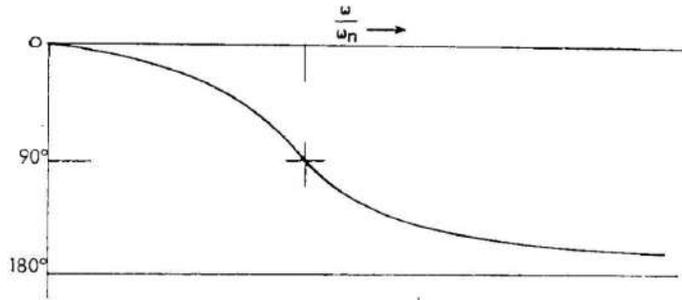
$$-\omega^2 |\theta_o| \sin(\omega t - \phi) + 2\zeta\omega_n \omega |\theta_o| \cos(\omega t - \phi) + \omega_n^2 |\theta_o| \sin(\omega t - \phi) = \omega_n^2 |\theta_i| \sin \omega t$$

Dimana
$$\frac{|\theta_o|}{|\theta_i|} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + 4\zeta^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}}$$

Dan
$$\tan \phi = \frac{2\zeta \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}$$



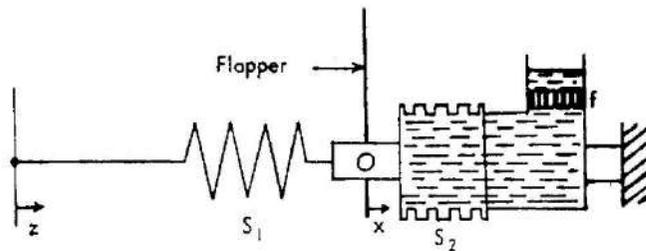
Gambar 2.9. Sinusoidal respon

Gambar 2.10. Nilai $\tan \phi$

Gambar 2.8 menunjukkan hubungan nilai sudut terhadap frekuensi sinusoidal. Pada sistem orde dua. Nilainya berbanding lurus. Semakin besar frekuensinya maka bentuk sudut yang dihasilkan semakin besar. Besarnya dapat dilihat pada gambar 2.10

2.9. Mekanikal lag unit

Susunan lag yang pertama terjadi diantara hubungan feedback dengan flapper. Ini terdiri pada sebuah pegas dari stiffness pertama (S_1), dan dashpot.



Gambar 2.11. Susunan pada second order theory

Susunan lag yang kedua terdiri dari bellows yang mana memompa minyak melalui variable restrictor dan menghasilkan gaya tolak dari $f\dot{x}$ (kecepatan flapper) stiffness yang kedua (S_2) dari dashpot karena karena gerakan mekanis stiffness antara bellows dan flapper bersamaan.

Pernimbangan keseimbangan gaya pada flapper,

$$S_1(z - x) = S_2 x + fDx$$

$$x/z = \frac{S_1}{[S_1 + S_2]} \frac{1}{[1 + T_1 D]}$$

$$\text{dimana } T_1 = \frac{f}{S_1 + S_2}$$

Keterangan :

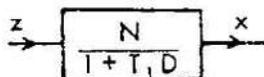
- S_1 = kekakuan dari spring penghubung/konstata pegas spring (mm)
- S_2 = kekakuan efektif dari peredam/konstata pegas peredam (mm)
- f = kekentalan peredam konstan pada pembatas
- x = penggerak displacement dari besi penopang (mm)

z = displacement dari tengah penghubung feedback (mm)

N = perbandingan konstanta pegas kiri dan total nilai konstanta pegas

Sama dengan susunan yang pertama dan dengan waktu yang konstan (T_1), unit juga mengurangi sinyal error dengan faktor :

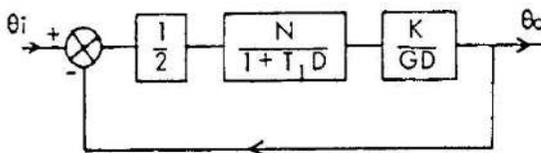
$$N = \frac{S_1}{S_1 + S_2}$$



Gambar 2.12. Pengurangan sinyal error dengan waktu konstan.

2.10. Fungsi pemindahan putaran tertutup

Walaupun ada beberapa gaya pada output dari pegas pertama (S_1), dikarenakan sistem konstan, maka perbedaan tekanan yang sangat kecil dibutuhkan pada salah satu sisi piston untuk menekan dan nozzle-flapper-jack unit menunjukkan reaksi sebagai penghubung. Blok diagram untuk sistem dapat dilihat pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13. Closed loop transfer function second order.

Fungsi dari pemindahan putaran terbuka adalah :

$$\frac{NK}{2G} \frac{1}{D(1 + T, D)} \text{ dimana } K, = \frac{NK}{2G}$$

Fungsi dari closed loop transfer function adalah :

$$\frac{\theta_o}{\theta_i} = \frac{\frac{K,}{T,}}{D^2 + \frac{D}{T,} + \frac{K,}{T,}}$$

Keterangan :

θ_o = output displacement (mm)

θ_i = input displacement (mm)

- K = kombinasi konstanta
 G = faktor peredaman pada flapper
 D = operator
 T = waktu konstant (detik)
 N = perbandingan konstanta pegas kiri dan total nilai konstanta pegas

$$\frac{\theta_o}{\theta_i} = \frac{\omega_n^2}{D^2 + 2\zeta\omega_n D + \omega_n^2}$$

Dimana :

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_1}{T_1}} \dots\dots\dots \text{natural frequency}$$

$$\zeta = \frac{1}{2}\sqrt{K, T}, \dots\dots\dots \text{damping ratio}$$

biasanya :

$$\frac{\theta_o}{\theta_i} = \frac{16}{D^2 + 2.5D + 16D}$$

$$\omega_n = 4 \text{ dan } \zeta = 0.3$$

respon pada input $\theta_i(t)$ diberikan oleh :

$$(D^2 + 2\zeta\omega_n D + \omega_n^2)\theta_o = \omega_n^2 \theta_i(t)$$

Dan untuk persamaan Complementary Function :

$$(D^2 + 2\zeta\omega_n D + \omega_n^2)\theta_o = 0$$

Dimana :

$$\theta_o = A_1 e^{m_1/T} + A_2 e^{m_2/T}$$

dimana m_1 dan m_2 merupakan akar dari :

$$(m^2 + 2\zeta\omega_n m + \omega_n^2) = 0 \text{ dan } A_1 \text{ dan } A_2 \text{ adalah konstan.}$$

$$m_1, m_2 = -\zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1}$$

sehingga persamaan Complementary Function :

$$\theta_o = e^{-\zeta\omega_n t} \left[A_1 e^{+(\sqrt{\zeta^2-1})\omega_n t} + A_2 e^{-(\sqrt{\zeta^2-1})\omega_n t} \right]$$

2.11. Setingan Dashpot

Pada penelitian sebelumnya, variasi peredaman yang terbaca hanya 3 yaitu 1 psi, 6 psi dan 12 psi. Hal ini dikarenakan Dashpot yang digunakan untuk mensetting gaya redam masih mengalami kerusakan. Pada penelitian ini, akan dilakukan perbaikan pada dashpot nya sehingga bisa menggunakan ke- 12 variasi yang ada pada daspot tersebut. Terori umum untuk dashpot sendiri, semakin tinggi setingan yang dilakukan maka semakin tinggi gaya redamnya. Contoh, ketika di set pada setingan 12, maka oli yang akan mengalir juga makin sedikit, sehingga gaya pegas pada dashpot itu akan lama atau berat untuk kembali ke posisi semula.



Gambar .2.14. Gambar Dashpot

2.12. Teori Kekentalan Oli

Viskositas dapat dinyatakan sebagai tahanan aliran fluida yang merupakan gesekan antara molekul – molekul cairan satu dengan yang lain. Suatu jenis cairan yang mudah mengalir dapat dikatakan memiliki viskositas yang rendah, dan sebaliknya bahan – bahan yang sulit mengalir dikatakan memiliki viskositas yang tinggi. Pada hukum aliran viskos, Newton menyatakan hubungan antara gaya – gaya mekanika dari suatu aliran viskos sebagai : Geseran dalam (viskositas) fluida adalah konstan sehubungan dengan gesekannya. Hubungan tersebut berlaku untuk fluida Newtonian, dimana perbandingan antara tegangan geser (s) dengan kecepatan geser (g) nya konstan. Parameter inilah yang disebut dengan viskositas. Aliran viskos dapat digambarkan dengan dua buah bidang sejajar yang dilapisi fluida tipis diantara kedua bidang tersebut. Suatu bidang permukaan bawah yang tetap dibatasi oleh lapisan fluida setebal h , sejajar dengan suatu bidang permukaan atas yang bergerak seluas A . Jika bidang bagian atas itu ringan, yang berarti tidak memberikan beban pada lapisan fluida dibawahnya, maka tidak ada gaya tekan yang bekerja pada lapisan fluida. Suatu gaya F dikenakan pada bidang bagian atas yang menyebabkan Bergeraknya bidang atas dengan kecepatan konstan v , maka fluida dibawahnya akan membentuk suatu lapisan – lapisan yang saling bergeseran. Setiap lapisan tersebut akan memberikan tegangan geser (s) sebesar F/A yang seragam, dengan kecepatan lapisan fluida yang paling atas sebesar v dan kecepatan

lapisan fluida paling bawah sama dengan nol. Maka kecepatan geser (g) pada lapisan fluida di suatu tempat pada jarak y dari bidang tetap, dengan tidak adanya tekanan fluida

2.14 . Konsep Viskositas

Fluida, baik zat cair maupun zat gas yang jenisnya berbeda memiliki tingkat kekentalan yang berbeda. Viskositas alias kekentalan sebenarnya merupakan gaya gesekan antara molekul-molekul yang menyusun suatu fluida. Jadi molekul-molekul yang membentuk suatu fluida saling gesek-menggesek ketika fluida tersebut mengalir. Pada zat cair, viskositas disebabkan karena adanya gaya kohesi (gaya tarik menarik antara molekul sejenis). Sedangkan dalam zat gas, viskositas disebabkan oleh tumbukan antara molekul.

Setiap zat cair mempunyai karakteristik yang khas, berbeda satu zat cair dengan zat cair yang lain. Salah satunya adalah viskositas. Viskositas merupakan tahanan yang dilakukan oleh suatu lapisan fluida terhadap suatu lapisan lainnya. Sifat viskositas ini dimiliki oleh setiap fluida, gas, atau cairan.

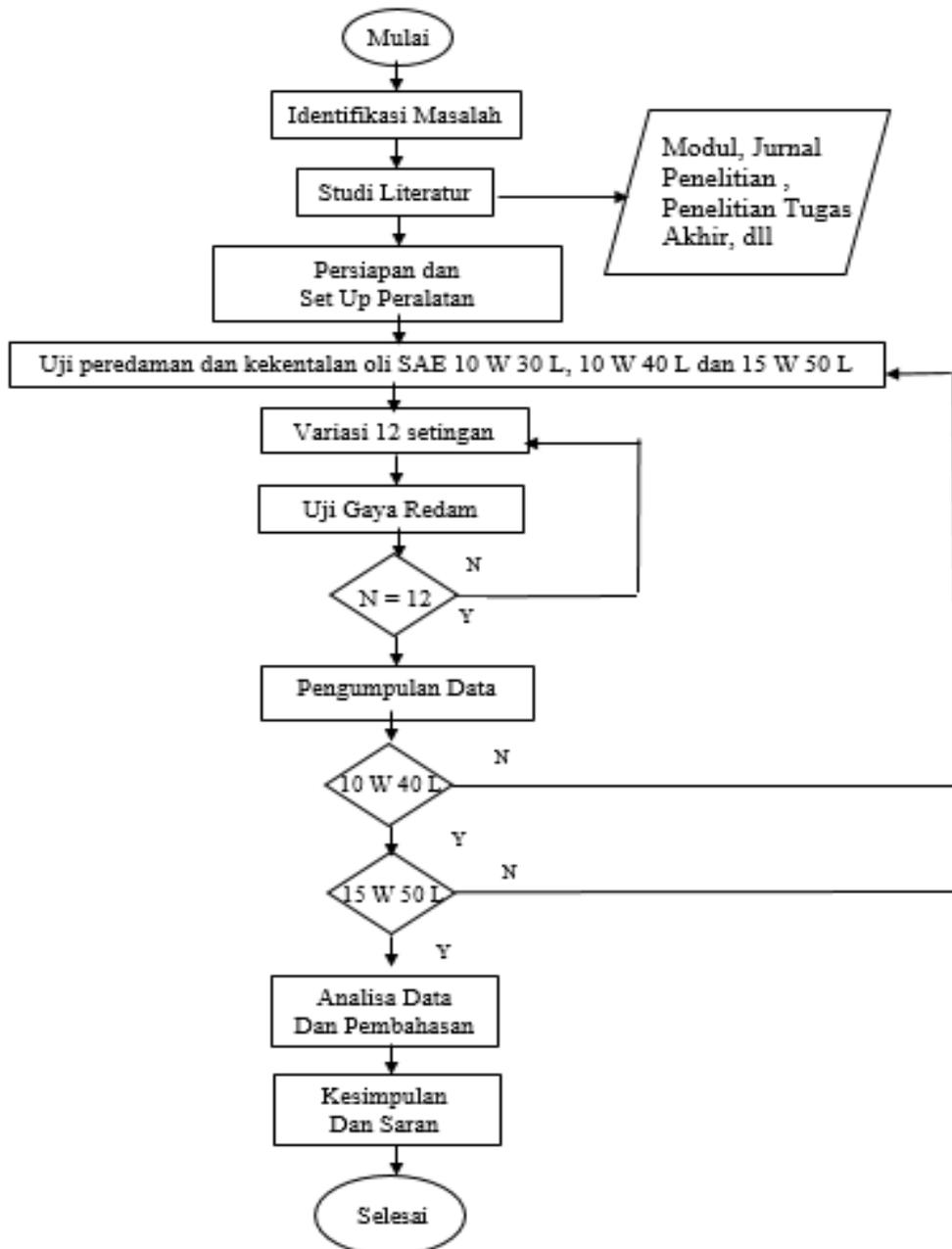
Dari bahan dasarnya, oli pelumas yang umum beredar terbagi 2 jenis, yaitu :

1. Oli Mineral (Base Oil) : Diperoleh dari hasil tambang minyak bumi yang diolah menjadi oli dan ditambah bahan aditif untuk menambah mutu pelumas menjadi lebih baik.
2. Oli Sintetis (Synthetic Oil): Oli Sintetis biasanya terdiri atas Polyalphaolifins yang datang dari bagian terbersih dari pemilahan dari oli mineral, yakni gas. Senyawa ini kemudian dicampur dengan oli mineral. Inilah mengapa oli sintetis bisa dicampur dengan oli mineral dan sebaliknya. Basis yang paling stabil adalah. Pada dasarnya, oli sintetis didesain untuk menghasilkan kinerja yang lebih efektif dibandingkan dengan oli mineral.

Contohnya, kode SAE 50 menunjukkan oli tersebut mempunyai tingkat kekentalan 50 menurut standar SAE. Semakin tinggi angkanya, semakin kental pelumas tersebut. Ada pula kode angka yang menunjukkan multi grade seperti 10W-50. Kode ini menandakan pelumas mempunyai kekentalan yang dapat berubah-ubah sesuai suhu di sekitarnya. Huruf W di belakang angka 10 merupakan singkatan kata winter (musim dingin). Maksudnya, pelumas mempunyai tingkat kekentalan sama dengan SAE 10 pada saat suhu udara dingin dan SAE 50 ketika udara panas. Oli yang memiliki multi grade seperti ini sekarang banyak di pasaran karena kekentalannya luwes (flexible) dan tidak cenderung mengental saat udara dingin sehingga mesin mudah dihidupkan di pagi hari.

Pada penelitian akan menggunakan 3 variasi kekentalan oli , yakni SAE 10 W 30 L , SAE 10 W 40 L, dan SAE 15 W 50 L.

BAB III METODOLOGI



Gambar 3.1. Diagram alir penelitian.

3.1. Metode Penelitian

Metode yang digunakan pada penelitian ini yaitu metode eksperimen. Dimana pada penelitian ini akan dilakukan percobaan pengamatan menggunakan instrumen sistem kontroler pneumatis feedback tipe PCM140 yang akan dioperasikan atau diuji dengan kondisi orde kedua (*second order*)

3.2. Identifikasi Masalah

Pengidentifikasian masalah pada penelitian ini adalah untuk mengetahui bagaimana pengaruh variasi gaya redam dan kekentalan oli terhadap *transient response* dari rangkaian sistem dan performa sistem kontroler pneumatis dengan pengujian sinyal (*step*, *ramp*, dan *sinusoidal response*) standar pada teori orde kedua (*second order*) menggunakan instrumen feedback tipe PCM140.

3.3. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk mempelajari teori teori yang dapat menunjang permasalahan yang ada. Studi literatur didapatkan dari beberapa sumber seperti buku dan modul, jurnal penelitian, penelitian tugas akhir, dan internet. Pada penelitian ini studi literatur tersebut mengacu pada sistem kontrol pneumatis dan lebih mengacu pada modul feedback teching mechanism tipe PCM140.

3.4. Persiapan Alat

Pada tahap ini dilakukan persiapan peralatan yang dibutuhkan untuk melakukan eskperimen. Termasuk juga melakukan pengecekan terhadap peralatan seperti kondisi dari komponen yang akan digunakan,

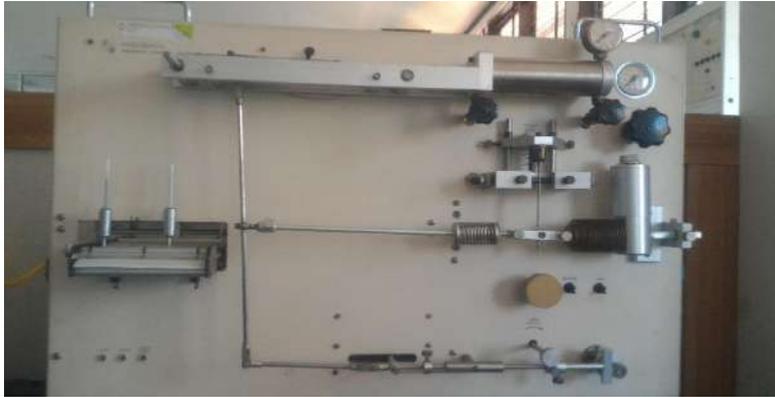
3.5. Set Up Peralatan

Setelah mempersiapkan peralatan yang dibutuhkan kemudian merangkai peralatan tersebut sesuai dengan rangkain orde kedua dan melakukan pengetesan untuk mengetahui apakah sistem tersebut berfungsi dengan normal atau mengalami gangguan. Prosedur melakukan set up mengacu pada modul feedback tipe PCM140.

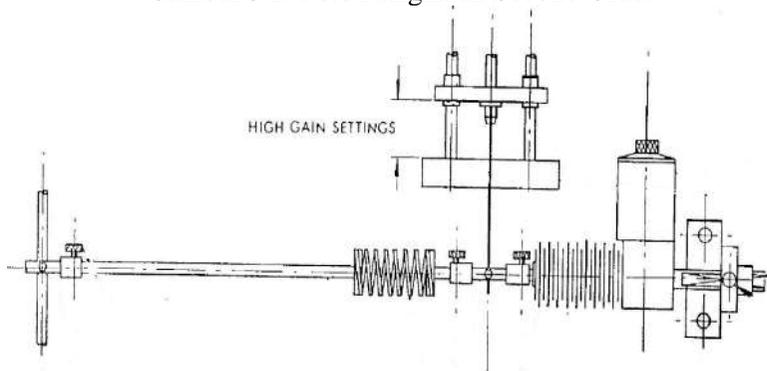
Kondisi normal tidak bergerak dari mekanisme ini harus ada tekanan sebesar 10 psi pada salah satu sisi jack, dengan flapper blade ditengah. Kondisi ini diperoleh dengan putaran servo tertutup pada pencapaian mendekati minimum.

Set up supplai udara pada 20 psi dan dengan sistem persamaan susunan kedua, posisi input ditengah. Catat pressure pada silinder melalui pressure gauge yang disediakan. Kurangi kekencangan locknuts. Jika pressure terlalu tinggi putar bagian kanan nozzle out, dan jika pressure terlalu rendah putar bagian nozzle in. Cek posisi blade dari flapper, harus berada pada posisi vertikal pada keadaan tidak bergerak. Jika blade bengkok, kedua nozzle harus di setel sehingga keadaan blade normal, sampai posisi blade kembali ditengah.

Pastikan tidak ada pressure yang berubah, kemudian nozzle dapat dikencangkan. Jika sistem menjadi tidak simetris atau sulit untuk balance, maka lepas orifices dan bersihkan (lihat modul bagian maintenance, section H)



Gambar 3.2. Foto Rangkaian Second Order



Gambar 3.3. Rangkaian Second order
(sumber : modul feedback PCM140)

3.6. Uji Peredaman dan Kekentalan oli

Pengujian yang akan dilakukan adalah dengan melakukan pengamatan serta pengambilan data menggunakan instrumen feedback tipe PCM140 berdasarkan teori orde kedua (second order). Kemudian data yang sudah diamati tersebut akan dihitung dan kemudian akan di analisa untuk mengetahui bagaimana karakteristik dari sistem tersebut serta apakah respon dari sistem tersebut dapat dikatakan baik atau tidak berdasarkan pengujian menggunakan sinyal standar.

3.7. Analisa dan Pembahasan

Pada penelitian ini analisa data yang dilakukan adalah mengamati kondisi operasional dari sistem kontrol pneumatis menggunakan instrumen feedback tipe

PCM140. kemudian melakukan analisa dari hasil perhitungan untuk mendapatkan performa dari sistem

3.8. Kesimpulan dan Saran

Setelah semua tahapan dilakukan, maka selanjutnya adalah menarik kesimpulan analisa data dan percobaan. Diharapkan nantinya hasil kesimpulan dapat menjawab permasalahan yang menjadi tujuan skripsi ini. Selain itu diperlukan saran berdasarkan hasil penelitian untuk perbaikan dan juga untuk penelitian berikutnya yang mungkin dilakukan.

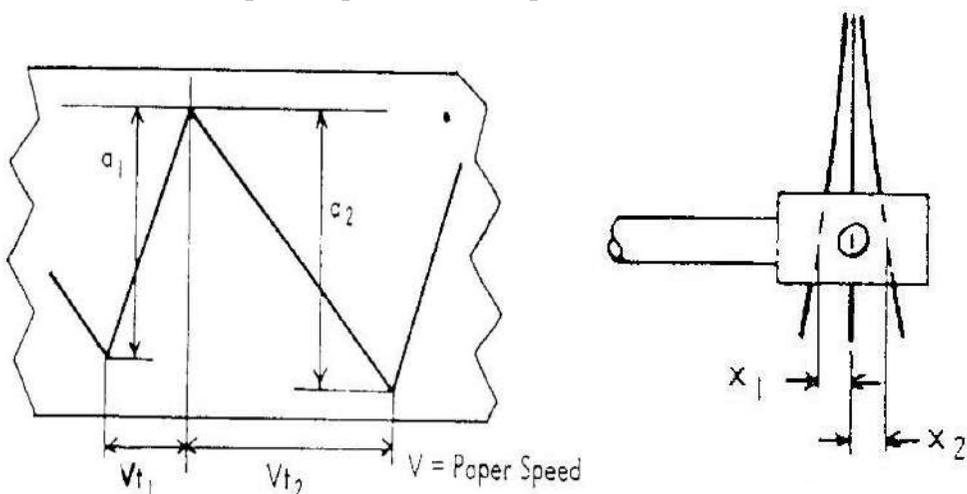
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

Dari hasil pengamatan serta perhitungan akan didapatkan suatu nilai yang menunjukkan karakteristik dari sistem yang diamati, bagaimana respon transienya dan bagaimana performa dari sistem tersebut berdasarkan pengujian sinyal standar, apakah dapat dikatakan baik atau tidak.

4.1. Pengambilan Data

Pengambilan data pada penelitian ini dibagi menjadi empat tahap, yaitu pada tahap pertama menggunakan rangkaian terbuka dan rangkaian tertutup untuk teori sistem orde pertama (*first order theory*). Tahap kedua menggunakan teori sistem orde kedua (*second order theory*) dengan Oli SAE 10 W 30 L. Tahap ketiga menggunakan teori sistem orde kedua (*second order theory*) dengan Oli SAE 10 W 40 L. Tahap keempat menggunakan teori sistem orde kedua (*second order theory*) dengan Oli SAE 15 W 50 L.

4.1.1. First Order – Open Loop & Closed Loop



Gambar 4.1. Hasil triangular trace dari output dan displacement flapper

Tabel 4.1 Tabel pengamatan *open loop*

No.	Pressure (psi)	t1 (detik)	t2 (detik)	a1 (mm)	a2 (mm)	x1 (mm)	x2 (mm)
1	10	0,77	0,89	39,00	75,00	6,15	6,15

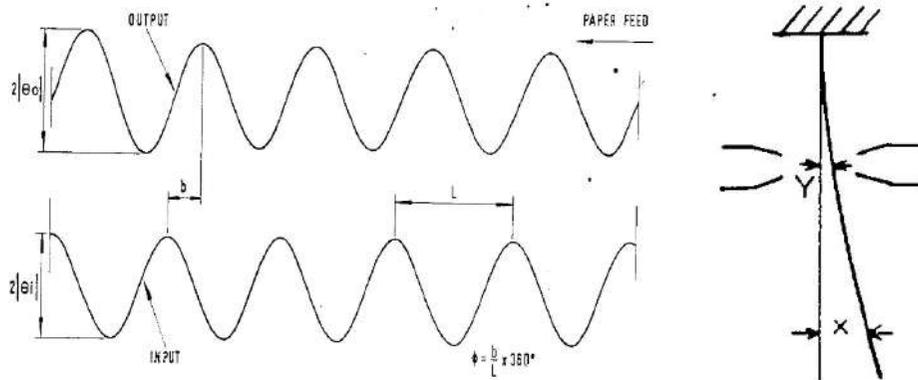
Keterangan :

a_1 = nilai a_1 dari titik bawah sampai titik atas (mm)

a_2 = nilai a_2 dari titik atas sampai titik bawah (mm)

t_1 = waktu yang ditempuh dari titik bawah sampai ke titik atas pada a_1 (detik)

- t_2 = waktu yang ditempuh dari titik bawah sampai ke titik atas pada a_2 (detik)
 x_1 = jarak flapper dri posisi tengah sampai ke kiri (mm)
 x_2 = jarak flapper dri posisi tengah sampai ke kanan (mm)



Gambar 4.2. Perhitungan amplitudo ratio dan phase lags pada recorder

Tabel 4.2 Tabel pengamatan *closed loop*

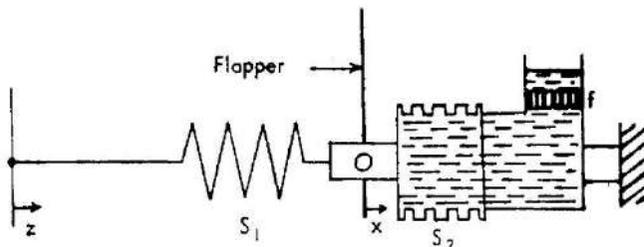
No.	Pressure (psi)	x (mm)	y (mm)	t (detik)	b (mm)	L (mm)	θ_i (mm)	θ_o (mm)
1	10	15,5	11,5	2,43	5,3	22,00	11,50	14,00

Keterangan :

- x = jarak flapper dari posisi tengah sampai ke kanan pada posisi bawah (mm)
 y = jarak flapper dari posisi tengah sampai ke kanan pada posisi atas (mm)
 t = waktu yang ditempuh untuk setengah gelombang pada input tracer (mm)
 b = selisih dua tinggi gelombang antara input dan ouput (mm)
 L = jarak antara 2 tinggi gelombang pada input (mm)
 θ_o = output displacement (mm)
 θ_i = input displacement (mm)

Tabel diatas menunjukkan hasil pengamatan terhadap respon waktu untuk rangkaian terbuka pada sistem orde pertama, pengambilan data dilakukan berulang ulang sampai didapatkan respon waktu yang signifikan.

4.1.2. Oli SAE 10 W 30 L



Gambar 4.3. Susunan Second Order Theory

Keterangan :

 S_1 = kekakuan dari spring penghubung/konstanta pegas spring (mm) S_2 = kekakuan efektif dari peredam/konstanta pegas peredam (mm) f = kekentalan peredam konstan pada pembatas x = penggerak displacement dari besi penopang (mm) z = displacement dari tengah penghubung feedback (mm)

Tabel 4.3. Tabel Pengamatan Second Order SAE 10 w 30 L

No.	Pressure (psi)	f	x (mm)	b (mm)	L (mm)	θ_i (mm)	θ_o (mm)	S_1 (mm)	S_2 (mm)	t (detik)
1	10	1	3	7	28,5	12	9,5	0,33	0,50	1,82
2	10	2	4	8,5	29	12,25	9,25	0,57	0,80	1,9
3	10	3	3	8,5	27,5	12	9,25	0,79	1,11	1,91
4	10	4	3	10	28,5	12,25	9,25	1,00	1,33	1,86
5	10	5	3	9	29	12	9,5	1,22	1,56	1,96
6	10	6	4	8	29	12	9,5	1,36	1,71	1,84
7	10	7	2	10,5	28,5	12	9,25	1,46	1,89	1,91
8	10	8	2,5	8,5	28,5	12	9,25	1,60	2,05	2,03
9	10	9	3	10,5	28,5	12	9,25	1,64	2,25	1,89
10	10	10	3	9	29	12,25	9,25	1,67	2,44	1,83
11	10	11	3,5	8,5	30	12,25	10,25	1,75	2,52	1,78
12	10	12	3,5	9	28,5	12,25	9,25	1,80	2,65	1,91

4.1.3. Oli SAE 10 W 40 L

Tabel 4.4. Tabel Pengamatan Second Order SAE 10 w 40 L

No.	Pressure (psi)	f	x (mm)	b (mm)	L (mm)	θ_i (mm)	θ_o (mm)	S1 (mm)	S2 (mm)	t (detik)
1	10	1	7	6,5	23,4	12	12,5	0,20	0,45	1,76
2	10	2	6,5	7	22,5	12	12,75	0,42	0,83	1,81
3	10	3	6	7,8	23	12	13,5	0,83	1,25	1,87
4	10	4	8	8	24	12,25	9	1,00	1,48	1,96
5	10	5	6,5	8	24,5	12	9,25	2,00	1,79	1,98
6	10	6	7	8,5	24	12,5	9	1,18	1,82	1,8
7	10	7	5,6	11,5	22,5	11,75	6,75	1,00	2,33	1,87
8	10	8	6	12	23	12	3,75	0,89	2,58	1,81
9	10	9	4,8	10,5	22,5	11,75	5	1,13	3,6	1,82
10	10	10	3,7	10	23	11,75	1,75	1,19	4,17	1,71
11	10	11	3,1	9,5	22	12	2	1,22	5,00	1,73
12	10	12	2,5	8,5	23,5	12	1,75	1,71	6,32	1,65

4.1.4. Oil SAE 15 W 50 L

Tabel 4.5. Tabel Pengamatan Second Order SAE 15 w 50 L

No.	Pressure (psi)	f	x (mm)	b (mm)	L (mm)	θ_i (mm)	θ_o (mm)	S1 (mm)	S2 (mm)	t (detik)
1	10	1	4	7	28,5	12	9,25	0,17	0,33	1,79
2	10	2	6	5,5	21	12,25	9,25	0,38	0,71	1,74
3	10	3	6,5	6	19,5	11,75	9,25	0,60	1,20	1,7
4	10	4	6	6,5	19,5	12	9,5	0,85	1,74	1,65
5	10	5	5,5	8,5	20	12	9,25	1,16	2,38	1,62
6	10	6	6	8	20	12	9	1,58	3,00	1,56
7	10	7	5	8,5	21	11,75	9	2,00	3,89	1,68
8	10	8	4,5	7,5	20	11,5	9	2,42	4,71	1,69
9	10	9	6	6,5	20	11,5	8,5	2,90	5,63	1,71
10	10	10	6	6	20,5	11,75	9,25	3,33	6,67	1,74
11	10	11	6	7	19,5	12	9,25	3,93	7,86	1,77
12	10	12	5	5,5	20,5	12	8,75	4,80	9,23	1,8

Tabel diatas menunjukkan hasil pengamatan pada sistem orde kedua. Pengambilan data dilakukan berulang ulang untuk mendapatkan respon waktu dan bentuk gelombang yang sesuai terhadap variasi peredaman yang diberikan. Namun setelah beberapa kali melakukan percobaan tetap didapatkan hasil yang kurang bagus. Hal ini mungkin disebabkan akibat fungsi kerja peredam yang belum optimal.

4.2. Perhitungan

4.2.1. Open Loop

Data percobaan pada tes putaran terbuka (*open loop test*) digunakan untuk menghitung nilai konstanta penggabungan (*integration constant*).

Berikut ini adalah detail perhitungan menggunakan data pada variasi tekanan 10 psi :

$$\begin{aligned} \left(\frac{a1}{t1} + \frac{a2}{t2} \right) &= \frac{K}{G} (x1 + x2) \\ \left(\frac{39}{0,77} + \frac{75}{0,89} \right) &= \frac{K}{G} (6,15 + 6,15) \\ 134,9 &= \frac{K}{G} (12,3) \\ \frac{K}{G} &= \frac{134,9}{12,3} = 10,96 \end{aligned}$$

Keterangan :

K = kombinasi konstanta

G = faktor peredaman pada flapper

4.2.2. Closed Loop

Setelah mendapatkan nilai konstanta $\frac{K}{G}$, maka nilai K untuk *gain setting* dapat dicari.

$$\begin{aligned} G &= \frac{x}{Y} \\ G &= \frac{15,5}{11,5} = 1,348 \\ \frac{K}{G} &= 10,96 \\ \frac{K}{1,309} &= 13,2093 \\ K &= 1,348 \times 10,96 = 14,784 \end{aligned}$$

4.2.3 Oli SAE 10 W 30 L

Transient response

Sama halnya dengan susunan pertama (*first order*), open loop transfer function juga digunakan untuk mendapatkan nilai konstanta (K_1)

Open loop transfer function :

$$\frac{NK}{2G} \frac{1}{D(1 + T1D)} = \frac{K1}{D(1 + T1D)} \quad \text{sehingga : } K1 = \frac{NK}{2G}$$

Dimana :

$$N = \frac{S1}{S1 + S2}$$

S1 dan S2 merupakan nilai konstanta dari pegas pada sisi bagian kiri dan kanan flapper

Untuk mencari nilai S1 dan S2 menggunakan rumus $f = k.x$ sama dengan $f = S1.x$

$$S1, S2 = \frac{f}{x}$$

Sehingga : (perhitungan berikut untuk variasi $f = 6$)

$$S1 = \frac{6}{4,4} = 1,36 \text{ mm}, \text{ dan } S2 = \frac{6}{3,5} = 1,71 \text{ mm}$$

$$N = \frac{S1}{S1 + S2}$$

$$N = \frac{1,36}{1,36 + 1,71} = 0,443 \text{ mm}$$

Setelah mendapatkan nilai N, maka nilai K_1 dapat dihitung :

$$K1 = \frac{0,443 \times 14,784}{2 \times 1,348} = 2,429 \text{ mm}$$

Berikutnya, menghitung kesetimbangan gaya pada rangkaian flapper

$$x/z = \frac{S1}{[S1 + S2]} \frac{1}{[1 + T1D]}$$

dimana :

$$T1 = \frac{f}{S1 + S2} = \frac{6}{1,36 + 1,71} = 1,949 \text{ s}$$

$$z = \frac{x}{\left(\frac{S1}{[S1 + S2]} \frac{1}{[1 + T1D]} \right)} = \frac{x}{N \left(\frac{1}{[1 + T1D]} \right)}$$

$$z = \frac{x}{N \left(\frac{1}{[1 + T1D]} \right)} = \frac{x}{0,443 \left(\frac{1}{[1 + 1,949D]} \right)} = 26,6 \text{ mm}$$

Setelah itu menghitung nilai frekuensi natural (*natural frequency*) untuk menentukan seberapa besar rasio peredaman (*damping ratio*) dari sistem tersebut.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_1}{T_1}} = \sqrt{\frac{2,429}{1,949}} = 2,176 \text{ rad/s}$$

$$\zeta = \frac{1}{2\sqrt{K_1 \cdot T_1}} = \frac{1}{2\sqrt{2,429 \times 1,949}} = 0,230$$

Nilai dari rasio peredaman ini akan digunakan untuk menentukan apa kategori peredaman dari sistem tersebut

Dengan menggunakan perhitungan yang sama seperti diatas untuk setiap variasi tekanan yang ada maka didapatkan hasil perhitungan sebagai berikut.

Tabel 4.6. Hasil perhitungan frekuensi natural dan rasio peredaman. SAE 10 w 30 L

Pressure (psi)	f	N (mm)	T1 (s)	K1 (mm)	ω_n (rad/s)	ζ	ζ^2	z (mm)
10	1	0,400	1,200	2,193	1,622	0,308	0,095	16,5
10	2	0,417	1,458	2,285	1,825	0,274	0,075	23,6
10	3	0,415	1,578	2,278	1,896	0,264	0,070	18,6
10	4	0,429	1,714	2,350	2,007	0,249	0,062	19
10	5	0,438	1,797	2,404	2,079	0,241	0,058	19,1
10	6	0,443	1,949	2,429	2,176	0,230	0,053	26,6
10	7	0,435	2,089	2,387	2,233	0,224	0,050	14,1
10	8	0,438	2,191	2,403	2,295	0,218	0,047	18,2
10	9	0,421	2,316	2,309	2,312	0,216	0,047	23,6
10	10	0,406	2,436	2,226	2,328	0,215	0,046	25,3
10	11	0,410	2,580	2,246	2,407	0,208	0,043	30,5
10	12	0,404	2,698	2,218	2,446	0,204	0,042	31,9

Keterangan :

- f = kekentalan peredam konstan pada pembatas
- N = perbandingan konstanta pegas kiri dan total nilai konstanta pegas (mm)
- T₁ = waktu konstan (detik)
- K₁ = kombinasi konstanta (mm)
- ω_n = frekuensi natural (rad/s)
- ζ = damping ratio
- z = displacement dari tengah penghubung feedback (mm)

Step input

Berdasarkan hasil perhitungan rasio peredaman di atas, sistem ini termasuk kedalam kategori *underdamped* sehingga, perhitungan respon step menggunakan persamaan :

$$\theta_0 = Hi \left[1 - e^{-\zeta\omega_n t} \left[\cos(\sqrt{\zeta^2 - 1}) \omega_n t + \frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin(\sqrt{\zeta^2 - 1}) \omega_n t \right] \right]$$

$$Hi = \frac{\theta_0}{\left[1 - e^{-\zeta\omega_n t} \left[\cos(\sqrt{\zeta^2 - 1}) \omega_n t + \frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin(\sqrt{\zeta^2 - 1}) \omega_n t \right] \right]}$$

$$= \frac{9,5}{\left[1 - e^{-0,230 \times 2,176 \times 1,84} \left[\cos(\sqrt{0,053 - 1}) 2,176 \times 1,84 + \frac{0,230}{\sqrt{1 - 0,053}} \sin(\sqrt{0,053 - 1}) 0,053 \times 1,84 \right] \right]}$$

$$Hi = 10,7344 \text{ mm}$$

Besarnya nilai overshoot pertama pada sistem adalah :

$$\text{Overshoot (\%)} = e^{\frac{-\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} = e^{\frac{-3,14 \times 0,230}{\sqrt{1-0,053}}} = 0,477\%$$

Nilai overshoot yang diizinkan adalah 0 sampai 10%, sehingga berdasarkan perhitungan diatas overshoot pada sistem masih termasuk dalam kategori diizinkan. Dengan menggunakan perhitungan yang sama seperti diatas untuk setiap variasi tekanan yang ada maka didapatkan hasil perhitungan sebagai berikut.

Tabel 4.7. Hasil perhitungan nilai step dan overshoot pada *second order* SAE 10 w 30 L

Pressure (psi)	f	ω_n (s/mm)	ζ	ζ^2	Step (Hi) (mm)	overshoot (%)
10	1	1,622	0,308	0,095	16,9953	0,362
10	2	1,825	0,274	0,075	12,8483	0,409
10	3	1,896	0,264	0,070	12,0310	0,424
10	4	2,007	0,249	0,062	11,5403	0,446
10	5	2,079	0,241	0,058	10,3620	0,459
10	6	2,176	0,230	0,053	10,7344	0,477
10	7	2,233	0,224	0,050	9,4912	0,486
10	8	2,295	0,218	0,047	8,2959	0,496
10	9	2,312	0,216	0,047	9,1939	0,499
10	10	2,328	0,215	0,046	9,589814	0,501
10	11	2,407	0,208	0,043	10,61453	0,513
10	12	2,446	0,204	0,042	8,366565	0,519

Keterangan :

- f = kekentalan peredam konstan pada pembatas
- ω_n = frekuensi natural (rad/s)
- ζ = damping ratio
- H_i = nilai step input (mm)
- Overshoot = nilai respon yang melampaui harga *steady state* (%)

Ramp input

Dikarenakan karakteristik dari rangkaian susunan kedua (*second order*) maka terjadi ketidaksesuaian aliran pada respon ramp, hal ini menyebabkan terjadi keterlambatan output dibelakang input.

Besarnya ketidak sesuaian dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$\theta_o = \Omega \left(t - \frac{2\zeta}{\omega_n} + e^{-\zeta\omega_n t} \cdot \frac{2\zeta\Omega}{\omega_n} \cos[(\sqrt{1-\zeta^2})\omega_n t] + \frac{2\zeta^2 - 1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\sqrt{1-\zeta^2})\omega_n t \right)$$

untuk menyelesaikan persamaan diatas, diperlukan nilai untuk mencari determinan ramp (Ω) dengan merubah persamaan tersebut menjadi akar persamaan kuadrat sebagai berikut :

$$\Omega = \frac{\theta_o}{\left(t - \frac{2\zeta}{\omega_n} + e^{-\zeta\omega_n t} \cdot \frac{2\zeta\Omega}{\omega_n} \cos[(\sqrt{1-\zeta^2})\omega_n t] + \frac{2\zeta^2 - 1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\sqrt{1-\zeta^2})\omega_n t \right)}$$

$$\Omega = \frac{\theta_o}{A + B * X * C}$$

$$A = t - \frac{2\zeta}{\omega_n} = 1,84 - 2 * \frac{0,230}{2,176} = 1,629 \text{ rad/s}$$

$$B = e^{-\zeta\omega_n t} = e^{-0,230 * 2,176 * 1,84} = 0,033 \text{ rad/s}$$

$$C = \cos \left[(\sqrt{1-\zeta^2})\omega_n t + \frac{2\zeta^2 - 1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\sqrt{1-\zeta^2})\omega_n t \right]$$

$$= \cos[0,973 * 4 + (-4,23) * 0,82 * 4] = -0,764 \text{ rad /s}$$

$$X = \frac{2\zeta\Omega}{\omega_n}$$

$$\Omega = \frac{\theta_o}{A + B * X * C} = \frac{9,5}{1,69 + 0,033 * \frac{2 * 0,230\Omega}{2,176} * (-0,764)}$$

$$2,176\Omega = \frac{9,5}{1,69 + 0,033 * 0,46\Omega * (-0,764)}$$

$$2,176\Omega (1,69 + (-0,011\Omega)) = 9,5$$

$$3,677\Omega - 0,023\Omega^2 = 9,5$$

$$-0,023 + 3,677\Omega - 9,5 = 0$$

$$\Omega_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$\Omega_1 = \frac{-3,67 + \sqrt{3,67^2 - 4(-0,023) * (9,5)}}{2 * (-0,023)}$$

$$= 0,0018 \text{ rad/s}$$

$$\Omega_2 = \frac{-3,67 - \sqrt{3,67^2 - 4 * (-0,023) * (9,5)}}{2 * (-0,023)}$$

$$= 0,09 \text{ rad/s}$$

Dengan menggunakan perhitungan yang sama seperti diatas untuk setiap variasi tekanan yang ada maka didapatkan hasil perhitungan sebagai berikut.

Tabel 4.8. Hasil perhitungan nilai ramp SAE 10 w 30 L

Pressure (psi)	f	A (rad/s)	B (rad/s)	C (rad/s)	Ω_1 (rad/s)	Ω_2 (rad/s)	$2\zeta\Omega/\omega_n$ (rad/s)	$2\zeta/\omega_n$ (rad/s)
10	1	1,440	0,01125	-0,100	0,0000052	0,00262	0,000002	0,380
10	2	1,600	0,01555	0,933	0,0006562	-0,04301	0,000197	0,300
10	3	1,632	0,01779	0,443	0,0001846	-0,02459	0,000051	0,278
10	4	1,612	0,02456	-0,471	0,0003872	0,03706	0,000096	0,248
10	5	1,729	0,02301	-0,983	0,0013749	0,07985	0,000318	0,231
10	6	1,629	0,03398	-0,764	0,0018443	0,09020	0,000389	0,211
10	7	1,709	0,03268	0,211	0,0001144	-0,02640	0,000023	0,201
10	8	1,840	0,02905	0,986	0,0017718	-0,12271	0,000337	0,190
10	9	1,703	0,03803	0,885	0,0026071	-0,13508	0,000488	0,187
10	10	1,646	0,04312	0,785	0,0027097	-0,13241	0,000500	0,184
10	11	1,607	0,05194	1,000	0,0069056	-0,20784	0,001192	0,173
10	12	1,743	0,04401	0,142	0,0000845	-0,02673	0,000014	0,167

Keterangan :

f = kekentalan peredam konstan pada pembatas

A = konstanta nilai A untuk mencari nilai ramp (rad/s)

B = konstanta nilai B untuk mencari nilai ramp (rad/s)

C = konstanta nilai C untuk mencari nilai ramp (rad/s)

Ω_1 = velocity input / nilai ramp 1 (rad/s)

Ω_2 = velocity input / nilai ramp 2 (rad/s)

ω_n = frekuensi natural (rad/s)

ζ = damping ratio

Respon frekuensi untuk sinusoidal input

Menghitung phase lag :

$$\begin{aligned} \text{Phase lag} = \phi &= \left(\frac{b}{L}\right) \times 360 \\ &= \frac{8}{29} \times 360 = 99,31 \end{aligned}$$

Setelah itu mencari nilai $\tan \phi$ agar dapat menghitung nilai sinusoidal input (ω)

$$\tan \phi = \frac{2\zeta\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}$$

$$\tan 99,31 = \frac{2 \times 0,230\left(\frac{\omega}{2,176}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{2,176}\right)^2} = \frac{0,46 \times \left(\frac{\omega}{2,176}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{2,176}\right)^2}$$

$$-6 \left(1 - \frac{\omega}{2,176}\right) = 0,46$$

$$-6 + \frac{6\omega}{2,176} = 0,46$$

$$6\omega = (0,46 \times 2,176) + 6$$

$$\omega = 1,164 \text{ rad/s}$$

Menghitung amplitudo ratio :

$$\begin{aligned} \frac{|\theta_o|}{|\theta_i|} &= \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + 4\zeta^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \\ \frac{|\theta_o|}{|\theta_i|} &= \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{1,164}{2,176}\right)^2\right]^2 + 4 \times 0,23^2 \left(\frac{1,164}{2,176}\right)^2}} = 1.383 \end{aligned}$$

Dengan menggunakan perhitungan yang sama seperti diatas untuk setiap variasi tekanan yang ada maka didapatkan hasil perhitungan sebagai berikut

Tabel 4.9. Hasil perhitungan amplitudo ratio dan phase lag SAE 10 w 30 L

ω_n (rad/s)	ζ	Amplitudo Ratio	ϕ (derajat)	Tan ϕ	ω (rad/s)
1,622	0,308	1,471	88,4211	36,27814	0,972
1,825	0,274	1,813	105,5172	-3,60167	1,278
1,896	0,264	1,976	111,2727	-2,56848	1,389
2,007	0,249	3,016	126,3158	-1,36055	1,735
2,079	0,241	1,757	111,7241	-2,50981	1,398
2,176	0,230	1,383	99,3103	-6,09973	1,164
2,233	0,224	3,202	132,6316	-1,08629	1,921
2,295	0,218	1,468	107,3684	-3,19718	1,313
2,312	0,216	2,883	132,6316	-1,08629	1,921
2,328	0,215	1,541	111,7241	-2,50981	1,398
2,407	0,208	1,331	102,0000	-4,70463	1,213
2,446	0,204	1,512	113,6842	-2,27977	1,439

Keterangan :

ω_n = frekuensi natural (rad/s)

ζ = damping ratio

ϕ = sudut fase (derajat)

ω = nilai frekuensi sinusoidal input (rad/s)

4.2.4. Oli SAE 10 W 40 L

Transient response

Sama halnya dengan susunan pertama (*first order*), open loop transfer function juga digunakan untuk mendapatkan nilai konstanta (K_1)

Open loop transfer function :

$$\frac{NK}{2G} \frac{1}{D(1 + T1D)} = \frac{K1}{D(1 + T1D)} \quad \text{sehingga : } K1 = \frac{NK}{2G}$$

Dimana :

$$N = \frac{S1}{S1 + S2}$$

S1 dan S2 merupakan nilai konstanta dari pegas pada sisi bagian kiri dan kanan flapper

Untuk mencari nilai S1 dan S2 menggunakan rumus $f = k \cdot x$ sama dengan $f = S1 \cdot x$

$$S1, S2 = \frac{f}{x}$$

Sehingga : (perhitungan berikut untuk variasi $f = 6$)

$$S1 = \frac{6}{5,1} = 1,18, \text{ dan } S2 = \frac{6}{3,3} = 1,82$$

$$N = \frac{S1}{S1 + S2}$$

$$N = \frac{1,18}{1,18+1,82} = 0,393 \text{ mm}$$

Setelah mendapatkan nilai N , maka nilai K_1 dapat dihitung :

$$K1 = \frac{0,393 \times 14,784}{2 \times 1,348} = 2,154 \text{ mm}$$

Berikutnya, menghitung kesetimbangan gaya pada rangkaian flapper

$$x/z = \frac{S1}{[S1 + S2]} \frac{1}{[1 + T1D]}$$

dimana :

$$T1 = \frac{f}{S1+S2} = \frac{6}{1,18+1,82} = 2 \text{ s}$$

$$z = \frac{x}{\left(\frac{S1}{[S1 + S2]} \frac{1}{[1 + T1D]} \right)} = \frac{x}{N \left(\frac{1}{[1 + T1D]} \right)}$$

$$z = \frac{x}{N \left(\frac{1}{[1+T1D]} \right)} = \frac{7}{0,393 \left(\frac{1}{[1+2D]} \right)} = 53,51 \text{ mm}$$

Setelah itu menghitung nilai frekuensi natural (*natural frequency*) untuk menentukan seberapa besar rasio peredaman (*damping ratio*) dari sistem tersebut.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K1}{T1}} = \sqrt{\frac{2,154}{2}} = 2,078 \text{ rad/s}$$

$$\zeta = \frac{1}{2\sqrt{K1 \cdot T1}} = \frac{1}{2\sqrt{2,154 \times 2}} = 0,241$$

Nilai dari rasio peredaman ini akan digunakan untuk menentukan apa kategori peredaman dari sistem tersebut

Dengan menggunakan perhitungan yang sama seperti diatas untuk setiap variasi tekanan yang ada maka didapatkan hasil perhitungan sebagai berikut.

Tabel 4.10. Hasil perhitungan frekuensi natural dan rasio peredaman SAE 10 w 40 L

Pressure (psi)	f	N (mm)	T1 (s)	K1 (mm)	ω_n (rad/s)	ζ	ζ^2	z (mm)
10	1	0,306	1,528	1,676	1,600	0,313	0,098	57,909
10	2	0,333	1,600	1,828	1,710	0,292	0,085	50,700
10	3	0,400	1,440	2,193	1,777	0,281	0,079	36,600
10	4	0,403	1,612	2,210	1,887	0,265	0,070	51,852
10	5	0,528	1,321	2,897	1,956	0,256	0,065	28,554
10	6	0,393	2,004	2,154	2,078	0,241	0,058	53,518
10	7	0,300	2,100	1,645	1,859	0,269	0,072	57,867
10	8	0,256	2,306	1,405	1,800	0,278	0,077	77,419
10	9	0,238	1,905	1,306	1,577	0,317	0,101	58,560
10	10	0,222	1,867	1,219	1,508	0,332	0,110	47,730
10	11	0,196	1,768	1,077	1,380	0,362	0,131	43,682
10	12	0,213	1,494	1,171	1,323	0,378	0,143	29,211

Keterangan :

- f = kekentalan peredam konstan pada pembatas
- N = perbandingan konstanta pegas kiri dan total nilai konstanta pegas (mm)
- T₁ = waktu konstan (detik)
- K₁ = kombinasi konstanta (mm)
- ω_n = frekuensi natural (rad/s)
- ζ = damping ratio
- z = displacement dari tengah penghubung feedback (mm)

Step input

Berdasarkan hasil perhitungan rasio peredaman di atas, sistem ini termasuk kedalam kategori *underdamped* sehingga, perhitungan respon step menggunakan persamaan :

$$\theta_o = H_i \left[1 - e^{-\zeta\omega_n t} \left[\cos(\sqrt{\zeta^2 - 1}) \omega_n t + \frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin(\sqrt{\zeta^2 - 1}) \omega_n t \right] \right]$$

$$H_i = \frac{\theta_o}{\left[1 - e^{-\zeta\omega_n t} \left[\cos(\sqrt{\zeta^2 - 1}) \omega_n t + \frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin(\sqrt{\zeta^2 - 1}) \omega_n t \right] \right]}$$

$$= \frac{\theta_o}{\left[1 - e^{-0,24 \times 0,2078 \times 1,8} \left[\cos(\sqrt{0,058 - 1}) 2,078 \times 1,8 + \frac{0,24}{\sqrt{1 - 0,058}} \sin(\sqrt{0,058 - 1}) 2,078 \times 1,8 \right] \right]}$$

$$H_i = 11.25 \text{ mm}$$

Besarnya nilai overshoot pertama pada sistem adalah :

$$\text{Overshoot (\%)} = e^{\frac{-\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} = e^{\frac{-3,14 \times 0,241}{\sqrt{1-0,058}}} = 0,459\%$$

Nilai overshoot yang diizinkan adalah 0 sampai 10%, sehingga berdasarkan perhitungan diatas overshoot pada sistem masih termasuk dalam kategori diizinkan.

Dengan menggunakan perhitungan yang sama seperti diatas untuk setiap variasi tekanan yang ada maka didapatkan hasil perhitungan sebagai berikut.

Tabel 4.11. Hasil perhitungan nilai step dan overshoot pada *second order* SAE 10 w 40I

Pressure (psi)	f	ω_n (s/mm)	ζ	ζ^2	Step (H_i) (mm)	overshoot (%)
10	1	1,600	0,313	0,098	24,1439	0,356
10	2	1,710	0,292	0,085	21,1710	0,383
10	3	1,777	0,281	0,079	20,0380	0,398
10	4	1,887	0,265	0,070	11,3123	0,422
10	5	1,956	0,256	0,065	10,8479	0,436
10	6	2,078	0,241	0,058	11,2597	0,459
10	7	1,859	0,269	0,072	9,3583	0,416
10	8	1,800	0,278	0,077	5,7536	0,403
10	9	1,577	0,317	0,101	9,3645	0,350
10	10	1,508	0,332	0,110	3,902763614	0,332
10	11	1,380	0,362	0,131	5,093687838	0,295
10	12	1,323	0,378	0,143	5,19236343	0,277

Keterangan :

f = kekentalan peredam konstan pada pembatas

ω_n = frekuensi natural (rad/s)

ζ = damping ratio

H_i = nilai step input (mm)

Overshoot = nilai respon yang melampaui harga *steady state* (%)

Ramp input

Dikarenakan karakteristik dari rangkaian susunan kedua (*second order*) maka terjadi ketidaksesuaian aliran pada respon ramp, hal ini menyebabkan terjadi keterlambatan output dibelakang input.

Besarnya ketidak sesuaian dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$\theta_0 = \Omega \left(t - \frac{2\zeta}{\omega_n} + e^{-\zeta\omega_n t} \cdot \frac{2\zeta\Omega}{\omega_n} \cos[(\sqrt{1-\zeta^2})\omega_n t] + \frac{2\zeta^2 - 1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\sqrt{1-\zeta^2})\omega_n t \right)$$

untuk menyelesaikan persamaan diatas, diperlukan nilai untuk mencari determinan ramp (Ω) dengan merubah persamaan tersebut menjadi akar persamaan kuadrat sebagai berikut :

$$\Omega = \frac{\theta_0}{\left(t - \frac{2\zeta}{\omega_n} + e^{-\zeta\omega_n t} \cdot \frac{2\zeta\Omega}{\omega_n} \cos[(\sqrt{1-\zeta^2})\omega_n t] + \frac{2\zeta^2 - 1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\sqrt{1-\zeta^2})\omega_n t \right)}$$

$$\Omega = \frac{\theta_0}{A + B * X * C}$$

$$A = t - \frac{2\zeta}{\omega_n} = 1,8 - 2 * \frac{0,241}{2,078} = 1,56 \text{ rad/s}$$

$$B = e^{-\zeta\omega_n t} = e^{-0,2414 * 2,078 * 1,8} = 0,031 \text{ rad/s}$$

$$C = \cos\left[(\sqrt{1-\zeta^2})\omega_n t\right] + \frac{2\zeta^2 - 1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\sqrt{1-\zeta^2})\omega_n t$$

$$= \cos[0,970 * 3,7 + (-4,03) * 0,82 * 3,7] = -0,8 \text{ rad/s}$$

$$X = \frac{2\zeta\Omega}{\omega_n}$$

$$\Omega = \frac{\theta_0}{A + B * X * C} = \frac{9}{1,56 + 0,031 * \frac{0,241 * 2 * \Omega}{2,078} * (-0,8)}$$

$$2,078\Omega = \frac{9}{1,56 + 0,031 * 0,48\Omega * (-0,8)}$$

$$2,078\Omega (1,56 - 0,011\Omega) = 9$$

$$3,24\Omega - 0,022\Omega^2 = 9$$

$$-0,022\Omega^2 + 3,24\Omega - 9 = 0 \dots\dots\dots (a^2 + b - c = 0)$$

$$\Omega_1, \Omega_2 = \frac{b \pm \sqrt{b^2 + 4ac}}{2a}$$

$$\Omega_1 = \frac{-3,24 + \sqrt{-3,24^2 + 4 * (-0,022) * 9}}{2 * (-0,022)}$$

$$= 0,0018 \text{ rad/s}$$

$$\Omega_2 = \frac{-3,24 - \sqrt{-3,24^2 + 4 * (-0,022) * 9}}{2 * (-0,022)}$$

$$= 0,081 \text{ rad/s}$$

Dengan menggunakan perhitungan yang sama seperti diatas untuk setiap variasi tekanan yang ada maka didapatkan hasil perhitungan sebagai berikut.

Tabel 4.12. Hasil perhitungan nilai ramp SAE 10 w 40 L

Pressure (psi)	f	A (rad/s)	B (rad/s)	C (rad/s)	Ω_1 (rad/s)	Ω_2 (rad/s)	$2\zeta\Omega / \omega_n$ (rad/s)	$2\zeta / \omega_n$ (rad/s)
10	1	1,369	0,01228	0,4126	0,0001483	0,01094	0,000058	0,391
10	2	1,468	0,01450	0,565	0,0003349	-0,02088	0,000115	0,342
10	3	1,553	0,01486	0,982	0,0010169	-0,04132	0,000322	0,317
10	4	1,679	0,01570	0,350	0,0000856	-0,01752	0,000024	0,281
10	5	1,719	0,01744	-0,443	0,0001650	0,02578	0,000043	0,261
10	6	1,568	0,03125	-0,821	0,0018581	0,08170	0,000430	0,232
10	7	1,581	0,01788	0,833	0,0005039	-0,04425	0,000146	0,289
10	8	1,501	0,01791	0,984	0,0004269	-0,04802	0,000132	0,309
10	9	1,418	0,00989	-0,443	0,0000431	0,00975	0,000017	0,402
10	10	1,270	0,01073	-0,933	0,0000920	0,01908	0,000040	0,440
10	11	1,205	0,00664	-0,906	0,0000437	0,00996	0,000023	0,525
10	12	1,078	0,00681	-0,629	0,0000225	0,00608	0,000013	0,572

Keterangan :

- f = kekentalan peredam konstan pada pembatas
- A = konstanta nilai A untuk mencari nilai ramp (rad/s)
- B = konstanta nilai B untuk mencari nilai ramp (rad/s)
- C = konstanta nilai C untuk mencari nilai ramp (rad/s)
- Ω_1 = velocity input / nilai ramp 1 (rad/s)
- Ω_2 = velocity input / nilai ramp 2 (rad/s)
- ω_n = frekuensi natural (rad/s)
- ζ = damping ratio

Respon frekuensi untuk sinusoidal input

Menghitung phase lag :

$$\text{Phase lag} = \phi = \left(\frac{b}{L}\right) \times 360$$

$$= \frac{8,5}{24} \times 360 = 127,5$$

Setelah itu mencari nilai $\tan \phi$ agar dapat menghitung nilai sinusoidal input (ω)

$$\tan \phi = \frac{2\zeta\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}$$

$$\tan 127,5 = \frac{2 \times 0,241 \left(\frac{\omega}{2,078}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{2,078}\right)^2} = \frac{0,482 \times \left(\frac{\omega}{2,078}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{2,078}\right)^2}$$

$$-1,3 \left(1 - \frac{\omega}{2,078}\right) = 0,482$$

$$-1,3 + \frac{1,3\omega}{2,078} = 0,482$$

$$1,3\omega = (0,482 \times 2,078) + 1,3$$

$$\omega = 1,767 \text{ rad/s}$$

Menghitung amplitudo ratio :

$$\frac{|\theta_o|}{|\theta_i|} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + 4\zeta^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}}$$

$$\frac{|\theta_o|}{|\theta_i|} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{1,767}{2,078}\right)^2\right]^2 + 4 \times 0,241^2 \left(\frac{1,767}{2,078}\right)^2}} = 2,046$$

Dengan menggunakan perhitungan yang sama seperti diatas untuk setiap variasi tekanan yang ada maka didapatkan hasil perhitungan sebagai berikut

Tabel 4.13. Hasil perhitungan amplitudo ratio dan phase lag SAE 10 w 40 L

ω_n (rad/s)	ζ	Amplitudo Ratio	Φ (derajat)	Tan ϕ	ω (rad/s)
1,600	0,313	1,846	100,0000	-5,67128	1,176
1,710	0,292	2,325	112,0000	-2,47509	1,404
1,777	0,281	3,012	122,0870	-1,59494	1,627
1,887	0,265	2,617	120,0000	-1,73205	1,577
1,956	0,256	2,252	117,5510	-1,91681	1,522

2,078	0,241	2,046	127,5000	-1,30323	1,767
1,859	0,269	0,020	184,0000	0,069927	-13,301
1,800	0,278	0,089	187,8261	0,137447	-6,276
1,577	0,317	0,082	168,0000	-0,21256	5,705
1,508	0,332	0,255	156,5217	-0,43436	3,302
1,380	0,362	0,222	155,4545	-0,45668	3,190
1,323	0,378	0,808	130,2128	-1,18281	1,845

Keterangan :

ω_n = frekuensi natural (rad/s)

ζ = damping ratio

ϕ = sudut fase (derajat)

ω = nilai frekuensi sinusoidal input (rad/s)

4.2.5. Oli SAE 15 W 50 L

Transient response

Sama halnya dengan susunan pertama (*first order*), open loop transfer function juga digunakan untuk mendapatkan nilai konstanta (K_1)

Open loop transfer function :

$$\frac{NK}{2G} \frac{1}{D(1 + T1D)} = \frac{K1}{D(1 + T1D)} \quad \text{sehingga : } K1 = \frac{NK}{2G}$$

Dimana :

$$N = \frac{S1}{S1 + S2}$$

S1 dan S2 merupakan nilai konstanta dari pegas pada sisi bagian kiri dan kanan flapper

Untuk mencari nilai S1 dan S2 menggunakan rumus $f = k.x$ sama dengan $f = S1.x$

$$S1, S2 = \frac{f}{x}$$

Sehingga : (perhitungan berikut untuk variasi $f = 6$)

$$S1 = \frac{6}{3,8} = 1,58, \text{ dan } S2 = \frac{6}{2} = 3$$

$$N = \frac{S1}{S1 + S2}$$

$$N = \frac{1,58}{1,58+3} = 0,345 \text{ mm}$$

Setelah mendapatkan nilai N, maka nilai K_1 dapat dihitung :

$$K_1 = \frac{0,345 \times 14,784}{2 \times 1,348} = 1,891 \text{ mm}$$

Berikutnya, menghitung kesetimbangan gaya pada rangkaian flapper

$$x/z = \frac{S_1}{[S_1 + S_2]} \frac{1}{[1 + T_1 D]}$$

dimana :

$$T_1 = \frac{f}{S_1 + S_2} = \frac{6}{1,58 + 3} = 1,31 \text{ s}$$

$$z = \frac{x}{\left(\frac{S_1}{[S_1 + S_2]} \frac{1}{[1 + T_1 D]} \right)} = \frac{x}{N \left(\frac{1}{[1 + T_1 D]} \right)}$$

$$z = \frac{x}{N \left(\frac{1}{[1 + T_1 D]} \right)} = \frac{6}{0,345 \left(\frac{1}{[1 + 1,31 D]} \right)} = 40,2 \text{ mm}$$

Setelah itu menghitung nilai frekuensi natural (*natural frequency*) untuk menentukan seberapa besar rasio peredaman (*damping ratio*) dari sistem tersebut.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_1}{T_1}} = \sqrt{\frac{1,891}{1,31}} = 1,574 \text{ rad/s}$$

$$\zeta = \frac{1}{2\sqrt{K_1 T_1}} = \frac{1}{2\sqrt{1,891 \times 1,31}} = 0,318$$

Nilai dari rasio peredaman ini akan digunakan untuk menentukan apa kategori peredaman dari sistem tersebut

Dengan menggunakan perhitungan yang sama seperti diatas untuk setiap variasi tekanan yang ada maka didapatkan hasil perhitungan sebagai berikut.

Tabel 4.14. Hasil perhitungan frekuensi natural dan rasio peredaman SAE 15 w 50L

Pressure (psi)	f	N (mm)	T1 (s)	K1 (mm)	ω_n (rad/s)	ζ	ζ^2	z (mm)
10	1	0,333	2,000	1,828	1,912	0,262	0,068	45,000
10	2	0,346	1,832	1,896	1,864	0,268	0,072	49,157
10	3	0,333	1,667	1,828	1,745	0,286	0,082	52,000
10	4	0,329	1,544	1,802	1,668	0,300	0,090	46,461
10	5	0,328	1,411	1,799	1,593	0,314	0,098	40,412
10	6	0,345	1,310	1,891	1,574	0,318	0,101	40,200
10	7	0,340	1,189	1,862	1,488	0,336	0,113	32,222
10	8	0,340	1,122	1,864	1,446	0,346	0,120	28,085
10	9	0,340	1,055	1,867	1,404	0,356	0,127	36,225

10	10	0,333	1,000	1,828	1,352	0,370	0,137	36,000
10	11	0,333	0,933	1,828	1,306	0,383	0,147	34,800
10	12	0,342	0,855	1,876	1,267	0,395	0,156	27,115

Keterangan :

- f = kekentalan peredam konstan pada pembatas
- N = perbandingan konstanta pegas kiri dan total nilai konstanta pegas (mm)
- T₁ = waktu konstan (detik)
- K₁ = kombinasi konstanta (mm)
- ω_n = frekuensi natural (rad/s)
- ζ = damping ratio
- z = displacement dari tengah penghubung feedback (mm)

Step input

Berdasarkan hasil perhitungan rasio peredaman di atas, sistem ini termasuk kedalam kategori *underdamped* sehingga, perhitungan respon step menggunakan persamaan :

$$\theta_o = Hi \left[1 - e^{-\zeta\omega_n t} \left[\cos(\sqrt{\zeta^2 - 1}) \omega_n t + \frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin(\sqrt{\zeta^2 - 1}) \omega_n t \right] \right]$$

$$Hi = \frac{\theta_o}{\left[1 - e^{-\zeta\omega_n t} \left[\cos(\sqrt{\zeta^2 - 1}) \omega_n t + \frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin(\sqrt{\zeta^2 - 1}) \omega_n t \right] \right]}$$

$$= \frac{9}{\left[1 - e^{-0,318 \times 1,574 \times 1,56} \left[\cos(\sqrt{0,101 - 1}) 1,574 \times 1,56 + \frac{0,318}{\sqrt{1 - 0,101}} \sin(\sqrt{0,101 - 1}) 1,574 \times 1,56 \right] \right]}$$

$$Hi = 21,75 \text{ mm}$$

Besarnya nilai overshoot pertama pada sistem adalah :

$$\text{Overshoot (\%)} = e^{\frac{-\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} = e^{\frac{-3,14 \times 0,318}{\sqrt{1-0,101}}} = 0,349\%$$

Nilai overshoot yang diizinkan adalah 0 sampai 10%, sehingga berdasarkan perhitungan diatas overshoot pada sistem masih termasuk dalam kategori diizinkan.

Dengan menggunakan perhitungan yang sama seperti diatas untuk setiap variasi tekanan yang ada maka didapatkan hasil perhitungan sebagai berikut.

Tabel 4.15. Hasil perhitungan nilai step dan overshoot pada *second order* SAE 15 w 50L

Pressure (psi)	f	ω_n (s/mm)	ζ	ζ^2	Step (Hi) (mm)	overshoot (%)
10	1	1,912	0,262	0,068	13,5457	0,427
10	2	1,864	0,268	0,072	14,3510	0,417
10	3	1,745	0,286	0,082	16,4745	0,391
10	4	1,668	0,300	0,090	19,0753	0,373
10	5	1,593	0,314	0,098	20,5998	0,354
10	6	1,574	0,318	0,101	21,7598	0,349
10	7	1,488	0,336	0,113	21,1351	0,326
10	8	1,446	0,346	0,120	21,9569	0,314
10	9	1,404	0,356	0,127	21,4191	0,302
10	10	1,352	0,370	0,137	24,19535	0,287
10	11	1,306	0,383	0,147	25,03419	0,272
10	12	1,267	0,395	0,156	24,37743	0,259

Keterangan :

f = kekentalan peredam konstan pada pembatas

ω_n = frekuensi natural (rad/s)

ζ = damping ratio

Hi = nilai step input (mm)

Overshoot = nilai respon yang melampaui harga *steady state* (%)

Ramp input

Dikarenakan karakteristik dari rangkaian susunan kedua (*second order*) maka terjadi ketidaksesuaian aliran pada respon ramp, hal ini menyebabkan terjadi keterlambatan output dibelakang input.

Besarnya ketidak sesuaian dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$\theta_o = \Omega \left(t - \frac{2\zeta}{\omega_n} + e^{-\zeta\omega_n t} \cdot \frac{2\zeta\Omega}{\omega_n} \cos[(\sqrt{1-\zeta^2})\omega_n t] + \frac{2\zeta^2 - 1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\sqrt{1-\zeta^2})\omega_n t \right)$$

untuk menyelesaikan persamaan diatas, diperlukan nilai untuk mencari determinan ramp (Ω) dengan merubah persamaan tersebut menjadi akar persamaan kuadrat sebagai berikut :

$$\Omega = \frac{\theta_o}{\left(t - \frac{2\zeta}{\omega_n} + e^{-\zeta\omega_n t} \cdot \frac{2\zeta\Omega}{\omega_n} \cos \left[(\sqrt{1-\zeta^2})\omega_n t \right] + \frac{2\zeta^2 - 1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\sqrt{1-\zeta^2})\omega_n t \right)}$$

$$\Omega = \frac{\theta_0}{A + B * X * C}$$

$$A = t - \frac{2\zeta}{\omega_n} = 1,56 - 2 * \frac{0,318}{1,574} = 1,156 \text{ rad/s}$$

$$B = e^{-\zeta\omega_n t} = e^{-0,318 * 1,574 * 1,56} = 0,0189 \text{ rad/s}$$

$$C = \cos\left[\left(\sqrt{1 - \zeta^2}\right) \omega_n t + \frac{2\zeta^2 - 1}{2\zeta\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin\left(\sqrt{1 - \zeta^2}\right) \omega_n t\right]$$

$$= \cos[0,948 * 2,45 + (-2,98) * 0,81 * 2,45] = -0,88 \text{ rad/s}$$

$$X = \frac{2\zeta\Omega}{\omega_n}$$

$$\Omega = \frac{\theta_0}{A + B * X * C} = \frac{9}{1,156 + 0,0189 * \frac{2 * 0,318 * \Omega}{1,574} * (-0,88)}$$

$$1,574\Omega = \frac{9}{1,156 + 0,018 * 0,63\Omega * (-0,88)}$$

$$1,574\Omega (1,156 - 0,0099\Omega) = 9$$

$$1,81\Omega - 0,015\Omega^2 = 9$$

$$-0,015\Omega^2 + 1,81\Omega - 9 = 0 \dots\dots\dots (a^2 + b - c = 0)$$

$$\Omega_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$\Omega_1 = \frac{-1,81 + \sqrt{1,81^2 - 4 * (-0,88) * 9}}{2 * -0,88}$$

$$= 0,0014 \text{ rad/s}$$

$$\Omega_2 = \frac{-1,81 - \sqrt{1,81^2 - 4 * (-0,88) * 9}}{2 * -0,88}$$

$$= 0,029 \text{ rad/s}$$

Dengan menggunakan perhitungan yang sama seperti diatas untuk setiap variasi tekanan yang ada maka didapatkan hasil perhitungan sebagai berikut.

Tabel 4.16. Hasil perhitungan nilai ramp SAE 15 w 50 L

Pressure (psi)	f	A (rad/s)	B (rad/s)	C (rad/s)	Ω_1 (rad/s)	Ω_2 (rad/s)	$2\zeta\Omega/\omega_n$ (rad/s)	$2\zeta/\omega_n$ (rad/s)
10	1	1,516	0,02364	0,6973	0,0008743	-0,04867	0,000239	0,274
10	2	1,452	0,02388	0,988	0,0018504	-0,06571	0,000533	0,288
10	3	1,372	0,02032	0,534	0,0004476	-0,02644	0,000147	0,328
10	4	1,291	0,01913	-0,191	0,0000594	0,00780	0,000021	0,359
10	5	1,226	0,01713	-0,726	0,0007562	0,02354	0,000298	0,394
10	6	1,156	0,01898	-0,885	0,0014648	0,02910	0,000591	0,404
10	7	1,228	0,01093	-0,986	0,0005890	0,01909	0,000266	0,452
10	8	1,212	0,00934	-0,996	0,0004572	0,01585	0,000219	0,478
10	9	1,202	0,00765	-0,949	0,0002713	0,01197	0,000138	0,508
10	10	1,193	0,00581	-0,829	0,0001356	0,00763	0,000074	0,547
10	11	1,184	0,00442	-0,678	0,0000545	0,00458	0,000032	0,586
10	12	1,177	0,00340	-0,525	0,0000188	0,00264	0,000012	0,623

Keterangan :

- f = kekentalan peredam konstan pada pembatas
- A = konstanta nilai A untuk mencari nilai ramp (rad/s)
- B = konstanta nilai B untuk mencari nilai ramp (rad/s)
- C = konstanta nilai C untuk mencari nilai ramp (rad/s)
- Ω_1 = velocity input / nilai ramp 1 (rad/s)
- Ω_2 = velocity input / nilai ramp 2 (rad/s)
- ω_n = frekuensi natural (rad/s)
- ζ = damping ratio

Respon frekuensi untuk sinusoidal input

Menghitung phase lag :

$$\begin{aligned} \text{Phase lag} = \phi &= \left(\frac{b}{L}\right) \times 360 \\ &= \frac{8}{20} \times 360 = 144 \end{aligned}$$

Setelah itu mencari nilai $\tan \phi$ agar dapat menghitung nilai sinusoidal input (ω)

$$\tan \phi = \frac{2\zeta\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}$$

$$\tan 144 = \frac{2 \times 0,318 \left(\frac{\omega}{1,574}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{1,574}\right)^2} = \frac{0,63 \times \left(\frac{\omega}{1,574}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{1,574}\right)^2}$$

$$-0,72 \left(1 - \frac{\omega}{1,574}\right) = 0,63$$

$$-0,72 + \frac{0,72\omega}{1,574} = 0,63$$

$$0,72\omega = (0,63 \times 1,574) + 0,72$$

$$\omega = 2,376 \text{ rad/s}$$

Menghitung amplitudo ratio :

$$\frac{|\theta_o|}{|\theta_i|} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + 4\zeta^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}}$$

$$\frac{|\theta_o|}{|\theta_i|} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{2,376}{1,574}\right)^2\right]^2 + 4 \times 0,318^2 \left(\frac{2,376}{1,574}\right)^2}} = 2,706$$

Dengan menggunakan perhitungan yang sama seperti diatas untuk setiap variasi tekanan yang ada maka didapatkan hasil perhitungan sebagai berikut

Tabel 4.17. Hasil perhitungan amplitudo ratio dan phase lag SAE 15 w 50 L

ω_n (rad/s)	ζ	Amplitudo Ratio	Φ (derajat)	Tan ϕ	ω (rad/s)
1,912	0,262	1,565	100,4651	-5,41391	1,185
1,864	0,268	1,454	94,2857	-13,3441	1,075
1,745	0,286	2,191	110,7692	-2,63678	1,379
1,668	0,300	2,809	120,0000	-1,73205	1,577
1,593	0,314	2,390	153,0000	-0,50953	2,963
1,574	0,318	2,706	144,0000	-0,72654	2,376
1,488	0,336	2,526	145,7143	-0,68179	2,467
1,446	0,346	2,888	135,0000	-1	2,000
1,404	0,356	1,761	117,0000	-1,96261	1,510
1,352	0,370	1,895	105,3659	-3,63895	1,275
1,306	0,383	1,807	129,2308	-1,22478	1,816
1,267	0,395	1,686	96,5854	-8,66212	1,115

Keterangan :

- ω_n = frekuensi natural (rad/s)
- ζ = damping ratio
- φ = sudut fase (derajat)
- ω = nilai frekuensi sinusoidal input (rad/s)

4.3. Analisa Grafik

Dari data yang didapat setelah melakukan pengamatan dan perhitungan, kemudian data tersebut dibuat kedalam grafik untuk mempermudah analisa

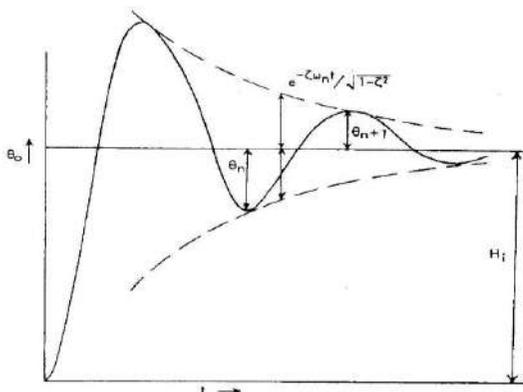
4.3.1. SAE 10 W 30 L

Grafik sinyal step input

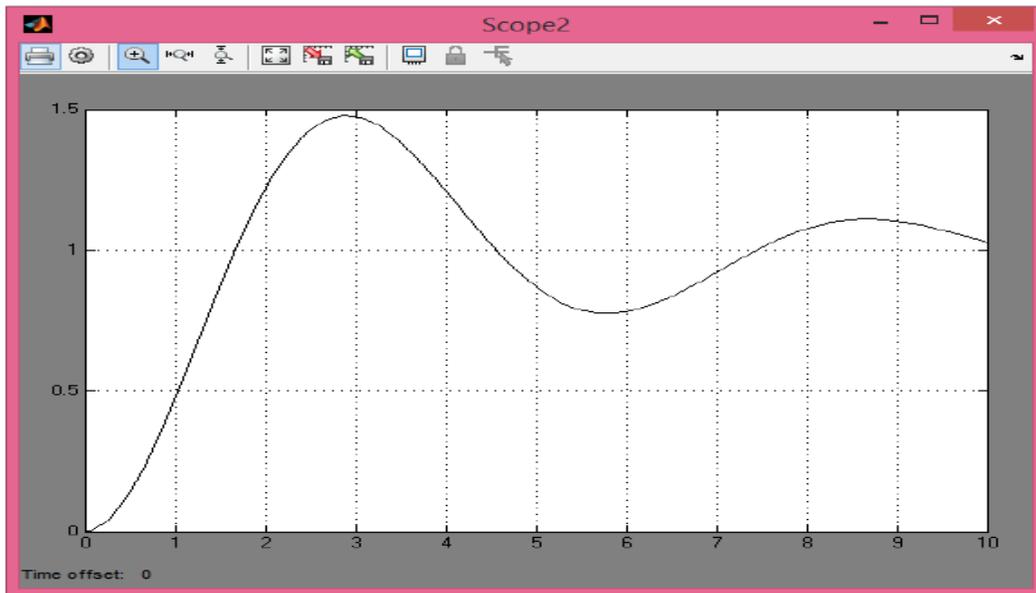
Fungsi sinyal uji step merupakan fungsi yang berguna untuk menguji respon sistem terhadap gangguan yang muncul tiba – tiba, dan melihat kemampuan sistem kontrol dalam memposisikan respon. Grafik sinyal step menunjukkan kondisi dari sistem tersebut terhadap gangguan yang muncul secara tiba – tiba. Dalam hal ini, sistem dalam keadaan diam, lalu kemudian diberi gangguan berupa gaya untuk menggerakkan flapper (inputan). Pada teori *second order* diberikan peredaman pada sistem sehingga karakteristik dari respon transient step juga berubah berdasarkan seberapa besar rasio peredaman yang terjadi. Berikut ini detail penjelasan grafik step untuk variasi tekanan pada 10 psi menggunakan software MATLAB.

Grafik nilai step

Grafik nilai step menunjukkan seberapa besar nilai step pada waktu tertentu disertai peredaman yang disimulasikan pada rangkaian closed loop.



Grafik disamping menunjukkan bagaimana seharusnya karakteristik dari respon step pada teori susunan kedua (*second order*)



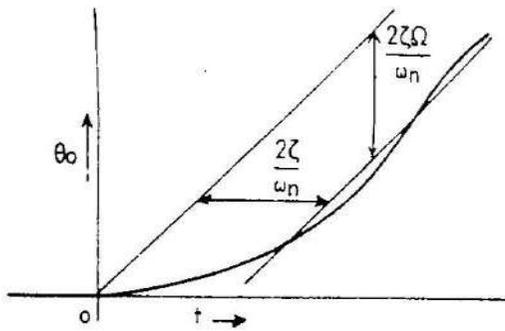
Grafik. 4.1. Sinyal step respon pada MATLAB – closed loop SAE 10 w 30 L

Grafik diatas menunjukkan hasil simulasi sinyal uji step dari rangkaian closed loop susunan kedua (*second order*). Berdasarkan hasil perhitungan sebelumnya, sistem ini termasuk kedalam kategori underdamped dikarenakan $\zeta = 0,23$ sehingga karakteristiknya adalah nilai output akan mengalami lonjakan awal (*overshoot*) yaitu nilai output akan melebihi nilai step input dan kemudian akan turun hingga kebawahnya (*undershoot*) dan kemudian akan berangsur setabil walaupun ada kemungkinan terjadi lonjakan kedua yang memiliki nilai lebih rendah dibandingkan dengan lonjakan awal. Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh nilai step input sebesar 10,7 dengan lonjakan awal (*overshoot*) sebesar 0,47%.

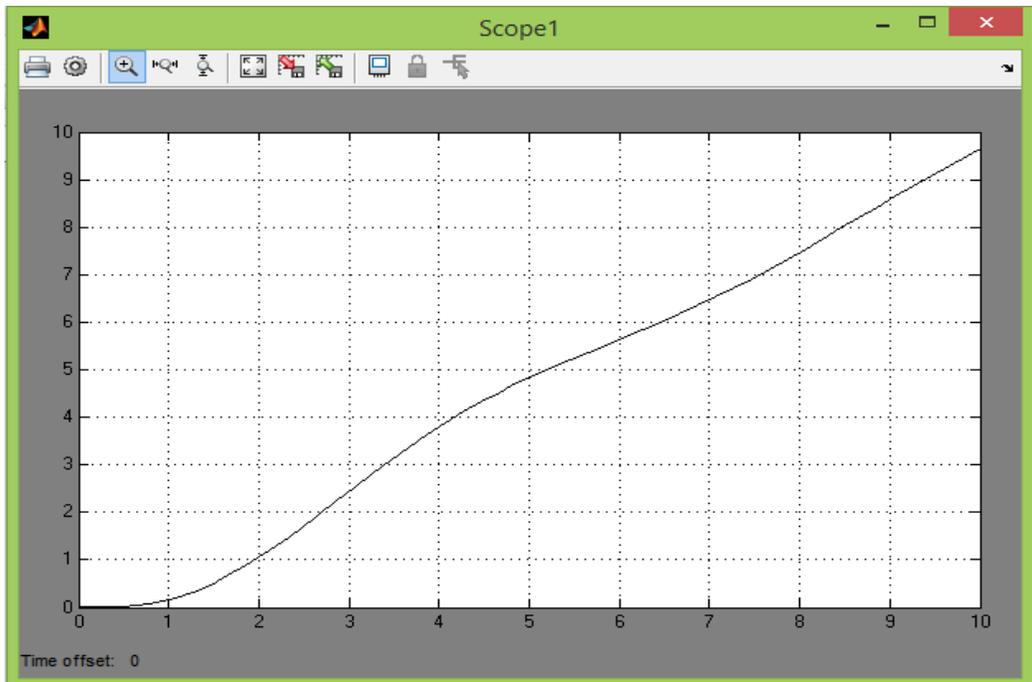
Pada grafik diatas terlihat overshoot yang terjadi yaitu sebesar $\pm 0,5\%$ sedangkan menurut hasil perhitungan sebesar 0,47%. Berdasarkan teori, besarnya lonjakan awal (*overshoot*) yang diizinkan adalah 0 hingga 10%. Jadi berdasarkan analisa dan perhitungan diatas dapat disimpulkan bahwa besarnya lonjakan awal (*overshoot*) yang terjadi pada sistem masih dapat diterima dan sistem dapat dikatakan dalam kondisi yang baik.

Grafik sinyal ramp input

Fungsi sinyal uji ramp merupakan fungsi berubah – ubah terhadap waktu, dan berguna untuk melihat kemampuan sistem kontrol untuk melacak target yang bergerak dengan kecepatan konstan. Grafik sinyal ramp menunjukkan kondisi dari aliran kecepatan pada sistem tersebut dari mulai kondisi diam ($t = 0$) sampai pada waktu tertentu (t) dan disertai peredaman. Berikut ini detail penjelasan grafik ramp untuk variasi tekanan pada 10 psi menggunakan software MATLAB.



Grafik disamping menunjukkan bagaimana seharusnya karakteristik dari respon step pada teori susunan kedua (*second order*)



Grafik. 4.2. Sinyal ramp respon pada MATLAB – closed loop SAE 10 w 30 L

Grafik diatas menunjukkan hasil simulasi sinyal uji ramp dari rangkaian closed loop susunan kedua (*second order*). Dalam sistem orde kedua juga terjadi delay pada kecepatan aliran, namun waktu delay tersebut berbanding lurus terhadap rasio peredaman dan nilai ramp, persamaannya adalah : $\left(\frac{2z\zeta\Omega}{\omega_n}\right)$. Artinya semakin besar peredaman yang diberikan maka waktu delay juga semakin lama dan nilai ramp juga semakin besar. Waktu konstan pada respon ramp juga dipengaruhi oleh nilai peredaman dengan persamaan : $\left(\frac{2z\zeta}{\omega_n}\right)$.

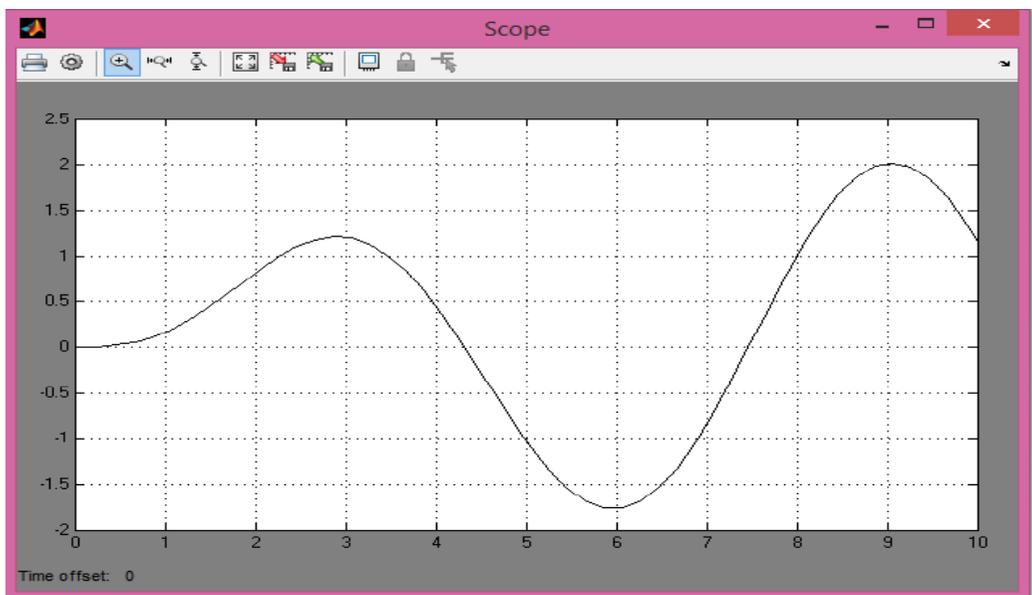
Berdasarkan grafik diatas terlihat bahwa waktu delay lebih lama (bentuk melengkung), namun berdasarkan hasil perhitungan diperoleh waktu delay selama 0,0003 detik, hal ini berlawanan dengan teori.. Ketidak sesuaian antara teori dengan hasil

perhitungan mungkin disebabkan oleh fungsi dari peredam yang tidak bekerja secara optimal.

Grafik sinyal sinusoidal input

Fungsi sinyal uji sinusoidal merupakan pengujian yang berguna untuk menguji respon yang menerima input berupa sinyal sinus. Respon ini juga berfungsi untuk menganalisa keadaan transient dari suatu sistem. Dikarenakan sinyal uji sinusoidal hanya digunakan untuk menguji jika sistem menerima inputan berupa sinyal sinusoidal maka pada percobaan open loop tidak dilakukan analisa mengenai respon sinusoidal melainkan hanya pada percobaan closed loop saja.

Berikut ini detail penjelasan grafik sinusoidal untuk variasi tekanan pada 10 psi menggunakan software MATLAB.



Grafik. 4.3. Sinyal sinusoidal respon pada MATLAB – closed loop SAE 10 w 30 L

Grafik diatas menunjukkan hasil simulasi dari respon sinusoidal pada sistem orde kedua. Terlihat bahwa semakin besar nilai frekuensi sinusoidalnya, semakin besar juga sudut fase dan amplitudonya. Menurut perhitungan nilai $\omega = 1,164$, $\phi = 99,31$ dan amplitudo ratio sebesar 1,383. Seharusnya dengan adanya penambahan peredam pada sistem, gangguan berupa getaran berlebih dapat dikurangi. Hal ini mungkin terjadi akibat fungsi dari peredam yang tidak bekerja secara optimal sehingga amplitudo pada respon sinusoidal tetap mengalami peningkatan.

4.3.2. SAE 10 W 40 L

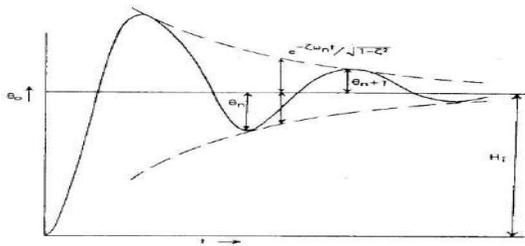
Grafik sinyal step input

Fungsi sinyal uji step merupakan fungsi yang berguna untuk menguji respon sistem terhadap gangguan yang muncul tiba – tiba, dan melihat kemampuan sistem kontrol dalam memposisikan respon. Grafik sinyal step menunjukkan kondisi dari sistem tersebut terhadap gangguan yang muncul secara tiba – tiba. Dalam hal ini, sistem dalam keadaan diam, lalu kemudian diberi gangguan berupa gaya untuk menggerakkan flapper (inputan). Pada teori *second order* diberikan peredaman pada sistem sehingga karakteristik dari respon transient step juga berubah berdasarkan seberapa besar rasio peredaman yang terjadi.

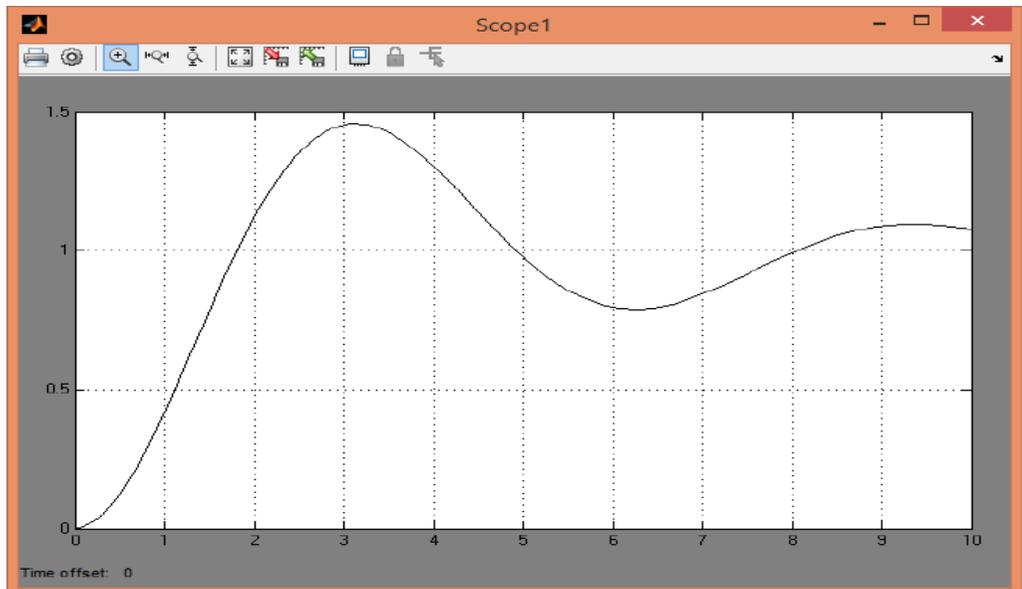
Berikut ini detail penjelasan grafik step untuk variasi tekanan pada 10 psi menggunakan software MATLAB.

Grafik nilai step

Grafik nilai step menunjukkan seberapa besar nilai step pada waktu tertentu disertai peredaman yang disimulasikan pada rangkaian closed loop.



Grafik disamping menunjukkan bagaimana seharusnya karakteristik dari respon step pada teori susunan kedua (*second order*)



Grafik. 4.4. Sinyal step respon pada MATLAB – closed loop SAE 10 w 40 L

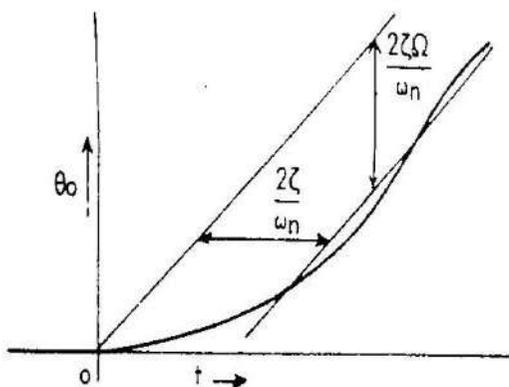
Grafik diatas menunjukkan hasil simulasi sinyal uji step dari rangkaian closed loop susunan kedua (*second order*). Berdasarkan hasil perhitungan sebelumnya, sistem ini termasuk kedalam kategori underdamped dikarenakan $\zeta = 0,24$ sehingga karakteristiknya adalah nilai output akan mengalami lonjakan awal (*overshoot*) yaitu nilai output akan melebihi nilai step input dan kemudian akan turun hingga kebawahnya (*undershoot*) dan kemudian akan berangsur setabil walaupun ada kemungkinan terjadi lonjakan kedua yang memiliki nilai lebih rendah dibandingkan dengan lonjakan awal. Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh nilai step input sebesar 11,59 dengan lonjakan awal (*overshoot*) sebesar 0,45 %.

Pada grafik diatas terlihat overshoot yang terjadi yaitu sebesar $\pm 0,45\%$ sedangkan menurut hasil perhitungan sebesar 0,45 %. Berdasarkan teori, besarnya lonjakan awal (*overshoot*) yang diizinkan adalah 0 hingga 10%. Jadi berdasarkan analisa dan perhitungan diatas dapat disimpulkan bahwa besarnya lonjakan awal (*overshoot*) yang terjadi pada sistem masih dapat diterima dan sistem dapat dikatakan dalam kondisi yang baik.

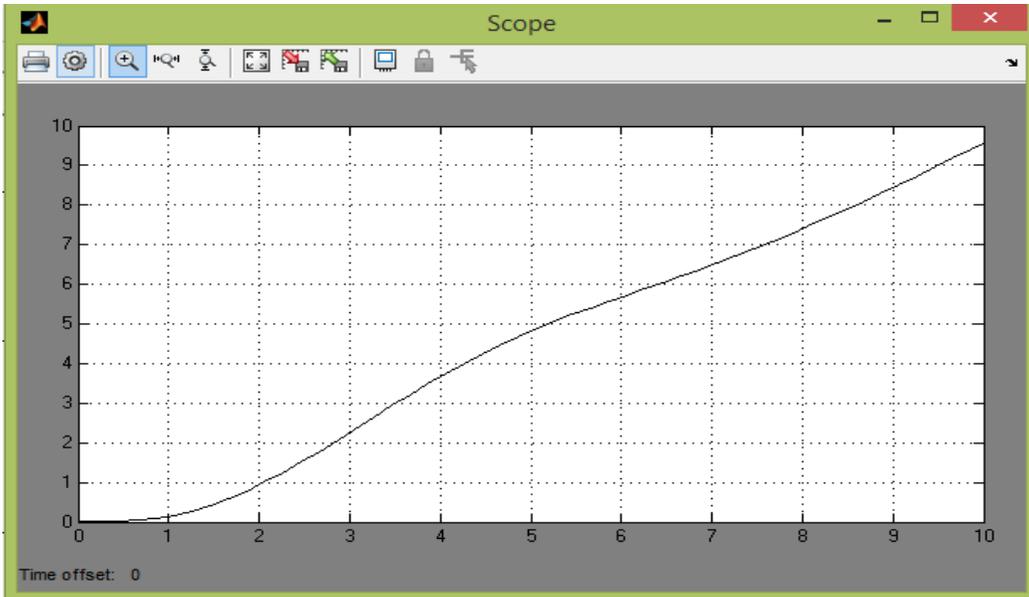
Grafik sinyal ramp input

Fungsi sinyal uji ramp merupakan fungsi berubah – ubah terhadap waktu, dan berguna untuk melihat kemampuan sistem kontrol untuk melacak target yang bergerak dengan kecepatan konstan. Grafik sinyal ramp menunjukkan kondisi dari aliran kecepatan pada sistem tersebut dari mulai kondisi diam ($t = 0$) sampai pada waktu tertentu (t) dan disertai peredaman.

Berikut ini detail penjelasan grafik ramp untuk variasi tekanan pada 10 psi menggunakan software MATLAB.



Grafik disamping menunjukkan bagaimana seharusnya karakteristik dari respon step pada teori susunan kedua (*second order*)



Grafik. 4.5. Sinyal ramp respon pada MATLAB – closed loop SAE 10 w 40 L

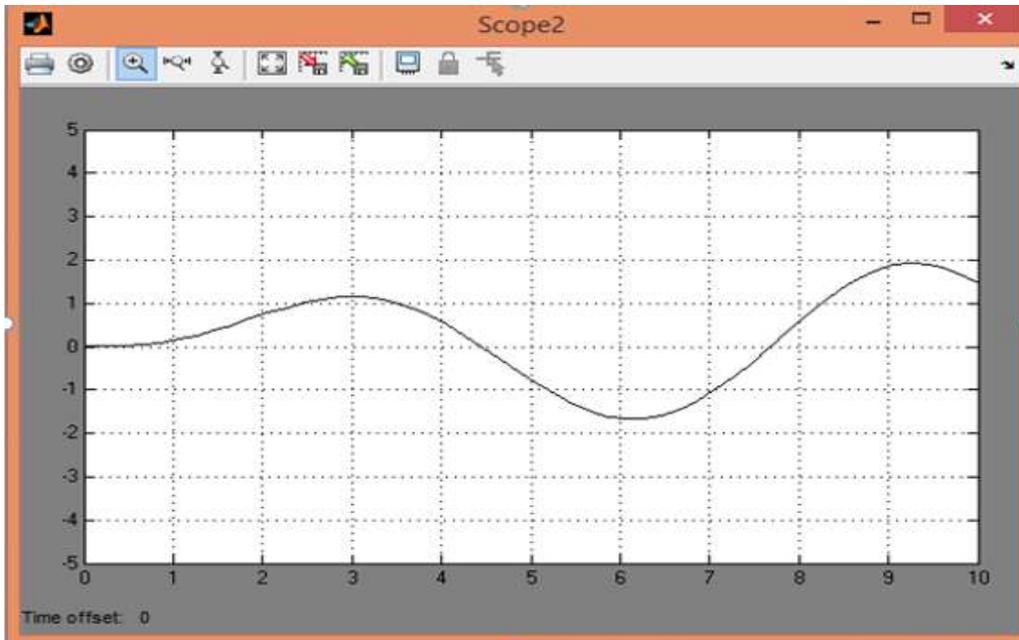
Grafik diatas menunjukkan hasil simulasi sinyal uji ramp dari rangkaian closed loop susunan kedua (*second order*). Dalam sistem orde kedua juga terjadi delay pada kecepatan aliran, namun waktu delay tersebut berbanding lurus terhadap rasio peredaman dan nilai ramp, persamaannya adalah : $\left(\frac{2\zeta\Omega}{\omega_n}\right)$. Artinya semakin besar peredaman yang diberikan maka waktu delay juga semakin lama dan nilai ramp juga semakin besar. Waktu konstan pada respon ramp juga dipengaruhi oleh nilai peredaman dengan persamaan : $\left(\frac{2\zeta}{\omega_n}\right)$.

Berdasarkan grafik diatas terlihat bahwa waktu delay lebih lama (bentuk melengkung), namun berdasarkan hasil perhitungan diperoleh waktu delay selama 0,00043 detik, hal ini berlawanan dengan teori. Ketidak sesuaian antara teori dengan hasil perhitungan mungkin disebabkan oleh fungsi dari peredam yang tidak bekerja secara optimal.

Grafik sinyal sinusoidal input

Fungsi sinyal uji sinusoidal merupakan pengujian yang berguna untuk menguji respon yang menerima input berupa sinyal sinus. Respon ini juga berfungsi untuk menganalisa keadaan transient dari suatu sistem. Dikarenakan sinyal uji sinusoidal hanya digunakan untuk menguji jika sistem menerima inputan berupa sinyal sinusoidal maka pada percobaan open loop tidak dilakukan analisa mengenai respon sinusoidal melainkan hanya pada percobaan closed loop saja.

Berikut ini detail penjelasan grafik sinusoidal untuk variasi tekanan pada 10 psi menggunakan software MATLAB.



Grafik. 4.6. Sinyal sinusoidal respon pada MATLAB – closed loop SAE 10 w 40 L

Grafik diatas menunjukkan hasil simulasi dari respon sinusoidal pada sistem orde kedua. Terlihat bahwa semakin besar nilai frekuensi sinusoidalnya, semakin besar juga sudut fase dan amplitudo nya. Menurut perhitungan nilai $\omega = 1,767$, $\phi = 127,50$ dan amplitudo ratio sebesar 2,046. Seharusnya dengan adanya penambahan peredam pada sistem, gangguan berupa getaran berlebih dapat dikurangi. Hal ini mungkin terjadi akibat fungsi dari peredam yang tidak bekerja secara optimal sehingga amplitudo pada respon sinusoidal tetap mengalami peningkatan.

4.3.3. SAE 15 W 50 L

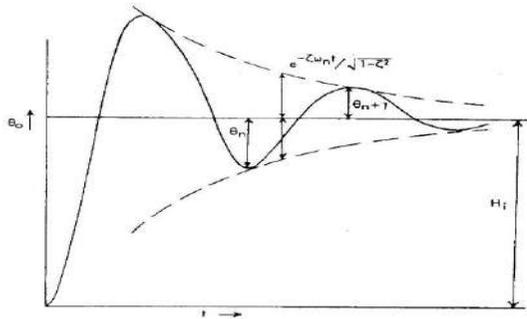
Grafik sinyal step input

Fungsi sinyal uji step merupakan fungsi yang berguna untuk menguji respon sistem terhadap gangguan yang muncul tiba – tiba, dan melihat kemampuan sistem kontrol dalam memposisikan respon. Grafik sinyal step menunjukkan kondisi dari sistem tersebut terhadap gangguan yang muncul secara tiba – tiba. Dalam hal ini, sistem dalam keadaan diam, lalu kemudian diberi gangguan berupa gaya untuk menggerakkan flapper (inputan). Pada teori *second order* diberikan peredaman pada sistem sehingga karakteristik dari respon transient step juga berubah berdasarkan seberapa besar rasio peredaman yang terjadi.

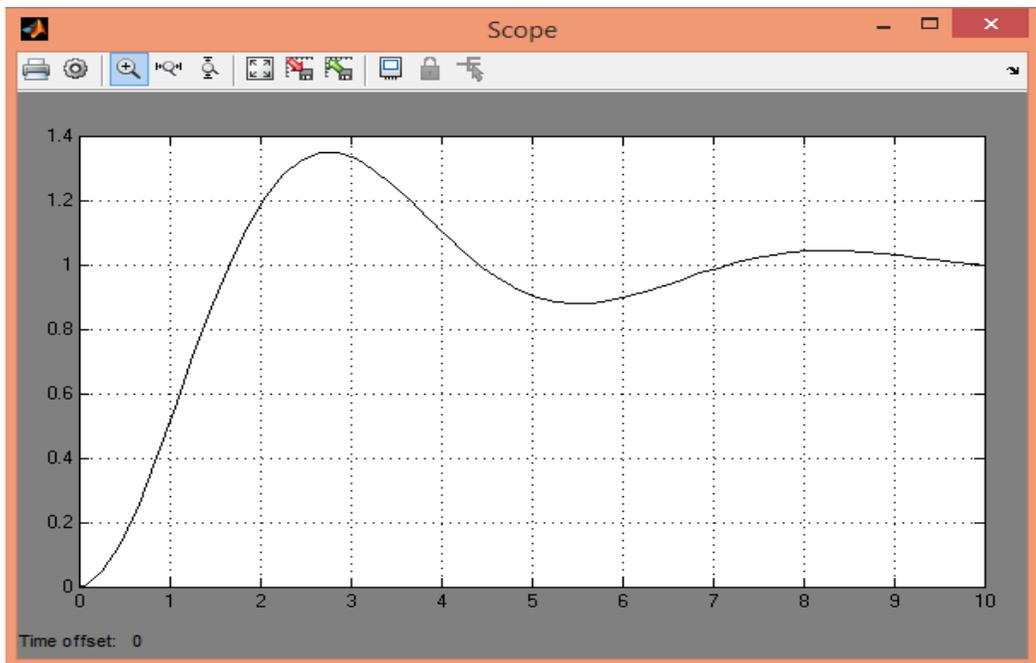
Berikut ini detail penjelasan grafik step untuk variasi tekanan pada 10 psi menggunakan software MATLAB.

Grafik nilai step

Grafik nilai step menunjukkan seberapa besar nilai step pada waktu tertentu disertai peredaman yang disimulasikan pada rangkaian closed loop.



Grafik disamping menunjukkan bagaimana seharusnya karakteristik dari respon step pada teori susunan kedua (*second order*)



Grafik. 4.7. Sinyal step respon pada MATLAB – closed loop SAE 15 w 50 L

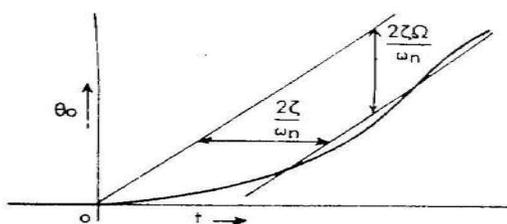
Grafik diatas menunjukkan hasil simulasi sinyal uji step dari rangkaian closed loop susunan kedua (*second order*). Berdasarkan hasil perhitungan sebelumnya, sistem ini termasuk kedalam kategori underdamped dikarenakan $\zeta = 0,318$ sehingga karakteristiknya adalah nilai output akan mengalami lonjakan awal (*overshoot*) yaitu nilai output akan melebihi nilai step input dan kemudian akan turun hingga kebawahnya (*undershoot*) dan kemudian akan berangsur setabil walaupun ada kemungkinan terjadi lonjakan kedua yang memiliki nilai lebih rendah dibandingkan dengan lonjakan awal. Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh nilai step input sebesar 21,75 dengan lonjakan awal (*overshoot*) sebesar 0,34%.

Pada grafik diatas terlihat overshoot yang terjadi yaitu sebesar $\pm 0,35\%$ sedangkan menurut hasil perhiungan sebesar $0,34\%$. Berdasarkan teori, besarnya lonjakan awal (*overshoot*) yang diizinkan adalah 0 hingga 10%. Jadi berdasarkan analisa dan perhitungan diatas dapat disimpulkan bahwa besarnya lonjakan awal (*overshoot*) yang terjadi pada sistem masih dapat diterima dan sistem dapat dikatakan dalam kondisi yang baik.

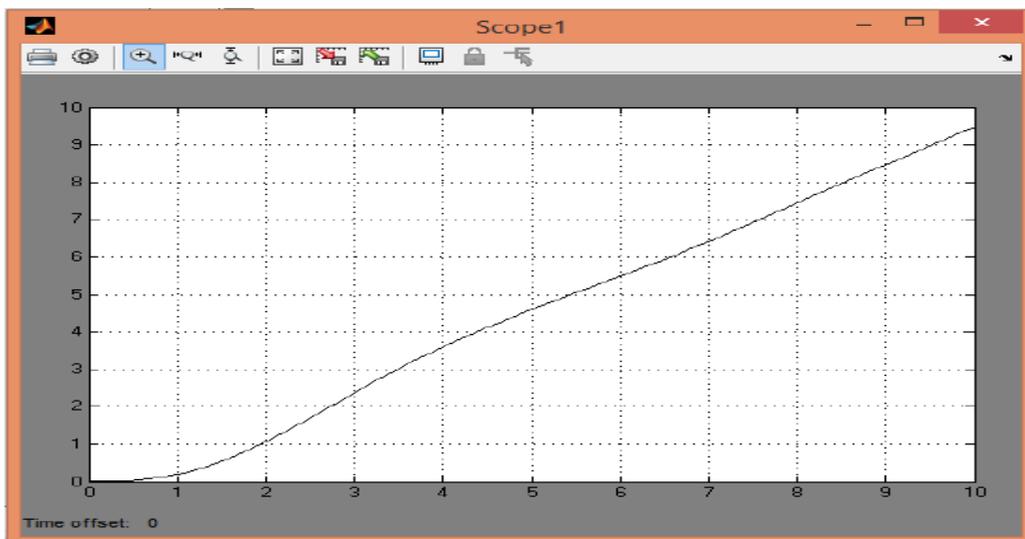
Grafik sinyal ramp input

Fungsi sinyal uji ramp merupakan fungsi berubah – ubah terhadap waktu, dan berguna untuk melihat kemampuan sistem kontrol untuk melacak target yang bergerak dengan kecepatan konstan. Grafik sinyal ramp menunjukkan kondisi dari aliran kecepatan pada sistem tersebut dari mulai kondisi diam ($t = 0$) sampai pada waktu tertentu (t) dan disertai peredaman.

Berikut ini detail penjelasan grafik ramp untuk variasi tekanan pada 10 psi menggunakan software MATLAB.



Grafik menunjukkan bagaimana seharusnya karakteristik dari respon step pada teori susunan kedua (*second order*)



Grafik. 4.8. Sinyal ramp respon pada MATLAB – closed loop SAE 15 w 50 L

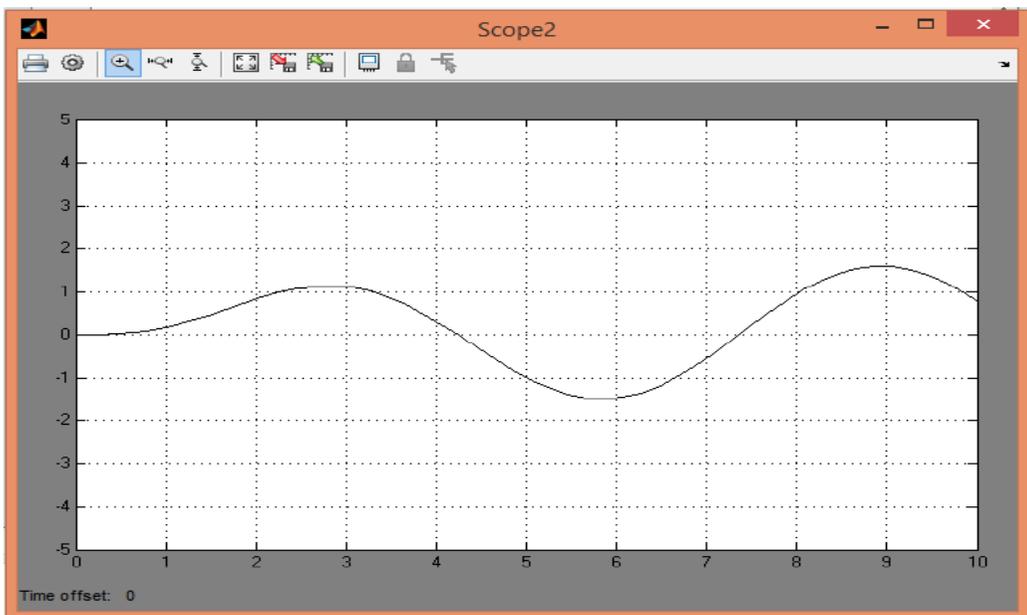
Grafik diatas menunjukkan hasil simulasi sinyal uji ramp dari rangkaian closed loop susunan kedua (*second order*). Dalam sistem orde kedua juga terjadi delay pada kecepatan aliran, namun waktu delay tersebut berbanding lurus terhadap rasio peredaman dan nilai ramp, persamaannya adalah : $\left(\frac{2\zeta\Omega}{\omega_n}\right)$. Artinya semakin besar peredaman yang diberikan maka waktu delay juga semakin lama dan nilai ramp juga semakin besar. Waktu konstan pada respon ramp juga dipengaruhi oleh nilai peredaman dengan persamaan : $\left(\frac{2\zeta}{\omega_n}\right)$.

Berdasarkan grafik diatas terlihat bahwa waktu delay lebih lama (bentuk melengkung), namun berdasarkan hasil perhitungan diperoleh waktu delay selama 0,0005 detik, hal ini berlawanan dengan teori. Ketidak sesuaian antara teori dengan hasil perhitungan mungkin disebabkan oleh fungsi dari peredam yang tidak bekerja secara optimal.

Grafik sinyal sinusoidal input

Fungsi sinyal uji sinusoidal merupakan pengujian yang berguna untuk menguji respon yang menerima input berupa sinyal sinus. Respon ini juga berfungsi untuk menganalisa keadaan transient dari suatu sistem. Dikarenakan sinyal uji sinusoidal hanya digunakan untuk menguji jika sistem menerima inputan berupa sinyal sinusoidal maka pada percobaan open loop tidak dilakukan analisa mengenai respon sinusoidal melainkan hanya pada percobaan closed loop saja.

Berikut ini detail penjelasan grafik sinusoidal untuk variasi tekanan pada 10 psi menggunakan software MATLAB.



Grafik. 4.9. Sinyal sinusoidal respon pada MATLAB – closed loop SAE 15 w 50 L

Grafik diatas menunjukkan hasil simulasi dari respon sinusoidal pada sistem orde kedua. Terlihat bahwa semakin besar nilai frekuensi sinusoidalnya, semakin besar juga sudut fase dan amplitudo nya. Menurut perhitungan nilai $\omega = 2,376$, $\phi = 144$ dan amplitudo ratio sebesar 2,706. Seharusnya dengan adanya penambahan peredam pada sistem, gangguan berupa getaran berlebih dapat dikurangi. Hal ini mungkin terjadi akibat fungsi dari peredam yang tidak bekerja secara optimal sehingga amplitudo pada respon sinusoidal tetap mengalami peningkatan.

4.4 Pembahasan

Sebuah sistem kontrol dengan menggunakan teori second order memiliki peredam (dashpot) yang menyebabkan akan timbul respon transient yang berupa rasio peredaman (*damping ratio*) dan lonjakan awal (*overshoot*).

Seberapa besar peredaman yang dihasilkan pada sistem akan mempengaruhi karakteristik dari pengujian stepnya. Pada hal ini, sistem menggunakan variasi 3 oli (SAE 10 w 30 L, SAE 10 w 40 L, SAE 15 w 50 L) dalam pengujian dan mendapatkan hasil bahwa rasio peredamannya termasuk kedalam kategori underdamped dikarenakan memiliki rasio peredaman kurang dari 1 ($\zeta = 0,23, \zeta = 0,24, \zeta = 0,318$). Ciri -ciri lain yang bisa didapatkan dari sistem yang berjenis underdamped ini adalah pada saat sistem beroperasi terjadi lonjakan awal (*overshoot*) yaitu berupa nilai output yang tinggi sehingga melebihi input. Kemudian outputnya mengalami penurunan sehingga dibawah nilai input dan lama – lama akan berangsur menjadi stabil, kemungkinan terjadi overshoot berikutnya mungkin ada namun nilainya masih lebih kecil dibandingkan dengan overshoot yang pertama. Dari nilai overshoot juga dapat disimpulkan apakah sistem tersebut aman atau tidak karena overshoot memiliki batas toleransi sebesar 0 hingga 10%.

Dikarenakan sistem ini terdapat peredaman, maka hal ini juga mempengaruhi nilai ramp sehingga delay pada sistem juga akan semakin besar tergantung dari hasil rasio peredaman yang didapat dan kekentalan oli yang digunakan. Begitu pula dengan nilai respon sinusoidal, dengan adanya peredaman seharusnya frekuensi sinusoidal dan juga amplitudo rasio dapat ditekan sehingga sudut fase dari gelombang yang dihasilkan akan semakin kecil agar sistem tersebut memiliki gangguan berupa getaran yang lebih kecil (lebih stabil) namun faktanya dengan semakin besar rasio peredaman dan kekentalan oli, nilai frekuensi sinusoidal dan juga amplitudo rasio yang dihasilkan semakin besar juga. Hal ini mungkin dikarenakan fungsi peredaman pada sistem tidak bekerja dengan baik.

“Halaman Sengaja Dikosongkan”

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan.

1. Untuk pengujian respon sistem, diperoleh hasil bahwa,
 - Pada oli SAE 10 w 30 L, diperoleh nilai *overshoot* sebesar 0,47% dengan waktu konstan $T = 1,949$ detik dan *damping ratio* sebesar 0,23. Kemudian untuk sinyal uji ramp didapatkan perhitungan nilai ramp sebesar 0,00184 dengan waktu delay selama 0,0003 detik. Dan untuk nilai sinusoidal sebesar 1,164, dengan amplitudo rasio 1,38
 - Pada oli SAE 10 w 40 L, diperoleh nilai *overshoot* sebesar 0,45 % dengan waktu konstan $T = 2,004$ detik dan *damping ratio* sebesar 0,24. Kemudian untuk sinyal uji ramp didapatkan perhitungan nilai ramp sebesar 0,00185 dengan waktu delay selama 0,0004 detik. Dan untuk nilai sinusoidal sebesar 1,767 , dengan amplitudo rasio 2,046
 - Pada oli SAE 15 w 50 L, diperoleh nilai *overshoot* sebesar 0,35% dengan waktu konstan $T = 1,310$ detik dan *damping ratio* sebesar 0,31. Kemudian untuk sinyal uji ramp didapatkan perhitungan nilai ramp sebesar 0,0014 dengan waktu delay selama 0,0005 detik. Dan untuk nilai sinusoidal sebesar 2,376, dengan amplitudo rasio 2,706

Berdasarkan analisa perhitungan secara keseluruhan, respon transient dari sistem masih dapat dikatakan baik .

2. Untuk pengujian dengan variasi oli, didapatkan hasil bahwa ketiga oli dengan SAE 10 w 30 L ($\zeta = 0,23$) , SAE 10 w 40 L ($\zeta = 0,24$), dan SAE 15 w 50 L ($\zeta = 0,31$) menghasilkan peredaman *underdamped* ($0 < \zeta < 1$) dimana ketiga oli tersebut masih layak digunakan dalam pengaplikasian seperti pada penggunaan pada pintu kapal yang tidak membutuhkan peredaman yang terlalu besar dalam penggunaannya. Sedangkan untuk aplikasi bidang marine membutuhkan peredaman yang besar (*Overdamped*), seperti pada rampdoor yang menggunakan pneumatic dalam penurunan /pengangkatan pintunya, dimana pada sistemnya membutuhkan peredaman yang stabil dan waktu yang lama, karena beban yang besar. Jadi untuk hasil dari variasi oli yang telah didapat tidak memungkinkan untuk diaplikasikan pada rampdoor

5.2. Saran.

1. Perlu dilakukan penelitian mendalam untuk sistem orde kedua dengan meningkatkan tingkat kekentalan oli agar mendapatkan peredaman *Critically Damped* dan *Overdamped*
2. Perlu dilakukan penelitian dengan teori *third order* dan *fourth order* mengacu pada modul feedback tipe PCM140.

“Halaman Sengaja Dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Supeno, Bambang . 2013, Aplikasi Sistem Kontrol Pnuematik pada Robotika (Bagian 1), Jurnal Kontrol Pnuematis . Universitas Jember
- Roland, S.Burns. 2001, *Advance Control Engineering*". Butterworth Heinemann. University of Plymouth, UK.
- Triwiyatno, Aris. 2012, Konsep Umum Sistem Kontrol , Buku Ajar Sistem Kontrol Analog, Universitas Dipenogoro
- Triwiyatno, Aris. 2012, Analisa Tanggapan waktu , Buku Ajar Sistem Kontrol Analog, Universitas Dipenogoro
- Ogata, K.. 2002. "*Modern Control Engineering*" 4th edition. Printice-Hall, Inc. New Jersey
- B.L. Theraja, A.K. Theraja, S.G. Tarnekar. 2005. *Basic Electrical Engineering (volume1)* "A Textbook of Electrical technology". Visvesvaraya National Institute of Technology, Nagpur. Ram Nagar, New Delhi.
- <http://belajartanggaponline.blogspot.co.id>, Fungsi Oil Hidrolik dan tingkat viskositas oli, diakses tanggal 10 agustus 2017
- Feedback Control Teaching Mechanism Type PCM140 Module.

“Halaman Sengaja Dikosongkan”

LAMPIRAN

SECTION B.

TECHNICAL DATA.

Supplies.

Air	20-150 psi at	1.25 cfm.
Electrical	200/250 volts single phase	50 Hz.
	100/125 volts single phase	60 Hz.

Pressure Regulator and Filter Unit.

- 1 - Stop valve 1/4 BSP, Norgren 10 x 1000C
- 1 - Special air purifier, Norgren F41-200 MOTB
- 1 - Precision pressure regulator (0-30 psi) 1/4 BSP Norgren 11,400-2G
- 1 - Pressure gauge, Norgren G30

Servo.

Piston diameter	1.5 in.
Piston rod diameter	0.25 in.
Upstream orifice	.041 in. diameter
Downstream nozzle	.060 in. diameter
Effective mass of inertia load	450 lb.
Quiescent cylinder pressure	10 psi

Recorder.

Paper	National Cash Register	Type AM6 x 3.1/2" diameter
Pens	Platignum Ball Point by Mentmore Manufacturing Co.	Ref. 502 (Red) Ref. 501 (Blue)

Belt.

Fenner No. S142.

Restrictor Unit.

Shell Oil Tellus 27, or Esso Nuto H44.

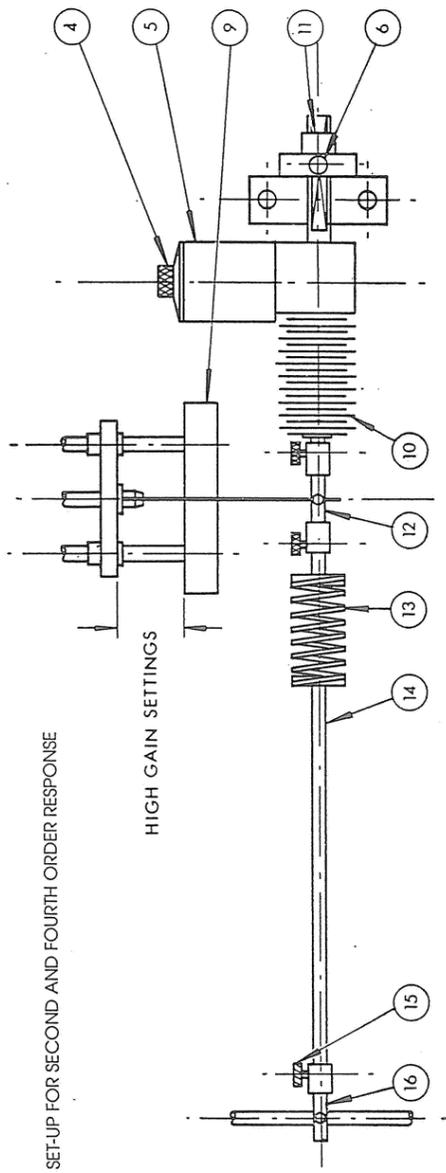
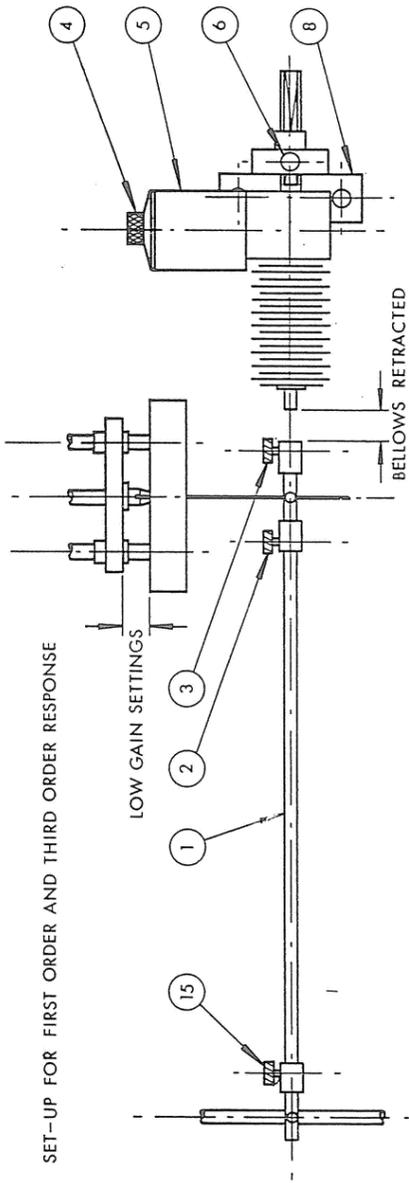
Potentiometer Voltage Supply Unit.

Feedback Type 140.

SYMBOLS USED IN THEORY SECTIONS.

θ_i	Input displacement
θ_o	Output displacement
θ	Displacement error
z	Displacement of centre of feedback link
x	Actuating displacement of cantilever
Y, y	Displacement of cantilever at nozzles
G	Flapper attenuation factor
Q_i, q_i	Flow through(one) upstream orifice
Q_o, q_o	Flow through(one) nozzle
Q, q	Flow to one side of piston
k	Flow per unit displacement at nozzle
A	Piston area
D	Operator, $\frac{d}{dt}$
T, T_1	Time constants
A_1, A_2, ψ	Constants of integration
H_i	Magnitude of input step
Ω	Velocity of input
ω	Frequency of sinusoidal input
$ \theta_i $	Amplitude of sinusoidal input
$ \theta_o $	Amplitude of sinusoidal output
ϕ	Phase lag of output
S_1	Stiffness of spring link
S_2	Effective stiffness of dashpot
f	Viscous damping constant of restrictor
ω_n	Undamped natural frequency
ω_o	Damped natural frequency
ζ	Damping ratio
m_1, m_2, α	Roots of auxiliary equations
θ_n	Successive overshoots and undershoots of output following an input step
θ_{n+1}	
λ	Logarithmic decrement

P_s	Supply pressure
$P_{c,p}$	Pressure between upstream orifice and nozzle
P, p	Pressure in cylinder
Y_0	Gap between flapper and nozzle in equilibrium position
k_1, k_2, k_4	Flow/pressure constants
V	Volume of air in cylinder on one side of piston
B	Equivalent bulk modulus of air in cylinder
M	Equivalent mass of output load
K)
N)
K_1)
K_2)
k_3)
a)
b)
c) Combinations of constants
e)
a^1)
b^1)
c^1)
e^1)
f^1)



SET UP FOR OPEN LOOP TEST

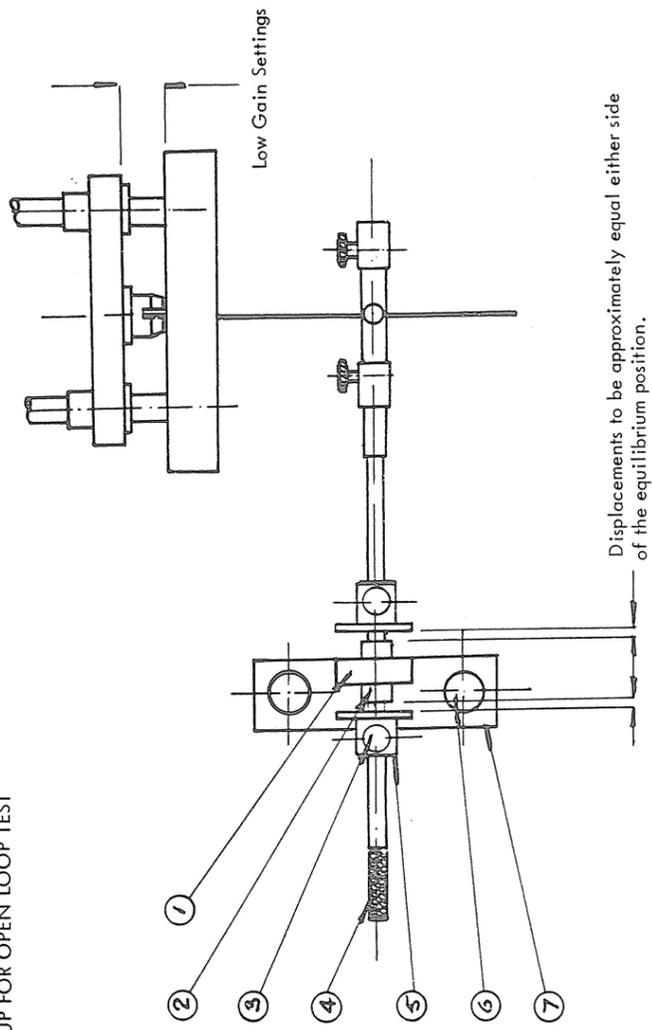


Fig. 26

DIAGRAMMATIC VIEW OF SERVO.

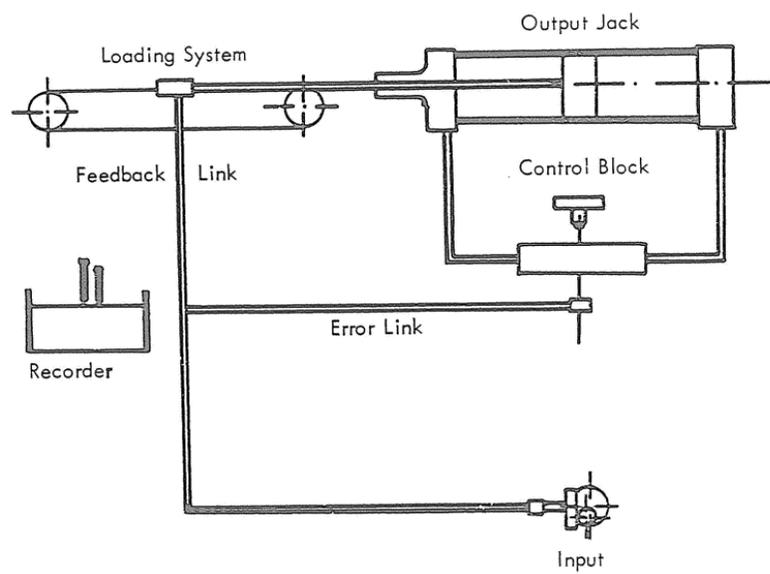


Fig. 1A

PNEUMATIC CIRCUIT DIAGRAM

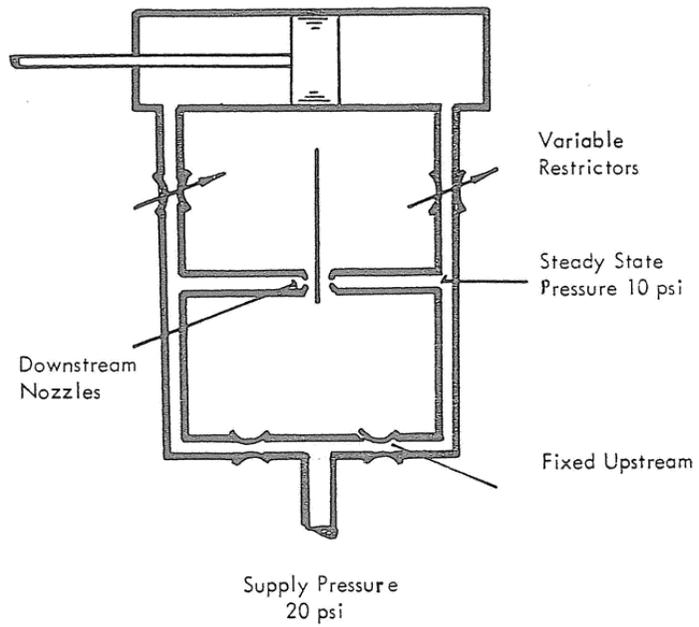


Fig. 1B

FLAPPER BLADE ALIGNMENT

14C...5

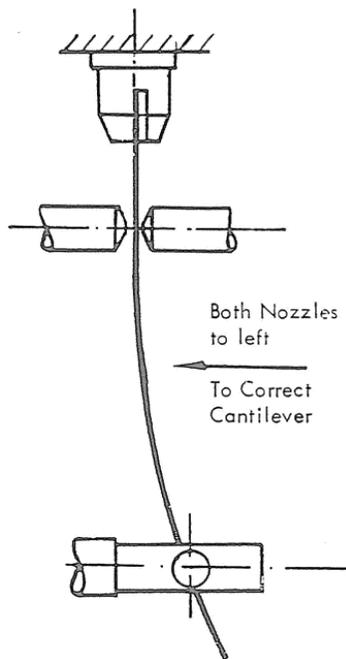
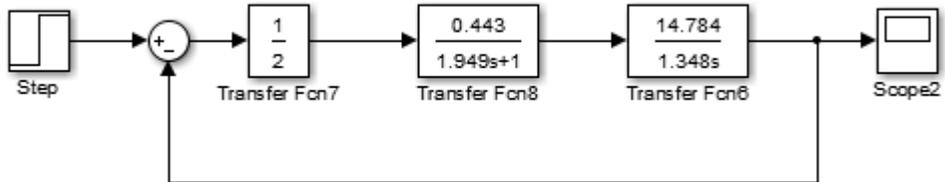


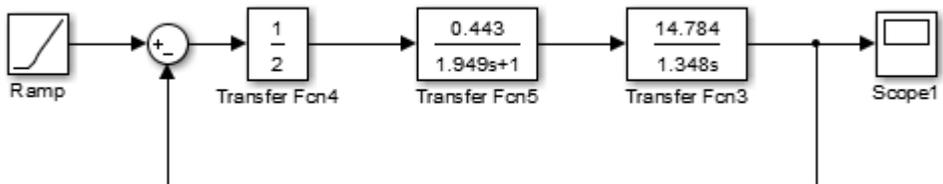
Fig. 4

SAE 10 W 30 L

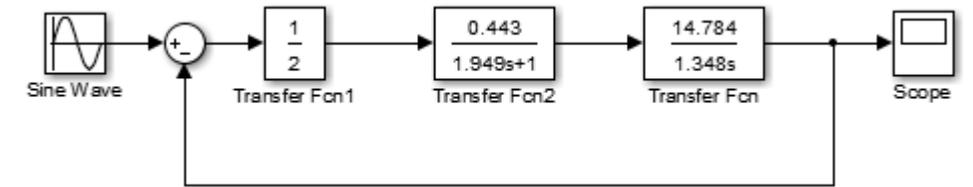
STEP SECOND ORDER



RAMP SECOND ORDER

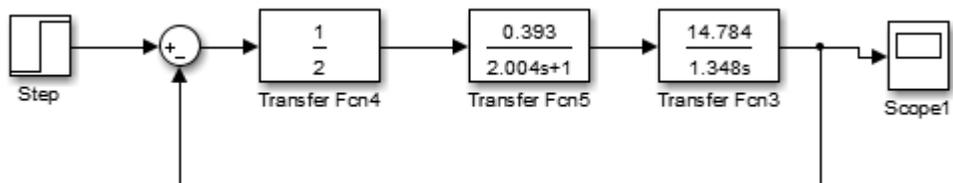


SINUSOIDAL SECOND ORDER

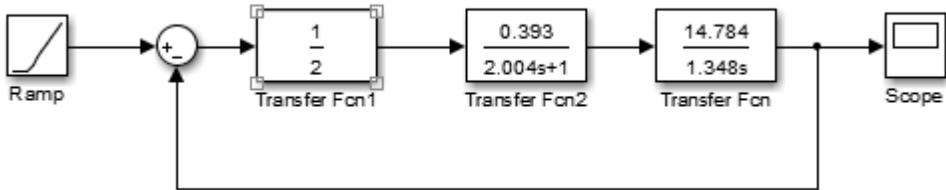


SAE 10 W 40 L

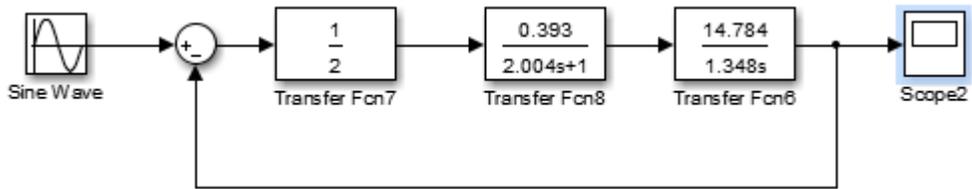
STEP SECOND ORDER



RAMP SECOND ORDER

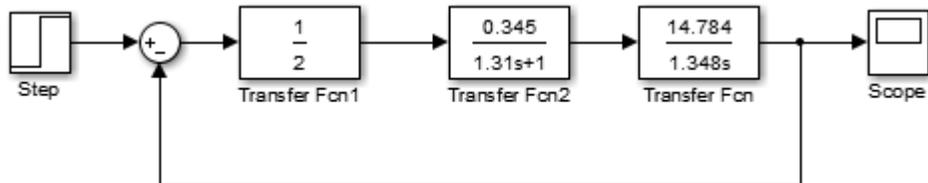


SINUSOIDAL SECOND ORDER

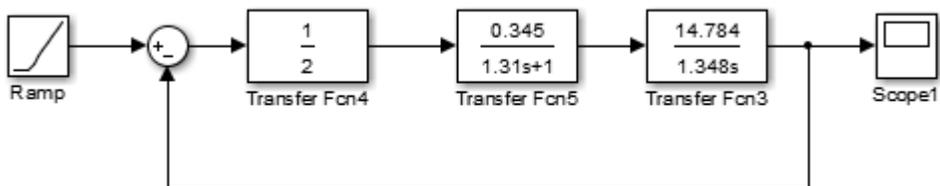


SAE 15 W 50 L

STEP SECOND ORDER



RAMP SECOND ORDER



SINUSOIDAL SECOND ORDER





BIODATA PENULIS

Penulis dilahirkan di Sambas pada tanggal 04 Juli 1991, merupakan anak pertama dari 3 bersaudara. Penulis menempuh pendidikan di SD Muhammadiyah kota Pontianak pada tahun 1998 – 2004, Madrasah Tsanawiyah Negeri 2 Pontianak pada tahun 2004 – 2007, SMA Negeri 3 Pontianak tahun 2007 – 2010. Kemudian penulis melanjutkan studinya ke jenjang Diploma Tiga (D3) di Politeknik Negeri Jakarta, Kampus Universitas Indonesia, Depok Jawa Barat dengan jurusan Teknik Mesin program studi Alat Berat pada tahun 2011 – 2014. Setelah itu penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang Strata Satu (S1) di

Fakultas Teknologi Kelautan – Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Penulis sempat aktif sebagai grader pratikum mata kuliah sistem pengendalian di Lab MEAS.