

# **RANCANG BANGUN SIMULATOR GEMPA BUMI**

**NUR AZHARY IRIAWAN EKA PUTRA  
D022181006**



**PROGRAM PASCASARJANA  
JURUSAN TEKNIK MESIN  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2022**

**TESIS**

**RANCANG BANGUN SIMULATOR GEMPA BUMI**

Disusun dan diajukan oleh

**NUR AZHARY IRIAWAN EKA PUTRA**

**D022181006**



**PROGRAM PASCASARJANA**

**JURUSAN TEKNIK MESIN**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**GOWA**

**2022**

# LEMBAR PENGESAHAN

## RANCANG BANGUN SIMULATOR GEMPA BUMI

Disusun dan diajukan oleh

**NUR AZHARY IRIAWAN EKA PUTRA**

**D022181006**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka

Penyelesaian Studi Program Magister Program Studi Teknik Mesin

Fakultas Teknik

Universitas Hasanuddin

pada tanggal 02 Maret 2022

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

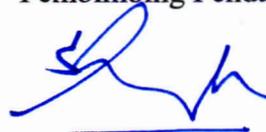
Menyetujui  
Komisi Penasehat,

Pembimbing Utama



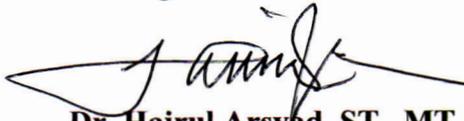
**Rafiuddin Syam, ST., M.Eng., Ph. D**  
**NIP. 197203301995121001**

Pembimbing Pendamping



**Prof. Dr. Ir. H. Ilyas Renreng M.T.**  
**NIP. 195709141987031001**

Ketua Program Studi  
Magister Teknik Mesin



**Dr. Hairul Arsyad, ST., MT.**  
**NIP. 197503222002121001**



**Prof. Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, MT.**  
**NIP. 196012311986091001**

## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Nur Azhary Iriawan Eka Putra  
Nomor Induk Mahasiswa : D022181006  
Program Studi : Teknik Mesin/Konstruksi Mesin  
Jenjang : S2

Menyatakan bahwa karya tulis berupa Tesis dengan judul

### RANCANG BANGUN SIMULATOR GEMPA BUMI

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis yang saya tulis ini benar benar merupakan hasil karya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 02 Maret 2022

Yang menyatakan,



Nur Azhary Iriawan Eka Putra

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur sennantiasa penulis panjatkan kehadirat Allah SWT karena atas rahmat dan berkat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis dengan Judul “*Rancang Bangun Simulator Gempa Bumi*” yang mana merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Master Teknik Mesin pada Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Selama proses pengerjaan Tesis ini penulis menerima begitu banyak bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada: kedua Orang Tua saya, serta seluruh keluarga besar yang selalu mendoakan, mendampingi dan memberikan dukungan baik secara moril dan materi.

Penulis juga ingin menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada semua pihak yang telah memberikan bimbingan dan petunjuk, terutama kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Dwia Aries Tina Pulubuhu. MA Selaku Rektor Universitas Hasanuddin.
2. Dr. Eng. Jalaluddin, ST., MT. selaku Ketua Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin beserta seluruh staf Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Dr. Hairul Arsyad, ST., MT. Selaku ketua Program Studi S2 Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
4. Rafiuddin Syam, ST., M. Eng., Ph. D, dan Prof. Dr. Ir. H. Ilyas Renreng, MT, Sebagai Dosen Pembimbing I dan Dosen Pembimbing II yang telah memberikan waktu, arahan, dan saran selama proses pengerjaan tesis ini.
5. Prof. Dr. Ir. Onny Sutresman, MT. Dr. Ir. H. Ahmad Yusran Aminy, MT dan Dr. Eng. Andi Amijoyo Mochtar, ST., M. Sc selaku penguji yang telah memberikan saran-saran selama proses pengerjaan tesis.
6. Bapak/Ibu dosen Departemen Teknik Mesin Universitas Hasanuddin yang telah memberikan ilmu, nasehat dan pengalaman kepada penulis selama menempuh pendidikan.

7. Seluruh staf Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
8. Seluruh teman-teman mahasiswa di Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari bahwa dalam pengerjaan tesis ini masih jauh dari kata kesempurnaan baik dari materi maupun cara penulisannya. Namun demikian, penulis telah berupaya dengan segala kemampuan dan pengetahuan yang dimiliki sehingga dapat menyelesaikan Tesis ini dengan baik dan oleh karenanya, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dari pembaca. Semoga Tesis ini dapat bermanfaat untuk pembaca.

Gowa, 02 Maret 2022

Nur Azhary Iriawan Eka Putra

## ABSTRAK

**NUR AZHARY IRIAWAN EKA PUTRA**, Rancang Bangun Simulator Gempa Bumi (dibimbing oleh **Rafiuddin Syam** dan **Ilyas Renreng**)

Ketika terjadi gempa bumi, maka bangunan akan bergetar disebabkan gaya inersia sehingga menghasilkan percepatan atau laju perubahan kecepatan gelombang yang menyebabkan bangunan bergerak. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun simulator gempa bumi yang dapat merepresentasikan gempa bumi dan dapat menghasilkan data aktual berupa percepatan. Simulator gempa bumi yang dibangun berbentuk meja getar (*shaking table*). *Shaking table* menggunakan aktuator hidrolik sebagai penggerak dari meja uji. Arduino Mega2560 digunakan sebagai kontroler untuk proses input dan output. Simulator gempa bumi dilengkapi dengan sensor jarak HC SR-04 untuk mengetahui jarak dari pergerakan silinder yang dikontrol. LabVIEW digunakan untuk membuat program sebagai interface untuk pengambilan data input/output secara actual. Hasil penelitian menunjukkan simulator gempa bumi telah dibuat dengan bentuk *shaking table* dan menggunakan hidrolik sebagai aktuator. *Shaking table* dapat bekerja dengan ideal dengan nilai parameter  $p$  (kc) = 0.066195 dan nilai parameter  $i$  (ki) = 2.009974. *Shaking table* dibuat menggunakan Arduino mega2560 sebagai pengatur input dan output alat. Interface pengambilan data input dan output telah dibuat dengan menggunakan labVIEW.

**Kata Kunci:** Gempa, Simulator, Arduino, *Electro-Hydraulic*

## ABSTRACT

**NUR AZHARY IRIAWAN EKA PUTRA**, Design and Build an Earthquake Simulator (supervised by **Rafiuddin Syam** and **Ilyas Renreng**)

When an earthquake occurs, the building will vibrate due to the inertial force resulting in acceleration or rate of change in the speed of the waves that cause the building to move. This study aims to design and build an earthquake simulator that can represent earthquakes and can produce actual data in the form of acceleration. The earthquake simulator was built in the form of a shaking table. The shaking table uses a hydraulic actuator to drive the testing table. Arduino Mega2560 is used as a controller for input and output processes. The earthquake simulator is equipped with an HC SR-04 proximity sensor to determine the distance from the controlled cylinder movement. LabVIEW is used to create programs as an interface for actual input/output data retrieval. The results showed that an earthquake simulator had been made in the form of a shaking table and used hydraulics as an actuator. Shaking table can work ideally with parameter value  $p$  (kc) = 0.066195 and value  $i$  (ki) = 2.009974. The shaking table is made using Arduino mega2560 as input and output controller. The input and output data retrieval interface has been created using LabVIEW. The earthquake simulator can generate real-time acceleration data which is displayed in graphical form on the LabVIEW front panel. An Earthquake simulator has been made and can work well and generate actual acceleration data.

**Keywords:** Earthquake, Simulator, Arduino, Electro-Hydraulic

## DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR .....	iv
ABSTRAK .....	vi
ABSTRACT .....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR .....	xi
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Simulator Gempa Bumi .....	5
2.2 Mikrokontroler .....	6
2.3 Aktuator.....	8
2.3.1 Komponen Sistem Hidrolik.....	9
2.3.2 Elemen Daya ( <i>Power Pack</i> ).....	10
2.3.3 Elemen Pengatur .....	10
2.4 Akselerometer.....	12
2.5 Proporsional Integral Derivatif (PID).....	13
2.5.1 Sistem Kontrol Proporsional (P) .....	14
2.5.2 Sistem Kontrol Integral (I).....	14
2.5.3 Sistem Kontrol Derivatif (D) .....	15
2.5.4 Sistem Kontrol PID .....	15
2.6 Metode Tuning PID.....	17
2.6.1 Metode <i>auto tuning</i> umpan balik relay .....	17
2.6.2 Spesifikasi Respon Sistem .....	18
BAB III METODE PENELITIAN.....	20

3.1	Waktu dan Tempat Penelitian .....	20
3.2	Alat dan Bahan Penelitian .....	21
3.3	Metode Perancangan .....	21
3.4	Diagram dan desain sistem kerja alat .....	23
3.4.1	Diagram blok sistem kerja alat.....	23
3.4.2	Desain alat Simulator Gempa Bumi.....	24
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....		29
4.1	Hasil Simulator Gempa Bumi .....	29
4.2	Tampilan kontrol Simulator Gempa Bumi .....	32
4.3	Implementasi program serta Kontrol P dan PI .....	34
4.3.1	Program dengan menggunakan kontrol P .....	34
4.3.2	Program dengan menggunakan kontrol PI.....	36
4.4	Data Sensor Percepatan Simulator Gempa Bumi .....	39
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		41
5.1	Kesimpulan.....	41
5.2	Saran .....	41
DAFTAR PUSTAKA .....		42
LAMPIRAN.....		44

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Uraian arduino Mega2560 [27].....	7
Tabel 2.2 Spesifikasi ADXL345 .....	13
Tabel 2.3 Efek perubahan nilai parameter kontroler terhadap spesifikasi respon	16
Tabel 3.1 Jadwal penelitian.....	20
Tabel 3.2 Alat dan bahan penelitian.....	21

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Arduino uno [27].....	8
Gambar 2.2 Tipikal unit aktuator .....	9
Gambar 2. 3 Katup 2/2-way valve.....	11
Gambar 2.4 Katup 3/2-way valve.....	11
Gambar 2.5 Katup 4/3-way valve.....	12
Gambar 2.6 Relief valve.....	12
Gambar 2.7 Blok Diagram Kontrol Proposional (P).....	14
Gambar 2.8 Diagram blok kontrol Integral (I).....	15
Gambar 2.9 Diagram Blok Kontrol Derivatif (D).....	15
Gambar 2.10 Diagram blok Sistem Kontrol PID.....	16
Gambar 2.11 Kurva respon step satuan menunjukkan $t_d$ , $t_r$ , $t_p$ , $M_p$ dan $t_s$ [34] ...	19
Gambar 3.1 Diagram alir metode perancangan.....	22
Gambar 3.2 Diagram blok sistem alat simulator gempa bumi.....	23
Gambar 3.3 Skema alat simulator gempa bumi ( <i>drawing by autodesk inventor</i> ). ..	25
Gambar 3.4 Komponen-komponen alat simulator gempa bumi .....	25
Gambar 3.5 Skema rangkaian hidrolik simulator gempa bumi.....	26
Gambar 3.6 Skema rangkaian elektronik Simulator gempa bumi .....	27
Gambar 3.7 Skema rancangan sistem kontrol Elektro Hidrolik .....	28
Gambar 4.1 Alat simulator gempa bumi yang telah dibuat .....	29
Gambar 4.2 Hydraulic power pack .....	30
Gambar 4.3 <i>Pressure relief valve</i> JAGUAR OSG-01-2B2.....	30
Gambar 4.4 WINNER 4/3 – way solenoid valve .....	31
Gambar 4.5 Silinder Hidrolik.....	31
Gambar 4.6 Arduino mega2560 dan driver mosfet.....	32
Gambar 4.7 Tampilan Front Panel Labview .....	33
Gambar 4.8 Tampilan Block Diagram.....	34
Gambar 4.9 Respon sistem dengan unit step = 2 .....	34
Gambar 4.10 Respon sistem dengan unit step = 3 .....	35
Gambar 4.11 Respon sistem dengan unit step = 4 .....	35

Gambar 4.12 Respon sistem dengan unit step = 5 .....	35
Gambar 4.13 Respon sistem dengan unit step = 6 .....	36
Gambar 4. 14 Respon sistem dengan unit step 2 cm.....	37
Gambar 4. 15 Respon sistem dengan unit step 3 cm.....	37
Gambar 4. 16 Respon sistem dengan unit step 4 cm.....	37
Gambar 4. 17 Respon sistem dengan unit step 5 cm.....	38
Gambar 4. 18 Respon sistem dengan unit step 6 cm.....	38
Gambar 4.19 Hasil Percobaan nilai frekuensi 25 mHz dan amplitude 10 terhadap percepatan.....	39

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Gempa bumi merupakan suatu peristiwa yang terjadi karena pergerakan dan tumbukan dari lapisan batuan pada kulit bumi atau lempeng tektonik. Tumbukan atau pergeseran tersebut menghasilkan energi yang merambat ke permukaan bumi sebagai gelombang seismik (Kaur, 2015). Gempa bumi merupakan bencana alam yang dahsyat serta meluas, menyebabkan kerusakan, menimbulkan korban jiwa, dan kerusakan ekonomi (Guo, Hu, Li, Zhai, & Shao, 2019). Selain itu, gempa bumi juga dapat memicu terjadinya bencana alam lainnya seperti, tsunami dan likuifaksi, yang memberikan dampak kerugian yang begitu besar (Anda, Purwanto, Suryani, Husnain, & Muchtar, 2021). Gempa bumi dapat disebabkan oleh beberapa faktor seperti letusan gunung berapi, pergeseran lempeng bumi, dan peledakan dinamit (Oluwafemi et al., 2018).

Ketika terjadi gempa bumi, maka bangunan akan ikut bergetar disebabkan gaya inersia yang diterima berupa gaya horizontal (lateral). Gaya tersebut menghasilkan percepatan atau laju perubahan kecepatan gelombang yang menyebabkan bangunan bergerak. Selain itu gaya ini juga dipengaruhi oleh percepatan ketika terjadi gempa, durasi gempa, periode getaran natural, redaman yang mengurangi getaran, amplifikasi tanah, kekakuan, dan induksi dari torsi (Khan, 2013). Oleh karena itu setiap bangunan harus dirancang agar dapat bertahan terhadap gempa yang dapat menyebabkan terjadinya keruntuhan sebagai salah satu bentuk antisipasi (Zhou, Shao, Cao, & Lui, 2021).

Pentingnya pengetahuan tentang karakteristik kerusakan seismik dan respon struktur bangunan berupa percepatan ketika gempa bumi diperlukan untuk meningkatkan daya tahan bangunan terhadap gempa bumi (Guo, Shao, Li, Long, & Mao, 2019), terutama pada bangunan yang rentan terjadi gempa (Damerji et al.,

2021). Beberapa pengujian eksperimen yang biasa digunakan dalam mempelajari struktur dengan beban dinamis antara lain uji kuasi statis (*quasi static test*), uji meja getar (*shaking table test*), uji dinamis semu (*pseudo dynamic tests*) (Guo, Zhai, Cui, Yu, & Wu, 2019).

Untuk menunjang hal tersebut, tentunya diperlukan alat yang dapat merepresentasikan gempa bumi untuk mengamati respon struktur terhadap gempa. Di antara pengujian tersebut, pengujian dengan simulator gempa bumi meja getar (*shaking table*) merupakan satu-satunya perangkat yang mampu mereplikasi percepatan gempa bumi untuk memberikan dampak kerusakan seismik (Guo, Zeng, et al., 2019). Simulator gempa bumi *shaking table* adalah metode eksperimental yang digunakan secara luas untuk mengevaluasi kinerja struktural dalam teknik gempa (Plummer, 2016). Selain itu, *shaking table* memiliki peranan penting untuk mengembangkan bangunan dan infrastruktur tahan gempa, sehingga meningkatkan kinerjanya dan memberikan kontribusi penting dalam menyelamatkan banyak nyawa (Yang, Li, Lin, Li, & Tung, 2015).

Beberapa penelitian tentang simulator *shaking table* yaitu Suryadi (2021) yang membuat *shaking table* dengan menggunakan aktuator pneumatik, *shaking table* tersebut dikontrol dengan menggunakan PLC dan Arduino Mega dengan input berupa gelombang sinusoidal dengan variasi frekuensi. Frekuensi tersebut mengontrol pembukaan dari katup bukaan pneumatik (Suryadi, Syamitra, Fauzan, Darath, & Agustian, 2021). Selanjutnya Damci (2018) membuat sebuah *shaking table* dengan dimensi  $500 \times 500$  mm yang menggunakan motor DC sebagai aktuator. Alat tersebut menggunakan Arduino Due sebagai pengontrol kerjanya (Damci & Şekerci, 2019). Damerji (2021) membuat *shaking table* berdimensi  $2,5 \times 3,5$  m dengan menggunakan hidrolis sebagai aktuator (Damerji et al., 2021).

Untuk menunjang penelitian tersebut, dibutuhkan alat yang dapat merepresentasikan gempa untuk mengamati respon struktur terhadap gempa. Oleh karena itu, penulis tertarik untuk melakukan penelitian tentang merancang dan membangun sebuah alat simulator *shaking table* yang dapat merepresentasikan gempa bumi.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka penulis dapat mengambil rumusan masalah yaitu:

1. Bagaimana merancang alat simulator yang dapat merepresentasikan gempa bumi.
2. Bagaimana membangun alat simulator yang dapat merepresentasikan gempa bumi
3. Bagaimana menghasilkan data percepatan secara *real-time* simulator gempa bumi

## 1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah di atas, tujuan dari penelitian ini yaitu:

1. Merancang sebuah alat simulator yang dapat merepresentasikan gempa bumi.
2. Membangun sebuah alat simulator yang dapat merepresentasikan gempa bumi.
3. Menghasilkan data percepatan secara *real-time* dari simulator gempa bumi

## 1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Simulator gempa bumi dibuat dalam skala laboratorium dengan ukuran meja uji  $1,25\text{ m} \times 1,25\text{ m}$ .
- b. Jenis alat yang dibuat adalah simulasi
- c. Pembuatan program dilakukan dengan menggunakan *software* Labview
- d. Pengambilan data dilakukan pada satu arah lateral dengan percepatan konstan
- e. Batas maksimum silinder bergerak maju dan mundur adalah 15 cm, dari posisi awal (*initiating position* 0 cm) bergerak maju 15 cm, dan mundur dari posisi awal sejauh 15 cm

- f. Penggunaan jenis material dan perhitungan pembebanan material tidak dipertimbangkan
- g. Perhitungan percepatan dan skala richter tidak dibahas

### **1.5 Manfaat Penelitian**

Dari hasil penelitian ini diharapkan memiliki beberapa manfaat baik bagi peneliti maupun masyarakat luas diantaranya:

- a. Sebagai Alat peraga/praktik dalam melakukan simulasi gempa terhadap bangunan.
- b. Diharapkan mampu menjadi referensi dari penelitian simulator gempa bumi selanjutnya.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Simulator Gempa Bumi

Telah dijelaskan sebelumnya bahwa ketika terjadi gempa bumi, maka bangunan akan ikut bergetar disebabkan gaya inersia yang diterima berupa gaya horizontal (lateral). Gaya tersebut menghasilkan percepatan atau laju perubahan kecepatan gelombang yang menyebabkan bangunan bergerak. Beberapa karakteristik gempa antara lain intensitas, durasi gempa, periode getaran, dan percepatan tanah (Khan, 2013). Untuk mempelajari karakteristik kerusakan seismic tersebut, beberapa teknologi pengujian telah dikembangkan antara lain, uji kuasistatik, uji kuasidinamik, dan uji meja goyang. Pengujian kuasistatik dan pengujian kuasidinamik tidak dapat mencerminkan efek dari percepatan dan kecepatan gempa, sedangkan pengujian meja goyang (*shaking table*) merupakan pengujian yang dianggap paling efektif dalam merepresentasikan kerusakan seismik (Guo, Shao, et al., 2019).

Simulator gempa bumi adalah metode eksperimental yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja struktural dalam teknik gempa. Simulator gempa bumi digerakkan oleh aktuator untuk mereplikasi/membuat percepatan yang serupa dengan gempa bumi (Yang et al., 2015). Sistem kerja simulator gempa bumi adalah benda uji diletakkan di atas meja dan dipasang dengan pengikat. Kemudian benda uji akan mengalami proses pengguncangan pada nilai frekuensi tertentu hingga batas waktu tertentu yang telah ditetapkan oleh operator (bin Ngadimon, 2006). Secara umum, sistem *shaking table* terdiri dari komponen mekanis (misalnya platform), aktuator hidrolik, dan elektronik (pengontrol dan sensor) (Ryu & Reinhorn, 2017).

Peralatan *shaking table* pertama yang diketahui digerakkan oleh tenaga manual dibuat di Jepang pada tahun 1890. Mereka menghasilkan gerakan osilasi

pada benda uji menggunakan batang yang dipasang secara eksentrik ke roda yang digerakkan dengan tangan, gerakan tersebut direkam oleh pena pada drum yang berputar (Severn, 2011). Konsep *shaking table* saat ini muncul di pertengahan tahun 60an berkat perkembangan aktuator hidrolik yang disertai dengan sistem kendali. beberapa penelitian gempa yang menggunakan hidrolik sebagai aktuator antara lain Nakata (2010) melakukan penelitian dengan menggunakan aktuator hidrolik dengan dimensi  $1 \times 1$  m (Nakata, 2010), Trombetti (2002) menggunakan *shaking table* dengan aktuator hidrolik dengan dimensi  $1,5 \times 1,5$  m pada universitas rice (Trombetti & Conte, 2002), serta Damerji (2021) dengan dimensi *shaking table*  $2,5 \times 2,5$  (Damerji et al., 2021).

Simulator gempa bumi dikelompokkan berdasarkan daya aktuatornya, rentang frekuensi dan beban maksimum yang dapat ditanganinya. Biasanya diklasifikasikan dalam skala kecil, skala menengah atau beban skala besar. Simulator gempa bumi beban skala kecil mulai dari beban 0 hingga 1000 kg sedangkan untuk skala menengah berkisar antara 1000 hingga 5000 kg, dan rentang skala besar lebih besar dari beban 5000 kg (bin Ngadimon, 2006).

## 2.2 Mikrokontroler

Mikrokontroler merupakan integrasi mikroprosesor dengan memori, memiliki antarmuka input/output, dan periferal lain seperti timer, dalam satu chip. Selain itu mikrokontroler berfungsi melakukan pembacaan data, proses kalkulasi sederhana, dan juga mengatur operasi mesin dengan program tetap yang tersimpan pada memori dan tidak berubah. Pada umumnya mikrokontroler memiliki pin untuk koneksi eksternal input dan output, daya, waktu, dan juga sinyal kontrol. Pin untuk input dan output dikelompokkan dalam unit yang disebut port input/output. Port tersebut dapat berupa input, output, atau berupa program input dan output (Bolton, 2015). Ada tiga kriteria utama dalam memilih mikrokontroler:

- Kebutuhan komputasi pekerjaan pada sisi efisiensi dan efektifitas harga
- Ketersediaan pengembangan *tool* perangkat lunak dan perangkat keras

- Ketersediaan sumber mikrokontroler secara luas dan terjangkau (Syahrul, 2014).

Pada penelitian ini, mikrokontroler yang digunakan untuk mengontrol alat simulator gempa bumi adalah Arduino. E. Damci dan Sekerci melakukan penelitian mengenai pengembangan simulator gempa dengan satu arah gerakan menggunakan arduino karena memiliki banyak pin *input* dan *output* sehingga dalam pengembangannya menjadi lebih efisien. Selain itu mikrokontroler arduino merupakan sebuah piranti yang serbaguna dan juga lebih hemat biaya (Damcı & Şekerci, 2019).

Arduino merupakan sebuah platform elektronik open-source yang memiliki perangkat keras dan perangkat lunak yang dapat digunakan dengan mudah. Papan Arduino dapat digunakan untuk membaca data input, mengaktifkan sensor, mengatur output seperti mengaktifkan motor dan menyalakan lampu. Jenis-jenis Arduino diantaranya Arduino Uno, Arduino Mega 2560, Arduino Fio, Lilypad dan lainnya (“Arduino-Home,” n.d.).

Arduino menggunakan bahasa C sebagai programnya. Format dasar program tersebut terdiri dari dua fungsi, setup dan loop. Fungsi setup dijalankan pada awal program dan digunakan untuk mengkonfigurasi pin, dan untuk mendeklarasikan variabel, konstanta, dll. Fungsi loop dijalankan langkah-demi langkah dan, ketika mencapai akhir loop, secara otomatis kembali ke Langkah pertama dari fungsi loop dan terus mengulang loop sampai program dihentikan. Papan Arduino telah dilengkapi dengan loader USB sehingga sangat memudahkan ketika melakukan program pada arduino. Adapun kebanyakan papan mikrokontroler lainnya masih memerlukan rangkaian loader untuk menginput program ke mikrokontroler (Bolton, 2015). Berikut merupakan deskripsi dan gambar dari Arduino Mega2560 yang akan digunakan dalam pembuatan alat simulator gempa bumi.

Tabel 2.1 Uraian arduino Mega2560 (“Arduino-Home,” n.d.)

<b>Uraian</b>	<b>Keterangan</b>
Mikrokontroler	ATmega2560
Tegangan Operasi	5V

Uraian	Keterangan
Input Tegangan (dianjurkan)	7-12V
Input Tegangan (batas)	6-20V
Digital I/O Pin	54 (15 output pwm)
Pin Masukan Analog	16
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC untuk 3,3 Volt Pin	50 mA
Flash Memory	256 kb (8 kb untuk bootloader)
SRAM	8 kb
EEPROM	4 kb
Kecepatan Jam	16 MHz
Panjang	101.52 mm
Lebar	53.3 mm
Berat	37 g

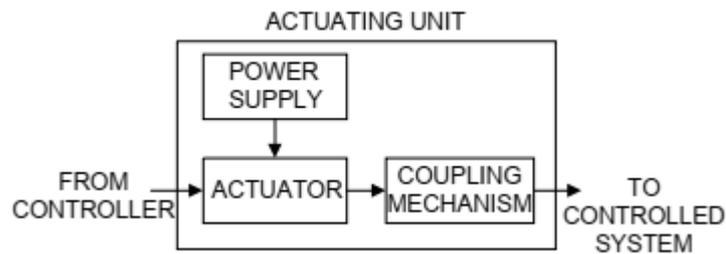


Gambar 2.1 Arduino uno (“Arduino-Home,” n.d.)

### 2.3 Aktuator

Aktuator merupakan sistem mekatronik yang menerima instruksi kontrol (dalam bentuk sinyal listrik) dan menghasilkan perubahan dalam bentuk sistem fisik seperti gaya, gerak, panas, aliran, dan lain-lain. Aktuator biasanya dihubungkan dengan catu daya serta mekanisme kopling seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.4. Daya yang digunakan dapat berupa tegangan AC atau DC.

Mekanisme kopling bertindak sebagai penghubung antara aktuator dan sistem fisik. Mekanisme tipikal termasuk *rack*, *belt drive*, *lead screw and nut*, *gear drive*, *linkages*, dan piston (Bishop, 2002). Pada penelitian ini aktuator yang digunakan berupa penggerak hidrolik.



Gambar 2.2 Tipikal unit aktuator

Aktuator hidrolik dapat berupa motor putar (*rotary motor*), piston/silinder linier, ataupun katup kontrol. Aktuator hidrolik menggunakan oli bertekanan yang tidak dapat dimampatkan serta dapat menghasilkan kekuatan yang sangat besar dengan biaya yang lebih hemat. Kerugian dengan aktuator hidrolik adalah hidrolik lebih kompleks dan membutuhkan lebih banyak perawatan (Bishop, 2002).

Fungsi aktuator dalam sistem kontrol hidrolik adalah mengubah energi hidrolik yang disuplai oleh pompa dan diproses oleh elemen kontrol menjadi kerja yang digunakan. Aktuator hidrolik yang paling umum digunakan adalah silinder atau dongkrak. Silinder diantaranya berupa silinder kerja tunggal atau silinder kerja ganda. Silinder kerja tunggal digerakkan dengan daya dalam satu arah saja, sedangkan silinder kerja ganda digerakkan dengan daya pada dua arah (Walters, 2000). Untuk memenuhi keperluan kekuatan yang besar, maka digunakan Aktuator hidrolik untuk menggerakkan simulator gempa bumi. Pada penelitian nakata, 2010 (Nakata, 2010) digunakan servo hidrolik sebagai aktuator simulator gempa bumi.

### 2.3.1 Komponen Sistem Hidrolik

Komponen utama sistem hidrolik sebagai berikut:

- a. Elemen Daya atau *Power Pack*.
- b. *Filter* (Saringan)
- c. *Hidrolik Distributor* atau saluran pembagi

- d. Selang (*Hose*)
- e. Unit Pengatur (*Control Elements*).
- f. Elemen Penggerak (*Actuators*).

### **2.3.2 Elemen Daya (*Power Pack*)**

Fungsi dari elemen tenaga atau *power pack* adalah mengubah daya poros yang berputar menjadi daya fluida yang dapat ditransmisikan secara terkontrol ke seluruh komponen sistem hidrolis (Manring & Fales, 2020). Unit tenaga terdiri atas:

- a. Motor listrik atau motor bakar sebagai penggerak awal (*prime mover*). Motor listrik atau motor bakar menghasilkan energi mekanik dalam bentuk putaran poros, yaitu dengan mengubah tenaga listrik atau energi panas menjadi tenaga mekanik.
- b. Pompa hidrolis digunakan untuk mengalirkan fluida menuju sistem. Poros pompa disambungkan (dikopel) dengan poros motor (penggerak awal), Ketika motor sebagai penggerak awal berputar, maka pompa hidrolis juga ikut berputar. Putaran pompa akan mengakibatkan terjadinya penghisapan fluida dari tangki dan menekan fluida ke saluran tekan.
- c. Tangki hidrolis sebagai penampung atau wadah cairan hidrolis/fluida.
- d. Saringan (*Filter*) digunakan sebagai penyaring kotoran yang berasal dari komponen sistem hidrolis seperti bagian-bagian kecil yang telah mengelupas, oksidasi dan sebagainya.

### **2.3.3 Elemen Pengatur**

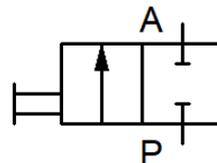
Elemen pengatur atau biasa disebut katup pengatur (*pressure control valve*) merupakan bagian komponen dalam rangkaian hidrolis yang berfungsi mengatur daya hidrolis yang dikirim ke aktuator. Perannya adalah untuk mengaktifkan, mematikan aliran fluida atau mengalihkannya sesuai dengan kebutuhan, sehingga memungkinkan dalam menyesuaikan tekanan dan laju aliran fluida. Unit ini biasanya digunakan dalam sistem kontrol hidraulik untuk melakukan kontrol yang akurat ke seluruh sistem. Selain itu, elemen tersebut juga mengatur atau

mengendalikan kerja output dari sistem hidraulik sehingga kecepatan, pergerakan, urutan untuk bergerak, arah gerakan dan kekuatannya dapat dikendalikan secara otomatis. Kontrol hidraulik menerima umpan balik dari operator atau sumber kontrol otomatis lalu menyesuaikan dengan output sistem yang sesuai (Manring & Fales, 2020). Elemen pengatur ini berbentuk katup (*valve*), dan berdasarkan fungsinya dapat dibagi menjadi 3 (tiga) yaitu:

a. *Directional control valve*

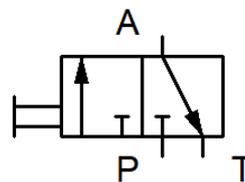
Katup ini berfungsi untuk mengatur arah jalan dari fluida, mendorong aktuator, atau sebagai pengatur/mengarahkan gerak dari aktuator. Katup ini terdiri dari beberapa tipe, diantaranya yaitu:

- 1) Katup 2/2 (*2/2-way valve*) di mana pada katup ini mempunyai dua *port* (saluran/lubang), dan juga memiliki dua posisi yaitu posisi *off* sebelum dioperasikan dan setelah dioperasikan menjadi posisi *on*.



Gambar 2. 3 Katup 2/2-way valve

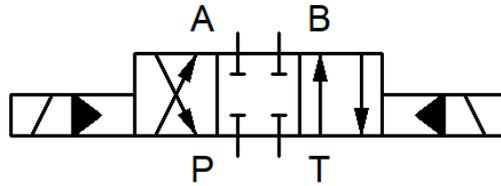
- 2) Katup 3/2 (*3/2-way valve*), katup ini terdiri dari tiga port (saluran/lubang), dan memiliki dua posisi yaitu posisi netral ketika belum diaktifkan dan posisi *on* ketika dioperasikan.



Gambar 2.4 Katup 3/2-way valve

- 3) Katup 4/3 (*4/3-way valve*). Saluran-saluran atau lubang (*port*) pada katub 4/3 yaitu:
  - P merupakan saluran yang berfungsi sebagai tempat masuk fluida dari pompa menuju katup
  - A dan B yaitu saluran yang menghubungkan katup ke dan dari aktuator.

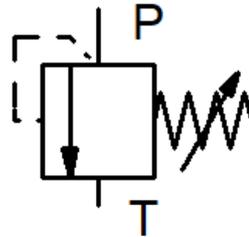
- T merupakan saluran buang yang berfungsi menghubungkan antara katup dan tangki. Posisi netral pada katup 4/3 adalah pada posisi tengah.



Gambar 2.5 Katup 4/3-way valve

b. *Pressure regulator*

Biasa disebut sebagai katup pengatur tekanan. Katup ini memiliki fungsi sebagai pengatur tekanan fluida pada sistem. Katup pengatur tekanan membatasi tekanan dan sebagai pengaman bagi seluruh sistem. Fluida berlebih akan menuju *pressure regulator* melalui saluran P dan mendorong katup (popet) yang ditahan oleh pegas sehingga melepaskan aliran berlebih yang tidak digunakan oleh sistem melalui saluran T menuju tangki (reservoir).



Gambar 2.6 Relief valve

## 2.4 Akselerometer

Akselerometer digunakan untuk mengukur percepatan yang dihasilkan dari pergerakan objek terhadap gaya luar, termasuk gravitasi. Akselerometer harus responsif terhadap berbagai bentuk percepatan - dari konstan hingga bergerak lambat hingga dampak dan getaran yang kuat (Fraden, 2016).

ADXL345 merupakan piranti yang kecil, tipis, daya rendah, akselerometer 3 aksis dengan resolusi tinggi (13-bit) yang dapat mengukur hingga  $\pm 16$  g. Data keluaran digital dalam format 16-bit dengan dua akses, yaitu dapat diakses melalui SPI atau berupa I2C. Selain itu mode daya rendah memungkinkan sensor dapat mengukur percepatan pada daya yang rendah (“ADXL345-Analog

Devices,” n.d.). Penelitian ini menggunakan ADXL345 sebagai pengukur percepatan dari simulator gempa bumi. Tabel 2.2 menunjukkan spesifikasi dari sensor akselerometer ADXL345.

Tabel 2.2 Spesifikasi ADXL345

<b><i>Output Resolution</i></b>	<b><i>Each Axis</i></b>
<i>All g Ranges</i>	<i>10-bit resolution</i>
<i>± 2 g Range</i>	<i>Full resolution</i>
<i>± 4 g Range</i>	<i>Full resolution</i>
<i>± 8 g Range</i>	<i>Full resolution</i>
<i>± 16 g Range</i>	<i>Full resolution</i>
<b><i>Sensitivity</i></b>	<b><i>Each Axis</i></b>
<i>Sensitivity at X<sub>OUT</sub>, Y<sub>OUT</sub>, Z<sub>OUT</sub></i>	<i>All g-ranges, full resolution</i> <i>± 2 g, 10-bit resolution</i> <i>± 4 g, 10-bit resolution</i> <i>± 8 g, 10-bit resolution</i> <i>± 16 g, 10-bit resolution</i>
<i>Sensitivity Deviation from Ideal</i> <i>Scale factor at X<sub>OUT</sub>, Y<sub>OUT</sub>, Z<sub>OUT</sub></i>	<i>All g-ranges</i> <i>All g-ranges, full resolution</i> <i>± 2 g, 10-bit resolution</i> <i>± 4 g, 10-bit resolution</i> <i>± 8 g, 10-bit resolution</i> <i>± 16 g, 10-bit resolution</i>

## 2.5 Proporsional Integral Derivatif (PID)

Merupakan sistem kontrol yang telah lama digunakan pada bidang industri. Selain karena struktur sistem kontrolnya yang sederhana karena hanya terdiri dari tiga parameter utama untuk diatur dan mudah dipahami oleh operator, kontrol PID juga telah terbukti menghasilkan kerja yang relatif memuaskan. Kontrol PID memiliki jangkauan yang luas dalam bidang industri dan masih digunakan sampai saat ini (Setiawan, 2008).

Kontrol PID adalah gabungan dari tiga sistem kontrol yaitu kontrol proporsional, integral, dan derivatif. Jenis kendali tersebut memiliki kelebihan dan kekurangannya. Oleh karena itu pada pengaplikasian dari kendali tersebut dapat dimodifikasi, seperti kontrol PI, PD, atau PID sesuai dengan keperluan yang memenuhi sistem kontroler (Ogata, 2010).

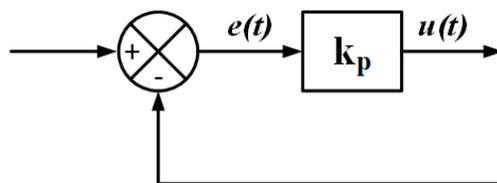
### 2.5.1 Sistem Kontrol Proporsional (P)

Kontrol proporsional memiliki dampak langsung yang sebanding dengan *error*. Semakin besar nilai *error*, maka semakin besar nilai sinyal kontrol yang diberikan oleh kontroler. Adapun pengaruh dari kontroler proporsional yaitu menambah atau mengurangi kestabilan, memperbaiki respon transien berupa *rise time* dan *settling time*, mengurangi (tidak menghilangkan) *error steady state*,  $E_{ss}$ .  $E_{ss}$  dapat dihilangkan dengan  $K_p$  yang besar, tetapi mengakibatkan sistem menjadi tidak stabil.

Hubungan antara keluaran kontroler  $u(t)$  dan *error* sebagai masukan  $e(t)$  yaitu:

$$u(t) = k_p e(t) \quad (2.1)$$

Dengan  $k_p$  sebagai konstanta proporsional. Adapun diagram kotak kontroler proporsional, diperlihatkan pada gambar 2.10.



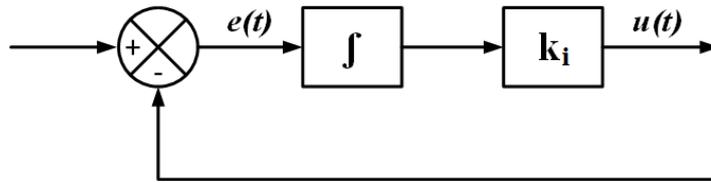
Gambar 2.7 Blok Diagram Kontrol Proporsional (P)

### 2.5.2 Sistem Kontrol Integral (I)

Pada dasarnya kontrol integral memiliki pengaruh untuk menghilangkan *steady-state error* dari suatu sistem yang tidak dapat dilakukan oleh kontrol *proportional*. Persamaan dari kontrol integral yaitu:

$$u(t) = k_i \int_0^t e(t) \quad (2.2)$$

Dengan  $k_i$  adalah konstanta Integral. Diagram blok kontrol integral ditunjukkan pada gambar 2.10:



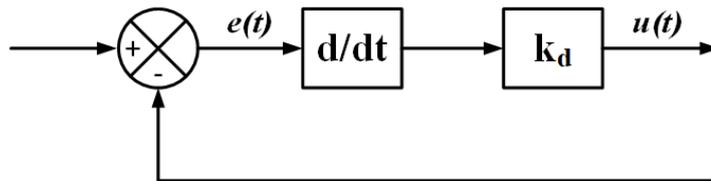
Gambar 2.8 Diagram blok kontrol Integral (I)

### 2.5.3 Sistem Kontrol Derivatif (D)

Pada dasarnya, kontrol derivatif berfungsi memperbaiki stabilitas serta mempercepat output dari respon proses. Kontrol derivatif hanya berubah ketika terjadi perubahan *error*, sehingga pada penggunaannya kontroler derivatif tidak digunakan sendiri. Persamaan kontrol derivatif yaitu:

$$u(t) = k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.3)$$

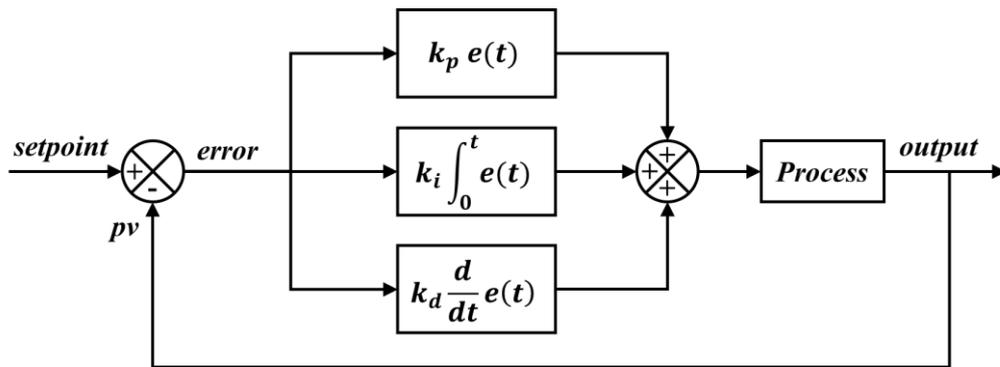
Dengan  $k_d$  adalah konstanta derivatif. Diagram blok kontrol derivatif ditunjukkan pada gambar 2.12:



Gambar 2.9 Diagram Blok Kontrol Derivatif (D)

### 2.5.4 Sistem Kontrol PID

Dalam pembahasan sebelumnya, kontrol P, I, dan D mempunyai kelebihan dan kekurangannya masing-masing. Dengan mengkombinasikan kontroler-kontroler tersebut dapat menutupi kekurangan dari masing-masing kontroler. Diagram blok dari sistem kontrol PID diperlihatkan pada gambar 2.13.



Gambar 2.10 Diagram blok Sistem Kontrol PID

Untuk mengatur nilai  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$ , agar respon sistem sesuai atau mendekati yang diinginkan, maka beberapa hal berikut bisa dijadikan sebagai salah satu acuan (Hartanto & Prasetyo, 2004).

- Kontroler P ( $K_p$ ), memberikan pengaruh mengurangi *rise time*, tetapi tidak menghilangkan  $E_{ss}$ ,
- Kontroler I ( $K_i$ ) memberi efek menghilangkan  $E_{ss}$ , tetapi mengakibatkan respon transien menjadi buruk
- Kontroler D ( $K_d$ ) a meningkatnya stabilitas sistem, mengurangi overshoot, dan menaikkan respon transient.

Pengaruh dari parameter-parameter tersebut ditunjukkan pada tabel 2.3.

Tabel 2.3 Efek perubahan nilai parameter kontroler terhadap spesifikasi respon

<b><i>Parameter Kontrol</i></b>	<b><i>Rise Time</i></b>	<b><i>Overshoot</i></b>	<b><i>Settling Time</i></b>	<b><i>Steady-State Error</i></b>
$K_p$	Menurun	Meningkat	Perubahan Kecil	Menurun
$K_i$	Menurun	Meningkat	Meningkat	Mengeliminasi
$K_d$	Perubahan kecil	Menurun	Menurun	Perubahan kecil

Bentuk persamaan kontrol PID pada gambar 2.13 disebut sebagai PID ideal bentuk *independent*. Selain itu, PID juga memiliki bentuk lain yang disebut dengan PID ideal bentuk *dependent*. Kedua istilah tersebut memiliki perbedaan dalam hal perubahan nilai  $k_p$  terhadap setiap parameter kontrol. Pada bentuk *independent*, perubahan nilai  $k_p$  hanya mempengaruhi nilai proporsional, sedangkan pada bentuk *dependent* nilai  $k_p$  tidak hanya mempengaruhi nilai

proporsional, tetapi juga nilai dari integral dan derivatif. Perumusan PID bentuk ideal *dependent* ditunjukkan sebagai berikut:

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.4)$$

Dengan:

- $u(t)$  = output kontroler
- $K_p$  = Konstanta proporsional
- $e(t)$  = sinyal eror
- $T_i$  = Waktu integral
- $T_d$  = Waktu derivatif

## 2.6 Metode Tuning PID

Dalam proses tuning (pengaturan) parameter PID, terdapat beberapa metode yang bisa digunakan, diantaranya metode Metode *auto tuning* umpan balik relay.

### 2.6.1 Metode *auto tuning* umpan balik relay

*Auto tuning* umpan balik relay atau disebut *auto tuning* metode respon frekuensi atau metode siklus terbatas (*limit cycle*). Prinsip kerjanya berdasarkan pada informasi perioda dan juga besar magnituda osilasi output proses terjadi pada titik kerjanya ketika melakukan proses kontrol dengan metode umpan balik relay (Setiawan, 2008).

Output kontrol dari metode umpan balik relay hanya memiliki dua kondisi, yaitu kondisi maksimum dan minimum. Secara praktis, penggunaan kontrol relay bertujuan agar variabel proses yang dikontrol dapat secepatnya mencapai level operasi yang diharapkan dengan menginduksikan sinyal kontrol maksimum atau minimum yang dipengaruhi dari selisih antara set point dengan variabel terkontrol. Pada dasarnya, metode ini hanya mempunyai dua kondisi yaitu jika nilai eror adalah negatif dalam hal ini SP lebih kecil dari PV maka output relay yang dihasilkan bernilai negatif (-). Sebaliknya jika nilai eror adalah positif SP lebih besar dari PV maka output relay akan bernilai positif (+).

Langkah berikut yang dilakukan setelah memperoleh parameter PID dengan melakukan *fine tuning*. Caranya yaitu dengan menaikkan atau menurunkan parameter PID yang didapatkan agar dapat memperbaiki respon sistem yang sesuai dan memenuhi kriteria desain sistem kontrol yang diinginkan. Proses *Fine tuning* tidak dilakukan begitu saja dengan menaikkan atau menurunkan parameter, tetapi bersumber pada pengetahuan dari efek pengaruh parameter  $k_p$ ,  $k_i$  dan  $k_d$ , seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.3

### 2.6.2 Spesifikasi Respon Sistem

Ketika sistem diberikan input baru, maka sistem tersebut akan mengalami keadaan transisi (*transient state*) sebelum sistem mencapai keadaan setimbang yang baru. Pada saat sistem mengalami transisi, sistem dalam keadaan yang perlu diwaspadai, karena sistem akan mudah jatu dalam keadaan yang tidak stabil. Oleh karena itu, kondisi transisi memerlukan perhatian serius dari pengamat dan perancang sistem kontrol. Dengan mengamati keadaan tersebut, dapat diketahui dua hal, yaitu:

- Karakteristik sistem diketahui sebagai kinerja sistem.
- Dapat merancang kontroler yang sesuai berdasarkan keadaan peralihan tersebut, jika kriteria-kriteria dinyatakan dengan jelas.

Beberapa spesifikasi respon/tanggapan *transient* yang perlu diperhatikan berdasarkan unit step satuan, adalah:

- Waktu tunda (*delay time*),  $t_d$   
Merupakan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai setengah nilai akhir pada waktu yang pertama.
- Waktu naik (*rise time*),  $t_r$   
Waktu naik adalah waktu yang diperlukan oleh respon untuk naik dari 10% sampai 90%, 5% sampai 95% atau 0% sampai 100% dari nilai akhir yang biasa digunakan. Untuk sistem atas redaman waktu naik yang biasa digunakan adalah 10% sampai 90%.
- Waktu puncak (*peak time*),  $t_p$

Waktu puncak adalah waktu yang dibutuhkan tanggapan untuk mencapai puncak pertama *overshoot*.

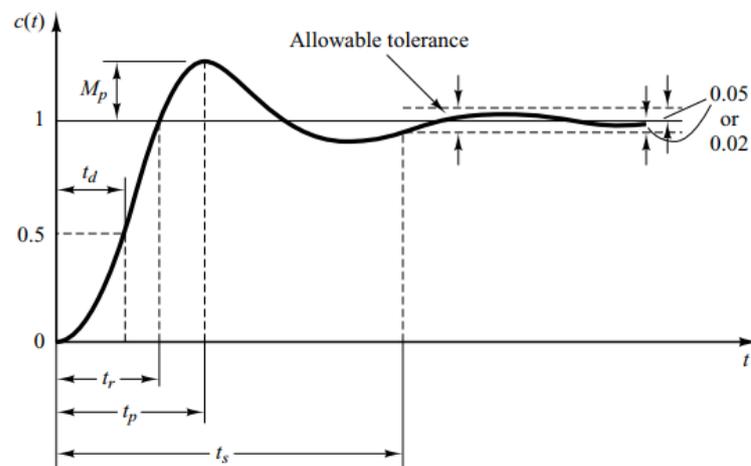
- *Overshoot*

*Overshoot* maksimum merupakan nilai puncak kurva tanggapan.

- Waktu turun (*settling time*),  $t_s$

Waktu turun adalah waktu yang diperlukan untuk merespon kurva untuk mencapai dan tetap berada dalam nilai akhir yang diinginkan dengan persentase nilai absolut dari nilai akhir (biasanya 2% atau 5%).

Spesifikasi daerah waktu penting karena sebagian besar sistem kontrol adalah sistem daerah waktu, yaitu, dapat menerima respons waktu. Ini berarti bahwa sistem kontrol harus dimodifikasi sampai respon transien terpenuhi. Gambar 2.13 menunjukkan kurva respon langkah yang dapat menunjukkan beberapa spesifikasi dari respon transien.



Gambar 2.11 Kurva respon step satuan menunjukkan  $t_d$ ,  $t_r$ ,  $t_p$ ,  $M_p$  dan  $t_s$  (Ogata, 2010)