

**DESIGN KONTROLER PI DIGITAL BERBASIS KRITERIA  
INTEGRAL ERROR KUADRATIK PADA SISTEM KONTROL  
KECEPATAN MOTOR DC**

**SKRIPSI  
TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK KONTROL**

**Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik**



**DAVIN WIRAWAN SAPUTRA  
NIM. 105060300111048**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
MALANG  
2017**



**LEMBAR PENGESAHAN**  
**DESIGN KONTROLER PI DIGITAL BERBASIS KRITERIA**  
**INTEGRAL ERROR KUADRATIK PADA SISTEM KONTROL**  
**KECEPATAN MOTOR DC**

**SKRIPSI**  
**TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK KONTROL**

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan  
 memperoleh gelar Sarjana Teknik



**DAVIN WIRAWAN SAPUTRA**  
**NIM. 105060300111048**

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing  
 Pada tanggal 1 Februari 2017

**Dosen Pembimbing I**

**Dosen Pembimbing II**

**Dipl. Ing. Ir. Moch. Rusli**  
**NIP. 19630104 198701 1 001**

**M. Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph.D**  
**NIP. 19741203 200012 1 001**

Mengetahui,

**Ketua Jurusan Teknik Elektro**

**M. Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph.D**  
**NIP. 19741203 200012 1 001**



## JUDUL SKRIPSI:

DESIGN KONTROLER PI DIGITAL BERBASIS KRITERIA INTEGRAL ERROR  
KUADRATIK PADA SISTEM KONTROL KECEPATAN MOTOR DC

Nama Mahasiswa : Davin Wirawan Saputra

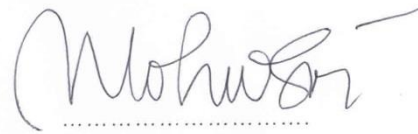
NIM : 105060300111048

Program Studi : Teknik Elektro

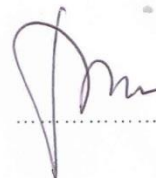
Konsentrasi : Teknik Kontrol

## KOMISI PEMBIMBING :

Ketua : Dipl.-Ing. Ir. Moch. Rusli



Anggota : M. Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph.D.



## TIM DOSEN PENGUJI :

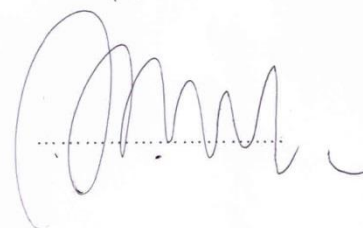
Dosen Penguji 1 : Ir. Purwanto, M.T.



Dosen Penguji 2 : Dr. Ir. Erni Yudaningtyas, M.T.



Dosen Penguji 3 : Dr. Ir. Bambang Siswojo, M.T.



Tanggal Ujian : 27 Januari 2017

SK Penguji : No. 170/UN10.F07/SK/2017



**PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI**

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 1 Februari 2017

**Mahasiswa,**



**DAVIN WIRAWAN SAPUTRA**

**NIM. 105060300111048**



## RINGKASAN

**Davin Wirawan Saputra**, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Februari 2017, Design Kontroler PI Digital Berbasis Kriteria Integral Error Kuadratik Pada Sistem Kontrol Kecepatan Motor DC, Dosen Pembimbing : Moch. Rusli dan M. Aziz Muslim.

Salah satu permasalahan dalam sistem kontrol adalah pencapaian spesifikasi performansi. Performansi yang dimaksud yaitu tentang kestabilan dan kecepatan respon. Hal ini dapat dicapai dengan mengoptimalkan parameter-parameter kontroler. Pada penelitian ini digunakan *Integral of the Square Error (ISE)* untuk menghitung parameter-parameter dari proporsional integral (PI) kontroler. Selain itu proses diskritisasi fungsi alih kontroler pada penerapannya juga perlu diperhatikan karena itu penelitian ini juga akan membandingkan tiga metode diskritisasi. Ketiga metode yang dimaksud adalah *Zero Order Hold (ZOH) Equivalence*, *Pole-Zero Mapping*, *Bilinear Transformation*.

Berdasarkan perhitungan dan simulasi Matlab yang telah dilakukan dengan metode *Integral of the Square Error (ISE)* maka didapatkan nilai  $K_p = 2,5$  dengan  $K_i = 82,5$ . Parameter tersebut selanjutnya diterapkan pada program untuk menguji respon aktual dari perangkat keras yang telah dibuat. Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan terhadap tiga metode diskritisasi diketahui metode *Bilinear Transformation* lebih baik daripada dua metode yang lain dengan nilai  $T_d = 0,06$  s,  $T_r = 0,08$  s,  $T_p = 0,13$  s,  $M_p = 6,6\%$ ,  $T_s = 0,192$  s, *error steady state* = 2,35%.

**Kata Kunci** — diskritisasi, *Integral of the Square Error*, kontroler, optimasi.

## SUMMARY

**Davin Wirawan Saputra**, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, Februari 2017, *Digital PI Controller Design Criteria of Integral Square Error-Based on DC Motor Speed Control System*, Supervisor : Moch. Rusli and M. Aziz Muslim.

One of problematic in control system is specification of performance attainment. What means by performance is about stability and response quickness. This can be attained by optimizing parameters controller. In this research Integral of the Square Error (ISE) was used to calculate parameters from proportional-integral (PI) controller. Besides that transfer function discretization controller need to payed attention on the application therefore this research will comparing those three discretization methods. Those three methods are Zero Order Hold (ZOH) Equivalence, Pole-Zero Mapping, and Bilinear Transformation.

Based on Matlab calculation and simulation which already done on Integral of the Square Error (ISE) method, can be valued as  $K_p = 2,5$  with  $K_i = 82,5$ . Furthermore, this parameter applied on a program to test the actual response from handmade hardware. Based on the test of those three discretization methods before, the Bilinear Transformation method is better than two other methods with value  $T_d = 0,06$  s;  $T_r = 0,08$  s;  $T_p = 0,13$ ;  $M_p = 6,6\%$ ;  $T_s = 0,192$ s; error steady state = 2,35%.

Keywords — discretization, Integral of the Square Error, controller, optimization.

## PENGANTAR

*Bismillahirrohmanirrohim.*

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Design Kontroler PI Digital Berbasis Kriteria Integral Error Kuadratik Pada Sistem Kontrol Kecepatan Motor DC”. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

Penulis menyadari bahwa penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan, bimbingan, serta dorongan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa terima kasih kepada:

- Allah SWT yang selalu tahu kapan waktu yang terbaik untuk hambaNya dan Rasulullah Muhammad SAW, semoga shalawat serta salam selalu tercurah kepada beliau.
- Kedua orang tua tercinta, Bapak Sukanto dan Ibu Endang Sripeni yang senantiasa mendoakan, memberikan nasihat, dorongan, dan kesabaran selama ini. Serta adik Duta Manuarva Wahyu Saputra yang senantiasa memberikan dukungan.
- Bapak M. Aziz Muslim, ST., MT, Ph.D sebagai Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya sekaligus Dosen Pembimbing II atas memberikan banyak waktu, ilmu, saran, dan kesabaran dalam membimbing.
- Bapak Hadi Suyono, ST., MT., Ph.D. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
- Bapak Ali Mustofa, ST., MT. selaku Ketua Program Studi S1 Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
- Bapak Ir. Mochammad Rusli, Dipl. Ing. sebagai Dosen Pembimbing I yang telah banyak memberikan waktu, ilmu, saran, dan kesabaran dalam membimbing.
- Bapak Ibu Dosen, karyawan, staf recording dan RBTE atas segala bantuan dan kemudahan.
- Joko Purnomo, terima kasih atas bantuan dan waktunya untuk menyelesaikan skripsi ini.
- Fildzah Hanifati, terima kasih atas doa, dukungan, bantuan, dan motivasinya dalam menyelesaikan skripsi ini.

- Ario, Atika, Ayu, Azis, Christopher, Dayat, Enov, Hizba, Rara, Resi, Zara, dan teman-teman angkatan 2010 “MAGNET” atas semangat dan dukungan yang diberikan kepada penulis.
- Fahmi, Randu, Rizwan, Alfons, Ino, Fetty, Ira, Wiwik, Zora, Alvin, Andra, Yara, Adi, Galih, dan teman-teman penulis yang tidak dapat disebutkan satu per satu, terima kasih atas motivasi dan dukungannya yang diberikan kepada penulis.

Dalam penyusunan skripsi ini, penulis menyadari bahwa skripsi ini belumah sempurna, karena keterbatasan ilmu dan kendala-kendala lain yang terjadi selama pengerjaan skripsi. Oleh karena itu, penulis mengharap kritik dan saran untuk penyempurnaan tulisan di masa yang akan datang. Penulis berharap, semoga tulisan ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Malang, Februari 2017

Penulis

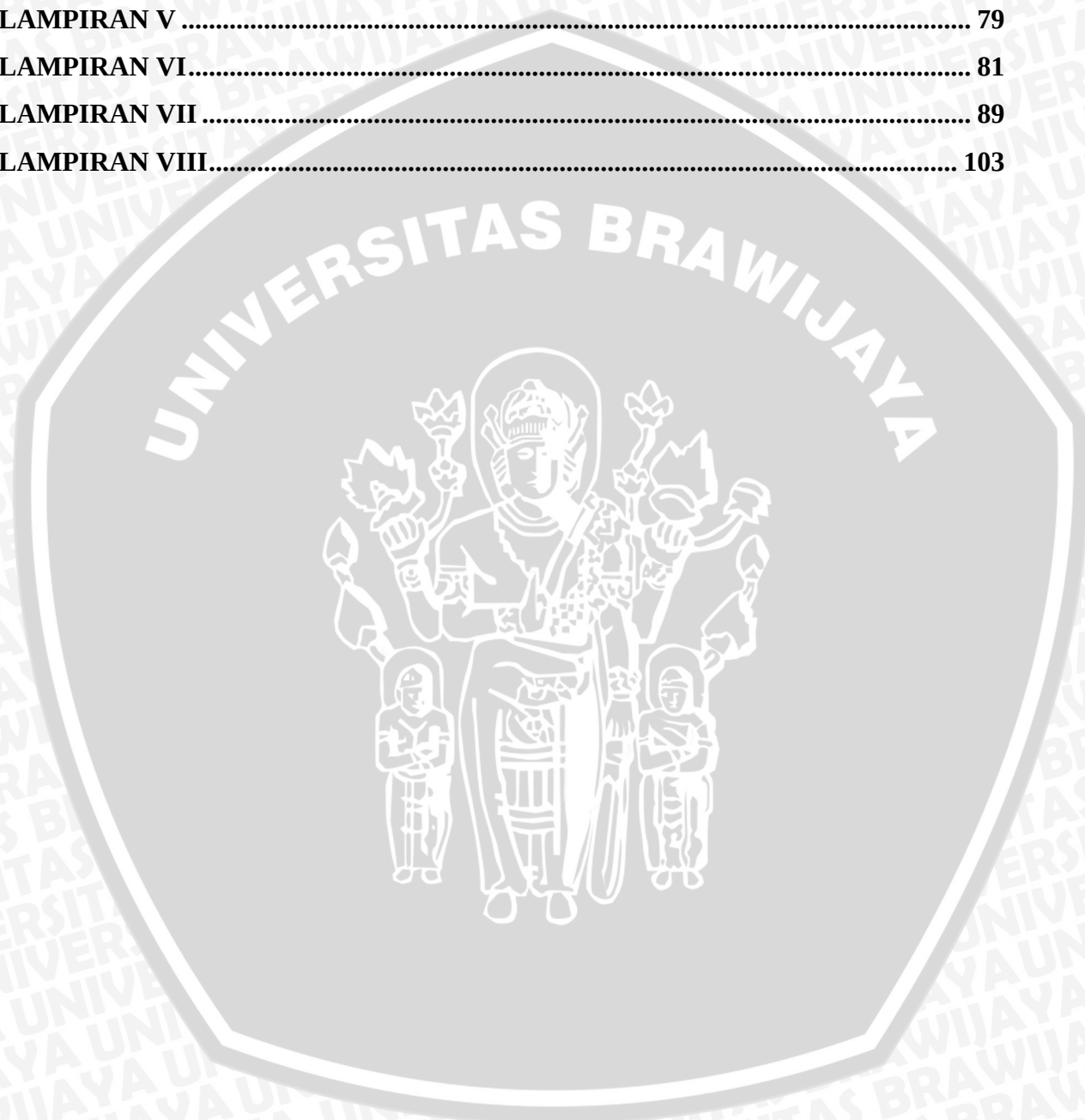


## DAFTAR ISI

|                                                                      |            |
|----------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>PENGANTAR.....</b>                                                | <b>i</b>   |
| <b>DAFTAR ISI .....</b>                                              | <b>iii</b> |
| <b>DAFTAR TABEL .....</b>                                            | <b>vii</b> |
| <b>DAFTAR GAMBAR .....</b>                                           | <b>ix</b>  |
| <b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>                                       | <b>1</b>   |
| 1.1. Latar Belakang .....                                            | 1          |
| 1.2. Rumusan Masalah .....                                           | 2          |
| 1.3. Batasan Masalah.....                                            | 2          |
| 1.4. Tujuan Penelitian.....                                          | 2          |
| 1.5. Sistematika Penulisan.....                                      | 3          |
| <b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>                                 | <b>5</b>   |
| 2.1. Sistem Kontrol.....                                             | 5          |
| 2.1.1. Kontrol Digital .....                                         | 6          |
| 2.1.1.1. <i>Zero Order Hold (ZOH) Equivalence</i> .....              | 6          |
| 2.1.1.2. <i>Pole-Zero Mapping</i> .....                              | 7          |
| 2.1.1.3. <i>Bilinear Transformation</i> .....                        | 8          |
| 2.1.2. Kontrol Optimal .....                                         | 8          |
| 2.1.3. Optimasi Parameter Pengendali dengan Indeks Performansi ..... | 9          |
| 2.2. Kontroler .....                                                 | 11         |
| 2.2.1. Kontroler Proporsional (P).....                               | 12         |
| 2.2.2. Kontroler Integral (I).....                                   | 13         |
| 2.2.3. Kontroler Proporsional Integral (PI) .....                    | 13         |
| 2.3. Motor DC .....                                                  | 14         |
| 2.3.1. Prinsip Kerja Motor DC .....                                  | 15         |
| 2.3.2. Fungsi Alih Motor DC .....                                    | 16         |
| 2.4. Arduino Uno.....                                                | 18         |
| 2.4.1. Catu Daya.....                                                | 19         |
| 2.4.2. Memory .....                                                  | 19         |
| 2.4.3. Input dan Output .....                                        | 19         |
| 2.4.4. Komunikasi .....                                              | 20         |
| 2.5. Output Sistem Orde Satu .....                                   | 21         |
| 2.5.1. Output Unit Step Pada Sistem Orde Satu .....                  | 21         |

|                                                                         |           |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.6. Output Sistem Orde Dua .....                                       | 22        |
| 2.6.1. Keadaan Kurang Teredam ( <i>Underdamped</i> ) .....              | 23        |
| 2.6.2. Teredam Kritis ( <i>Critically Damped</i> ) .....                | 25        |
| 2.6.3. Terlalu Teredam ( <i>Overdamped</i> ) .....                      | 25        |
| 2.7. Tahapan Peralihan .....                                            | 25        |
| 2.8. Driver Motor L298N .....                                           | 27        |
| 2.9. Rotary Encoder .....                                               | 27        |
| <b>BAB III METODE PENELITIAN .....</b>                                  | <b>29</b> |
| 3.1. Perancangan Blok Diagram Sistem .....                              | 29        |
| 3.2. Spesifikasi Desain .....                                           | 30        |
| 3.3. Identifikasi Motor DC .....                                        | 30        |
| 3.3.1. Penentuan Parameter Motor DC .....                               | 30        |
| 3.3.2. Penentuan Fungsi Alih Motor DC .....                             | 31        |
| 3.4. Perancangan Algoritma .....                                        | 32        |
| 3.4.1. Perancangan Kontroler Proporsional Integral .....                | 32        |
| 3.4.2. <i>Zero Order Hold (ZOH) Equivalence</i> .....                   | 36        |
| 3.4.3. <i>Pole-Zero Mapping</i> .....                                   | 37        |
| 3.4.4. <i>Bilinear Transformation</i> .....                             | 37        |
| 3.5. Pembuatan Perangkat Keras .....                                    | 38        |
| 3.6. Flowchart Program .....                                            | 39        |
| <b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>                                | <b>43</b> |
| 4.1. Pengujian Arduino .....                                            | 43        |
| 4.2. Pengujian Karakteristik Driver Motor .....                         | 48        |
| 4.3. Pengujian Karakteristik Motor DC .....                             | 50        |
| 4.4. Pengujian Kontroler Proporsional Integral Menggunakan Matlab ..... | 52        |
| 4.5. Pengujian Open Loop Sistem .....                                   | 53        |
| 4.6. Pengujian Sistem Zero Order Hold (ZOH) Equivalence .....           | 54        |
| 4.7. Pengujian Sistem Pole-Zero Mapping .....                           | 54        |
| 4.8. Pengujian Sistem Bilinear Transformation .....                     | 55        |
| 4.9. Rekapitulasi Analisis Respon Pengujian Sistem .....                | 56        |
| 4.10. Pengujian Kinerja Sistem Terhadap Beban dan Gangguan .....        | 57        |
| <b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>                                 | <b>59</b> |
| 5.1. Kesimpulan .....                                                   | 59        |
| 5.2. Saran .....                                                        | 59        |

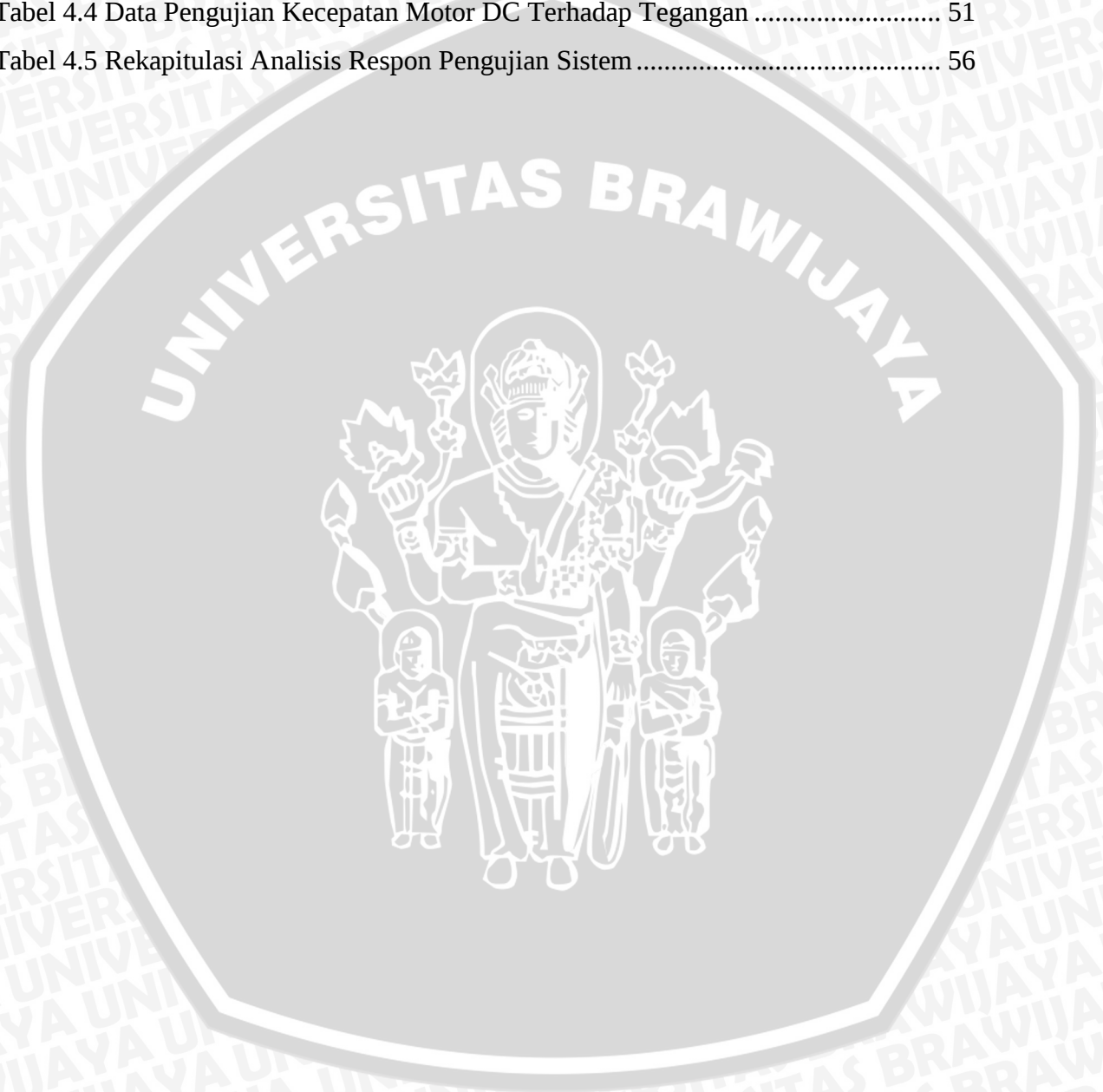
|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| <b>DAFTAR PUSTAKA .....</b> | <b>61</b>  |
| <b>LAMPIRAN I.....</b>      | <b>63</b>  |
| <b>LAMPIRAN II .....</b>    | <b>65</b>  |
| <b>LAMPIRAN III .....</b>   | <b>69</b>  |
| <b>LAMPIRAN IV .....</b>    | <b>73</b>  |
| <b>LAMPIRAN V .....</b>     | <b>79</b>  |
| <b>LAMPIRAN VI.....</b>     | <b>81</b>  |
| <b>LAMPIRAN VII .....</b>   | <b>89</b>  |
| <b>LAMPIRAN VIII.....</b>   | <b>103</b> |





## DAFTAR TABEL

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| Tabel 2.1 Indeks Performansi <i>Error</i> Kuadratik.....            | 11 |
| Tabel 4.1 Hasil Pengujian <i>PIN</i> 6 <i>output</i> PWM .....      | 45 |
| Tabel 4.2 Hasil Pengujian <i>PIN</i> 2 .....                        | 47 |
| Tabel 4.3 Data Pengujian <i>Driver</i> Motor.....                   | 49 |
| Tabel 4.4 Data Pengujian Kecepatan Motor DC Terhadap Tegangan ..... | 51 |
| Tabel 4.5 Rekapitulasi Analisis Respon Pengujian Sistem .....       | 56 |





## DAFTAR GAMBAR

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 2.1 Diagram Blok Sistem Kontrol .....                                          | 5  |
| Gambar 2.2 <i>Zero Order Hold (ZOH) Equivalence</i> dari $H(s)$ .....                 | 6  |
| Gambar 2.3 Sistem Jaring Tertutup Sederhana .....                                     | 9  |
| Gambar 2.4 Diagram Blok Kontroler Proporsional .....                                  | 12 |
| Gambar 2.5 Diagram Blok Kontroler Integral .....                                      | 13 |
| Gambar 2.6 Diagram Blok Kontroler Proporsional Integral (PI) .....                    | 14 |
| Gambar 2.7 Motor DC Magnet Permanen RF 130-CH .....                                   | 15 |
| Gambar 2.8 Rangkaian Ekvivalen Motor DC Magnet Permanen .....                         | 16 |
| Gambar 2.9 Diagram Blok Fungsi Alih Motor DC .....                                    | 16 |
| Gambar 2.10 Arduino .....                                                             | 18 |
| Gambar 2.11 Sistem Orde Satu .....                                                    | 21 |
| Gambar 2.12 <i>Output Unit Step</i> Sistem Orde Satu .....                            | 22 |
| Gambar 2.13 Sistem Orde Dua .....                                                     | 22 |
| Gambar 2.14 <i>Output Unit Step</i> Sistem Orde Dua .....                             | 27 |
| Gambar 2.15 <i>Driver Motor L298N</i> .....                                           | 27 |
| Gambar 2.16 <i>Rotary Encoder</i> .....                                               | 28 |
| Gambar 3.1 Diagram Blok Sistem <i>Loop</i> Tertutup .....                             | 29 |
| Gambar 3.2 Respon Fungsi Alih Motor DC .....                                          | 32 |
| Gambar 3.3 Sistem Jaring Tertutup Kontroler PI .....                                  | 33 |
| Gambar 3.4 Skema Perangkat Keras .....                                                | 39 |
| Gambar 3.5 <i>Flowchart</i> Program .....                                             | 40 |
| Gambar 4.1 Prosedur Pengujian Arduino .....                                           | 44 |
| Gambar 4.2 Grafik Pengujian PIN 6 <i>Output PWM</i> .....                             | 46 |
| Gambar 4.3 Grafik Perbandingan Tegangan <i>Output Driver</i> - PWM Arduino .....      | 50 |
| Gambar 4.4 Grafik Perubahan Kecepatan Motor DC Terhadap Tegangan .....                | 52 |
| Gambar 4.5 Diagram Blok Pengujian Kontroler PI .....                                  | 52 |
| Gambar 4.6 Respon Sistem Kontroler PI .....                                           | 53 |
| Gambar 4.7 Respon Pengujian <i>Open Loop</i> Sistem .....                             | 53 |
| Gambar 4.8 Respon Pengujian Sistem dengan <i>Zero Order Hold (ZOH) Equivalence</i> .. | 54 |
| Gambar 4.9 Respon Pengujian Sistem dengan <i>Pole-Zero Mapping</i> .....              | 55 |
| Gambar 4.10 Respon Pengujian Sistem dengan <i>Bilinear Transformation</i> .....       | 55 |
| Gambar 4.11 Respon Pengujian Sistem Dengan Beban dan Tegangan .....                   | 57 |



## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Sistem kontrol telah memegang peranan yang sangat penting dalam kehidupan sehari-hari. Sistem kontrol yang semakin berkembang dapat meningkatkan kinerja sistem, kualitas produksi dan menekan biaya produksi. Keberadaan kontroler dalam sebuah sistem kontrol mempunyai kontribusi yang besar terhadap perilaku sistem. Pada prinsipnya hal itu disebabkan oleh tidak dapat diubahnya komponen penyusun sistem tersebut. Artinya, karakteristik *plant* harus diterima sebagaimana adanya, sehingga perubahan perilaku sistem hanya dapat dilakukan melalui penambahan suatu sub sistem, yaitu kontroler. Masalah umum dalam sistem kontrol adalah pencapaian spesifikasi performansi yang berkaitan dengan kestabilan dan kecepatan respon sehingga akan menghasilkan sistem kontrol optimal. Hal lain yang juga perlu diperhatikan adalah bagaimana spesifikasi tersebut dapat dicapai (Asnil dan Irma Husnaini, 2010).

Beberapa tahun terakhir ini, telah banyak usaha yang dilakukan untuk pengembangan metode kontroler terutama di dunia industri yang disebut metode kontrol modern. Modern dan teori kontrol otomatis konvensional sudah lama berkembang sejak pertengahan abad 19. Metode Tempat Kedudukan Akar, Nyquist, diagram Bode dan sebagainya adalah beberapa metode yang menggunakan kawasan frekuensi sebagai domain pembahasan yang telah memberikan sumbangan berarti, khususnya untuk sistem sederhana. Semua metode diatas digunakan untuk sistem linier dan tidak berubah waktu (misalnya sistem kontrol PID), akan tetapi jika sistem tidak linier atau linier tetapi berubah waktu dan sistem dengan multi input-multi output maka kriteria kestabilan sedemikian tidak berlaku (Ogata, K, 1997).

Langkah mendasar dan penting pada desain sebuah sistem kontrol jaringan tertutup adalah penentuan parameter kontroler. Terdapat tiga elemen dasar pembangun kontroler: kontroler proporsional (P), integral (I), dan derivative (D). Bentuk kontroler yang paling sederhana adalah kontroler proporsional. Tujuan sederhana perhitungan parameter kontroler adalah sinyal aktual sistem mencapai ke nilai sinyal tujuan (reference) secepat mungkin. Hal ini paling sederhana ditandai dengan sinyal *error* (perbandingan antara sinyal acuan dengan sinyal aktual) mencapai kondisi *steady state*

secepat mungkin. Selain itu magnitude dari perjalanan sinyal error adalah sekecil mungkin.

Cara yang paling sederhana untuk mencapai keadaan *steady state* secepat mungkin adalah dengan memperbesar parameter kontroler proporsional dan untuk mengurangi nilai *error* dengan cara memperbesar parameter kontroler integral. Namun kedua cara itu akan dapat mengakibatkan ketidakstabilan sistem dan mengurangi nilai redaman sistem ( $\zeta$ ). Tujuan desain kontrol untuk memperoleh redaman sebesar mungkin dan *error* sistem sekecil mungkin tidak dapat dicapai secara bersama-sama. Oleh karena itu, diperlukan konsep kompromi atau pengambilan “jalan tengah” dari kedua tujuan itu. “Jalan tengah” itu dikenal sebagai optimasi.

### 1.2. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana memperoleh parameter  $K_p$  dan  $K_i$  tertentu dengan menggunakan metode optimasi *Integral of the Square Error (ISE)*.
2. Bagaimana membandingkan hasil respon dari 3 metode diskritisasi, yaitu: *Zero Order Hold (ZOH) Equivalence, Pole-Zero Mapping, Bilinear Transformation*.

### 1.3. Batasan Masalah

Dalam perancangan skripsi ini permasalahan dibatasi oleh hal-hal sebagai berikut:

1. Kriteria performansi yang digunakan adalah metode optimasi *Integral of the Square Error (ISE)*.
2. Metode diskrit yang digunakan adalah *Zero Order Hold (ZOH) Equivalence, Pole-Zero Mapping, Bilinear Transformation*.
3. Kontroler yang digunakan adalah Kontroler Proporsional Integral (PI).
4. Motor DC yang digunakan adalah motor DC RF-130CH dengan *operating range* 2-6V, arus 0,036 A.
5. Kinerja *driver* dan elektronika tidak dibahas secara mendalam.

### 1.4. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan parameter kontroler proporsional integral (PI) dengan menggunakan metode optimasi *Integral of the Square Error (ISE)* dan membandingkan hasil respon pengujian antara metode *Zero Order Hold (ZOH) Equivalence, Pole-Zero Mapping, Bilinear Transformation*.

### 1.5. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam skripsi ini sebagai berikut:

#### **BAB I Pendahuluan**

Bab ini memuat latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, dan sistematika penulisan.

#### **BAB II Tinjauan Pustaka**

Bab ini berisi penjelasan mengenai dasar-dasar teori sistem kontrol yang mendukung atau dibutuhkan dalam pengerjaan tugas akhir.

#### **BAB III Metode Penelitian**

Bab ini berisi penjelasan metode yang digunakan dan membahas perancangan blok diagram sistem, spesifikasi desain, karakteristik alat, perancangan persamaan beda, dan pembuatan perangkat keras.

#### **BAB IV Hasil dan Pembahasan**

Bab ini memuat aspek pengujian meliputi penjelasan tentang cara pengujian dan hasil pengujian. Aspek analisis meliputi penilaian terhadap hasil-hasil pengujian. Pengujian dan analisis ini terhadap alat yang telah direalisasikan berdasarkan masing-masing blok dan sistem secara keseluruhan.

#### **BAB V Kesimpulan dan Saran**

Menjelaskan tentang pengambilan kesimpulan sesuai dengan hasil perealisasi dan pengujian alat sesuai dengan tujuan dan rumusan masalah, serta pemberian saran untuk pengembangan.



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Sistem Kontrol

Sistem kontrol adalah proses pengendalian terhadap satu atau beberapa besaran (variabel atau parameter) sehingga berada pada suatu harga atau *range* tertentu. Contoh variabel atau parameter fisik, adalah: tekanan (*pressure*), aliran (*flow*), suhu (*temperature*), ketinggian (*level*), kepadatan (*viscosity*), kecepatan (*velocity*), dan lain-lain. Sistem kontrol juga merupakan sebuah sistem dimana komponen-komponennya dihubungkan sedemikian rupa sehingga membentuk sebuah konfigurasi sistem. Sistem kontrol tersebut mengatur sistemnya sendiri atau sistem yang lain sehingga didapatkan tanggapan sistem yang diinginkan.

Ada beberapa definisi yang harus dimengerti untuk memahami sistem kontrol secara keseluruhan, yaitu: sistem, proses, kontrol. Definisi dari beberapa istilah tersebut adalah sebagai berikut:

**Sistem:** Kombinasi dari beberapa komponen yang bekerja bersama-sama melakukan sesuatu untuk sasaran tertentu.

**Proses:** Perubahan yang berurutan dan berlangsung secara kontinyu dan tetap menuju keadaan akhir tertentu.

**Kontrol:** Suatu kerja untuk mengawasi, mengendalikan, mengatur, dan menguasai sesuatu.

Dasar dalam menganalisis dan mendesain sistem kontrol adalah dengan menggunakan teori sistem linier. *Plant* atau proses yang akan dikontrol dapat direpresentasikan oleh hubungan sebab akibat, hal tersebut dapat dilihat dalam Gambar 2.1. *Input* merupakan sesuatu yang diinginkan dalam sistem kontrol, sedangkan *output* merupakan sesuatu yang terjadi atau merupakan tanggapan sistem.



Gambar 2.1 Diagram Blok Sistem Kontrol

### 2.1.1. Kontrol Digital

Kontrol digital adalah susunan peralatan yang dirancang untuk mengolah besaran fisik yang diwakili dalam besaran digital, yaitu dengan nilai-nilai diskrit. Peralatan itu pada saat ini umumnya merupakan peralatan elektronika. Di dalam sistem kontrol digital, sebagai pengendali (*controller*) dipergunakan komputer, mikroprosesor, mikrokontroler ataupun rangkaian logika lainnya untuk mengolah dinamika sistem.

Berdasarkan bentuk sinyal yang bekerja pada sistem digital, maka sinyal masukan umumnya berupa sinyal analog, sedangkan sinyal yang diproses oleh pengendali adalah sinyal digital, dan sinyal keluaran umumnya juga berupa sinyal analog. Dari perbedaan sinyal yang bekerja, maka pada sistem digital diperlukan komponen yang berfungsi untuk melakukan konversi bentuk sinyal, konverter tersebut dikenal dengan nama ADC (*Analog to Digital Converter*) dan DAC (*Digital to Analog Converter*).

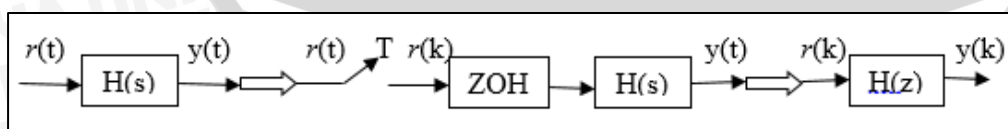
Dalam pengujian ini akan digunakan 3 metode diskritisasi, yaitu:

1. *Zero Order Hold (ZOH) Equivalence*
2. *Pole-Zero Mapping*
3. *Bilinear Transformation*

#### 2.1.1.1. Zero Order Hold (ZOH) Equivalence

*Zero Order Hold (ZOH) Equivalence* adalah sebuah model matematika dari rekonstruksi sinyal praktis yang dilakukan oleh konverter DAC (*Digital to Analog Converter*). Dengan kata lain, *Zero Order Hold (ZOH) Equivalence* akan menampilkan efek dari konversi sinyal waktu diskrit menjadi sinyal waktu kontinu yang masing-masing terdapat nilai sampel untuk satu interval sampel.

Untuk teknik ini, diasumsikan situasi seperti yang digambarkan pada Gambar 2.2. Filosofinya adalah merancang sebuah sistem, dengan input yang terdiri dari sampel  $r(t)$ , memiliki output yang mendekati output  $H(s)$  yang inputnya merupakan fungsi waktu-kontinu  $r(t)$ .



Gambar 2.2 Zero Order Hold (ZOH) Equivalence dari  $H(s)$   
Sumber: Gopal, M. (1988)

Diketahui rumus Zero Order Hold (ZOH) Equivalence adalah,

$$H(z) = \mathcal{L} \left[ \frac{1 - e^{-sT}}{s} H(s) \right]$$

$$H(z) = (1 - z^{-1}) \mathcal{L} \left[ \frac{H(s)}{s} \right] \quad (2.1)$$

Dimana nilai  $H(s)$  adalah,

$$H(s) = \frac{Kps + Ki}{s} \quad (2.2)$$

Sehingga,

$$H(z) = (1 - z^{-1}) \mathcal{L} \left[ \frac{Kps + Ki}{s^2} \right] \quad (2.3)$$

### 2.1.1.2. Pole-Zero Mapping

*Pole-Zero Mapping* adalah sebuah metode untuk mengkonversi sinyal waktu kontinyu menjadi sinyal waktu diskrit. Metode ini sangat sederhana namun efektif untuk memperoleh ekuivalen domain- $z$  pada sebuah fungsi transfer domain- $s$ . Metode ini menggunakan hubungan

$$Z = e^{sT} \quad (2.4)$$

yang metodenya terdiri dari serangkaian aturan heuristik sebagai berikut:

1. Sebuah *pole*  $H(s)$  dipetakan sebagai  $z = e^{sT}$ ; jika  $H(s)$  memiliki *pole* pada  $s = -a$ , maka  $H(z)$  memiliki *pole* pada  $z = e^{-aT}$ .
2. Semua *zero*  $H(s)$  yang terbatas dipetakan sebagai  $z = e^{sT}$ ; jika  $H(s)$  memiliki *zero* pada  $s = -b$ , maka  $H(z)$  memiliki *zero* pada  $z = e^{-bT}$ .
3. Semua *zero*  $H(s)$  pada  $s = \infty$  dipetakan hingga titik  $Z = -1$  dalam  $H(z)$ .
4. Jika keterlambatan unit pada respon unit-*pulse* kompensator digital diinginkan untuk berbagai alasan seperti; waktu perhitungan diperlukan untuk memproses setiap sampel, satu *zero*  $H(s)$  pada  $s = \infty$  dipetakan ke  $z = \infty$ .  $H(z)$  yang tersisa dari jumlah *zero* kurang satu dari jumlah *pole*.
5. Perolehan  $H(z)$  pada  $z = 1$  dipilih untuk menyesuaikan perolehan  $H(s)$  pada  $s = 0$ . Metode ini dapat digunakan apabila:

$$H(s) \Big|_{s=0} = H(z) \Big|_{z=1}$$

Dapat diingat bahwa metode transformasi- $z$  ( $H(z) = \mathcal{L} [H(s)]$ ) mengubah *pole*  $H(s)$  ke tempat yang sama dengan metode *pole-zero Mapping*, namun metode ini tidak

menempatkan *zero*  $H(s)$  pada tempat yang sama dengan pada metode *pole-zero Mapping*.

### 2.1.1.3. Bilinear Transformation

*Bilinear Transformation* digunakan dalam teori kontrol pemrosesan sinyal digital dan waktu diskrit untuk mengubah sistem waktu kontinyu menjadi waktu diskrit, dan begitu pula sebaliknya. Konsep dasar yang digunakan adalah mempresentasikan  $H(s)$  yang diberikan sebagai persamaan diferensial dan menurunkan persamaan diferensial yang penyelesaiannya merupakan sebuah pendekatan dengan persamaan diferensial.

Diketahui nilai  $H(s)$  adalah,

$$H(z) = \frac{Kps + Ki}{s} \quad (2.5)$$

Pendekatan trapesium untuk integrasi setara dengan memperoleh fungsi transfer pulsa  $H(z)$  dari  $H(s)$  yang diberikan dengan mensubstitusi dari pendekatan berikut untuk variabel frekuensi:

$$s = \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1} \quad (2.6)$$

Sehingga didapatkan,

$$H(z) = \frac{Kp \left( \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1} \right) + Ki}{\left( \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1} \right)} \quad (2.7)$$

### 2.1.2. Kontrol Optimal

Sistem kontrol optimal adalah konsep optimasi sistem kontrol yang memperhitungkan pemilihan indeks atau kriteria performansi serta desain yang akan menghasilkan sebuah sistem kontrol optimal dalam batas-batas kendala fisik. Indeks performansi didefinisikan sebagai suatu fungsi yang harganya menunjukkan seberapa baik performansi sistem yang sebenarnya mendekati performansi yang diinginkan. Secara garis besar teori kontrol optimal adalah suatu teori kontrol yang pencarian solusinya didasarkan pada usaha untuk meminimumkan atau memaksimalkan suatu fungsi indeks kinerja.

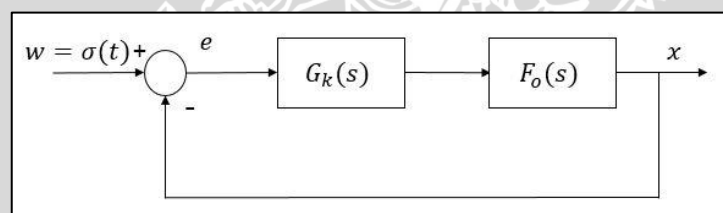
Bentuk umum persamaan tujuan dalam kontrol optimal ditunjukkan oleh persamaan 2.8.

$$I = \int f(t, e(t)) dt \quad (2.8)$$

### 2.1.3. Optimasi Parameter Pengendali dengan Indeks Performansi

Optimasi parameter kontrol adalah cara perhitungan untuk mendapatkan nilai parameter pengendali sebuah sistem kontrol dengan menggunakan kaidah optimasi. Perhitungannya didasarkan pada penetapan maksimum atau minimum dari suatu indeks performansi. Indeks performansi harus dipilih pada langkah awalnya. Indeks performansi adalah suatu persamaan matematik yang dapat menggambarkan kualitas performansi dari sebuah sistem kontrol.

Penetapan indeks performansi didasarkan suatu persamaan yang dapat menggambarkan baik atau buruknya suatu performansi sistem kontrol. Sebuah sistem kontrol dimungkinkan memiliki *plant* sangat beragam. Oleh karena itu sangatlah sulit untuk memperoleh suatu indeks performansi yang dapat digunakan secara umum pada semua kasus dalam sistem kontrol. Akhirnya dikembangkan suatu indeks performansi yang dimungkinkan dapat dilakukan pada semua kasus dalam sistem kontrol, yaitu kuadrat luasan fungsi *error* (kuadrat luasan *error*).



Gambar 2.3 Sistem Jaring Tertutup Sederhana  
Sumber: Rusli, M. (2015)

Dimisalkan bahwa sistem tersebut adalah stabil dan mengandung unsur integral di dalamnya, sehingga *error* dari sistem akan menuju nol. Misalnya juga kalau masukan dari sistem kita berikan sinyal langkah (*step*), maka  $e(t)$  – *error system* akan segera menuju nilai nol dalam selang waktu tertentu. Salah performansi yang baik adalah kalau nilai  $e(t)$  menurun dengan sangat cepat. Agar mengetahui bahwa sinyal *error* berlangsung sangat cepat, maka yang dapat dilakukan adalah dengan melakukan integral nilai *error* dengan batasan waktu dari 0 sampai tak berhingga menggunakan rumus kuadratik luasan *error* sebagai berikut:

$$J = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (2.9)$$

Sebuah fungsi *error* harus mengandung parameter-parameter pengendali. Sehingga kalau nilai parameter-parameter berubah, maka berubah pula nilai  $J$  dari persamaan 2.9. Oleh karena itu, persamaan  $J$  itu dapat dituliskan ke dalam  $J(r_1, \dots, r_q)$ , dengan  $r_1 \dots r_q$  merupakan parameter-parameter pengendali. Jadi proses optimasi parameter pengendali dengan menggunakan indeks performansi adalah menghitung persamaan:

$$J(r_1 \dots r_q) = \text{Minimum} \quad (2.10)$$

Fungsi integral harus terdiri dari parameter *controller* dan parameter *plant*. Persamaan integral di kawasan waktu yang ditunjukkan oleh persamaan (2.10) akan lebih mudah kalau ditransformasikan ke dalam persamaan di kawasan bidang frekuensi kompleks. Karena dengan menggunakan kawasan kompleks maka, pemisahan *pole* dan *zero* dari persamaan itu akan jauh lebih mudah dibandingkan kalau menggunakan kawasan waktu. Transformasi persamaan dari kawasan waktu ke kawasan frekuensi kompleks dapat dilakukan dengan menggunakan teori parseval berikut:

$$J = \int_0^\infty e^2(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |E(j\omega)|^2 d\omega \quad (2.11)$$

Persamaan 2.10 akan dapat digunakan hanya jika  $\int_0^\infty e^2(t) dt < +\infty$ . Syarat ini akan terpenuhi hanya jika sistem pengendalian yang dioptimalkan adalah stabil. Agar persamaan 2.10 dapat mudah dihitung, persamaan itu dapat dimodifikasi dengan menggunakan pemecahan variabel kompleks kuadrat yaitu bilangan kompleks  $|z|^2 = z\bar{z}$  dengan  $\bar{z}$  merupakan kompleks konjugasi dari bilangan  $z$ . Konjugasi dari variabel kompleks  $E(j\omega)$  adalah  $E(-j\omega)$ . Sehingga persamaan (2.11) dapat ditulis ke dalam persamaan yang mengandung bilangan kompleks konjugasi berikut:

$$J = \int_{-\infty}^\infty E(j\omega)E(-j\omega)d\omega \quad (2.12)$$

Persamaan *error system* pengendalian dapat dituliskan dalam persamaan pecahan berikut:

$$E(s) = \frac{1}{1 + Fk(s)} W(s) \quad (2.13)$$

Apabila sistem jaringan tertutup itu dikenai oleh sinyal masukan unit *step* pada masukannya, maka persamaan *error* yang ditunjukkan oleh persamaan (2.13) adalah sebagai berikut:

$$E(s) = \frac{1}{1 + Fk(s)} \frac{1}{s} \quad (2.14)$$

Variabel  $s$  pada persamaan 2.14 diganti dengan variabel kompleks sehingga menjadi:

$$E(j\omega) = \frac{1}{1 + Fk(j\omega)} \frac{1}{(j\omega)} \quad (2.15)$$

Karena fungsi  $F_K(s)$  merupakan pecahan *polynomial*, maka fungsi error yang ditunjukkan oleh persamaan 2.15 dapat memiliki *polynomial* pembilang dan *polynomial* penyebut yang dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan berikut:

$$E(j\omega) = \frac{c(j\omega)}{d(j\omega)} = \frac{c_0 + c_1(j\omega) + \dots + c_{n-1}(j\omega)^{n-1}}{d_0 + d_1(j\omega) + \dots + d_{n-1}(j\omega)^{n-1}}; d_n \neq 0 \quad (2.16)$$

Untuk perhitungan indeks performansi *error* kuadratik pada sistem kontrol optimal dapat langsung dilakukan dengan menggunakan Tabel 2.1. Hanya saja pada tabel ini hanya menampilkan persamaan *polynomial* sampai tingkat 4.

Tabel 2.1 Indeks Performansi *Error* Kuadratik

| No. | Orde | Indeks Performansi <i>Error</i> Kuadratik                                                                                                                                    |
|-----|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.  | 1    | $J_1 = \frac{c_0^2}{2d_0d_1}$                                                                                                                                                |
| 2.  | 2    | $J_2 = \frac{c_1^2d_0 + c_0^2d_2}{2d_0d_1d_2}$                                                                                                                               |
| 3.  | 3    | $J_3 = \frac{c_2^2d_0d_1 + (c_1^2 - 2c_0c_2)d_0d_3 + c_0^2d_2d_3}{2d_0d_3(d_1d_2 - d_0d_3)}$                                                                                 |
| 4.  | 4    | $J_4 = \frac{c_2^2(d_0d_1d_2 - d_0^2d_3) + (c_2^2 - 2c_1c_3)d_0d_1d_4 + (c_1^2 - 2c_0c_2)d_0d_3d_4 + c_0^2(d_2d_3d_4 - d_1d_4^2)}{2d_0d_4(d_1d_2d_3 - d_0d_3^2 - d_1^2d_4)}$ |

## 2.2. Kontroler

Sistem pengontrolan dirancang untuk melakukan dan menyelesaikan tugas tertentu. Syarat utama sistem pengendalian adalah harus stabil. Di samping kestabilan mutlak, maka sistem harus memiliki kestabilan secara relatif, yakni tolak ukur kualitas kestabilan sistem dengan menganalisis sampai sejauh mana batas-batas kestabilan sistem tersebut jika dikenai gangguan (Ogata, K., 1997). Selain itu analisis juga dilakukan untuk mengetahui bagaimana kecepatan sistem dalam merespons *input*, dan bagaimana peredaman terhadap adanya lonjakan (*overshoot*).

Suatu sistem dikatakan stabil jika diberi gangguan maka sistem tersebut akan kembali ke keadaan *steady state* di mana *output* berada dalam keadaan tetap seperti tidak ada gangguan. Sistem dikatakan tidak stabil jika *output* berosilasi terus menerus

ketika dikenai suatu gangguan. Suatu sistem pengontrolan biasanya melibatkan penyimpanan energi maka *output* sistem ketika diberi suatu *input*, tidak dapat mengikuti *input* secara serentak, tapi menunjukkan respon transien berupa suatu osilasi teredam sebelum mencapai *steady state*.

Salah satu fungsi kontroler adalah mengurangi sinyal *error*, dan sinyal *error* adalah perbedaan nilai *setpoint* dengan nilai *output plant*. *Setpoint* adalah nilai referensi atau nilai yang diinginkan, sedangkan *ouput plant* adalah nilai aktual yang terukur pada *output plant*. Semakin kecil nilai sinyal *error* maka kinerja sistem kontrol dinilai semakin baik.

Prinsip kerja kontroler adalah membandingkan nilai *output plant* dengan nilai *setpoint*, menentukan nilai kesalahan dan akhirnya menghasilkan sinyal kontrol untuk meminimalkan kesalahan (Ogata K., 1997).

### 2.2.1. Kontroler Proporsional (P)

Kontroler proporsional adalah sebuah kontroler yang memiliki karakteristik mempercepat respon. Hubungan antara *output* kontroler  $u(t)$  dan sinyal *error*  $e(t)$  ditunjukkan pada persamaan (2.17).

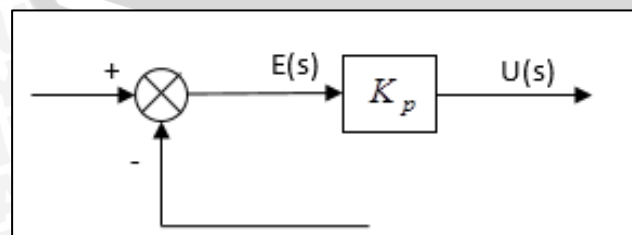
$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.17)$$

atau, dalam Transformasi *Laplace* ditunjukkan pada persamaan 2.18.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (2.18)$$

Dimana  $K_p$  adalah kepekaan proporsional atau penguatan.

Apapun wujud mekanisme yang sebenarnya dan apapun bentuk daya penggerakannya, kontroler proporsional pada dasarnya merupakan penguat dengan penguatan yang dapat diatur (Ogata, K.,1997). Diagram blok kontroler proporsional ( $K_p$ ) ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Diagram Blok Kontroler Proporsional  
Sumber: Ogata, K. (1997)

### 2.2.2. Kontroler Integral (I)

Kontroler integral memiliki kemampuan untuk mengurangi *offset* yang ditinggalkan oleh kontroler proporsional. Harga *output* kontroler  $m(t)$  diubah dengan laju yang sebanding dengan sinyal *error*  $e(t)$ . Persamaan kontroler  $K_i$  ditunjukkan dalam persamaan 2.19 (Ogata, K.,1997).

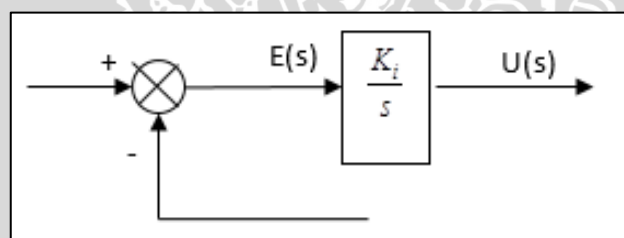
$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t)$$

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.19)$$

atau, dalam Transformasi *Laplace* ditunjukkan pada persamaan (2.20)

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (2.20)$$

yang merupakan fungsi alih kontroler integral ( $K_i$ ), dengan  $K_i$  adalah konstanta integral yang dapat diubah nilainya. Jika  $e(t)$  bernilai nol, maka nilai  $m(t)$  tetap konstan. Aksi kontrol integral ( $K_i$ ) biasa disebut dengan kontrol *reset*. Diagram blok kontroler integral ( $K_i$ ) ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Diagram Blok Kontroler Integral  
Sumber: Ogata, K. (1997)

### 2.2.3. Kontroler Proporsional Integral (PI)

Pada pengontrolan proporsional dapat menimbulkan *offset* pada keluaran pengendali. Untuk proses-proses dimana *offset* tidak dapat ditolerir maka perlu ditambahkan aksi pengontrolan integral. Aksi kontrol integral dapat menghilangkan perbedaan pengukuran dan titik acuan yang dapat mengakibatkan keluaran pengendali berubah sampai dengan perubahan tersebut berharga nol.

Kontroler PI adalah sistem kontrol gabungan antara kontroler proporsional dan integral. Dalam waktu kontinyu, sinyal keluaran kontroler` PI dirumuskan sebagai:

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \right) \quad (2.21)$$

dengan :

$$u(t) = \text{output kontroler PI}$$

$K_p$  = konstanta proporsional

$T_i$  = waktu integral

$K_i$  = konstanta integral

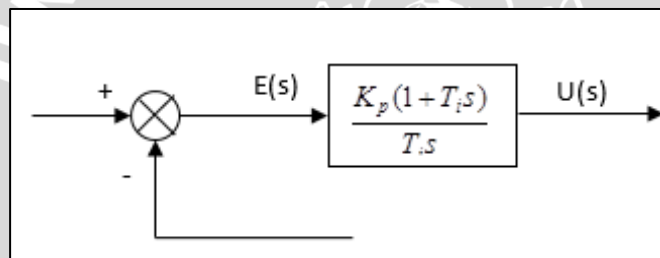
$e(t)$  = sinyal kesalahan ( $e(t)$  = referensi – keluaran plant)

Jadi, fungsi alih kontroler PI (dalam domain  $s$ ) dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_p(1 + T_i s)}{T_i s} \quad (2.22)$$

dengan konstanta proporsional ( $K_p$ ) dan waktu integral ( $T_i$ ), yang keduanya dapat ditentukan. Waktu integral mengatur aksi kontrol internal sedangkan perubahan nilai  $K_p$  berakibat pada bagian aksi kontrol proporsional maupun integral. Diagram blok kontroler proporsional integral (PI) ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Diagram Blok Kontroler Proporsional Integral (PI)  
Sumber: Ogata, K. (2010)

### 2.3. Motor DC

Motor DC merupakan motor listrik yang sangat sering digunakan sebagai elemen kontrol akhir dalam sistem kontrol posisi dan kecepatan. Prinsip kerja motor DC sesuai dengan hukum Lorentz, apabila arus dialirkan melalui kumparan jangkar dari mesin DC dan kumparan medannya diberi penguatan, maka akan timbul Gaya Lorentz pada tiap sisi kumparan jangkar tersebut (Soemarwanto, 2010).

Besar gaya Lorentz yang ditimbulkan motor DC adalah

$$F = B \times i \times l \quad (2.23)$$

dengan:

$B$  = kerapatan medan magnetik (*gauss*)

$i$  = arus listrik (*ampere*)

$l$  = panjang konduktor (*cm*)

Salah satu jenis motor DC yang digunakan adalah motor DC magnet permanen RF 130-CH seperti dalam Gambar 2.7



Gambar 2.7 Motor DC Magnet Permanen RF 130-CH

Sumber: [http://mabuchi-motor.co.jp/rf\\_130ch](http://mabuchi-motor.co.jp/rf_130ch)

### 2.3.1. Prinsip Kerja Motor DC

Sebuah motor DC magnet permanen biasanya tersusun atas magnet permanen, kumparan jangkar, dan sikat (*brush*). Medan magnet yang besarnya konstan dihasilkan oleh magnet permanen, sedangkan komutator dan sikat berfungsi untuk menyalurkan arus listrik dari sumber di luar motor ke dalam kumparan jangkar. Letak sikat di sepanjang sumbu netral dari komutator, yaitu sumbu dimana medan listrik yang dihasilkan bernilai nol. Hal ini dimaksudkan agar pada proses perpindahan dari sikat ke komutator tidak terjadi percikan api.

Keuntungan utama motor DC adalah sebagai pengendali kecepatan, yang tidak mempengaruhi kualitas pasokan daya. Motor ini dapat dikendalikan dengan mengatur:

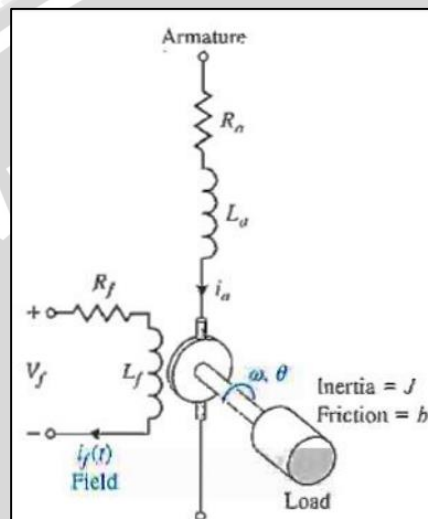
1. Tegangan dinamo, meningkatkan tegangan dinamo akan meningkatkan kecepatan.
2. Arus medan, menurunkan arus medan akan meningkatkan kecepatan.

Mekanisme kerja untuk seluruh jenis motor secara umum adalah:

1. Arus listrik dalam medan magnet akan memberikan sebuah gaya.
2. Jika kawat yang membawa arus dibengkokkan menjadi sebuah lingkaran (*loop*), maka kedua sisi *loop*, yaitu pada sudut kanan medan magnet, akan mendapatkan gaya pada arah yang berlawanan.
3. Pasangan gaya menghasilkan tenaga putar (*torque*) untuk memutar kumparan.
4. Motor-motor memiliki beberapa *loop* pada dinamonya untuk memberikan tenaga putaran yang lebih seragam dan medan magnetnya dihasilkan oleh susunan elektromagnetik yang disebut kumparan medan.

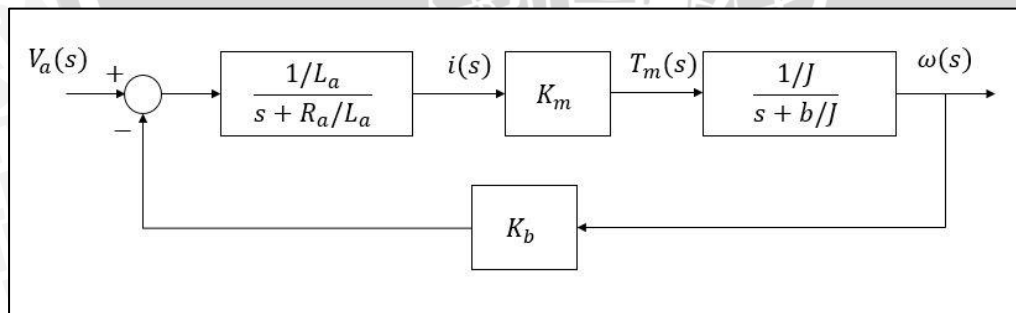
### 2.3.2. Fungsi Alih Motor DC

Motor *Direct Current* (DC) merupakan aktuator yang banyak digunakan dalam teknologi kontrol. Motor DC memerlukan suplai tegangan yang searah pada kumparan medan untuk diubah menjadi energi mekanik. Catu tegangan DC dari baterai menuju ke lilitan melalui sikat yang menyentuh komutator, dua segmen yang terhubung dengan dua ujung lilitan. Kumparan dalam satu lilitan disebut jangkar (*armature*). *Armature* adalah sebatang untuk komponen yang berputar di antara medan magnet. Rangkaian ekuivalen motor DC magnet permanen dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Rangkaian Ekuivalen Motor DC Magnet Permanen  
Sumber: Dorf, R. C. & Bishop, R. H. (2011)

Pada motor DC magnet permanen, arus kumparan medan  $I_f$  dibuat konstan. Diagram blok fungsi alih motor DC dapat dilihat dalam Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Diagram Blok Fungsi Alih Motor DC  
Sumber: <http://bsiswoyo.lecture.ub.ac.id/2012/01/motor-dc-fungsi-alih/>

Apabila gangguan (*disturbance*)  $T_d(s) = 0$ , maka fungsi alih motor DC adalah

$$\frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K_m / (L_a \times J)}{\left(s + \frac{R_a}{L_a}\right) \left(s + \frac{b}{J}\right) + (K_b \times K_m) / (L_a \times J)} \quad (2.24)$$

dengan:

$K_m$  = konstanta motor

$K_b$  = konstanta *back electromotive force*

$R_a$  = resistansi *armature*

$L_a$  = induktansi *armature*

$J$  = inersia

$b$  = gesekan

Dalam menemukan fungsi alih motor seperti persamaan (2.24), diperlukan beberapa percobaan untuk mengukur parameter-parameter fisik secara mekanik maupun elektrik. Untuk nilai resistansi ( $R$ ) dan induktansi ( $L$ ) dapat dicari dengan menggunakan alat ukur RLCmeter. Parameter yang dicari adalah konstanta torsi, konstanta *back-emf*, koefisien friksi dan momen inersia.

Karakteristik dari sebuah motor DC adalah nilai torsi sebanding dengan arus jangkar ( $i$ ) dengan faktor konstanta motor ( $K_m$ ), sehingga nilai dari konstanta motor ( $K_m$ ) memiliki persamaan sebagai berikut.

$$K_m = \frac{T_m}{i} \quad (2.25)$$

Selanjutnya untuk menentukan nilai dari *back-emf* dapat dicari dengan persamaan sebagai berikut.

$$e = V_a - (i \times R) \quad (2.26)$$

Dengan mengukur kecepatan motor  $\omega$  (dalam *rad/s*) saat dicatu dengan tegangan  $V$ , maka mampu diperoleh nilai konstanta *back-emf* ( $K_b$ ) sebagai berikut.

$$K_b = \frac{e}{\omega} \quad (2.27)$$

Berikutnya mengestimasi koefisien nilai friksi ( $b$ ) motor menggunakan persamaan (2.28). Motor dinyalakan hingga mencapai kecepatan konstan sehingga  $\frac{d\theta}{dt} = 0$  atau dapat dikatakan nilai percepatannya adalah 0, maka nilai  $b$  setara dengan persamaan.

$$b = \frac{K_b \times i}{\omega} \quad (2.28)$$

Terakhir adalah menentukan momen inersia dari motor. Motor ketika telah mencapai kecepatan konstan dan seketika itu catu daya dimatikan ( $V=0$ ) sehingga nilai arus juga sama dengan 0.

$$J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} = 0 \quad (2.29)$$

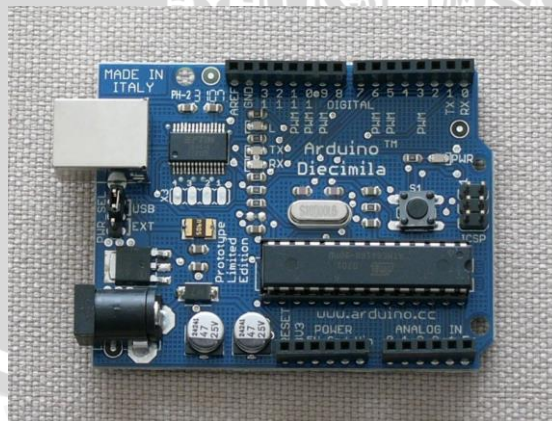
Solusi untuk persamaan (2.29) diperoleh dengan cara menggunakan kecepatan *steady state* sebagai nilai awal kecepatan dalam persamaan.

$$\omega = \frac{T_e}{b} e^{-\left(\frac{b}{J}\right)t} \quad (2.30)$$

Ketika nilai  $t$  sama dengan  $\tau = \frac{J}{b}$  dengan  $\tau$  adalah waktu konstan dimana saat motor yang diberi sumber tegangan ( $v$ ) tiba-tiba dilepas catu dayanya hingga kondisi berhenti. Karena nilai  $b$  sudah diketahui pada persamaan (2.28) maka akan didapatkan nilai momen inersia dari motor.

## 2.4. Arduino Uno

Arduino Uno adalah *board* mikrokontroler berbasis ATmega328. Memiliki 14 PIN *input* dari *output* digital dimana 6 PIN *input* tersebut dapat digunakan sebagai *output* PWM dan 6 PIN *input* analog, 16 MHz osilator kristal, koneksi USB, *jack power*, ICSP *header*, dan tombol *reset*. Untuk mendukung mikrokontroler agar dapat digunakan, cukup hanya menghubungkan *Board* Arduino Uno ke komputer dengan menggunakan kabel USB atau sumber tegangan bisa didapat dari adaptor AC-DC atau baterai untuk menggunakannya. Uno berbeda dengan semua board sebelumnya dalam hal koneksi USB-to-serial yaitu menggunakan fitur Atmega8U2 yang diprogram sebagai konverter USB-to-serial berbeda dengan board sebelumnya yang menggunakan chip FTDI driver USB-to-serial.



Gambar 2.10 Arduino

Sumber: <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno>

Nama “Uno” berarti *satu* dalam bahasa Italia, untuk menandai peluncuran Arduino 1.0. Uno dan versi 1.0 akan menjadi versi referensi dari Arduino. Uno adalah yang

terbaru dalam serangkaian board USB Arduino, dan sebagai model referensi untuk platform Arduino, untuk perbandingan dengan versi sebelumnya.

#### 2.4.1. Catu Daya

Arduino Uno dapat diaktifkan melalui koneksi USB atau dengan catu daya eksternal (otomatis). Eksternal (non-USB) daya dapat berasal baik dari AC-DC adaptor atau baterai. Adaptor ini dapat dihubungkan dengan menancapkan plug jack pusat-positif ukuran 2.1mm konektor *Power*. Ujung kepala dari baterai dapat dimasukkan kedalam Gnd dan Vin PIN *header* dari konektor *Power*. Kisaran kebutuhan daya yang disarankan untuk board Uno adalah 7 sampai dengan 12 volt, jika diberi daya kurang dari 7 volt kemungkinan PIN 5v Uno dapat beroperasi tetapi tidak stabil kemudian jika diberi daya lebih dari 12V, regulator tegangan bisa panas dan dapat merusak board Uno. PIN catu daya adalah sebagai berikut:

1. Vin = Tegangan masukan kepada *board* Arduino ketika menggunakan sumber daya eksternal (sebagai pengganti dari 5 volt koneksi USB atau sumber daya lainnya).
2. 5V = Catu daya digunakan untuk daya mikrokontroler dan komponen lainnya di *board*. Hal ini dapat terjadi baik dari Vin melalui regulator *on-board* atau diberikan oleh USB.
3. 3,3V = Volt pasokan yang dihasilkan oleh regulator *on-board*. Menarik arus maksimum adalah 50 mA.
4. Gnd = Ground PIN.

#### 2.4.2. Memory

Arduino ini memiliki 32 KB (dengan 0,5 KB digunakan untuk *loading file*) dan 2 KB dari SRAM dan 1 KB EEPROM.

#### 2.4.3. Input dan Output

Masing-masing dari 14 PIN digital di Uno dapat digunakan sebagai *input* atau *output*, dengan menggunakan fungsi *pinMode ()*, *digitalWrite ()*, dan *digitalRead ()*, beroperasi dengan daya 5 volt. Setiap PIN dapat memberikan atau menerima maksimum 40 mA dan memiliki internal pull-up resistor (secara default terputus) dari 20-50 kOhms. Selain itu, beberapa PIN memiliki fungsi khusus:

1. *Serial*: 0 (RX) dan 1 (TX). Digunakan untuk menerima (RX) dan mengirimkan (TX) TTL data serial. PIN ini dihubungkan ke PIN yang berkaitan dengan chip Serial ATmega8U2 USB-to-TTL.
2. *Eksternal menyela*: 2 dan 3. PIN ini dapat dikonfigurasi untuk memicu interrupt pada nilai yang rendah, dengan batasan tepi naik atau turun, atau perubahan nilai. *PWM*: 3, 5, 6, 9, 10, dan 11. Menyediakan output PWM 8-bit dengan fungsi *analogWrite ()*.
3. *SPI*: 10 (SS), 11 (Mosi), 12 (MISO), 13 (SCK). PIN ini mendukung komunikasi SPI menggunakan *SPI library*.
4. *LED*: 13. Ada built-in LED terhubung ke PIN digital 13. Ketika PIN bernilai nilai HIGH, LED on, ketika PIN bernilai LOW, LED off.

Uno memiliki 6 masukan analog, berlabel A0 sampai dengan A5, yang masing-masing menyediakan 10 bit dengan resolusi (yaitu 1024 nilai yang berbeda). Selain itu, beberapa PIN memiliki fungsi khusus:

1. *I2C*: A4 (*SDA*) dan A5 (*SCL*). Dukungan I2C (TWI) komunikasi menggunakan perpustakaan Wire.
2. *Aref*. Tegangan referensi (0 sampai 5V saja) untuk input analog. Digunakan dengan fungsi *analogReference ()*.
3. *Reset*. Bawa baris ini LOW untuk me-reset mikrokontroler.

#### 2.4.4. Komunikasi

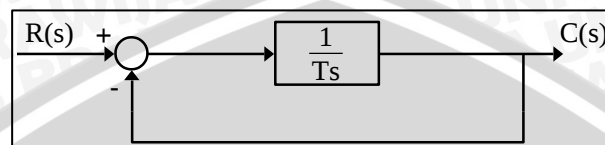
Arduino Uno memiliki sejumlah fasilitas untuk berkomunikasi dengan komputer, Arduino lain, atau mikrokontroler lainnya. ATmega328 menyediakan UART TTL (5V) untuk komunikasi serial, yang tersedia di PIN digital 0 (RX) dan 1 (TX). Sebuah ATmega8U2 sebagai saluran komunikasi serial melalui USB dan sebagai port virtual com untuk perangkat lunak pada komputer. Firmware '8 U2 menggunakan driver USB standar COM, dan tidak ada driver eksternal yang diperlukan. Namun, pada Windows diperlukan, sebuah file inf. Perangkat lunak Arduino terdapat monitor serial yang memungkinkan digunakan memonitor data tekstual sederhana yang akan dikirim ke atau dari board Arduino. LED RX dan TX di papan tulis akan berkedip ketika data sedang dikirim melalui chip USB-to-serial dengan koneksi USB ke komputer (tetapi tidak untuk komunikasi serial pada PIN 0 dan 1).

Sebuah Software Serial Library memungkinkan untuk berkomunikasi secara serial pada salah satu PIN digital pada board Uno's. ATmega328 juga mendukung I2C (TWI)

dan komunikasi SPI. Perangkat lunak Arduino termasuk perpustakaan kawat untuk menyederhanakan penggunaan bus I2C.

## 2.5. Output Sistem Orde Satu

Diagram blok sistem orde satu dapat dilihat dalam Gambar 2.11 yang mempunyai fungsi alih sebagai berikut



Gambar 2.11 Sistem Orde Satu

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\frac{1}{Ts}}{1 + \frac{1}{Ts}}$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{1 + Ts} \quad (2.31)$$

### 2.5.1. Output Unit Step Pada Sistem Orde Satu

Jika sistem orde satu diberi masukan unit *step*  $r(t) = 1$ , dari Transformasi *Laplace* fungsi *ramp* adalah  $R(s) = 1/s$ . Keluaran sistem adalah sebagai berikut

$$C(s) = \frac{1}{Ts + 1} R(s)$$

$$C(s) = \frac{1}{Ts + 1} \frac{1}{s}$$

$$C(s) = \frac{1}{s(Ts + 1)} \quad (2.32)$$

$$C(t) = \mathcal{L}^{-1}[C(s)]$$

$$C(t) = 1 - e^{-t/T} \quad (t \geq 0) \quad (2.33)$$

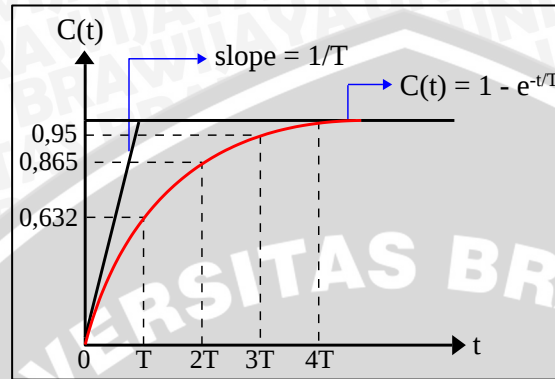
Persamaan keluaran tersebut menyatakan bahwa keluaran  $c(t)$  mula-mula bernilai nol kemudian akhirnya berubah menjadi satu. Salah satu karakteristik penting *output* eksponensial  $c(t)$  tersebut adalah bahwa pada  $t = T$ , maka  $c(t) = 1 - e^{-1} \cong 0,632 = 2/3$ .

$T$  = konstanta waktu sistem (*time constant*)

=  $2/3$  harga akhir

Konstanta waktu  $T$  yang lebih kecil akan mempercepat *output* sistem. Karakteristik penting lainnya pada kurva *output* eksponensial adalah kemiringan garis singgung (*gradien*) pada  $t = 0$  adalah  $1/T$ , karena

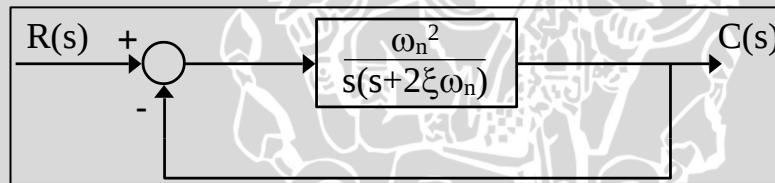
$$\frac{dc}{dt} = \frac{1}{T} e^{-t/T} \Big|_{t=0} = \frac{1}{T}$$



Gambar 2.12 Output Unit Step Sistem Orde Satu

## 2.6. Output Sistem Orde Dua

Sistem orde dua dengan fungsi alihnya adalah sebagai berikut



Gambar 2.13 Sistem Orde Dua

$$\begin{aligned} \frac{C(s)}{R(s)} &= \frac{\omega_n^2}{s(s + 2\xi\omega_n)} \\ &= \frac{\omega_n^2}{1 + \frac{\omega_n^2}{s(s + 2\xi\omega_n)}} \\ &= \frac{\omega_n^2}{s(s + 2\xi\omega_n) + \omega_n^2} \\ &= \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \end{aligned} \quad (2.34)$$

Akar-akar penyebut fungsi alih atau persamaan karakteristik adalah

$$\begin{aligned} s_{1,2} &= \frac{-2\xi\omega_n \pm \sqrt{(2\xi\omega_n)^2 - 4\omega_n^2}}{2} \\ &= -\xi\omega_n \pm \omega_n \sqrt{\xi^2 - 1} \end{aligned}$$

$$s_{1,2} = -\xi\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\xi^2} \quad (2.35)$$

dengan:

$\xi$  = rasio peredaman sistem (*damping ratio*)

$\omega_n$  = frekuensi natural/alamiah tak teredam

$\omega_d$  = frekuensi natural/alamiah teredam

Kelakuan dinamik sistem orde dua dapat digambarkan dalam suku dua parameter  $\xi$  dan  $\omega_n$ . Jika ( $0 < \xi < 1$ ), maka *pole loop* tertutup merupakan konjugat kompleks dan berada pada bidang  $s$  sebelah kiri. Dalam hal ini, sistem dikatakan dalam peredam dan tanggapan peralihan berisolasi. Jika ( $\xi = 1$ ), maka sistem dikatakan teredam kritis. Sistem selalu teredam berhubungan dengan ( $\xi > 1$ ). Tanggapan peralihan sistem kritis dan sistem terlalu teredam tidak berisolasi. Jika ( $\xi = 0$ ), tanggapan peralihan tidak muncul.

Pada sistem orde dua seperti terlihat dalam Gambar 2.13, berdasarkan *output* sistem dengan masukan unit step akan terdapat tiga keadaan yang berbeda, yaitu keadaan kurang teredam ( $0 < \xi < 1$ ), teredam kritis ( $\xi = 1$ ), dan keadaan terlalu teredam ( $\xi > 1$ ).

### 2.6.1. Keadaan Kurang Teredam (*Underdamped*)

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)s} \quad (2.36)$$

Jika sistem diberi *input* berupa unit step atau  $R(s) = 1/s$ , maka

$$C(s) = \frac{\omega_n^2}{(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)s} \quad (2.37)$$

Dari Tabel Transformasi Laplace didapatkan

$$c(t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_n t} \sin(\omega_n \sqrt{1-\xi^2} t + \phi)$$

$$\phi = \arctan \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi}$$

Jika  $\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\xi^2}$ , maka

$$c(t) = 1 - \frac{e^{-\xi\omega_n t}}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin\left(\omega_d t + \arctan \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi}\right) \quad t \geq 0 \quad (2.38)$$

Output sistem tersebut juga bisa diperoleh dengan menggunakan Transformasi *Laplace* balik jika  $C(s)$  ditulis dalam bentuk berikut

$$C(s) = \frac{1}{s} - \frac{s + 2\xi\omega_n}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.39)$$

$$= \frac{1}{s} - \frac{s + \xi\omega_n}{(s + \xi\omega_n)^2 + \omega_d^2} - \frac{\xi\omega_n}{(s + \xi\omega_n)^2 + \omega_d^2}$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{s + \xi\omega_n}{(s + \xi\omega_n)^2 + \omega_d^2}\right] = e^{-\xi\omega_n t} \cos \omega_d t$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{\xi\omega_n}{(s + \xi\omega_n)^2 + \omega_d^2}\right] = e^{-\xi\omega_n t} \sin \omega_d t \quad (2.40)$$

oleh karena itu, Transformasi *Laplace* balik dari persamaan

$$C(s) = \frac{\omega_n^2}{(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)s}$$

diperoleh sebagai

$$\mathcal{L}^{-1}[C(s)] = c(t)$$

$$c(t) = 1 - e^{-\xi\omega_n t} \left( \cos \omega_d t + \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin \omega_d t \right)$$

$$c(t) = 1 - \frac{e^{-\xi\omega_n t}}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin \left( \omega_d t + \arctan \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi} \right) \quad t \geq 0 \quad (2.41)$$

Sinyal kesalahan (*error*) adalah  $e(t) = r(t) - c(t)$ , dimana

$$r(t) = 1$$

dan

$$c(t) = 1 - e^{-\xi\omega_n t} \left( \cos \omega_d t + \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin \omega_d t \right)$$

sehingga

$$e(t) = e^{-\xi\omega_n t} \left( \cos \omega_d t + \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin \omega_d t \right) \quad t \geq 0$$

$$\text{jika } \xi = 0 \Rightarrow c(t) = 1 - \cos \omega_n t$$

### 2.6.2. Teredam Kritis (Critically Damped)

Dalam hal ini apabila dua  $\text{pole } C(s)/R(s)$  hampir sama, maka sistem dapat didekati

dengan bentuk teredam kritis. Jika input berupa unit *step* dimana  $R(s) = 1/s$  maka

$$C(s) = \frac{\omega_n^2}{(s + \omega_n)^2 s}$$

$$c(t) = 1 - e^{-\omega_n t} (1 + \omega_n t) \quad t \geq 0 \quad (2.42)$$

### 2.6.3. Terlalu Teredam (Overdamped)

Dalam hal ini  $\text{pole } C(s)/R(s)$  adalah bilangan nyata (*real*) negatif yang tidak sama.

Jika *input* berupa unit *step* dimana  $R(s) = 1/s$  dan  $C(s)$  dapat ditulis dengan

$$C(s) = \frac{\omega_n^2}{(s + \omega_n)^2 s} \quad (2.43)$$

$$C(s) = \frac{\omega_n^2}{\left(s + \xi\omega_n + \omega_n\sqrt{\xi^2 - 1}\right)\left(s + \xi\omega_n - \omega_n\sqrt{\xi^2 - 1}\right)s}$$

$$c(t) = 1 + \frac{\omega_n}{2\sqrt{\xi^2 - 1}} \left( \frac{e^{-s_1 t}}{s_1} - \frac{e^{-s_2 t}}{s_2} \right) \quad t \geq 0$$

dengan,

$$s_1 = \left( \xi + \sqrt{\xi^2 - 1} \right) \omega_n$$

$$s_2 = \left( \xi - \sqrt{\xi^2 - 1} \right) \omega_n$$

Tanggapan  $C(t)$  terdiri dari dua suku eksponensial menurun.

### 2.7. Tahapan Peralihan

Sistem dengan tenaga tidak dapat memberikan tanggapan seketika dan akan menunjukkan tanggapan peralihan walaupun diberi masukan ataupun gangguan. Karakteristik untuk kerja sistem kontrol yang diinginkan dicirikan oleh suku tanggapan peralihan terhadap masukan unit *step* karena hal itu mudah dilakukan dan cukup drastis. Jika tanggapan terhadap masukan unit *step* diketahui, secara matematis dapat dihitung tanggapan untuk masukan yang lain.

Tanggapan peralihan sistem kontrol selalu menunjukkan osilasi teredam sebelum mencapai keadaan mantapnya, hal ini juga menunjukkan bahwa sistem tersebut mempunyai rasio peredaman ( $0 < \xi < 1$ ) yang juga berarti bahwa sistem tersebut merupakan sistem yang kurang teredam (*underdamped*).

Tanggapan peralihan sistem kontrol terhadap masukan unit *step* umumnya dikelompokkan sebagai berikut:

1. Waktu Tunda (*Delay Time*),  $t_d$

Waktu yang dibutuhkan oleh *output* untuk mencapai setengah harga akhir pada saat lonjakan pertama.

2. Waktu Naik (*Rise Time*),  $t_r$

Waktu yang dibutuhkan oleh *output* agar bertambah dari 10% menjadi 90% dari nilai akhir.

3. Waktu Puncak (*Peak Time*),  $t_p$

Waktu yang dibutuhkan oleh *output* untuk mencapai puncak pertama lonjakan (maksimum)

4. Lonjakan Maksimum (*Maximum Overshoot*),  $M_p$

Merupakan nilai puncak kurva *output* diukur dari satu

$$M_p = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\%$$

dengan:

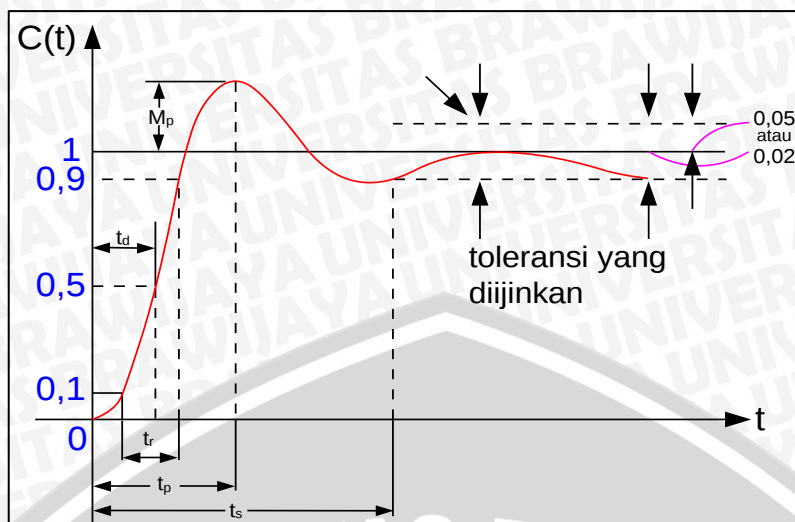
$c(t_p)$  = nilai *output* pada saat lonjakan maksimum

$c(\infty)$  = nilai *output* pada saat keadaan mantap

5. Waktu Turun (*Settling Time*),  $T_s$

Waktu yang dibutuhkan oleh *output* untuk mencapai harga tertentu dan tetap dalam range nilai akhir (biasanya 5% atau 2%)

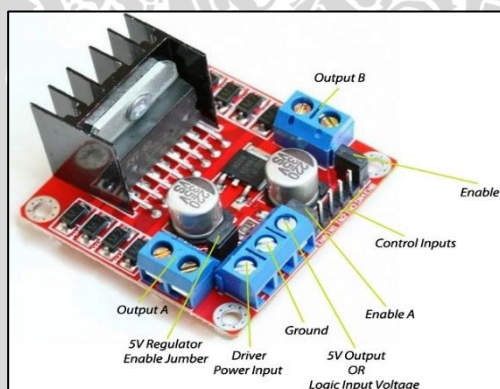
*Output* unit *step* sistem orde dua ditunjukkan oleh Gambar 2.14



Gambar 2.14 Output Unit Step Sistem Orde Dua

## 2.8. Driver Motor L298N

Driver motor L298N seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.15 digunakan untuk mengendalikan putaran motor DC. Modul ini dihubungkan dengan *output* dari mikrokontroler Arduino Uno.

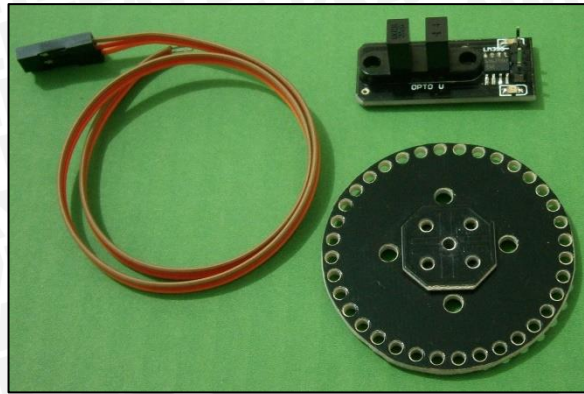


Gambar 2.15 Driver Motor L298N

Sumber: [electrosome.com](http://electrosome.com)

## 2.9. Rotary Encoder

*Rotary encoder* adalah elektromekanik yang dapat mendeteksi atau memonitor gerakan dan posisi. *Rotary encoder* biasanya menggunakan sensor optik untuk menghasilkan serial pulsa yang dapat dijadikan gerakan, posisi, dan arah. *Rotary encoder* adalah sensor *rotary* atau putaran yang terdiri dari dua bagian, yaitu satu rangkaian sensor *optocoupler* dan piringan derajat yang terdiri dari beberapa lubang yang adalah sebuah *trigger* dari sensor *optocoupler*.



Gambar 2.16 Rotary Encoder  
Sumber: [depokinstruments.com](http://depokinstruments.com)

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



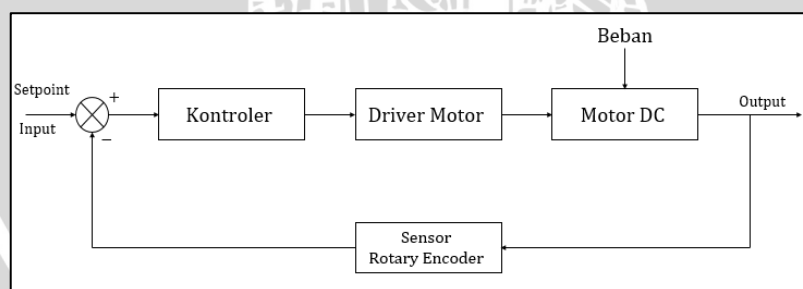
### BAB III METODE PENELITIAN

Untuk menyelesaikan rumusan masalah dan merealisasikan tujuan penelitian yang terdapat di bab pendahuluan maka diperlukan langkah-langkah untuk menyelesaikan masalah tersebut. Metode penelitian yang digunakan pada skripsi ini meliputi:

1. Perancangan blok diagram sistem
2. Spesifikasi desain
3. Identifikasi Motor DC
4. Perancangan Algoritma
5. Pembuatan perangkat keras
6. Pembuatan *flowchart*

#### 3.1. Perancangan Blok Diagram Sistem

Pada perancangan alat diperlukan perancangan blok diagram sistem yang dapat menjelaskan sistem secara garis besar dan diharapkan alat dapat bekerja sesuai dengan rencana. Perancangan perangkat keras pada penelitian ini terdiri dari Arduino Uno, *driver* motor, motor DC, dan sensor *rotary encoder*. Blok diagram sistem yang dirancang ditunjukkan dalam Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Blok Sistem *Loop* Tertutup

Keterangan:

1. *Setpoint* yang diberikan sebagai masukan pada sistem.
2. Kontroler yang digunakan adalah kontroler Proporsional Integral (PI) menggunakan perangkat keras Arduino Uno.
3. *Driver* motor menggunakan modul L298N.
4. Motor DC RF 130-CH berfungsi sebagai aktuator.

5. Sensor *rotary encoder* sebagai pembaca putaran motor dan *feedback* sistem.

### 3.2. Spesifikasi Desain

Spesifikasi dari desain yang dirancang adalah sebagai berikut:

1. Perancangan perangkat keras yang meliputi kontroler Arduino Uno, *driver* motor L298N, rangkaian catu daya LM2596, motor DC tipe RF 130-CH.
2. Perancangan perangkat lunak meliputi penentuan parameter kontroler PI menggunakan metode *Integral of the Square Error (ISE)*, sedangkan proses diskritisasi menggunakan *Zero Order Hold (ZOH) Equivalence*, *Pole-Zero Mapping*, *Bilinear Transformation*.
3. Parameter yang diamati meliputi *delay time*, *rise time*, *peak time*, *maximum overshoot*, *settling time*, *error steady state*.
4. Beban yang digunakan adalah cakram padat dengan berat 20 gram.
5. *Setpoint* sistem berupa putaran motor yaitu 3000 rpm.
6. Pembacaan kecepatan menggunakan sensor *rotary encoder*.
7. *Settling time* kurang dari 1 detik.
8. *Error* ditentukan kurang dari 5%.
9. *Overshoot* ditentukan kurang dari 10%.

### 3.3. Identifikasi Motor DC

Pengujian identifikasi Motor DC dilakukan untuk mendapatkan sebuah fungsi alih. Identifikasi tersebut menggunakan program Matlab pada laptop. Fungsi alih itu sendiri nantinya akan digunakan agar mengetahui karakteristik dari motor DC yang akan digunakan. Dari pengujian motor DC tersebut, akan didapatkan sebuah data yang kemudian akan disimulasikan menggunakan program Matlab.

#### 3.3.1. Penentuan Parameter Motor DC

Data yang diperoleh dari pengujian fisik motor DC adalah sebagai berikut:

$$V_a = 1 \text{ volt}$$

$$i = 0,05 \text{ A}$$

$$R_a = 2,8 \Omega$$

$$L_a = 0,0057 \text{ H}$$

$$t = 0,36 \text{ s}$$

$$T_m = 0,016 \text{ Nm}$$

$$\text{speed} = 29 \text{ rpm}$$

Kemudian hasil dari pengujian fisik motor DC tersebut akan didapatkan parameter dengan menggunakan persamaan (2.25) sampai (2.30) pada subbab 2.3.2 sebagai berikut:

$$K_m = 0,32 \text{ Nm/A}$$

$$\omega = 3,03 \text{ rad/s}$$

$$e = 0,86 \text{ volt}$$

$$K_b = 0,2831 \text{ Vs/rad}$$

$$b = 0,0047 \text{ Nms}$$

$$J = 0,0017 \text{ kgm}^2$$

### 3.3.2. Penentuan Fungsi Alih Motor DC

Setelah mendapatkan parameter motor DC, kemudian akan ditentukan fungsi alih dengan memasukkan parameter-parameter ke dalam simulasi menggunakan Matlab. Nilai-nilai yang dimasukkan kedalam program Matlab adalah sebagai berikut:

$$R_a = 2,8 \Omega$$

$$L_a = 0,0057 \text{ H}$$

$$K_m = 0,32 \text{ Nm/A}$$

$$K_b = 0,2831 \text{ Vs/rad}$$

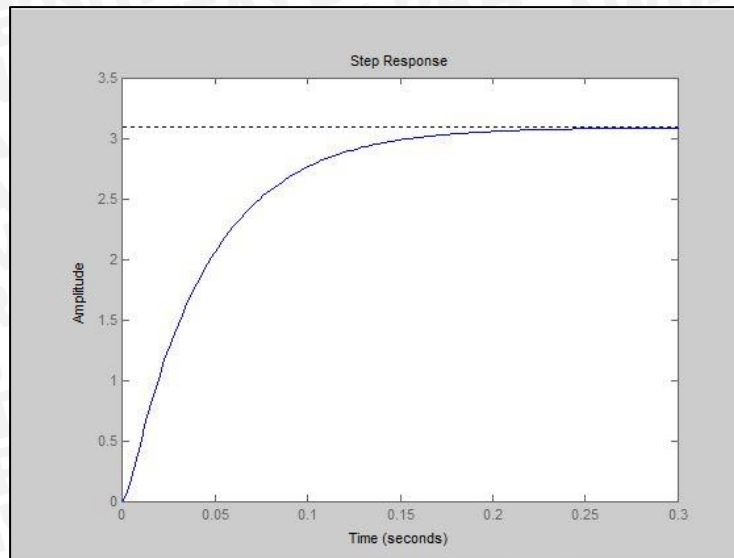
$$b = 0,0047 \text{ Nms}$$

$$J = 0,0017 \text{ kgm}^2$$

Berdasarkan data diatas, nilai-nilai tersebut dijalankan menggunakan program Matlab sehingga didapatkan fungsi alih motor DC sebagai berikut:

$$Fm(s) = \frac{33470}{s^2 + 494s + 10840} \quad (3.1)$$

Dan menghasilkan plot grafik respon *plant* tanpa kontroler dengan memberikan masukan sinyal *step* pada persamaan (3.1) yang ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Respon Fungsi Alih Motor DC

Berdasarkan grafik respon fungsi alih motor DC pada Gambar 3.2, maka dapat diketahui periode *sampling* sebesar:

$$T = \frac{\tau}{10} = \frac{0,06}{10} = 0,006 \quad (3.2)$$

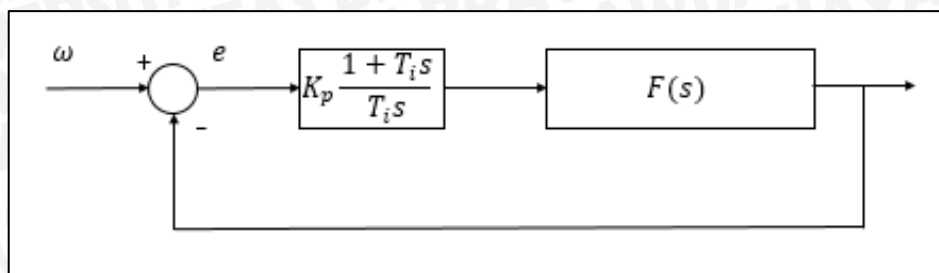
### 3.4. Perancangan Algoritma

Dalam perancangan algoritma, nilai parameter kontroler proporsional ( $K_p$ ) dan kontroler integral ( $K_i$ ) yang didapat akan diubah menjadi kawasan diskrit ( $z$ ). Perancangan ini dilakukan untuk mengkonversi sinyal analog yang telah didapatkan menjadi sinyal digital.

Metode yang digunakan untuk mencari nilai  $K_p$  dan  $K_i$  adalah *Integral of the Square Error*, sedangkan metode diskritisasi yang digunakan dalam perancangan ini adalah *Zero Order Hold (ZOH) Equivalence*, *Pole-Zero Mapping*, dan *Bilinear Transformation*. Manipulasi persamaan  $z$  yang didapatkan dalam algoritma perasamaan beda dari 3 metode diskrit ini nantinya akan dijalankan dalam program Arduino Uno.

#### 3.4.1. Perancangan Kontroler Proporsional Integral

Perancangan kontroler Proporsional Integral ( $PI$ ) pada penelitian ini menggunakan metode *Integral of the Square Error (ISE)*. Metode ini menghitung nilai integral dari mutlak *error* atau *error* kuadratik dari fungsi alih.



Gambar 3.3 Sistem Jaring Tertutup Kontroler PI  
Sumber: Rusli, M. (2015)

Langkah-langkah perhitungan menggunakan metode *Integral of the Square Error (ISE)* dari fungsi alih untuk mendapatkan parameter Kontroler Proporsional Integral adalah sebagai berikut:

Penyebut dari fungsi alih hasil identifikasi motor DC diakarkan menjadi:

$$\frac{\omega}{V_a} = \frac{33470}{s^2 + 494s + 10840}$$

$$\frac{\omega}{V_a} = \frac{33470}{(s + 471)(s + 23)} \quad (3.3)$$

Nilai *pole* dikeluarkan dan nilai koefisien *s* dibagi dengan nilai *pole* dan penjumlahannya menjadi bernilai 1:

$$(s + 471) = (471) \left[ \frac{1}{471} s + 1 \right]$$

$$(s + 23) = (23) \left[ \frac{1}{23} s + 1 \right]$$

$$\frac{\omega}{V_a} = \frac{33470}{(471)(23) \left[ \frac{1}{471} s + 1 \right] \left[ \frac{1}{23} s + 1 \right]} \quad (3.4)$$

$$\frac{\omega}{V_a} = \frac{33470/10833}{\left[ \frac{1}{471} s + 1 \right] \left[ \frac{1}{23} s + 1 \right]}$$

$$\frac{\omega}{V_a} = \frac{3,09}{(0,0021s + 1)(0,0434s + 1)} \quad (3.5)$$

Kemudian dapat dicari fungsi alih *open loop*.

$$F_{ol} = Kp \left[ \frac{1 + T_i s}{T_i s} \right] \left[ \frac{3,09}{(0,0021s + 1)(0,0434s + 1)} \right] \quad (3.6)$$

Dari persamaan (3.6), maka akan didapatkan hasil sebagai berikut.

$$F_{ol} = \left[ \frac{Kp + KpT_i s}{T_i s} \right] \left[ \frac{3,09}{(0,0021s + 1)(0,0434s + 1)} \right]$$

$$F_{ol} = \frac{3,09KpT_i s + 3,09Kp}{s(9,114 \times 10^{-5} T_i s^2 + 0,0455T_i s + T_i)} \quad (3.7)$$

Untuk mendapatkan persamaan *error* dari sistem jaring tertutup, digunakan hubungan fungsi alih berikut ini:

$$E(s) = \frac{1}{1 + F_{ol}} \times \frac{1}{s} \quad (3.8)$$

Hasil perhitungan yang didapatkan dari persamaan (3.7) disubstitusikan ke dalam persamaan (3.8), sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut.

$$E(s) = \frac{1}{1 + \frac{3,09KpT_i s + 3,09Kp}{s(9,114 \times 10^{-5} T_i s^2 + 0,0455T_i s + T_i)}} \times \frac{1}{s}$$

$$E(s) = \frac{9,114 \times 10^{-5} T_i s^2 + 0,0455T_i s + T_i}{9,114 \times 10^{-5} T_i s^3 + 0,0455T_i s^2 + (1 + 3,09Kp)T_i s + 3,09Kp} \quad (3.9)$$

Berdasarkan persamaan *error* diatas, persamaan polynomial penyebut memiliki orde tiga, dengan koefisien-koefisien berikut:

$$\begin{aligned} c_0 &= T_i \\ c_1 &= 0,0455 T_i \\ c_2 &= 9,114 \times 10^{-5} T_i \\ d_0 &= 3,09 K_p \\ d_1 &= (1 + 3,09 K_p) T_i \\ d_2 &= 0,0455 T_i \\ d_3 &= 9,114 \times 10^{-5} T_i \end{aligned}$$

Indeks performansi yang didasarkan pada tabel 2.1, bahwa indeks performansi untuk orde tiga adalah:

$$J_3 = \frac{c_2^2 d_0 d_1 + (c_1^2 - 2c_0 c_2) d_0 d_3 + c_0^2 d_2 d_3}{2d_0 d_3 (d_1 d_2 - d_0 d_3)} \quad (3.10)$$

Koefisien-koefisien yang didapatkan dari persamaan (3.9) disubstitusikan ke dalam persamaan (3.10), sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut.

$$J_3 = \frac{(7,9306 \times 10^{-8} Kp^2 + 5,5749 \times 10^{-7} Kp) T_i^3 + 4,1468 \times 10^{-6} T_i^4}{(7,9129 \times 10^{-5} Kp^2 + 2,5625 \times 10^{-5} Kp) T_i^3 - 1,5859 \times 10^{-7} Kp^2 T_i^2} \quad (3.11)$$

Kemudian persamaan indeks performansi diturunkan terhadap  $T_i$  sama dengan 0.

$$\frac{dJ_3}{dT_i} = \frac{x'y - xy'}{y^2} = 0 \quad (3.12)$$

Diketahui:

$$\begin{aligned} x' &= \underbrace{1,6587 \times 10^{-5}}_a T_i^3 + \underbrace{(2,3793 \times 10^{-7} Kp^2 + 1,6720 \times 10^{-6} Kp)}_b T_i^2 \\ y &= \underbrace{(7,9129 \times 10^{-5} Kp^2 + 2,5625 \times 10^{-5} Kp)}_c T_i^3 - \underbrace{1,5859 \times 10^{-7} Kp^2 T_i^2}_d \\ x &= \underbrace{4,1468 \times 10^{-6}}_e T_i^4 + \underbrace{(7,9306 \times 10^{-8} Kp^2 + 5,5749 \times 10^{-7} Kp)}_f T_i^3 \\ y' &= \underbrace{(7,6881 \times 10^{-5} Kp + 2,3756 \times 10^{-4} Kp^2)}_g T_i^2 - \underbrace{3,1724 \times 10^{-7} Kp^2 T_i}_h \end{aligned}$$

Untuk mencari nilai Kontroler Proporsional Integral menggunakan rumus *Integral of the Square Error (ISE)*, nilai  $Kp$  pada pembilang akan diasumsikan sehingga nantinya akan ditemukan nilai  $Ti$  dan  $Ki$ . Nilai  $Kp$  sendiri akan diasumsikan sebesar 2,5 yang kemudian perhitungannya akan diprogram menggunakan program Matlab dengan sintaks:

```
clc;
clear;

Kp = 2.5;

%Rumus hasil turunan J3
a = 1.6587e-5;
b = 2.3793e-7*Kp^2+1.6720e-6*Kp;
c = 2.5627e-5*Kp+7.9189e-5*Kp^2;
d = 1.5862e-7*Kp^2;

e = 4.1469e-6;
f = 7.9311e-8*Kp^2+5.5736e-7*Kp;
g = 2.3757e-4*Kp^2+7.6881e-5*Kp;
h = 3.1724e-7*Kp^2;

j = (b*c - f*g - a*d + e*h) / (a*c - e*g);
k = (f*h - b*d) / (a*c - e*g);

A = [1 j k]
Ti = roots(A)
Ki = Kp/Ti
```

Sehingga akan didapatkan nilai  $Ti$  dan  $Ki$  sebesar:

```
A =
    1.0000    -0.0036    -0.0008
Ti =
```

$$\begin{aligned}
 &0.0303 \\
 &-0.0267 \\
 K_i = &82.5367 \quad 0
 \end{aligned}$$

Berdasarkan nilai parameter  $K_p$  dan  $K_i$  yang diperoleh, maka nilai fungsi alih dari Kontroler Proporsional Integral adalah:

$$\begin{aligned}
 PI(s) &= \frac{K_p s + K_i}{s} \\
 PI(s) &= \frac{2,5s + 82,5}{s}
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

### 3.4.2. Zero Order Hold (ZOH) Equivalence

Langkah-langkah yang digunakan pada metode Zero Order Hold (ZOH) Equivalence adalah sebagai berikut:

nilai dari fungsi alih kontroler  $PI(s)$  disubstitusikan ke dalam rumus Zero Order Hold (ZOH) Equivalence.

$$\begin{aligned}
 PI(z) &= (1 - z^{-1}) \mathcal{L} \left[ \frac{H(s)}{s} \right] \\
 PI(z) &= (1 - z^{-1}) \mathcal{L} \left[ \frac{2,5s + 82,5}{s^2} \right]
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

Transformasikan ke bidang  $z$  fungsi alih hasil.

$$\mathcal{L} \left[ \frac{2,5s + 82,5}{s^2} \right] = \frac{2,5z}{z-1} + \frac{0,49z}{(z-1)^2}$$

Hasil dari transformasi bidang  $z$  disubstitusikan kembali ke dalam rumus Zero Order Hold (ZOH) Equivalence.

$$PI(z) = (1 - z^{-1}) \left( \frac{2,5z}{z-1} + \frac{0,49z}{(z-1)^2} \right) \tag{3.15}$$

Dari persamaan (3.15), maka akan didapatkan nilai  $PI(z)$  sebagai berikut.

$$PI(z) = \frac{2,5z^2 - 4,51z + 2,5}{z^2 - 2z + 1} \tag{3.16}$$

Sehingga didapatkan algoritma persamaan beda dari metode Zero Order Hold (ZOH) Equivalence.

$$\frac{M(z)}{E(z)} = \frac{2,5 - 4,51z^{-1} + 2,5z^{-2}}{1 - 2z^{-1} + z^{-2}} \quad (3.17)$$

$$M(z) - 2z^{-1}M(z) + z^{-2}M(z) = 2,5E(z) - 4,51z^{-1}E(z) + 2,5z^{-2}E(z)$$

$$m(k) = 2m(k-1) - m(k-2) + 2,5e(k) - 4,51e(k-1) + 2,5e(k-2) \quad (3.18)$$

### 3.4.3. Pole-Zero Mapping

Langkah-langkah yang digunakan pada metode *Pole-Zero Mapping* adalah sebagai berikut:

Menentukan nilai dari fungsi alih kontroler PI yang didapatkan dari nilai  $K_p$  dan  $K_i$ .

$$PI(z) = \frac{2,5s + 82,5}{s} \quad (3.19)$$

Berdasarkan fungsi alih  $PI(s)$  diatas, *zero* bernilai  $s = -33$  dan *pole* bernilai  $s = 0$ . Sehingga persamaan dari fungsi alih  $H(z)$  adalah:

$$PI(z) = \frac{z - e^{-33T}}{z - 1} \quad (3.20)$$

Dari persamaan (3.20), maka akan didapatkan nilai  $PI(z)$  sebagai berikut.

$$PI(z) = \frac{z - e^{-33(0,006)}}{z - 1}$$

$$PI(z) = \frac{z - 0,82}{z - 1} \quad (3.21)$$

Sehingga didapatkan algoritma persamaan beda dari metode *Pole-Zero Mapping*.

$$\frac{M(z)}{E(z)} = \frac{1 - 0,82z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (3.22)$$

$$M(z) - z^{-1}M(z) = E(z) - 0,82z^{-1}E(z)$$

$$m(k) = m(k-1) + e(k) - 0,82e(k-1) \quad (3.23)$$

### 3.4.4. Bilinear Transformation

Langkah-langkah yang digunakan pada metode *Bilinear Transformation* adalah sebagai berikut:

Substitusikan  $s = \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1}$  pada fungsi alih kontroler  $PI(s)$ , sehingga akan didapatkan fungsi alih  $PI(z)$ .

$$PI(z) = \frac{2,5 \left( \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1} \right) + 82,5}{\left( \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1} \right)} \quad (3.24)$$

Dari persamaan (3.24), maka akan didapatkan nilai  $PI(z)$  sebagai berikut.

$$PI(z) = \frac{2,5 \left( \frac{2}{0,006} \frac{z-1}{z+1} \right) + 82,5}{\left( \frac{2}{0,006} \frac{z-1}{z+1} \right)}$$

$$PI(z) = \frac{2,7z - 2,25}{z - 1} \quad (3.25)$$

Sehingga didapatkan algoritma persamaan beda dari metode *Bilinear Transformation*.

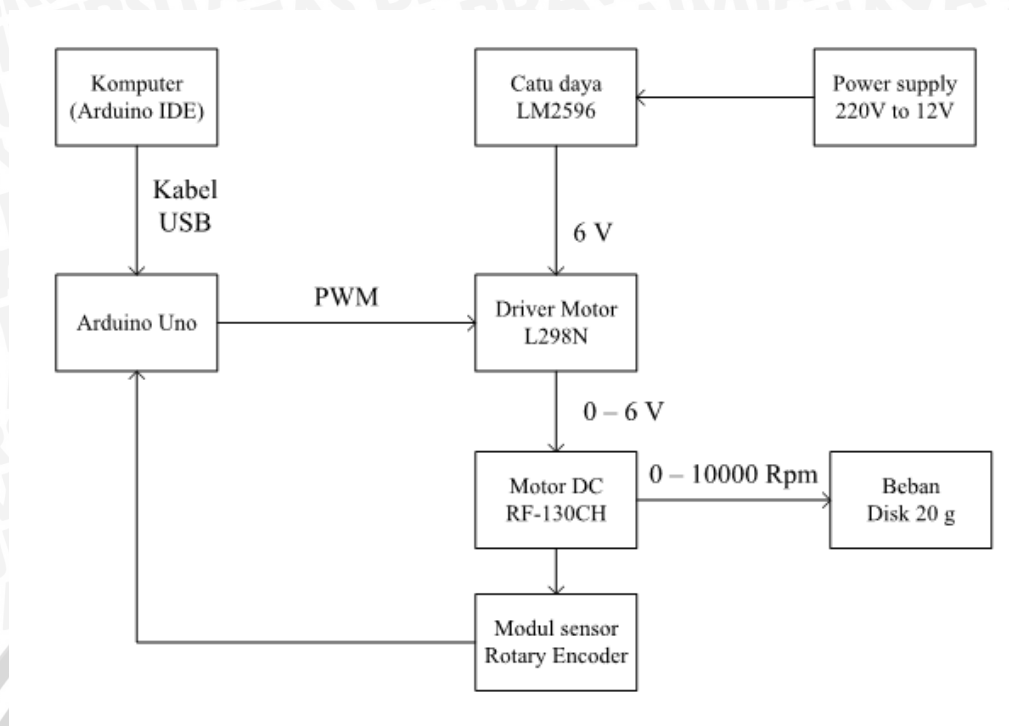
$$\frac{M(z)}{E(z)} = \frac{2,7 - 2,25z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (3.26)$$

$$M(z) - z^{-1}M(z) = 2,7E(z) - 2,25z^{-1}E(z)$$

$$m(k) = m(k-1) + 2,7e(k) - 2,25e(k-1) \quad (3.27)$$

### 3.5. Pembuatan Perangkat Keras

Pembuatan perangkat keras dilakukan sebagai langkah awal sebelum terbentuknya sistem beserta programnya. Hal ini dimaksudkan agar *rpm* kecepatan motor DC sesuai dengan *setpoint* yang diinginkan dan sistem dapat bekerja dengan baik sesuai yang direncanakan. Skema perangkat keras ditunjukkan pada Gambar 3.4.



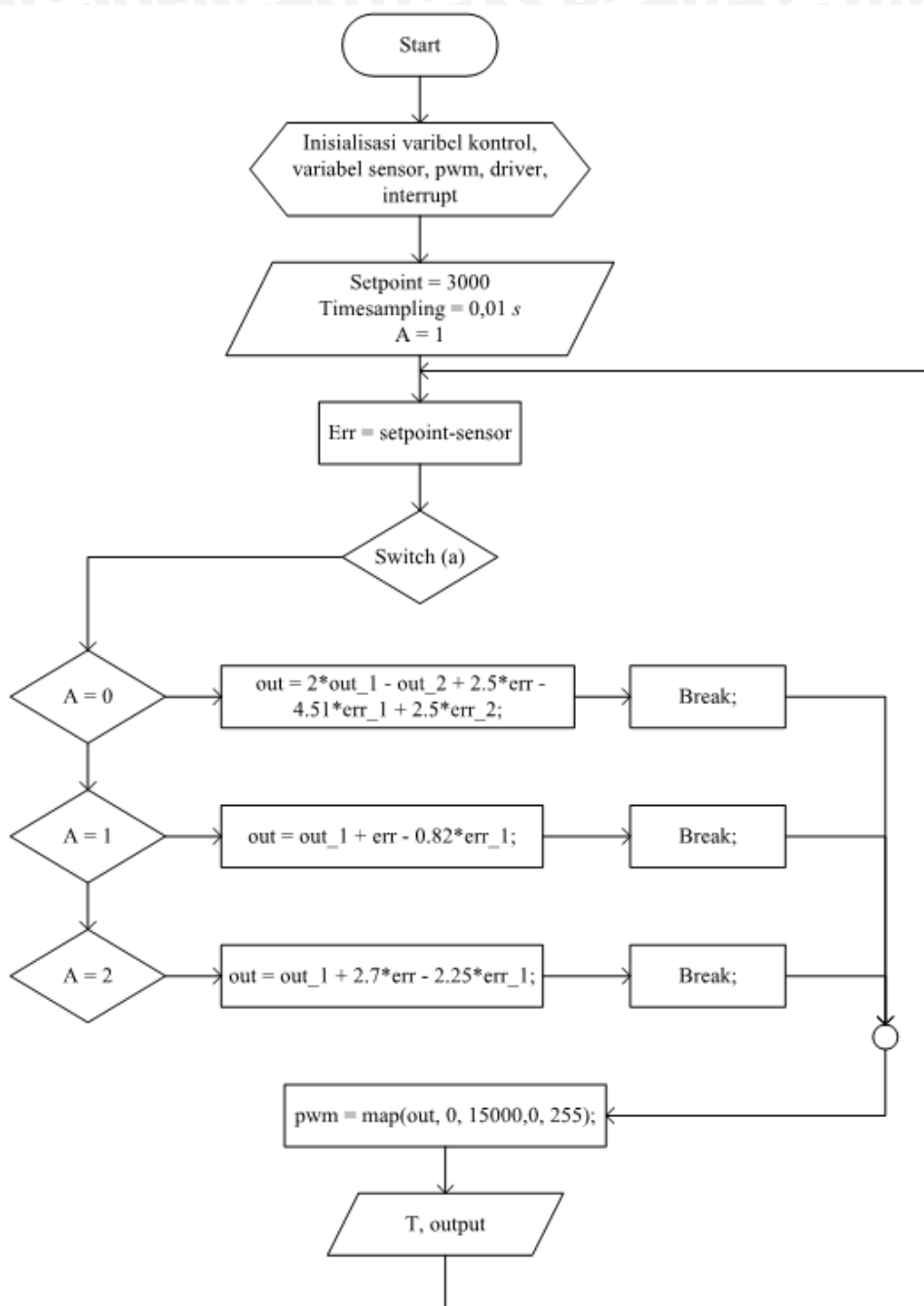
Gambar 3.4 Skema Perangkat Keras

Berdasarkan Gambar 3.4, skema perangkat keras terdiri dari komputer, Arduino Uno, catu daya, *driver* motor, motor DC, sensor *rotary encoder*, disk. Masing-masing perangkat memiliki kegunaan sebagai berikut:

- Komputer sebagai *interface serial monitor* dan memprogram perangkat Arduino uno.
- Arduino Uno sebagai kontroler PI pada sistem yang dirancang. Sinyal keluaran dari Arduino Uno berupa PWM untuk masukan *driver* motor.
- Catu daya untuk memberikan *supply* pada *driver* motor.
- Driver* motor sebagai perangkat yang digunakan untuk mengatur tegangan masukan pada motor DC.
- Motor DC sebagai *plant* pada sistem yang dirancang.
- Sensor *rotary encoder* sebagai pembaca kecepatan untuk *feedback* ke Arduino Uno.
- Disk* sebagai beban yang digunakan pada saat pengujian.

### 3.6. Flowchart Program

*Flowchart* program merupakan alur proses program yang dilakukan oleh kontroler pada saat implementasi. *Flowchart* program ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Flowchart Program

Berdasarkan Gambar 3.5, program berjalan pertama kali dengan menginisialisasi variabel-variabel yang digunakan dalam perhitungan, lalu membaca masukan berupa *setpoint*, *time sampling* dan variabel *a*. variabel *a* digunakan untuk menentukan jenis dari metode diskrit yang digunakan. Selanjutnya sistem akan menghitung nilai *error*. Ketika nilai *error* telah didapatkan maka program akan mengeksekusi metode diskrit yang digunakan untuk menentukan nilai *output* dari kontroler PI. Nilai tersebut

selanjutnya akan dikonversi menjadi sinyal PWM untuk *driver* motor. Pada saat program dijalankan oleh Arduino Uno, nilai yang diamati diberikan oleh *serial monitor*.





## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

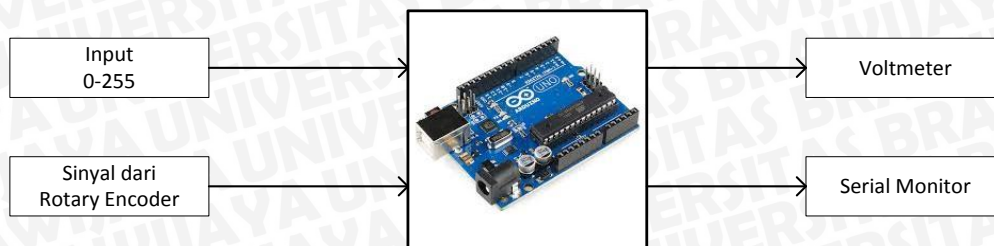
Hasil dan pembahasan dilakukan dengan melakukan simulasi dan menganalisis sistem serta melakukan pengujian keseluruhan sistem. Tujuan simulasi dan analisis sistem adalah untuk menentukan apakah alat yang telah dibuat dapat berfungsi dengan baik sesuai dengan skema pembuatan. Pengujian keseluruhan sistem bertujuan untuk menguji apakah parameter yang sudah didapatkan dapat diaplikasikan pada alat. Pengujian dibagi menjadi beberapa bagian, yaitu:

1. Pengujian Arduino
2. Pengujian karakteristik *driver* motor
3. Pengujian karakteristik motor DC
4. Pengujian Kontroler Proporsional Integral
5. Pengujian *open loop* sistem
6. Pengujian sistem *Zero Order Hold (ZOH) Equivalence*
7. Pengujian sistem *Pole-Zero Mapping*
8. Pengujian sistem *Bilinear Transformation*
9. Pengujian kinerja sistem terhadap beban dan tegangan

#### 4.1. Pengujian Arduino

Pengujian Arduino bertujuan untuk melihat kinerja Arduino dalam mengeksekusi program yang diberikan dan untuk melihat apakah *port-port* pada *PIN input output* bekerja dengan baik. Beberapa *port* yang digunakan dalam penelitian ini yaitu digital *PIN 6* sebagai *output* berupa sinyal PWM 8-bit dan digital *PIN 2* sebagai *input* berupa *external interrupt* untuk menangani masukan berupa sinyal keluaran *rotary encoder*.

Prosedur pengujian untuk digital *PIN 2* dilakukan dengan memberikan sinyal masukan dari *rotary encoder* pada Arduino lalu diamati pembacaan sinyal tersebut dengan mengamati isi pada *register Timer/Counter 1 (TCNT1)* pada *serial monitor*, sedangkan prosedur pengujian untuk digital *PIN 6* dengan memberikan masukan berupa nilai 0-255 lalu diamati besarnya tegangan yang dihasilkan pada *PIN output* menggunakan voltmeter. Prosedur pengujian tersebut diberikan oleh Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Prosedur Pengujian Arduino

Hasil pengujian PIN 6 *output* PWM yang telah dilakukan diberikan oleh Tabel 4.1.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

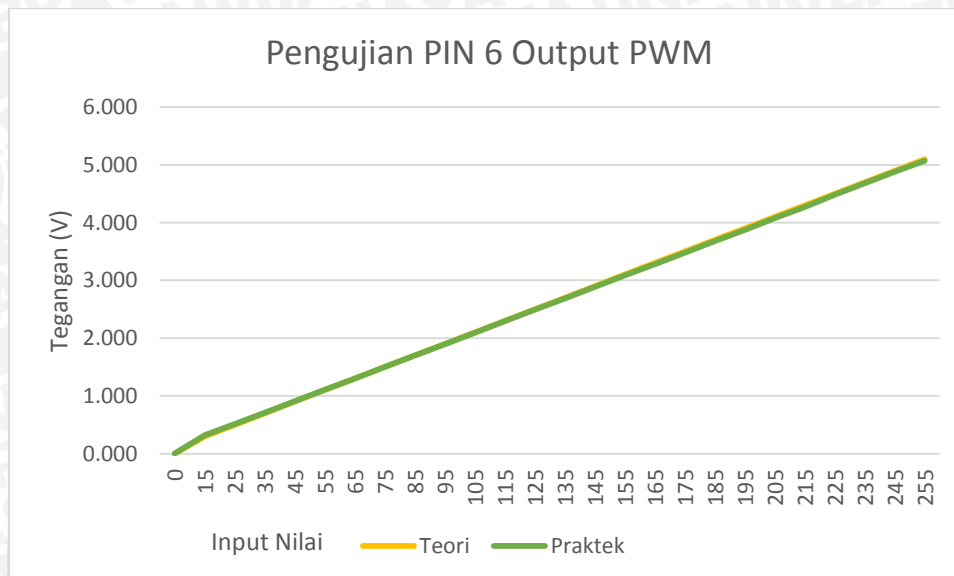


Tabel 4.1 Hasil Pengujian PIN 6 output PWM

| Nilai Input | Tegangan Output (Teori) | Tegangan Output (Praktek) |
|-------------|-------------------------|---------------------------|
| 0           | 0                       | 0,003                     |
| 15          | 0,3                     | 0,320                     |
| 25          | 0,5                     | 0,514                     |
| 35          | 0,7                     | 0,711                     |
| 45          | 0,9                     | 0,908                     |
| 55          | 1,1                     | 1,105                     |
| 65          | 1,3                     | 1,302                     |
| 75          | 1,5                     | 1,501                     |
| 85          | 1,7                     | 1,699                     |
| 95          | 1,9                     | 1,897                     |
| 105         | 2,1                     | 2,095                     |
| 115         | 2,3                     | 2,293                     |
| 125         | 2,5                     | 2,491                     |
| 135         | 2,7                     | 2,689                     |
| 145         | 2,9                     | 2,887                     |
| 155         | 3,1                     | 3,084                     |
| 165         | 3,3                     | 3,282                     |
| 175         | 3,5                     | 3,478                     |
| 185         | 3,7                     | 3,676                     |
| 195         | 3,9                     | 3,873                     |
| 205         | 4,1                     | 4,080                     |
| 215         | 4,3                     | 4,270                     |
| 225         | 4,5                     | 4,480                     |
| 235         | 4,7                     | 4,680                     |
| 245         | 4,9                     | 4,880                     |
| 255         | 5,1                     | 5,070                     |

Tegangan output teori merupakan hasil perhitungan dari rasio nilai *input* terhadap nilai maksimal *input* dikalikan dengan tegangan kerja Arduino yang terukur. Berdasarkan pengukuran yang telah dilakukan tegangan kerja Arduino sebesar 5 V

sehingga nilai tegangan *output* teori bisa ditentukan. Tegangan *output* praktek merupakan hasil pengukuran langsung pada PIN *output* 6 sebagai penghasil sinyal keluaran berupa *Pulse Width Modulation (PWM)*. Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan terhadap PIN digital nomor 6 dapat diketahui perbandingan antara tegangan *output* secara teori dan praktek seperti diberikan oleh Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Grafik Pengujian PIN 6 *Output PWM*

Gambar 4.2 menunjukkan bahwa nilai tegangan *output* secara teori dan praktek adalah sama namun berdasarkan perhitungan tegangan keluaran secara teori dan praktek memiliki *error* maksimal sebesar 0.58%.

Pengujian selanjutnya adalah melihat kinerja PIN digital 2 sebagai masukan terhadap sinyal keluaran *rotary encoder* sehingga dapat digunakan untuk mengukur kecepatan dari motor DC yang digunakan. Hasil pengujian yang telah dilakukan diberikan oleh Tabel 4.2. Data pada tabel tersebut berasal dari pengambilan data pada *serial monitor* dengan cara mengambil sekumpulan data secara acak namun memiliki urutan waktu.

Tabel 4.2 Hasil Pengujian PIN 2

| Waktu (ms) | TCNT1 | Nilai Sampling |
|------------|-------|----------------|
| 3935       | 961   | 3137           |
| 3947       | 4134  | 3174           |
| 3960       | 7308  | 3171           |
| 3973       | 10479 | 3167           |
| 3986       | 13646 | 3167           |
| 3998       | 16813 | 3164           |
| 4011       | 19977 | 3160           |
| 4024       | 23137 | 3160           |
| 4036       | 26297 | 3156           |
| 4048       | 29453 | 3153           |
| 4062       | 32606 | 3152           |
| 4074       | 35758 | 3150           |
| 4086       | 38908 | 3146           |
| 4100       | 42054 | 3145           |
| 4112       | 45199 | 3142           |
| 4124       | 48341 | 3140           |
| 4136       | 51481 | 3183           |
| 4150       | 54619 | 3135           |
| 4162       | 57754 | 3134           |
| 4174       | 60888 | 3131           |

Nilai sampling pada Tabel 4.2 ditentukan dengan menggunakan persamaan 4.1.

$$sampling = TCNT1(t) - TCNT1(t - 1) \quad (4.1)$$

Berdasarkan tabel 4.2 dapat diketahui nilai rata-rata pembacaan *sampling* adalah sebesar 3152.9 dan *error* maksimal pembacaan adalah sebesar 0,66%. Nilai frekuensi dari sinyal keluaran *rotary encoder* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 4.2.

$$frekuensi = \frac{freq\_Clock\_Timer / Counter}{sampling} \quad (4.2)$$

Dengan frekuensi *clock timer counter* yang digunakan sebesar 250 kHz dan rata-rata *sampling* sebesar 3152,9 maka frekuensi yang dihasilkan adalah sebesar 79,2 Hz

dan dengan mengalikan nilai frekuensi dengan 60 maka *speed* yang dihasilkan adalah sebesar 4757,52 *rpm*.

#### 4.2. Pengujian Karakteristik Driver Motor

Pengujian karakteristik *driver* motor bertujuan untuk mengetahui masukan *duty cycle* PWM dari mikrokontroler dengan besarnya nilai perubahan *Vrms*. Peralatan yang digunakan dalam mencari karakteristik *driver* motor terdiri atas:

1. Motor DC
2. Kabel
3. Arduino Uno
4. *Power Supply*
5. Voltmeter

Langkah pengujian meliputi:

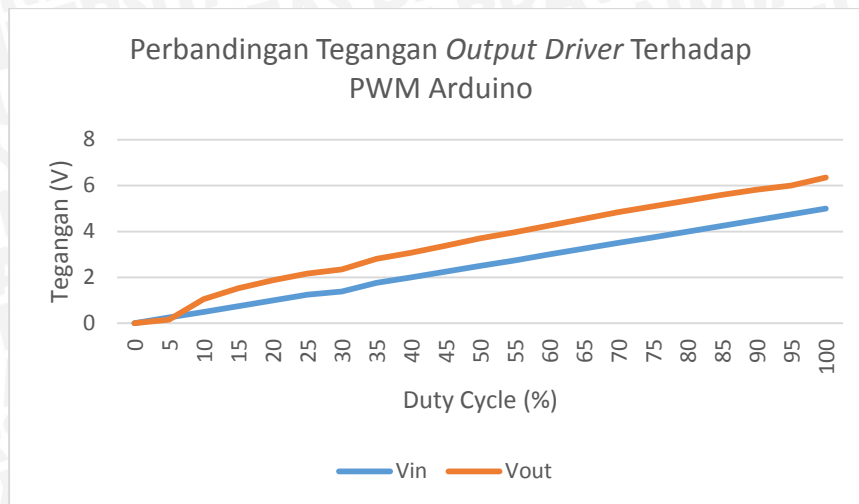
1. Menghubungkan catu motor ke *power supply* dan menghubungkan motor ke driver.
2. Menghubungkan *input* tegangan driver motor dengan PIN *output* PWM di arduino uno.
3. Menghubungkan *output* tegangan driver motor dengan multimeter.
4. Mengatur *duty cycle* sinyal PWM pada arduino uno dengan nilai 0-100%.

Data hasil pengujian *driver* motor ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Data Pengujian *Driver* Motor

| Duty Cycle<br>(%) | $V_{in}$ | $V_{out}$ |
|-------------------|----------|-----------|
| 0                 | 0        | 0         |
| 5                 | 0,25     | 0,159     |
| 10                | 0,5      | 1,045     |
| 15                | 0,74     | 1,52      |
| 20                | 1        | 1,873     |
| 25                | 1,25     | 2,168     |
| 30                | 1,39     | 2,355     |
| 35                | 1,76     | 2,803     |
| 40                | 2        | 3,08      |
| 45                | 2,25     | 3,385     |
| 50                | 2,5      | 3,7       |
| 55                | 2,74     | 3,966     |
| 60                | 3        | 4,26      |
| 65                | 3,25     | 4,55      |
| 70                | 3,5      | 4,84      |
| 75                | 3,74     | 5,1       |
| 80                | 4        | 5,35      |
| 85                | 4,25     | 5,6       |
| 90                | 4,5      | 5,82      |
| 95                | 4,7      | 6         |
| 100               | 5        | 6,35      |

Grafik hasil pengujian *driver* motor ditunjukkan dalam Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Grafik Perbandingan Tegangan *Output Driver* - PWM Arduino

Berdasarkan Gambar 4.3, tegangan *output* pada *driver* sama dengan tegangan PWM Arduino namun berbeda *level* dikarenakan catu daya yang digunakan berbeda.

#### 4.3. Pengujian Karakteristik Motor DC

Pengujian karakteristik motor DC dilakukan untuk mengetahui karakter atau *gain* dari motor DC. Hasil diperoleh dengan cara mengamati kecepatan motor DC terhadap perubahan tegangan motor DC. Peralatan yang digunakan dalam mencari karakteristik dari motor DC terdiri atas:

1. *Power Supply*
2. Motor DC
3. Kabel penghubung

Langkah pengujian meliputi:

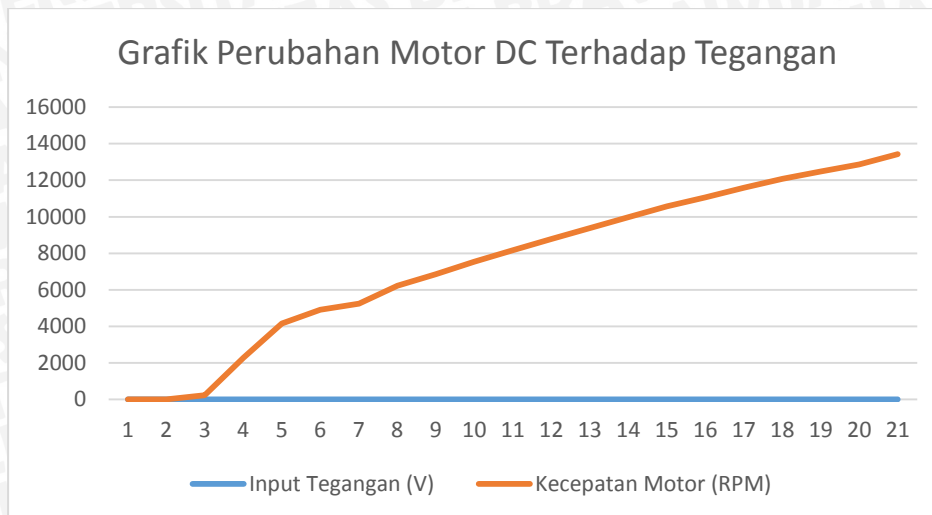
1. Menghubungkan tegangan *output power supply* dengan motor DC.
2. Mengatur tegangan *output power supply* dari 0V sampai dengan 6V sebagai tegangan sumber motor DC.
3. Menggunakan tachometer digital untuk mengetahui nilai putaran motor.
4. Mengamati dan mencatat hasil pengukuran putaran motor.

Data hasil pengujian tegangan *input* terhadap kecepatan motor DC ditunjukkan dalam Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Data Pengujian Kecepatan Motor DC Terhadap Tegangan

| Input Tegangan<br>(V) | Kecepatan Motor<br>(RPM) |
|-----------------------|--------------------------|
| 0                     | 0                        |
| 0,159                 | 0                        |
| 1,045                 | 225                      |
| 1,52                  | 2287                     |
| 1,873                 | 4162                     |
| 2,168                 | 4912                     |
| 2,355                 | 5250                     |
| 2,803                 | 6225                     |
| 3,08                  | 6862                     |
| 3,385                 | 7537                     |
| 3,7                   | 8175                     |
| 3,966                 | 8775                     |
| 4,26                  | 9375                     |
| 4,55                  | 9975                     |
| 4,84                  | 10575                    |
| 5,1                   | 11062                    |
| 5,35                  | 11587                    |
| 5,6                   | 12075                    |
| 5,82                  | 12487                    |
| 6                     | 12862                    |
| 6,35                  | 13425                    |

Grafik hasil pengujian tegangan *input* terhadap kecepatan motor DC ditunjukkan dalam Gambar 4.4.

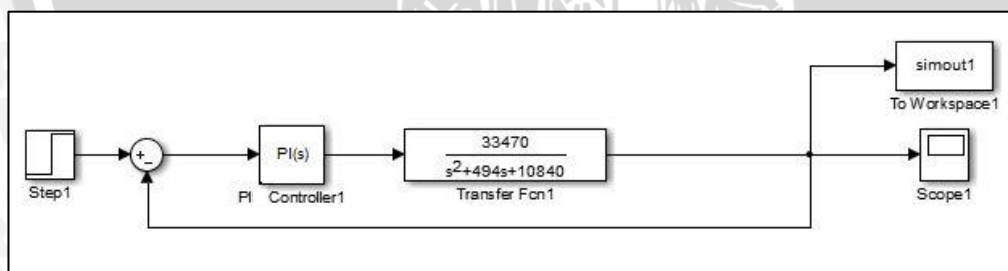


Gambar 4.4 Grafik Perubahan Kecepatan Motor DC Terhadap Tegangan

Berdasarkan Gambar 4.4, perubahan tegangan adalah linier dengan kecepatan motor DC, akan tetapi terdapat sedikit *delay* pada awal. Hal ini disebabkan karena adanya *delay time* pada komponen *driver* motor.

#### 4.4. Pengujian Kontroler Proporsional Integral Menggunakan Matlab

Pengujian kontroler PI menggunakan simulasi matlab dilakukan dengan membuat blok diagram dengan masukan unit *step*. Blok *transfer function* diisi dengan fungsi alih motor, sementara blok PI kontroler diisi dengan nilai  $P = 2,5$  dan  $I = 82,5$ . Simulasi dari blok diagram ini ditunjukkan oleh Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Diagram Blok Pengujian Kontroler PI

Setelah blok digram dibuat seperti pada Gambar 4.5, simulasi dijalankan melalui *simulink* dan grafiknya dapat dilihat pada blok *scope*. Grafik dari respon sistem ditunjukkan oleh gambar 4.6.

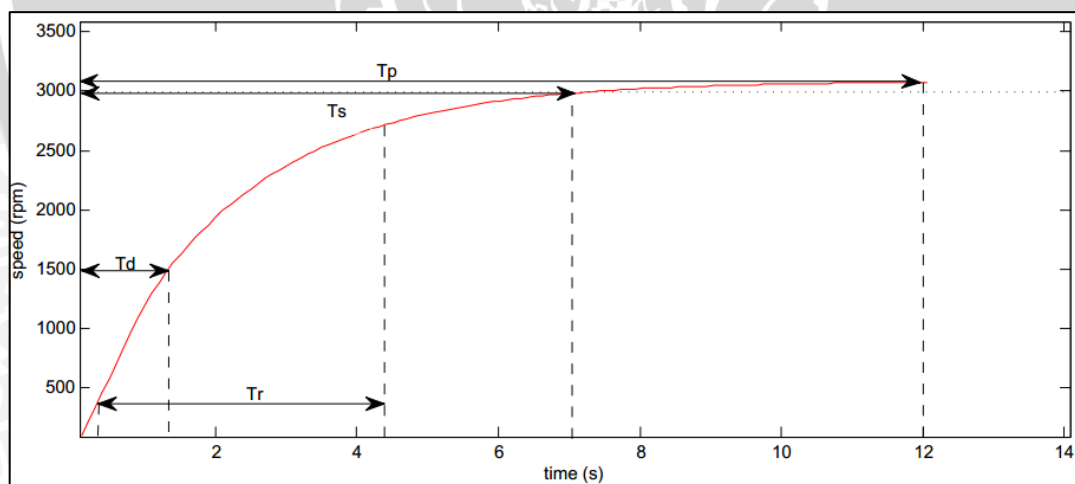


Gambar 4.6 Respon Sistem Kontroler PI

Berdasarkan grafik respon sistem pada Gambar 4.6, maka dapat diketahui juga nilai *rise time* 0,00803 s, *settling time* 0,0396 s, dan *overshoot* 5,44%.

#### 4.5. Pengujian Open Loop Sistem

Pengujian *open loop* sistem bertujuan untuk mengetahui bagaimana respon motor ketika sedang bekerja. *Setpoint* pada pengujian ini sebesar 3000 rpm. Grafik hasil pengujian *open loop* sistem dapat dilihat pada Gambar 4.7.

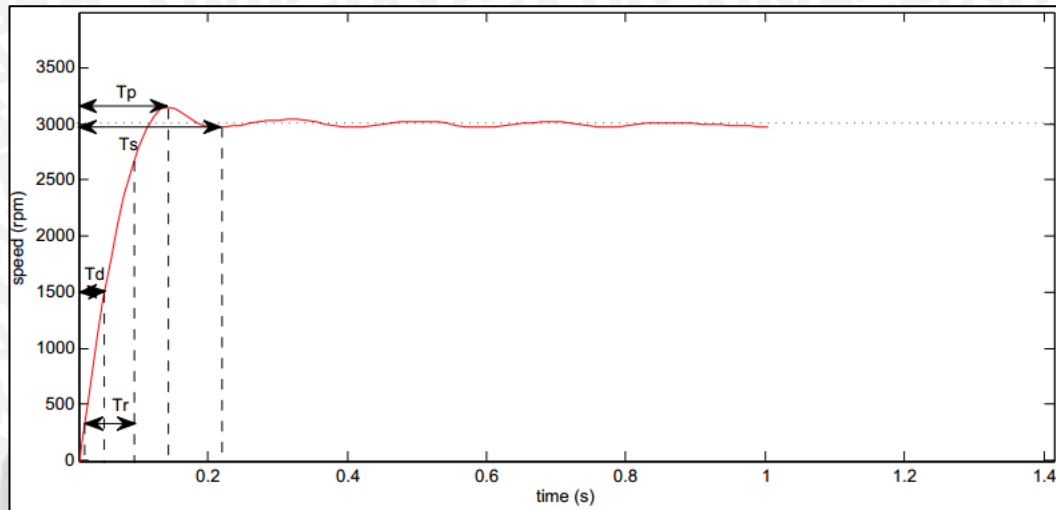


Gambar 4.7 Respon Pengujian Open Loop Sistem

Berdasarkan grafik respon pengujian *open loop* sistem pada Gambar 4.7, maka dapat diketahui juga nilai *delay time* 1,4 s, *rise time* 4,28 s, *peak time* 12 s, *settling time* 7 s, dan tidak terdapat *maximum overshoot* dan *error steady state*.

#### 4.6. Pengujian Sistem Zero Order Hold (ZOH) Equivalence

Pengujian sistem *Zero Order Hold (ZOH) Equivalence* bertujuan untuk mengetahui bagaimana respon motor ketika sedang bekerja. *Setpoint* pada pengujian ini sebesar 3000 rpm. Grafik hasil pengujian sistem *Zero Order Hold (ZOH) Equivalence* dapat dilihat pada Gambar 4.8.

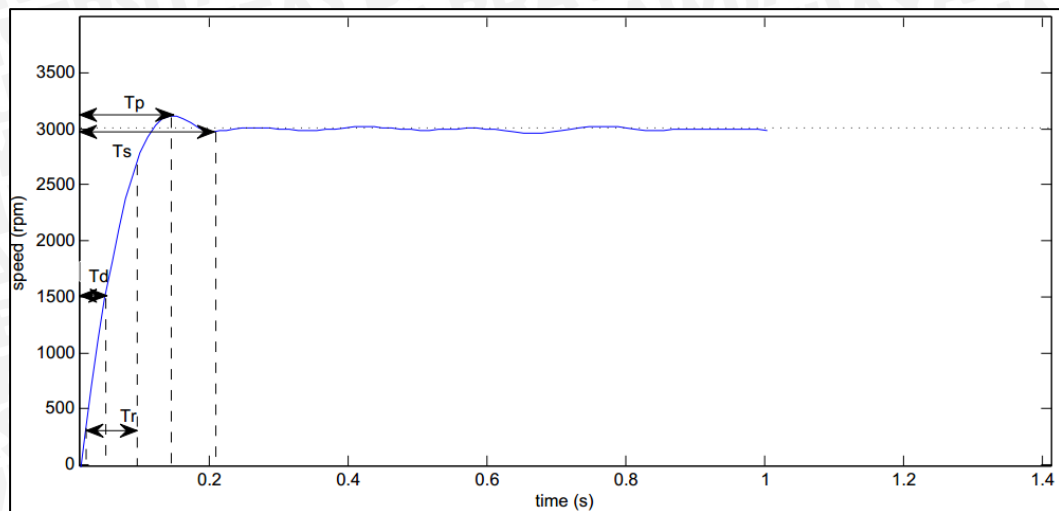


Gambar 4.8 Respon Pengujian Sistem dengan *Zero Order Hold (ZOH) Equivalence*

Berdasarkan grafik respon pengujian sistem dengan *Zero Order Hold (ZOH) Equivalence* pada Gambar 4.8, maka dapat diketahui juga nilai *delay time* 0,04 s, *rise time* 0,09 s, *peak time* 0,12 s, *maximum overshoot* 10%, *settling time* 0,225 s, dan *error steady state* 2,16%.

#### 4.7. Pengujian Sistem Pole-Zero Mapping

Pengujian sistem *Pole-Zero Mapping* bertujuan untuk mengetahui bagaimana respon motor ketika sedang bekerja. *Setpoint* pada pengujian ini sebesar 3000 rpm. Grafik hasil pengujian sistem *Pole-Zero Mapping* dapat dilihat pada Gambar 4.9.

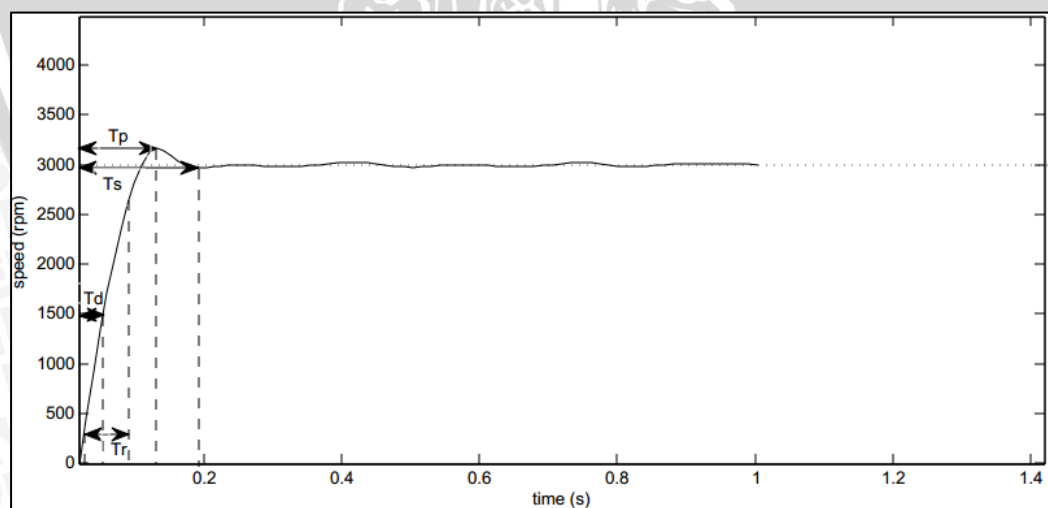


Gambar 4.9 Respon Pengujian Sistem dengan *Pole-Zero Mapping*

Berdasarkan grafik respon pengujian sistem dengan *Pole-Zero Mapping* pada Gambar 4.9, maka dapat diketahui juga nilai *delay time* 0,03 s, *rise time* 0,09 s, *peak time* 0,14 s, *maximum overshoot* 13,3%, *settling time* 0,211 s, dan *error steady state* 2,47%.

#### 4.8. Pengujian Sistem Bilinear Transformation

Pengujian sistem *Bilinear Transformation* bertujuan untuk mengetahui bagaimana respon motor ketika sedang bekerja. *Setpoint* pada pengujian ini sebesar 3000 rpm. Grafik hasil pengujian sistem *Bilinear Transformation* dapat dilihat pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Respon Pengujian Sistem dengan *Bilinear Transformation*

Berdasarkan grafik respon pengujian sistem dengan *Bilinear Transformation* pada Gambar 4.10, maka dapat diketahui juga nilai *delay time* 0,06 s, *rise time* 0,08 s, *peak*

time 0,13 s, maximum overshoot 6,6%, settling time 0,192 s, dan error steady state 2,35%.

#### 4.9. Rekapitulasi Analisis Respon Pengujian Sistem

Rekapitulasi analisis respon pengujian sistem *open loop*, *Zero Order Hold (ZOH) Equivalence*, *Pole-Zero Mapping*, dan *Bilinear Transformation* ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Rekapitulasi Analisis Respon Pengujian Sistem

| Parameter Kontrol          | <i>Open Loop</i> | <i>Zero Order Hold (ZOH) Equivalence</i> | <i>Pole-Zero Mapping</i> | <i>Bilinear Transformation</i> |
|----------------------------|------------------|------------------------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| <b>Delay Time (Td)</b>     | 1,4 s            | 0,04 s                                   | 0,03 s                   | 0,06 s                         |
| <b>Rise Time (Tr)</b>      | 4,28 s           | 0,09 s                                   | 0,09 s                   | 0,08 s                         |
| <b>Peak Time (Tp)</b>      | 12 s             | 0,12 s                                   | 0,14 s                   | 0,13 s                         |
| <b>Max. Overshoot (Mp)</b> | 0%               | 10%                                      | 13,3%                    | 6,6%                           |
| <b>Settling Time (Ts)</b>  | 7 s              | 0,225 s                                  | 0,211 s                  | 0,192 s                        |
| <b>Error Steady State</b>  | 0%               | 2,16%                                    | 2,47%                    | 2,35%                          |

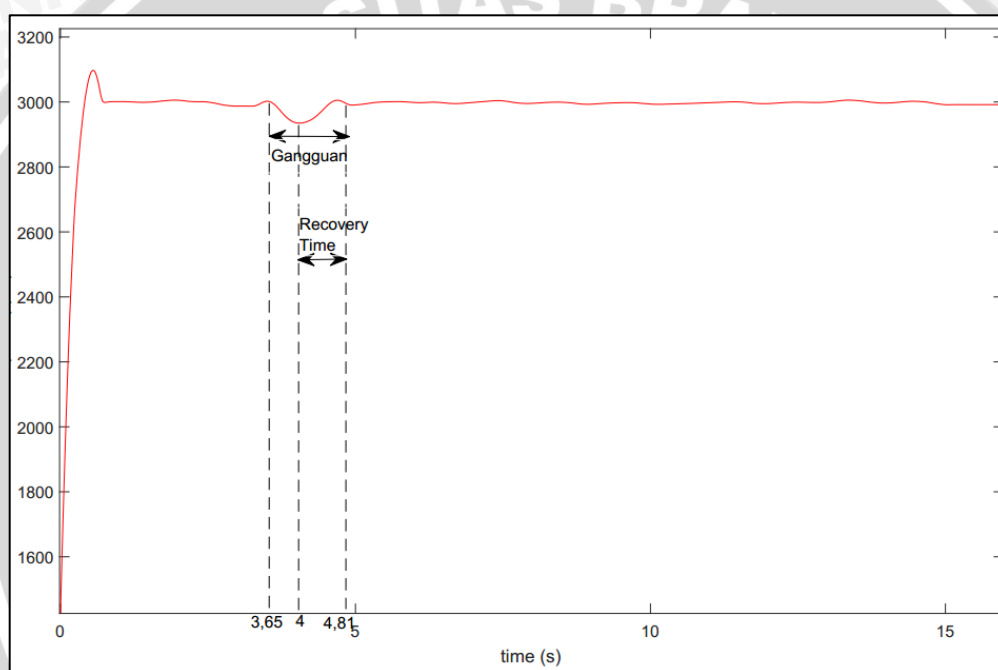
Berdasarkan Tabel 4.5, diketahui bahwa:

1. *Delay time* dari metode *Pole-Zero Mapping* lebih cepat daripada *Zero Order Hold (ZOH) Equivalence* dan *Bilinear Transformation*.
2. *Rise time* dari metode *Bilinear Transformation* lebih cepat daripada *Zero Order Hold (ZOH) Equivalence* dan *Pole-Zero Mapping*.
3. *Peak time* dari metode *Zero Order Hold (ZOH) Equivalence* lebih cepat daripada *Pole-Zero Mapping* dan *Bilinear Transformation*.
4. *Max. overshoot* dari metode *Bilinear Transformation* lebih kecil daripada *Zero Order Hold (ZOH) Equivalence* dan *Pole-Zero Mapping*.
5. *Settling time* dari metode *Bilinear Transformation* lebih cepat daripada *Zero Order Hold (ZOH) Equivalence* dan *Pole-Zero Mapping*.

6. *Error steady state* yang dihasilkan dari 3 metode telah sesuai dengan spesifikasi design, yaitu nilai *error* dibawah 5%.

#### 4.10. Pengujian Kinerja Sistem Terhadap Beban dan Gangguan

Pengujian sistem dengan peningkatan beban dan gangguan berupa pengereman singkat dari putaran motor bertujuan untuk melihat kinerja sistem terhadap penambahan beban dan reaksi sistem jika terdapat gangguan. Prosedur pengujian ini adalah dengan mengubah beban menjadi 2 kali beban semula, lalu ketika telah mencapai *steady state* diberikan gangguan berupa tahanan singkat pada rotor. Hasil pengujian diberikan oleh grafik pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11 Respon Pengujian Sistem Dengan Beban dan Tegangan

Berdasarkan Gambar 4.11 didapatkan waktu gangguan berlangsung selama 1,16 s dengan recovery time selama 0,18 s.



## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Berdasarkan pengujian dan analisis yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Parameter PI pada penelitian ini didapatkan dengan menggunakan metode *Integral of the Square Error (ISE)*. Langkah awal yang dilakukan adalah mengubah nilai fungsi alih motor DC ke dalam bentuk  $\frac{\omega}{Va} = \frac{3,09}{(0,0021 s+1)(0,0434 s+1)}$ . Dari nilai fungsi alih tersebut, nantinya akan didapatkan indeks performansi yang dimana nilai  $T_i$  diturunkan terhadap 0. Nilai parameter Proporsional Integral dengan menggunakan rumus *Integral of the Square Error (ISE)* didapatkan dengan mengasumsikan nilai  $K_p$  sebesar 2,5 sehingga akan ditemukan nilai  $T_i$  dan  $K_i$  yang kemudian perhitungannya akan diprogram menggunakan program Matlab. Berdasarkan *syntaks* pada program Matlab, Parameter PI dengan metode *Integral of the Square Error* akan didapatkan nilai  $K_p = 2,5$  dan nilai  $K_i = 82,5$ .
2. Berdasarkan penelitian yg telah dilakukan, ketiga metode berhasil memperbaiki respon sistem secara signifikan. Secara keseluruhan *Bilinear Transformation* lebih baik dibandingkan dengan *Zero Order Hold (ZOH) Equivalence* dan *Pole-Zero Mapping*, meskipun *peak time* dan *delay time* tidak secepat *Zero Order Hold (ZOH) Equivalence* dan *Pole-Zero Mapping*.

#### 5.2. Saran

Untuk pencarian parameter  $K_p$  dan  $K_i$ , bisa menggunakan metode kriteria optimum integral yang lain, seperti *Integral of the Absolute Value of the Error (IAE)*, *Integral of Square-Error Multiplied by Time (ITSE)*, atau *Integral of Absolute Error Multiplied by Time (ITAE)*.



## DAFTAR PUSTAKA

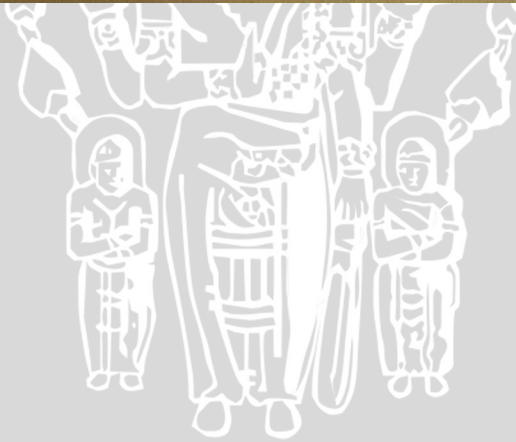
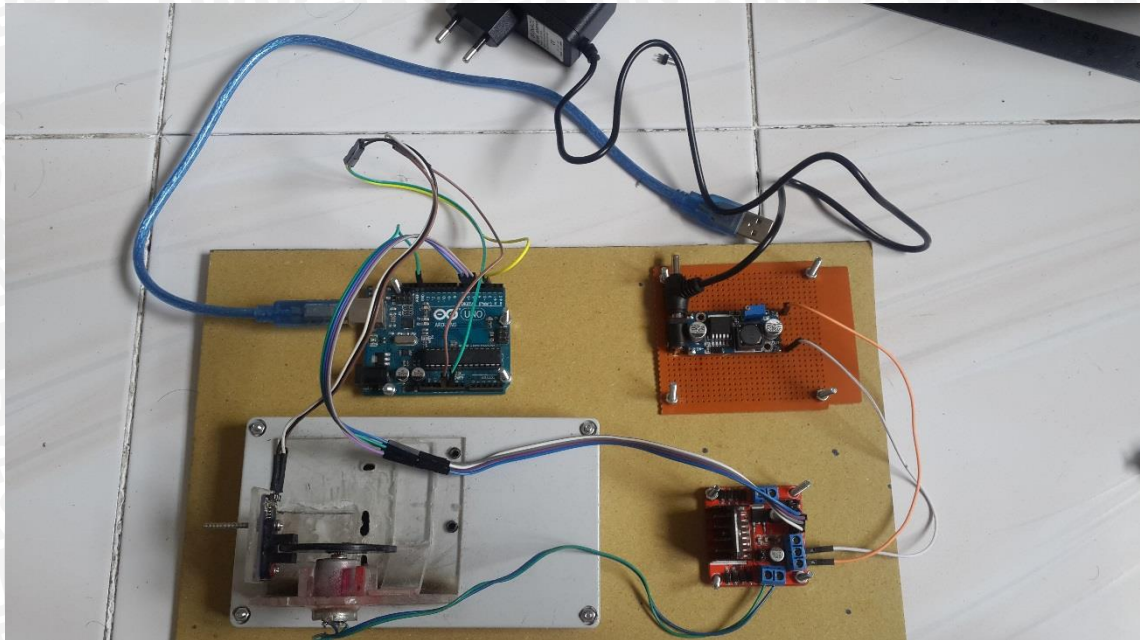
- Asnil dan Husnaini, Irma. 2010. "Sistem Kontrol Optimal Pada Kontrol Posisi Motor DC". *Jurnal Teknik Energi*. 6(1). 1-11.
- Gopal, M. 1988. *Digital Control Engineering*. New Delhi: Wiley Eastern Limited.
- Imantaka, Christopher. 2016. *Perancangan PI Kontrol Kecepatan Motor DC Dengan Kombinasi Pole Placement dan Symetrical Optimum*. Malang: Skripsi. Teknik Elektro. Universitas Brawijaya. Malang.
- Leonhard, Werner. 1985. *Control of Electrical Drives*. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin.
- Levine, William S. 1996. *The Control Handbook*. US: CRC Press and IEEE Press.
- Ogata, Katsuhiko. 1997. *Teknik Kontrol Automatik*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Ogata, Katsuhiko. 2010. *Modern Control Engineering*, Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall, One Lake Street, Upper Saddle River, New Jersey 07458. Fifth edition.
- Parallax. 2010. *Parallax Standard Servo*. California: Parallax.
- Rusli, Mochammad. 2015. *Dasar Teknik Kontrol*. Malang: UB Press.
- Soemarwanto. 2010. *Dasar Konversi Energi Elektrik*. Malang.



UNIVERSITAS BRAWIJAYA



LAMPIRAN I  
FOTO ALAT



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

LAMPIRAN II  
PERHITUNGAN KONTROLER PI  
MENGUNAKAN METODE ISE



$$F_{ol} = Kp \left[ \frac{1+T_i s}{T_i s} \right] \left[ \frac{3,09}{(0,0021s+1)(0,0434s+1)} \right]$$

$$F_{ol} = \left[ \frac{Kp + Kp T_i s}{T_i s} \right] \left[ \frac{3,09}{(0,0021s+1)(0,0434s+1)} \right]$$

$$F_{ol} = \left[ \frac{3,09 Kp T_i s + 3,09 Kp}{T_i s (9,114 \times 10^{-5} s^2 + 0,0455s + 1)} \right]$$

$$F_{ol} = \frac{3,09 Kp T_i s + 3,09 Kp}{s (9,114 \times 10^{-5} T_i s^2 + 0,0455 T_i s + T_i)}$$

$$E(s) = \frac{1}{1+F_{ol}} \times \frac{1}{s}$$

$$E(s) = \frac{1}{1 + \frac{3,09 Kp T_i s + 3,09 Kp}{s (9,114 \times 10^{-5} T_i s^2 + 0,0455 T_i s + T_i)}} \times \frac{1}{s}$$

$$E(s) = \frac{1}{\frac{9,114 \times 10^{-5} T_i s^3 + 0,0455 T_i s^2 + T_i s + 3,09 Kp T_i s + 3,09 Kp}{s (9,114 \times 10^{-5} T_i s^2 + 0,0455 T_i s + T_i)}} \times \frac{1}{s}$$

$$E(s) = \frac{s (9,114 \times 10^{-5} T_i s^2 + 0,0455 T_i s + T_i)}{9,114 \times 10^{-5} T_i s^3 + 0,0455 T_i s^2 + T_i s + 3,09 Kp T_i s + 3,09 Kp} \times \frac{1}{s}$$

$$E(s) = \frac{9,114 \times 10^{-5} T_i s^2 + 0,0455 T_i s + T_i}{9,114 \times 10^{-5} T_i s^3 + 0,0455 T_i s^2 + (1 + 3,09 Kp) T_i s + 3,09 Kp}$$

$$c_0 = T_i$$

$$c_1 = 0,0455 T_i$$

$$c_2 = 9,114 \times 10^{-5} T_i$$

$$d_0 = 3,09 Kp$$

$$d_1 = (1 + 3,09 Kp) T_i$$

$$d_2 = 0,0455 T_i$$

$$d_3 = 9,114 \times 10^{-5} T_i$$

$$J_3 = \frac{c_2^2 d_0 d_1 + (c_1^2 - 2c_0 c_2) d_0 d_3 + c_0^2 d_2 d_3}{2d_0 d_3 (d_1 d_2 - d_0 d_3)}$$

$$\begin{aligned}
& (9,114 \times 10^{-5} T_i)^2 (3,09 Kp) (1 + 3,09 Kp) T_i \\
& + ((0,0455 T_i)^2 - 2(T_i)(9,114 \times 10^{-5} T_i))(3,09 Kp)(9,114 \times 10^{-5} T_i) \\
& + (T_i)^2 (0,0455 T_i)(9,114 \times 10^{-5} T_i) \\
J_3 = & \frac{2(3,09 Kp)(9,114 \times 10^{-5} T_i)((1 + 3,09 Kp) T_i (0,0455 T_i) - (3,09 Kp)(9,114 \times 10^{-5} T_i))}{8,306 \times 10^{-9} T_i^2 (3,09 Kp + 9,5481 Kp^2) T_i} \\
& + (1,8885 \times 10^{-3} T_i^2) 2,8162 \times 10^{-4} Kp T_i \\
& + 4,1468 \times 10^{-6} T_i^4 \\
J_3 = & \frac{5,632 \times 10^{-4} Kp T_i (0,1405 Kp T_i^2 + 0,0455 T_i^2 - 2,816 \times 10^{-4} Kp T_i)}{2,566 \times 10^{-8} Kp T_i^3 + 7,9306 \times 10^{-8} Kp^2 T_i^3 + 5,3183 \times 10^{-7} Kp T_i^3 + 4,1468 \times 10^{-6} T_i^4} \\
J_3 = & \frac{7,9129 \times 10^{-5} Kp^2 T_i^3 + 2,5625 \times 10^{-5} Kp T_i^3 - 1,5859 \times 10^{-7} Kp^2 T_i^2}{7,9129 \times 10^{-5} Kp^2 T_i^3 + 2,5625 \times 10^{-5} Kp T_i^3 - 1,5859 \times 10^{-7} Kp^2 T_i^2}
\end{aligned}$$

$$J_3 = \frac{7,9306 \times 10^{-8} Kp^2 T_i^3 + 5,5749 \times 10^{-7} Kp T_i^3 + 4,1468 \times 10^{-6} T_i^4}{7,9129 \times 10^{-5} Kp^2 T_i^3 + 2,5625 \times 10^{-5} Kp T_i^3 - 1,5859 \times 10^{-7} Kp^2 T_i^2}$$

$$J_3 = \frac{(7,9306 \times 10^{-8} Kp^2 + 5,5749 \times 10^{-7} Kp) T_i^3 + 4,1468 \times 10^{-6} T_i^4}{(7,9129 \times 10^{-5} Kp^2 + 2,5625 \times 10^{-5} Kp) T_i^3 - 1,5859 \times 10^{-7} Kp^2 T_i^2}$$

$$\frac{dJ_3}{dT_i} = \frac{x'y - xy'}{y^2} = 0$$

$$x' = \underbrace{1,6587 \times 10^{-5} T_i^3}_a + \underbrace{(2,3793 \times 10^{-7} Kp^2 + 1,6720 \times 10^{-6} Kp) T_i^2}_b$$

$$y = \underbrace{(7,9129 \times 10^{-5} Kp^2 + 2,5625 \times 10^{-5} Kp) T_i^3}_c - \underbrace{1,5859 \times 10^{-7} Kp^2 T_i^2}_d$$

$$x = \underbrace{4,1468 \times 10^{-6} T_i^4}_e + \underbrace{(7,9306 \times 10^{-8} Kp^2 + 5,5749 \times 10^{-7} Kp) T_i^3}_f$$

$$y' = \underbrace{(7,6881 \times 10^{-5} Kp + 2,3756 \times 10^{-4} Kp^2) T_i^2}_g - \underbrace{3,1724 \times 10^{-7} Kp^2 T_i}_h$$



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

LAMPIRAN III  
PERHITUNGAN METODE DISKRIT



**Zero Order Hold (ZOH) Equivalence**

$$PI(s) = \frac{2,5s + 82,5}{s}$$

$$T = \frac{\tau}{10} = \frac{0,06}{10} = 0,006$$

$$PI(z) = \mathcal{L}\left[\frac{1-e^{-sT}}{s} PI(s)\right] = (1-z^{-1})\mathcal{L}\left[\frac{PI(s)}{s}\right]$$

$$PI(z) = (1-z^{-1})\mathcal{L}\left[\frac{PI(s)}{s}\right] = (1-z^{-1})\mathcal{L}\left[\frac{2,5s + 82,5}{s^2}\right]$$

$$\mathcal{L}\left[\frac{2,5s + 82,5}{s^2}\right] = \frac{2,5s}{s^2} + \frac{82,5}{s^2} = \frac{2,5}{s} + \frac{82,5}{s^2}$$

$$\frac{2,5}{s} = 2,5 \times \frac{1}{s} = 2,5 \times \frac{z}{z-1} = \frac{2,5z}{z-1}$$

$$\frac{82,5}{s^2} = 82,5 \times \frac{1}{s^2} = 82,5 \times \frac{Tz}{(z-1)^2} = \frac{(82,5)(0,006)z}{(z-1)^2} = \frac{0,49z}{(z-1)^2}$$

$$PI(z) = (1-z^{-1})\frac{2,5z}{z-1} + \frac{0,49z}{(z-1)^2}$$

$$PI(z) = \left(\frac{z-1}{z}\right)\frac{2,5z}{z-1} + \frac{0,49z}{(z-1)^2}$$

$$PI(z) = \frac{2,5z^2 - 2,5z}{z(z-1)} + \frac{0,49z}{(z-1)(z-1)}$$

$$PI(z) = \frac{2,5z - 2,5}{z-1} + \frac{0,49z}{(z-1)(z-1)}$$

$$PI(z) = \frac{(2,5z - 2,5)(z-1) + 0,49z}{(z-1)(z-1)}$$

$$PI(z) = \frac{2,5z^2 - 5z + 2,5 + 0,49z}{z^2 - 2z + 1}$$

$$PI(z) = \frac{2,5z^2 - 4,51z + 2,5}{z^2 - 2z + 1}$$

$$PI(z) = \frac{2,5z^2 - 4,51z + 2,5}{z^2 - 2z + 1} \div \frac{z^2}{z^2}$$

$$\frac{M(z)}{E(z)} = \frac{2,5 - 4,51z^{-1} + 2,5z^{-2}}{1 - 2z^{-1} + z^{-2}}$$

$$M(z) - 2z^{-1}M(z) + z^{-2}M(z) = 2,5E(z) - 4,51z^{-1}E(z) + 2,5z^{-2}E(z)$$

$$m(k) = 2m(k-1) - m(k-2) + 2,5e(k) - 4,51e(k-1) + 2,5e(k-2)$$

**Pole-Zero Mapping**

$$PI(s) = \frac{2,5s + 82,5}{s}$$

$$T = \frac{\tau}{10} = \frac{0,06}{10} = 0,006$$

$$\text{zero} \rightarrow 2,5s + 82,5 \rightarrow s = -\frac{82,5}{2,5} = -33$$

$$\text{pole} \rightarrow s = 0$$

$$PI(z) = \frac{(z - e^{-33T})}{(z - 1)}$$

$$PI(z) = \frac{z - e^{-33(0,006)}}{z - 1}$$

$$PI(z) = \frac{z - e^{-0,19}}{z - 1}$$

$$PI(z) = \frac{z - 0,82}{z - 1}$$

$$PI(z) = \frac{z - 0,82}{z - 1} \div \frac{z}{z}$$

$$\frac{M(z)}{E(z)} = \frac{1 - 0,82z^{-1}}{1 - z^{-1}}$$

$$M(z) - z^{-1}M(z) = E(z) - 0,82z^{-1}E(z)$$

$$m(k) = m(k-1) + e(k) - 0,82e(k-1)$$

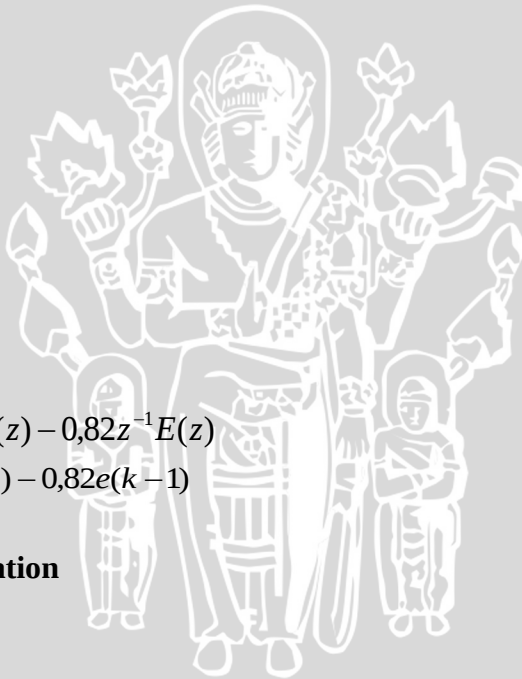
**Bilinear Transformation**

$$PI(s) = \frac{2,5s + 82,5}{s}$$

$$T = \frac{\tau}{10} = \frac{0,06}{10} = 0,006$$

$$s = \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1}$$

$$s = \frac{2}{0,006} \frac{z-1}{z+1} = 333,3 \frac{z-1}{z+1}$$



$$PI(z) = \frac{2,5 \left( 333,3 \frac{z-1}{z+1} \right) + 82,5}{\left( 333,3 \frac{z-1}{z+1} \right)}$$

$$PI(z) = \frac{\left[ \frac{(2,5)(333,3)(z-1)}{z+1} \right] + 82,5}{333,3(z-1)}$$

$$PI(z) = \frac{\frac{(2,5)(333,3)(z-1) + 82,5(z+1)}{z+1}}{333,3(z-1)}$$

$$PI(z) = \frac{833,25(z-1) + 82,5(z+1)}{333,3(z-1)}$$

$$PI(z) = \frac{833,25z - 833,25 + 82,5z + 82,5}{333,3z - 333,3}$$

$$PI(z) = \frac{915,75z - 750,75}{333,3z - 333,3}$$

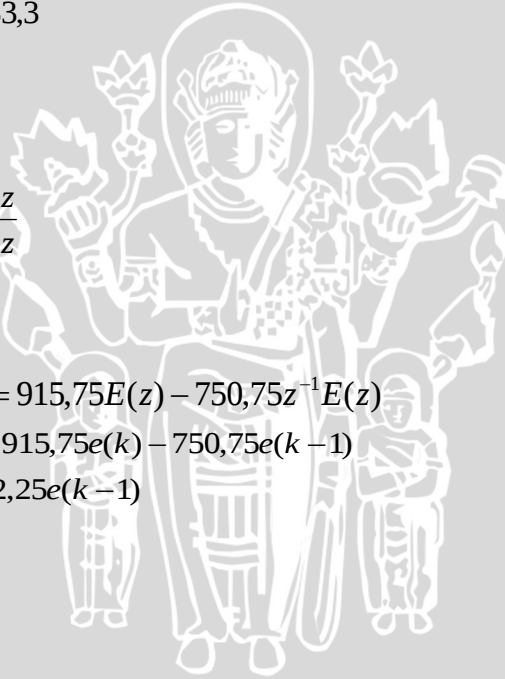
$$PI(z) = \frac{915,75z - 750,75}{333,3z - 333,3} \div \frac{z}{z}$$

$$\frac{M(z)}{E(z)} = \frac{915,75 - 750,75z^{-1}}{333,3 - 333,3z^{-1}}$$

$$333,3M(z) - 333,3z^{-1}M(z) = 915,75E(z) - 750,75z^{-1}E(z)$$

$$333,3m(k) = 333,3m(k-1) + 915,75e(k) - 750,75e(k-1)$$

$$m(k) = m(k-1) + 2,7e(k) - 2,25e(k-1)$$



UNIVERSITAS BRAWIJAYA



## LAMPIRAN IV LISTING PROGRAM

## PROGRAM UTAMA

```
//inisialisasi variabel kontrol
double setpoint = 3000, overshoot, input, out, out_1, out_2, err, err_1, err_2;
//inisialisasi baca sensor kecepatan
double Sampling, Value1 = 0, Value2 = 0, sensor, sensor_1;
//inisialisasi driver
int pwm;
//inisialisasi pemilih metode kontrol
//masukan nilai 0 untuk ZOH
//masukan nilai 1 untuk pole zero Mapping
//masukan nilai 2 untuk billinear
int a = 1, nilai_maks, nilai_min, k=0;
//untuk tampilan serial monitor
unsigned long timesampling = 50; //ambil sample untuk 0.1s
unsigned long now, last = 0, Ts;

void setup() {
    // put your setup code here, to run once:
    // setup untuk pwm
    // setup untuk driver motor
    noInterrupts();

    //Untuk Motor use L298N
    pinMode(6, OUTPUT); //enA ==> PWM
    pinMode(5, OUTPUT); //in1
    pinMode(4, OUTPUT); //in2

    digitalWrite(5, HIGH); //atur logika agar tidak short
    digitalWrite(4, LOW); //tukar logika untuk ganti arah putar motor

    TCCR1A=(0<<COM1A1) | (0<<COM1A0) | (0<<COM1B1) | (0<<COM1B0) |
    (0<<WGM11) | (0<<WGM10);
```

```
TCCR1B=(0<<ICNC1) | (1<<ICES1) | (0<<WGM13) | (0<<WGM12) |
(0<<CS12) | (1<<CS11) | (1<<CS10);
```

```
attachInterrupt(0, Input, RISING); //PIN 2 untuk external interrupt 0
```

```
Serial.begin(9600); // serial monitor
```

```
interrupts();
```

```
}
```

```
void loop() {
```

```
    // put your main code here, to run repeatedly:
```

```
    now = millis();
```

```
    err = setpoint-sensor; // mencari error untuk kalkulasi kontrol
```

```
    //metode kontrol
```

```
    switch (a) {
```

```
    case 0: //ZOH
```

```
        out = 2*out_1 - out_2 + 2.5*err - 4.51*err_1 + 2.5*err_2;
```

```
        break;
```

```
    case 1: //pole zero Mapping
```

```
        out = out_1 + err - 0.82*err_1;
```

```
        break;
```

```
    case 2: //bilinear
```

```
        out = out_1 + 2.7*err - 2.25*err_1;
```

```
        break;
```

```
    }
```

//konversi hasil keluaran kontrol menjadi PWM untuk driver motor dan pembatasan agar tidak error

```
if (out >= 15000){
```

```
    out = 15000;
```

76

```
}  
else if (out<=0){  
    out = 0;  
}  
else {  
    out = out;  
}  
  
pwm = map(out, 0, 15000,0, 255); //batas out harus jelas nilainya  
  
analogWrite(6,pwm);  
  
//tampilkan data pada serial monitor ( t, output, dutycycle, error )  
serialdisplay();  
  
//variabel yang diperlukan untuk iterasi selanjutnya  
out_1 = out;  
out_2 = out_1;  
err_1 = err;  
err_2 = err_1;  
sensor_1 = sensor;  
  
}
```

```
void Input() { //untuk sensor kecepatan
```

```
    Value2 = TCNT1;
```

```
    if (Value2 > Value1){
```

```
        Sampling = Value2 - Value1;
```

```
    }
```

```
else if (Value1 > Value2){  
    Sampling = (65535 - Value1) + Value2;  
}  
sensor = 250000/Sampling; //clock timer1 diset 250KHz  
sensor = sensor*60; //60 rps to rpm  
  
Value1 = Value2;  
}
```

```
void serialdisplay(){ //untuk tampilan pada serial monitor
```

```
    Ts = now - last;
```

```
    if (Ts >= timesampling )
```

```
    {
```

```
        Serial.print(millis());
```

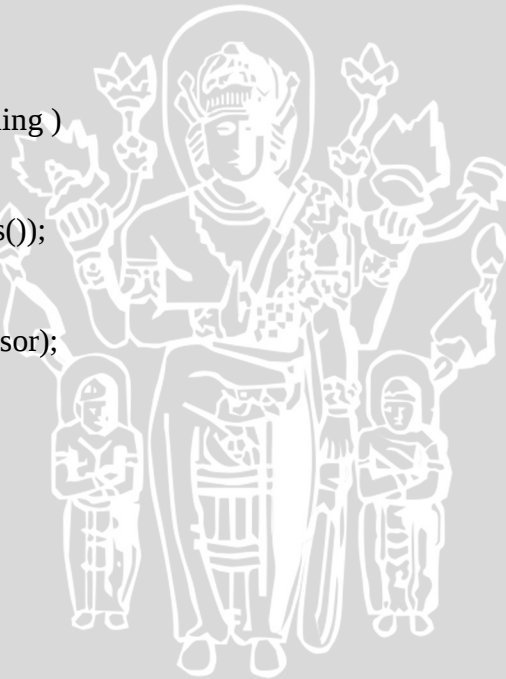
```
        Serial.print("\t");
```

```
        Serial.println(sensor);
```

```
        last = millis();
```

```
    }
```

```
}
```





UNIVERSITAS BRAWIJAYA



LAMPIRAN V  
DATASHEET MOTOR DC



## RF-130CH

**MABUCHI MOTOR**  
Precious metal-brush motors

OUTPUT : 0.03W~2.5W (APPROX)

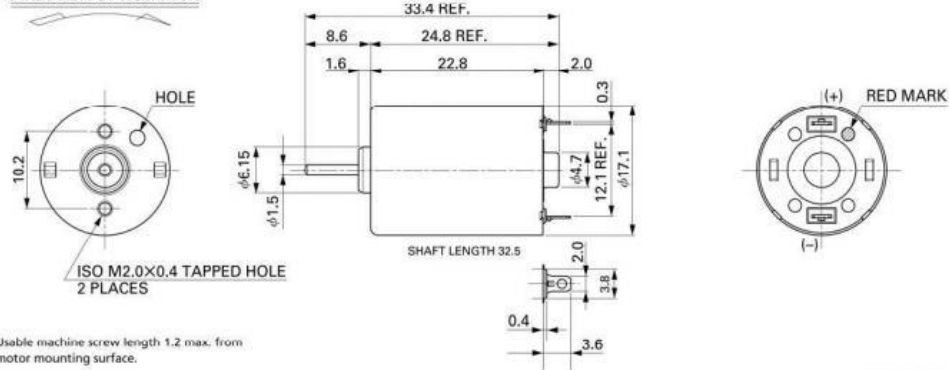
WEIGHT : 18g (APPROX)

Typical Applications Audio and Visual Equipment : CD Player / DVD Player

| MODEL          | VOLTAGE         |               | NO LOAD        |              | AT MAXIMUM EFFICIENCY |              |                |                |             |                | STALL          |              |
|----------------|-----------------|---------------|----------------|--------------|-----------------------|--------------|----------------|----------------|-------------|----------------|----------------|--------------|
|                | OPERATING RANGE | NOMINAL       | SPEED<br>r/min | CURRENT<br>A | SPEED<br>r/min        | CURRENT<br>A | TORQUE<br>mN·m | TORQUE<br>g·cm | OUTPUT<br>W | TORQUE<br>mN·m | TORQUE<br>g·cm | CURRENT<br>A |
| RF-130CH-12250 | 2.0~7.5         | 6V CONSTANT   | 8100           | 0.036        | 6600                  | 0.16         | 0.76           | 7.8            | 0.53        | 4.12           | 42             | 0.70         |
| RF-130CH-2860  | 1.0~1.5         | 1.2V CONSTANT | 7300           | 0.13         | 5990                  | 0.60         | 0.68           | 7.0            | 0.43        | 3.82           | 39             | 2.74         |

(\*1) CW shifted commutation (CW+)

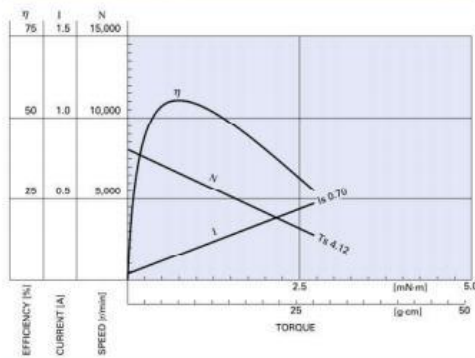
DIRECTION OF ROTATION



Usable machine screw length 1.2 max. from motor mounting surface.

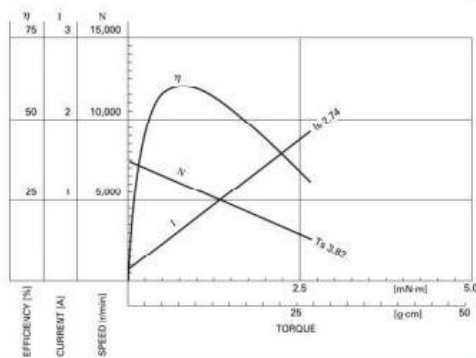
### RF-130CH-12250

6.0V



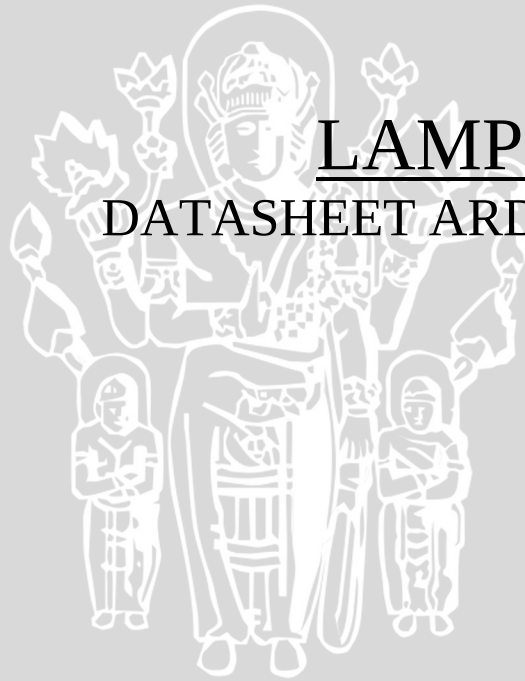
### RF-130CH-2860

1.2V



**MABUCHI MOTOR CO., LTD.** Headquarters 430 Matsuhidai, Matsudo City, Chiba, 270-2280 Japan. Tel:81-47-710-1177 Fax:81-47-710-1132 (Sales Dept.)

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



## LAMPIRAN VI DATASHEET ARDUINO UNO



## ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P

### ATMEL 8-BIT MICROCONTROLLER WITH 4/8/16/32KBYTES IN-SYSTEM PROGRAMMABLE FLASH

#### DATASHEET

#### Features

- High Performance, Low Power Atmel®AVR® 8-Bit Microcontroller Family
- Advanced RISC Architecture
  - 131 Powerful Instructions – Most Single Clock Cycle Execution
  - 32 x 8 General Purpose Working Registers
  - Fully Static Operation
  - Up to 20 MIPS Throughput at 20MHz
  - On-chip 2-cycle Multiplier
- High Endurance Non-volatile Memory Segments
  - 4/8/16/32KBytes of In-System Self-Programmable Flash program memory
  - 256/512/512/1KBytes EEPROM
  - 512/1K/1K/2KBytes Internal SRAM
  - Write/Erase Cycles: 10,000 Flash/100,000 EEPROM
  - Data retention: 20 years at 85°C/100 years at 25°C<sup>(1)</sup>
  - Optional Boot Code Section with Independent Lock Bits
    - In-System Programming by On-chip Boot Program
    - True Read-While-Write Operation
  - Programming Lock for Software Security
- Atmel® QTouch® library support
  - Capacitive touch buttons, sliders and wheels
  - QTouch and QMatrix® acquisition
  - Up to 64 sense channels
- Peripheral Features
  - Two 8-bit Timer/Counters with Separate Prescaler and Compare Mode
  - One 16-bit Timer/Counter with Separate Prescaler, Compare Mode, and Capture Mode
  - Real Time Counter with Separate Oscillator
  - Six PWM Channels
  - 8-channel 10-bit ADC in TQFP and QFN/MLF package
    - Temperature Measurement
  - 6-channel 10-bit ADC in PDIP Package
    - Temperature Measurement
  - Programmable Serial USART
  - Master/Slave SPI Serial Interface
  - Byte-oriented 2-wire Serial Interface (Philips I<sup>2</sup>C compatible)
  - Programmable Watchdog Timer with Separate On-chip Oscillator
  - On-chip Analog Comparator
  - Interrupt and Wake-up on Pin Change



- **Special Microcontroller Features**
  - Power-on Reset and Programmable Brown-out Detection
  - Internal Calibrated Oscillator
  - External and Internal Interrupt Sources
  - Six Sleep Modes: Idle, ADC Noise Reduction, Power-save, Power-down, Standby, and Extended Standby
- **I/O and Packages**
  - 23 Programmable I/O Lines
  - 28-pin PDIP, 32-lead TQFP, 28-pad QFN/MLF and 32-pad QFN/MLF
- **Operating Voltage:**
  - 1.8 - 5.5V
- **Temperature Range:**
  - -40°C to 85°C
- **Speed Grade:**
  - 0 - 4MHz@1.8 - 5.5V, 0 - 10MHz@2.7 - 5.5V, 0 - 20MHz @ 4.5 - 5.5V
- **Power Consumption at 1MHz, 1.8V, 25°C**
  - Active Mode: 0.2mA
  - Power-down Mode: 0.1µA
  - Power-save Mode: 0.75µA (Including 32kHz RTC)

## 1. Pin Configurations

Figure 1-1. Pinout ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P

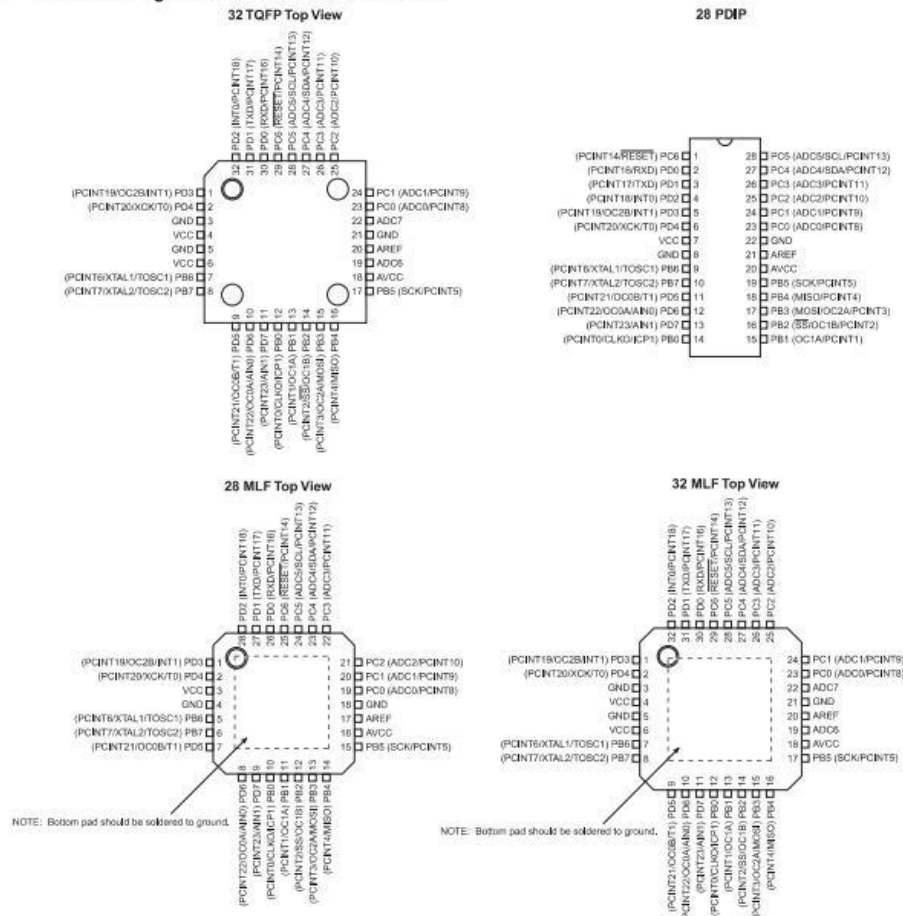


Table 1-1. 32UFPGA - Pinout ATmega48A/48PA/88A/88PA/168A/168PA

|          | 1   | 2   | 3   | 4   | 5    | 6    |
|----------|-----|-----|-----|-----|------|------|
| <b>A</b> | PD2 | PD1 | PC6 | PC4 | PC2  | PC1  |
| <b>B</b> | PD3 | PD4 | PD0 | PC5 | PC3  | PC0  |
| <b>C</b> | GND | GND |     |     | ADC7 | GND  |
| <b>D</b> | VDD | VDD |     |     | AREF | ADC6 |
| <b>E</b> | PB6 | PD6 | PB0 | PB2 | AVDD | PB5  |
| <b>F</b> | PB7 | PD5 | PD7 | PB1 | PB3  | PB4  |

### 30. Electrical Characteristics ( $T_A = -40^\circ\text{C}$ to $105^\circ\text{C}$ )

#### 30.1 Absolute Maximum Ratings\*

|                                                                                     |                                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Operating Temperature.....                                                          | $-55^\circ\text{C}$ to $+125^\circ\text{C}$ |
| Storage Temperature .....                                                           | $-65^\circ\text{C}$ to $+150^\circ\text{C}$ |
| Voltage on any Pin except $\overline{\text{RESET}}$<br>with respect to Ground ..... | $-0.5\text{V}$ to $V_{CC}+0.5\text{V}$      |
| Voltage on $\overline{\text{RESET}}$ with respect to Ground.....                    | $-0.5\text{V}$ to $+13.0\text{V}$           |
| Maximum Operating Voltage .....                                                     | $6.0\text{V}$                               |
| DC Current per I/O Pin .....                                                        | $40.0\text{mA}$                             |
| DC Current $V_{CC}$ and GND Pins .....                                              | $200.0\text{mA}$                            |

\*NOTICE: Stresses beyond those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only and functional operation of the device at these or other conditions beyond those indicated in the operational sections of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

#### 30.2 DC Characteristics

Table 30-1. Common DC characteristics  $T_A = -40^\circ\text{C}$  to  $105^\circ\text{C}$ ,  $V_{CC} = 1.8\text{V}$  to  $5.5\text{V}$  (unless otherwise noted)

| Symbol    | Parameter                                                              | Condition                                                                    | Min.                                   | Typ. | Max.                                   | Units |
|-----------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|------|----------------------------------------|-------|
| $V_{IL}$  | Input Low Voltage, except XTAL1 and $\overline{\text{RESET}}$ pin      | $V_{CC} = 1.8\text{V} - 2.4\text{V}$<br>$V_{CC} = 2.4\text{V} - 5.5\text{V}$ | $-0.5$<br>$-0.5$                       |      | $0.2V_{CC}^{(1)}$<br>$0.3V_{CC}^{(1)}$ | V     |
| $V_{IH}$  | Input High Voltage, except XTAL1 and $\overline{\text{RESET}}$ pins    | $V_{CC} = 1.8\text{V} - 2.4\text{V}$<br>$V_{CC} = 2.4\text{V} - 5.5\text{V}$ | $0.7V_{CC}^{(2)}$<br>$0.6V_{CC}^{(2)}$ |      | $V_{CC} + 0.5$<br>$V_{CC} + 0.5$       | V     |
| $V_{IL1}$ | Input Low Voltage, XTAL1 pin                                           | $V_{CC} = 1.8\text{V} - 5.5\text{V}$                                         | $-0.5$                                 |      | $0.1V_{CC}^{(1)}$                      | V     |
| $V_{IH1}$ | Input High Voltage, XTAL1 pin                                          | $V_{CC} = 1.8\text{V} - 2.4\text{V}$<br>$V_{CC} = 2.4\text{V} - 5.5\text{V}$ | $0.8V_{CC}^{(2)}$<br>$0.7V_{CC}^{(2)}$ |      | $V_{CC} + 0.5$<br>$V_{CC} + 0.5$       | V     |
| $V_{IL2}$ | Input Low Voltage, $\overline{\text{RESET}}$ pin                       | $V_{CC} = 1.8\text{V} - 5.5\text{V}$                                         | $-0.5$                                 |      | $0.1V_{CC}^{(1)}$                      | V     |
| $V_{IH2}$ | Input High Voltage, $\overline{\text{RESET}}$ pin                      | $V_{CC} = 1.8\text{V} - 5.5\text{V}$                                         | $0.9V_{CC}^{(2)}$                      |      | $V_{CC} + 0.5$                         | V     |
| $V_{IL3}$ | Input Low Voltage, $\overline{\text{RESET}}$ pin as I/O                | $V_{CC} = 1.8\text{V} - 2.4\text{V}$<br>$V_{CC} = 2.4\text{V} - 5.5\text{V}$ | $-0.5$<br>$-0.5$                       |      | $0.2V_{CC}^{(1)}$<br>$0.3V_{CC}^{(1)}$ | V     |
| $V_{IH3}$ | Input High Voltage, $\overline{\text{RESET}}$ pin as I/O               | $V_{CC} = 1.8\text{V} - 2.4\text{V}$<br>$V_{CC} = 2.4\text{V} - 5.5\text{V}$ | $0.7V_{CC}^{(2)}$<br>$0.6V_{CC}^{(2)}$ |      | $V_{CC} + 0.5$<br>$V_{CC} + 0.5$       | V     |
| $V_{OL}$  | Output Low Voltage <sup>(4)</sup> except $\overline{\text{RESET}}$ pin | $I_{OL} = 20\text{mA}$ , $V_{CC} = 5\text{V}$                                | $T_A = 85^\circ\text{C}$               |      | 0.9                                    |       |
|           |                                                                        |                                                                              | $T_A = 105^\circ\text{C}$              |      | 1.0                                    |       |
|           |                                                                        | $I_{OL} = 10\text{mA}$ , $V_{CC} = 3\text{V}$                                | $T_A = 85^\circ\text{C}$               |      | 0.6                                    |       |
|           |                                                                        |                                                                              | $T_A = 105^\circ\text{C}$              |      | 0.7                                    | V     |

Table 30-1. Common DC characteristics  $T_A = -40^\circ\text{C}$  to  $105^\circ\text{C}$ ,  $V_{CC} = 1.8\text{V}$  to  $5.5\text{V}$  (unless otherwise noted) (Continued)

| Symbol     | Parameter                                              | Condition                                          | Min.                      | Typ.       | Max. | Units            |
|------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------|------------|------|------------------|
| $V_{OH}$   | Output High Voltage <sup>(3)</sup><br>except Reset pin | $I_{OH} = -20\text{mA}$ , $V_{CC} = 5\text{V}$     | $T_A = 85^\circ\text{C}$  | 4.2        |      |                  |
|            |                                                        |                                                    | $T_A = 105^\circ\text{C}$ | 4.1        |      |                  |
|            |                                                        | $I_{OH} = -10\text{mA}$ , $V_{CC} = 3\text{V}$     | $T_A = 85^\circ\text{C}$  | 2.3        |      |                  |
|            |                                                        |                                                    | $T_A = 105^\circ\text{C}$ | 2.1        |      | V                |
| $I_{IL}$   | Input Leakage Current I/O Pin                          | $V_{CC} = 5.5\text{V}$ , pin low (absolute value)  |                           |            | 1    | $\mu\text{A}$    |
| $I_{IH}$   | Input Leakage Current I/O Pin                          | $V_{CC} = 5.5\text{V}$ , pin high (absolute value) |                           |            | 1    | $\mu\text{A}$    |
| $R_{RST}$  | Reset Pull-up Resistor                                 |                                                    | 30                        |            | 60   | $\text{k}\Omega$ |
| $R_{PU}$   | I/O Pin Pull-up Resistor                               |                                                    | 20                        |            | 50   | $\text{k}\Omega$ |
| $V_{ACIO}$ | Analog Comparator Input Offset Voltage                 | $V_{CC} = 5\text{V}$<br>$V_{in} = V_{CC}/2$        |                           | <10        | 40   | mV               |
| $I_{ACLK}$ | Analog Comparator Input Leakage Current                | $V_{CC} = 5\text{V}$<br>$V_{in} = V_{CC}/2$        | -50                       |            | 50   | nA               |
| $t_{ACID}$ | Analog Comparator Propagation Delay                    | $V_{CC} = 2.7\text{V}$<br>$V_{CC} = 4.0\text{V}$   |                           | 750<br>500 |      | ns               |

- Notes:
1. "Max" means the highest value where the pin is guaranteed to be read as low
  2. "Min." means the lowest value where the pin is guaranteed to be read as high
  3. Although each I/O port can source more than the test conditions ( $20\text{mA}$  at  $V_{CC} = 5\text{V}$ ,  $10\text{mA}$  at  $V_{CC} = 3\text{V}$ ) under steady state conditions (non-transient), the following must be observed:  
ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P:  
1) The sum of all  $I_{OH}$ , for ports C0 - C5, D0 - D4, ADC7, RESET should not exceed  $150\text{mA}$ .  
2) The sum of all  $I_{OH}$ , for ports B0 - B5, D5 - D7, ADC6, XTAL1, XTAL2 should not exceed  $150\text{mA}$ .  
If  $I_{OH}$  exceeds the test condition,  $V_{OH}$  may exceed the related specification. Pins are not guaranteed to source current greater than the listed test condition.
  4. Although each I/O port can sink more than the test conditions ( $20\text{mA}$  at  $V_{CC} = 5\text{V}$ ,  $10\text{mA}$  at  $V_{CC} = 3\text{V}$ ) under steady state conditions (non-transient), the following must be observed:  
ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P:  
1) The sum of all  $I_{OL}$ , for ports C0 - C5, ADC7, ADC6 should not exceed  $100\text{mA}$ .  
2) The sum of all  $I_{OL}$ , for ports B0 - B5, D5 - D7, XTAL1, XTAL2 should not exceed  $100\text{mA}$ .  
3) The sum of all  $I_{OL}$ , for ports D0 - D4, RESET should not exceed  $100\text{mA}$ .  
If  $I_{OL}$  exceeds the test condition,  $V_{OL}$  may exceed the related specification. Pins are not guaranteed to sink current greater than the listed test condition.

### 30.2.1 ATmega48PA DC Characteristics – Current Consumption

Table 30-2. ATmega48PA DC characteristics -  $T_A = -40^{\circ}\text{C}$  to  $105^{\circ}\text{C}$ ,  $V_{CC} = 1.8\text{V}$  to  $5.5\text{V}$  (unless otherwise noted)

| Symbol   | Parameter                           | Condition                                  | Min. | Typ. <sup>(2)</sup> | Max. | Units         |
|----------|-------------------------------------|--------------------------------------------|------|---------------------|------|---------------|
| $I_{CC}$ | Power Supply Current <sup>(1)</sup> | Active 1MHz, $V_{CC} = 2\text{V}$          |      | 0.22                | 0.55 | mA            |
|          |                                     | Active 4MHz, $V_{CC} = 3\text{V}$          |      | 1.15                | 2.65 |               |
|          |                                     | Active 8MHz, $V_{CC} = 5\text{V}$          |      | 4.1                 | 9.5  |               |
|          |                                     | Idle 1MHz, $V_{CC} = 2\text{V}$            |      | 0.024               | 0.16 |               |
|          |                                     | Idle 4MHz, $V_{CC} = 3\text{V}$            |      | 0.2                 | 0.75 |               |
|          |                                     | Idle 8MHz, $V_{CC} = 5\text{V}$            |      | 0.78                | 2.8  |               |
|          | Power-save mode <sup>(2)</sup>      | 32kHz TOSC enabled, $V_{CC} = 1.8\text{V}$ |      | 0.75                |      | $\mu\text{A}$ |
|          |                                     | 32kHz TOSC enabled, $V_{CC} = 3\text{V}$   |      | 0.9                 |      |               |
|          | Power-down mode <sup>(3)</sup>      | WDT enabled, $V_{CC} = 3\text{V}$          |      | 3.9                 | 10   |               |
|          |                                     | WDT disabled, $V_{CC} = 3\text{V}$         |      | 0.1                 | 5    |               |

Notes: 1. Values with "Minimizing Power Consumption" enabled (0xFF).  
 2. Typical values at  $25^{\circ}\text{C}$ . Maximum values are test limits in production.  
 3. The current consumption values include input leakage current.

### 30.2.2 ATmega88PA DC Characteristics – Current Consumption

Table 30-3. ATmega88PA DC characteristics -  $T_A = -40^{\circ}\text{C}$  to  $105^{\circ}\text{C}$ ,  $V_{CC} = 1.8\text{V}$  to  $5.5\text{V}$  (unless otherwise noted)

| Symbol   | Parameter                           | Condition                                  | Min. | Typ. <sup>(2)</sup> | Max. | Units         |
|----------|-------------------------------------|--------------------------------------------|------|---------------------|------|---------------|
| $I_{CC}$ | Power Supply Current <sup>(1)</sup> | Active 1MHz, $V_{CC} = 2\text{V}$          |      | 0.2                 | 0.6  | mA            |
|          |                                     | Active 4MHz, $V_{CC} = 3\text{V}$          |      | 1.2                 | 2.75 |               |
|          |                                     | Active 8MHz, $V_{CC} = 5\text{V}$          |      | 4.1                 | 10   |               |
|          |                                     | Idle 1MHz, $V_{CC} = 2\text{V}$            |      | 0.03                | 0.17 |               |
|          |                                     | Idle 4MHz, $V_{CC} = 3\text{V}$            |      | 0.18                | 0.8  |               |
|          |                                     | Idle 8MHz, $V_{CC} = 5\text{V}$            |      | 0.8                 | 3    |               |
|          | Power-save mode <sup>(3)</sup>      | 32kHz TOSC enabled, $V_{CC} = 1.8\text{V}$ |      | 0.8                 |      | $\mu\text{A}$ |
|          |                                     | 32kHz TOSC enabled, $V_{CC} = 3\text{V}$   |      | 0.9                 |      |               |
|          | Power-down mode <sup>(3)</sup>      | WDT enabled, $V_{CC} = 3\text{V}$          |      | 3.9                 | 10   |               |
|          |                                     | WDT disabled, $V_{CC} = 3\text{V}$         |      | 0.1                 | 5    |               |

Notes: 1. Values with "Minimizing Power Consumption" enabled (0xFF).  
 2. Typical values at  $25^{\circ}\text{C}$ . Maximum values are test limits in production.  
 3. The current consumption values include input leakage current.

### 30.2.3 ATmega168PA DC Characteristics – Current Consumption

Table 30-4. ATmega168PA DC characteristics -  $T_A = -40^\circ\text{C}$  to  $105^\circ\text{C}$ ,  $V_{CC} = 1.8\text{V}$  to  $5.5\text{V}$  (unless otherwise noted)

| Symbol   | Parameter                           | Condition                                  | Min. | Typ. <sup>(2)</sup> | Max. | Units         |
|----------|-------------------------------------|--------------------------------------------|------|---------------------|------|---------------|
| $I_{CC}$ | Power Supply Current <sup>(1)</sup> | Active 1MHz, $V_{CC} = 2\text{V}$          |      | 0.3                 | 0.6  | mA            |
|          |                                     | Active 4MHz, $V_{CC} = 3\text{V}$          |      | 1.8                 | 2.75 |               |
|          |                                     | Active 8MHz, $V_{CC} = 5\text{V}$          |      | 6.7                 | 10   |               |
|          |                                     | Idle 1MHz, $V_{CC} = 2\text{V}$            |      | 0.06                | 0.2  |               |
|          |                                     | Idle 4MHz, $V_{CC} = 3\text{V}$            |      | 0.4                 | 0.8  |               |
|          |                                     | Idle 8MHz, $V_{CC} = 5\text{V}$            |      | 1.7                 | 3    |               |
|          | Power-save mode <sup>(3)</sup>      | 32kHz TOSC enabled, $V_{CC} = 1.8\text{V}$ |      | 0.8                 |      | $\mu\text{A}$ |
|          |                                     | 32kHz TOSC enabled, $V_{CC} = 3\text{V}$   |      | 0.9                 |      |               |
|          | Power-down mode <sup>(3)</sup>      | WDT enabled, $V_{CC} = 3\text{V}$          |      | 4.6                 | 10   |               |
|          |                                     | WDT disabled, $V_{CC} = 3\text{V}$         |      | 0.1                 | 5    |               |

Notes: 1. Values with "Minimizing Power Consumption" enabled (0xFF).  
 2. Typical values at  $25^\circ\text{C}$ . Maximum values are test limits in production.  
 3. The current consumption values include input leakage current.

### 30.2.4 ATmega328P DC Characteristics – Current Consumption

Table 30-5. ATmega328P DC characteristics -  $T_A = -40^\circ\text{C}$  to  $105^\circ\text{C}$ ,  $V_{CC} = 1.8\text{V}$  to  $5.5\text{V}$  (unless otherwise noted)

| Symbol   | Parameter                           | Condition                                  | Min. | Typ. <sup>(2)</sup> | Max. | Units         |
|----------|-------------------------------------|--------------------------------------------|------|---------------------|------|---------------|
| $I_{CC}$ | Power Supply Current <sup>(1)</sup> | Active 1MHz, $V_{CC} = 2\text{V}$          |      | 0.3                 | 0.5  | mA            |
|          |                                     | Active 4MHz, $V_{CC} = 3\text{V}$          |      | 1.7                 | 2.5  |               |
|          |                                     | Active 8MHz, $V_{CC} = 5\text{V}$          |      | 5.2                 | 9.0  |               |
|          |                                     | Idle 1MHz, $V_{CC} = 2\text{V}$            |      | 0.04                | 0.15 |               |
|          |                                     | Idle 4MHz, $V_{CC} = 3\text{V}$            |      | 0.3                 | 0.7  |               |
|          |                                     | Idle 8MHz, $V_{CC} = 5\text{V}$            |      | 1.2                 | 2.7  |               |
|          | Power-save mode <sup>(3)</sup>      | 32kHz TOSC enabled, $V_{CC} = 1.8\text{V}$ |      | 0.8                 |      | $\mu\text{A}$ |
|          |                                     | 32kHz TOSC enabled, $V_{CC} = 3\text{V}$   |      | 0.9                 |      |               |
|          | Power-down mode <sup>(3)</sup>      | WDT enabled, $V_{CC} = 3\text{V}$          |      | 4.2                 | 10   |               |
|          |                                     | WDT disabled, $V_{CC} = 3\text{V}$         |      | 0.1                 | 5    |               |

Notes: 1. Values with "Minimizing Power Consumption" enabled (0xFF).  
 2. Typical values at  $25^\circ\text{C}$ . Maximum values are test limits in production.  
 3. The current consumption values include input leakage current.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



## LAMPIRAN VII DATASHEET DRIVER

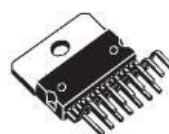

**L298**

## DUAL FULL-BRIDGE DRIVER

- OPERATING SUPPLY VOLTAGE UP TO 46 V
- TOTAL DC CURRENT UP TO 4 A
- LOW SATURATION VOLTAGE
- OVERTEMPERATURE PROTECTION
- LOGICAL "0" INPUT VOLTAGE UP TO 1.5 V (HIGH NOISE IMMUNITY)

### DESCRIPTION

The L298 is an integrated monolithic circuit in a 15-lead Multiwatt and PowerSO20 packages. It is a high voltage, high current dual full-bridge driver designed to accept standard TTL logic levels and drive inductive loads such as relays, solenoids, DC and stepping motors. Two enable inputs are provided to enable or disable the device independently of the input signals. The emitters of the lower transistors of each bridge are connected together and the corresponding external terminal can be used for the connection of an external sensing resistor. An additional supply input is provided so that the logic works at a lower voltage.



Multiwatt15

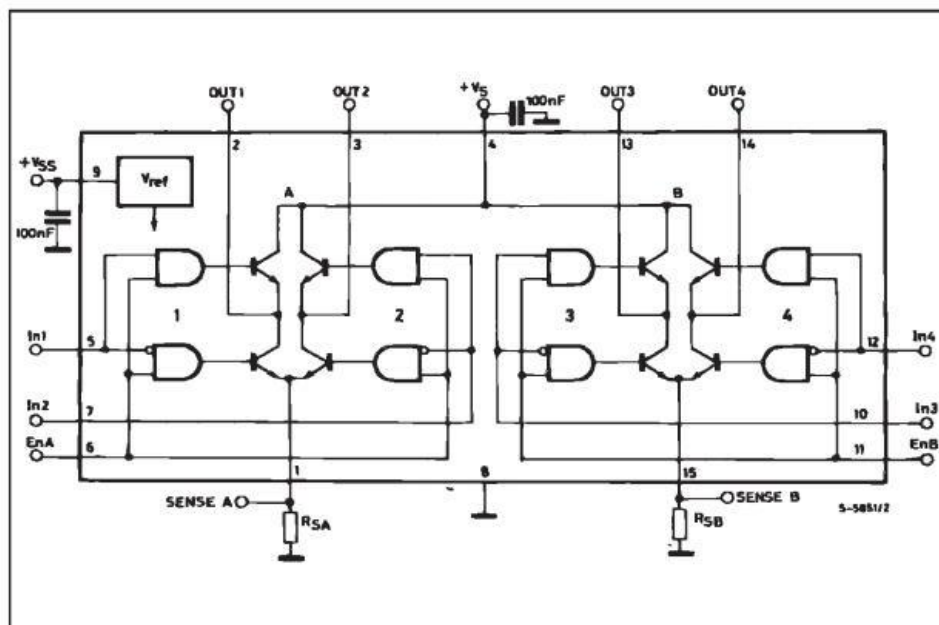


PowerSO20

**ORDERING NUMBERS :** L298N (Multiwatt Vert.)  
L298HN (Multiwatt Horiz.)  
L298P (PowerSO20)

section of an external sensing resistor. An additional supply input is provided so that the logic works at a lower voltage.

### BLOCK DIAGRAM



January 2000

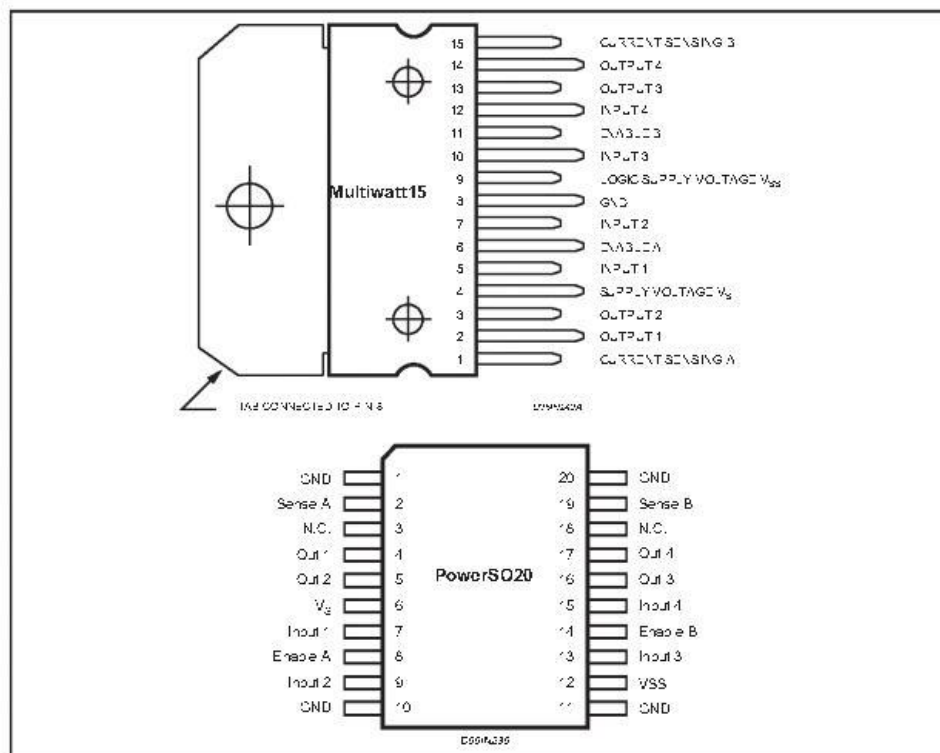
1/13

## L298

### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

| Symbol         | Parameter                                           | Value     | Unit       |
|----------------|-----------------------------------------------------|-----------|------------|
| $V_S$          | Power Supply                                        | 50        | V          |
| $V_{SS}$       | Logic Supply Voltage                                | 7         | V          |
| $V_I, V_{E1}$  | Input and Enable Voltage                            | 0.3 to 7  | V          |
| $I_O$          | Peak Output Current (each Channel)                  |           |            |
|                | Non Repetitive ( $t = 100\mu s$ )                   | 3         | A          |
|                | Repetitive (80% on, 20% off; $t_{ON} = 10ms$ )      | 2.5       | A          |
|                | DC Operation                                        | 2         | A          |
| $V_{SEN1}$     | Sensing Voltage                                     | 1 to 2.3  | V          |
| $P_G$          | Total Power Dissipation ( $T_{case} = 75^\circ C$ ) | 25        | W          |
| $T_{GJ}$       | Junction Operating Temperature                      | 25 to 130 | $^\circ C$ |
| $T_{stg}, T_J$ | Storage and Junction Temperature                    | 40 to 150 | $^\circ C$ |

### PIN CONNECTIONS (top view)



### THERMAL DATA

| Symbol         | Parameter                           | PowerSQ20 | Multiwatt15 | Unit         |
|----------------|-------------------------------------|-----------|-------------|--------------|
| $R_{JA, case}$ | Thermal Resistance Junction-case    | Max.      | 3           | $^\circ C/W$ |
| $R_{JA, amb}$  | Thermal Resistance Junction-ambient | Max.      | 13 (*)      | $^\circ C/W$ |

(\*) Mounted on aluminum substrate

**PIN FUNCTIONS** (refer to the block diagram)

| MW.15 | PowerSO    | Name               | Function                                                                                                                   |
|-------|------------|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1:15  | 2:19       | Sense A: Sense B   | Between this pin and ground is connected the sense resistor to control the current of the load.                            |
| 2:3   | 4:5        | Out 1: Out 2       | Outputs of the Bridge A: the current that flows through the load connected between these two pins is monitored at pin 1.   |
| 4     | 6          | V <sub>S</sub>     | Supply Voltage for the Power Output Stages. A non-inductive 100nF capacitor must be connected between this pin and ground. |
| 5:7   | 7:9        | Input 1: Input 2   | TTL Compatible Inputs of the Bridge A.                                                                                     |
| 6:11  | 8:14       | Enable A: Enable B | TTL Compatible Enable Input: the L state disables the bridge A (enable A) and/or the bridge B (enable B).                  |
| 8     | 1:10,11,20 | GND                | Ground.                                                                                                                    |
| 9     | 12         | V <sub>SS</sub>    | Supply Voltage for the Logic Blocks. A 100nF capacitor must be connected between this pin and ground.                      |
| 10:12 | 13:15      | Input 3: Input 4   | TTL Compatible Inputs of the Bridge B.                                                                                     |
| 13:14 | 16:17      | Out 3: Out 4       | Outputs of the Bridge B. The current that flows through the load connected between these two pins is monitored at pin 15.  |
|       | 3:18       | N.C.               | Not Connected                                                                                                              |

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** (V<sub>S</sub> = 42V; V<sub>SS</sub> = 5V, T<sub>J</sub> = 25°C; unless otherwise specified)

| Symbol                               | Parameter                                      | Test Conditions                                           | Min.                | Typ.       | Max.            | Unit     |
|--------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------|------------|-----------------|----------|
| V <sub>S</sub>                       | Supply Voltage (pin 4)                         | Operative Condition                                       | V <sub>I</sub> +2.5 |            | 46              | V        |
| V <sub>SS</sub>                      | Logic Supply Voltage (pin 9)                   |                                                           | 4.5                 | 5          | 7               | V        |
| I <sub>S</sub>                       | Quiescent Supply Current (pin 4)               | V <sub>en</sub> = H: I <sub>L</sub> = 0<br>V = L<br>V = H |                     | 13<br>50   | 22<br>70        | mA<br>mA |
|                                      |                                                | V <sub>en</sub> = L<br>V = X                              |                     |            | 4               | mA       |
| I <sub>SS</sub>                      | Quiescent Current from V <sub>SS</sub> (pin 9) | V <sub>en</sub> = H: I <sub>L</sub> = 0<br>V = L<br>V = H |                     | 24<br>7    | 36<br>12        | mA<br>mA |
|                                      |                                                | V <sub>en</sub> = L<br>V = X                              |                     |            | 6               | mA       |
| V <sub>L</sub>                       | Input Low Voltage (pins 5, 7, 10, 12)          |                                                           | 0.3                 |            | 1.5             | V        |
| V <sub>H</sub>                       | Input High Voltage (pins 5, 7, 10, 12)         |                                                           | 2.3                 |            | V <sub>SS</sub> | V        |
| I <sub>L</sub>                       | Low Voltage Input Current (pins 5, 7, 10, 12)  | V = L                                                     |                     |            | 10              | μA       |
| I <sub>H</sub>                       | High Voltage Input Current (pins 5, 7, 10, 12) | V <sub>I</sub> = H ≤ V <sub>SS</sub> - 0.6V               |                     | 30         | 100             | μA       |
| V <sub>en</sub> = L                  | Enable Low Voltage (pins 6, 11)                |                                                           | 0.3                 |            | 1.5             | V        |
| V <sub>en</sub> = H                  | Enable High Voltage (pins 6, 11)               |                                                           | 2.3                 |            | V <sub>SS</sub> | V        |
| I <sub>en</sub> = L                  | Low Voltage Enable Current (pins 6, 11)        | V <sub>en</sub> = L                                       |                     |            | 10              | μA       |
| I <sub>en</sub> = H                  | High Voltage Enable Current (pins 6, 11)       | V <sub>en</sub> = H ≤ V <sub>SS</sub> - 0.6V              |                     | 30         | 100             | μA       |
| V <sub>CCsat</sub> (I <sub>L</sub> ) | Source Saturation Voltage                      | I <sub>L</sub> = 1A<br>I <sub>L</sub> = 2A                | 0.95                | 1.35<br>2  | 1.7<br>2.7      | V<br>V   |
| V <sub>CCsat</sub> (I <sub>H</sub> ) | Sink Saturation Voltage                        | I <sub>L</sub> = 1A (5)<br>I <sub>L</sub> = 2A (5)        | 0.85                | 1.2<br>1.7 | 1.6<br>2.3      | V<br>V   |
| V <sub>CCsat</sub>                   | Total Drop                                     | I <sub>L</sub> = 1A (5)<br>I <sub>L</sub> = 2A (5)        | 1.80                |            | 3.2<br>4.9      | V<br>V   |
| V <sub>SEN</sub>                     | Sensing Voltage (pins 1, 15)                   |                                                           | 1 (1)               |            | 2               | V        |



# L298

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS (continued)

| Symbol                   | Parameter                     | Test Conditions                                    | Min. | Typ. | Max. | Unit |
|--------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------------|------|------|------|------|
| $T_1$ (V)                | Source Current Turn-off Delay | 0.5 V to 0.9 I <sub>L</sub> (2); (4)               |      | 1.5  |      | μs   |
| $T_2$ (V)                | Source Current Fall Time      | 0.9 I <sub>L</sub> to 0.1 I <sub>L</sub> (2); (4)  |      | 0.2  |      | μs   |
| $T_3$ (V)                | Source Current Turn-on Delay  | 0.5 V to 0.1 I <sub>L</sub> (2); (4)               |      | 2    |      | μs   |
| $T_4$ (V)                | Source Current Rise Time      | 0.1 I <sub>L</sub> to 0.9 I <sub>L</sub> (2); (4)  |      | 0.7  |      | μs   |
| $T_5$ (V)                | Sink Current Turn-off Delay   | 0.5 V to 0.9 I <sub>L</sub> (3); (4)               |      | 0.7  |      | μs   |
| $T_6$ (V)                | Sink Current Fall Time        | 0.9 I <sub>L</sub> to 0.1 I <sub>L</sub> (3); (4)  |      | 0.25 |      | μs   |
| $T_7$ (V)                | Sink Current Turn-on Delay    | 0.5 V to 0.9 I <sub>L</sub> (3); (4)               |      | 1.6  |      | μs   |
| $T_8$ (V)                | Sink Current Rise Time        | 0.1 I <sub>L</sub> to 0.9 I <sub>L</sub> (3); (4)  |      | 0.2  |      | μs   |
| $f_c$ (V)                | Commutation Frequency         | I <sub>L</sub> = 2A                                |      | 25   | 40   | KHz  |
| $T_1$ (V <sub>en</sub> ) | Source Current Turn-off Delay | 0.5 V <sub>en</sub> to 0.9 I <sub>L</sub> (2); (4) |      | 3    |      | μs   |
| $T_2$ (V <sub>en</sub> ) | Source Current Fall Time      | 0.9 I <sub>L</sub> to 0.1 I <sub>L</sub> (2); (4)  |      | 1    |      | μs   |
| $T_3$ (V <sub>en</sub> ) | Source Current Turn-on Delay  | 0.5 V <sub>en</sub> to 0.1 I <sub>L</sub> (2); (4) |      | 0.3  |      | μs   |
| $T_4$ (V <sub>en</sub> ) | Source Current Rise Time      | 0.1 I <sub>L</sub> to 0.9 I <sub>L</sub> (2); (4)  |      | 0.4  |      | μs   |
| $T_5$ (V <sub>en</sub> ) | Sink Current Turn-off Delay   | 0.5 V <sub>en</sub> to 0.9 I <sub>L</sub> (3); (4) |      | 2.2  |      | μs   |
| $T_6$ (V <sub>en</sub> ) | Sink Current Fall Time        | 0.9 I <sub>L</sub> to 0.1 I <sub>L</sub> (3); (4)  |      | 0.35 |      | μs   |
| $T_7$ (V <sub>en</sub> ) | Sink Current Turn-on Delay    | 0.5 V <sub>en</sub> to 0.9 I <sub>L</sub> (3); (4) |      | 0.25 |      | μs   |
| $T_8$ (V <sub>en</sub> ) | Sink Current Rise Time        | 0.1 I <sub>L</sub> to 0.9 I <sub>L</sub> (3); (4)  |      | 0.1  |      | μs   |

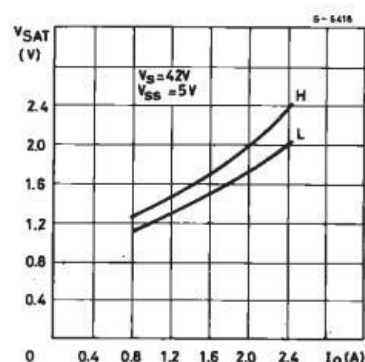
1) Sensing voltage can be -1V for t ≤ 50 μsec; in steady state V<sub>SEN</sub> min ≥ -0.5 V.

2) See fig. 2.

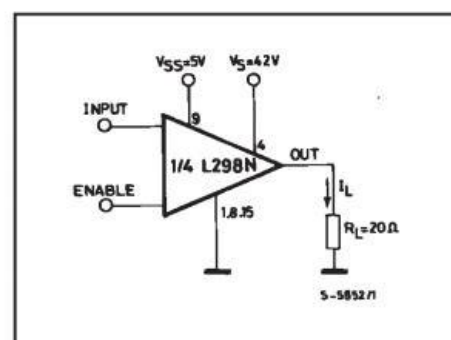
3) See fig. 1.

4) The load must be a pure resistor.

**Figure 1 : Typical Saturation Voltage vs. Output Current.**



**Figure 2 : Switching Times Test Circuits.**



Note : For INPUT Switching, set EN = H  
For ENABLE Switching, set IN = H

Figure 3 : Source Current Delay Times vs. Input or Enable Switching.

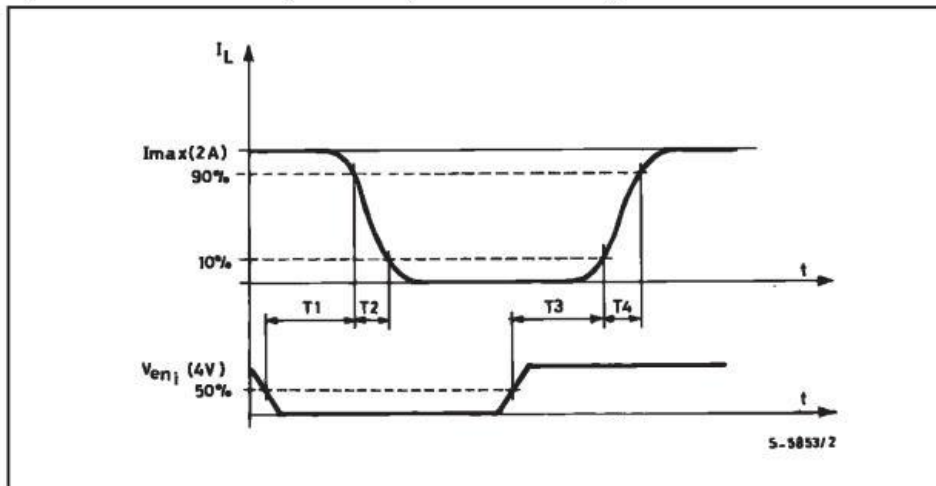
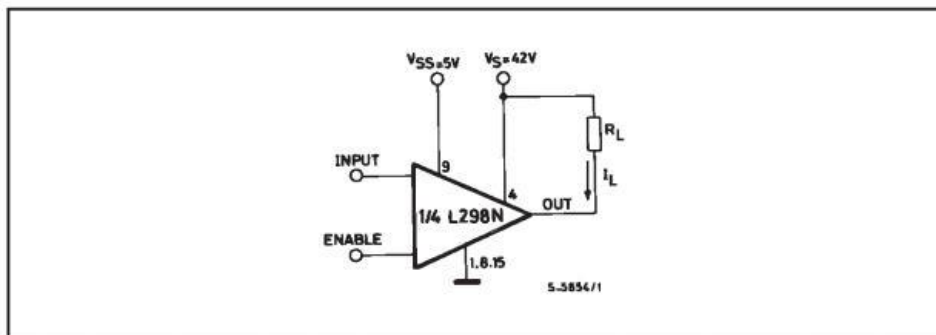


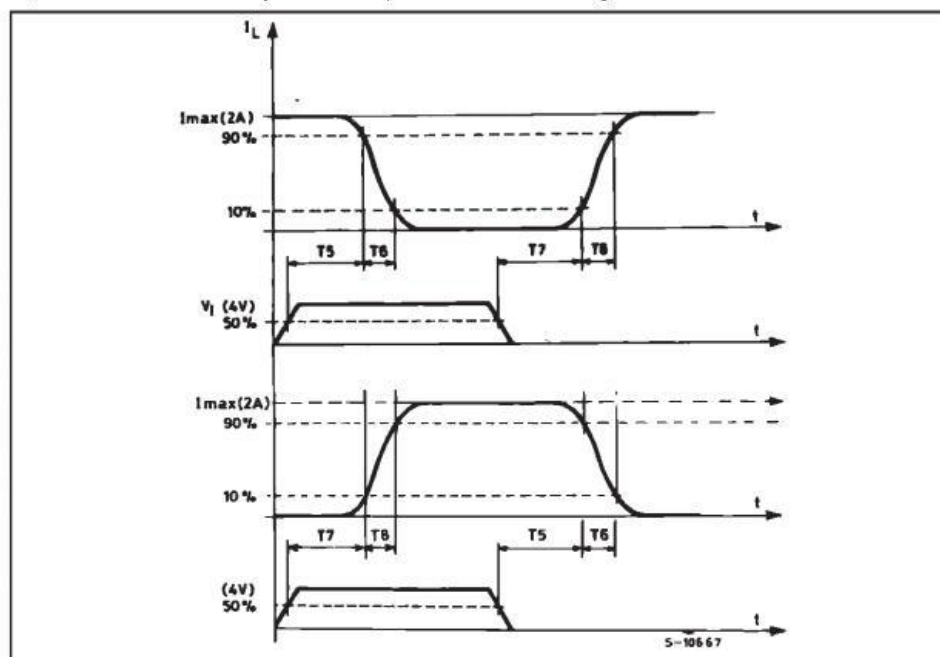
Figure 4 : Switching Times Test Circuits.



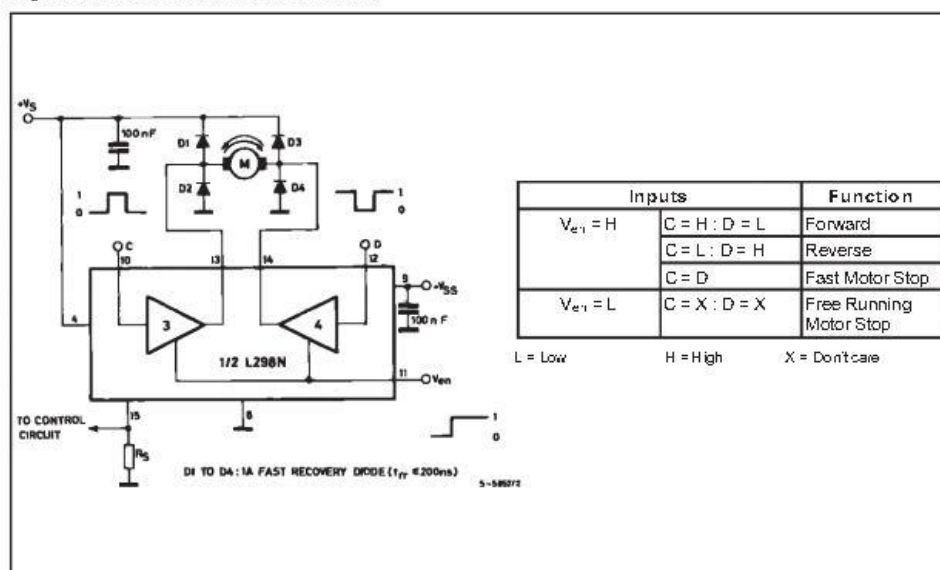
Note : For INPUT Switching, set EN = H  
For ENABLE Switching, set IN = L

**L298**

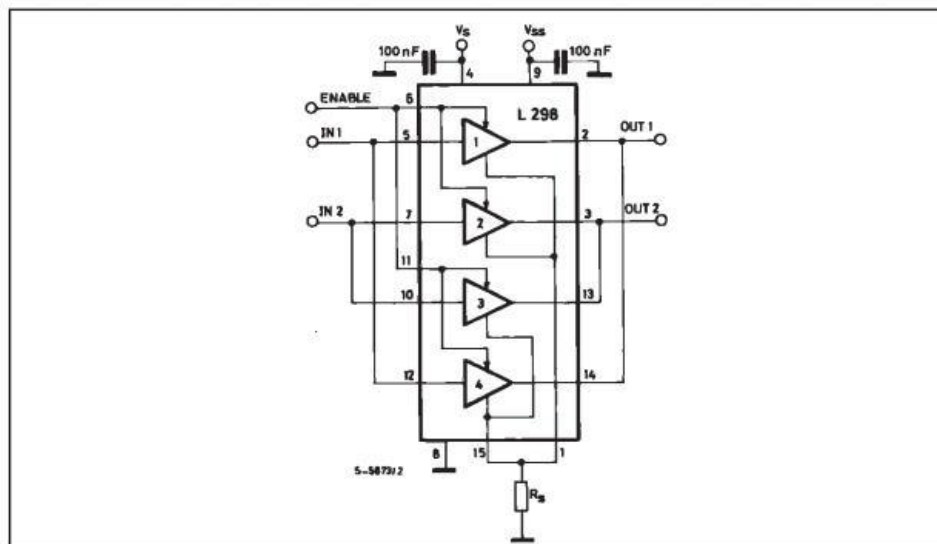
**Figure 5 : Sink Current Delay Times vs. Input 0 V Enable Switching.**



**Figure 6 : Bidirectional DC Motor Control.**



**Figure 7 :** For higher currents, outputs can be paralleled. Take care to parallel channel 1 with channel 4 and channel 2 with channel 3.



#### APPLICATION INFORMATION (Refer to the block diagram)

##### 1.1. POWER OUTPUT STAGE

The L298 integrates two power output stages (A; B). The power output stage is a bridge configuration and its outputs can drive an inductive load in common or differential mode, depending on the state of the inputs. The current that flows through the load comes out from the bridge at the sense output: an external resistor ( $R_{SA}$ ;  $R_{SB}$ .) allows to detect the intensity of this current.

##### 1.2. INPUT STAGE

Each bridge is driven by means of four gates the input of which are  $IN1$ ;  $IN2$ ;  $EN_A$  and  $IN3$ ;  $IN4$ ;  $EN_B$ . The  $IN$  inputs set the bridge state when the  $EN$  input is high; a low state of the  $EN$  input inhibits the bridge. All the inputs are TTL compatible.

##### 2. SUGGESTIONS

A non inductive capacitor, usually of 100 nF, must be foreseen between both  $V_S$  and  $V_{SS}$ , to ground, as near as possible to GND pin. When the large capacitor of the power supply is too far from the IC, a second smaller one must be foreseen near the L298.

The sense resistor, not of a wire wound type, must be grounded near the negative pole of  $V_S$  that must be near the GND pin of the I.C.

Each input must be connected to the source of the driving signals by means of a very short path.

**Turn-On and Turn-Off :** Before to Turn-ON the Supply Voltage and before to Turn it OFF, the Enable input must be driven to the Low state.

##### 3. APPLICATIONS

Fig 6 shows a bidirectional DC motor control Schematic Diagram for which only one bridge is needed. The external bridge of diodes D1 to D4 is made by four fast recovery elements ( $t_{rr} \leq 200$  nsec) that must be chosen of a VF as low as possible at the worst case of the load current.

The sense output voltage can be used to control the current amplitude by chopping the inputs, or to provide overcurrent protection by switching low the enable input.

The brake function (Fast motor stop) requires that the Absolute Maximum Rating of 2 Amps must never be overcome.

When the repetitive peak current needed from the load is higher than 2 Amps, a paralleled configuration can be chosen (See Fig.7).

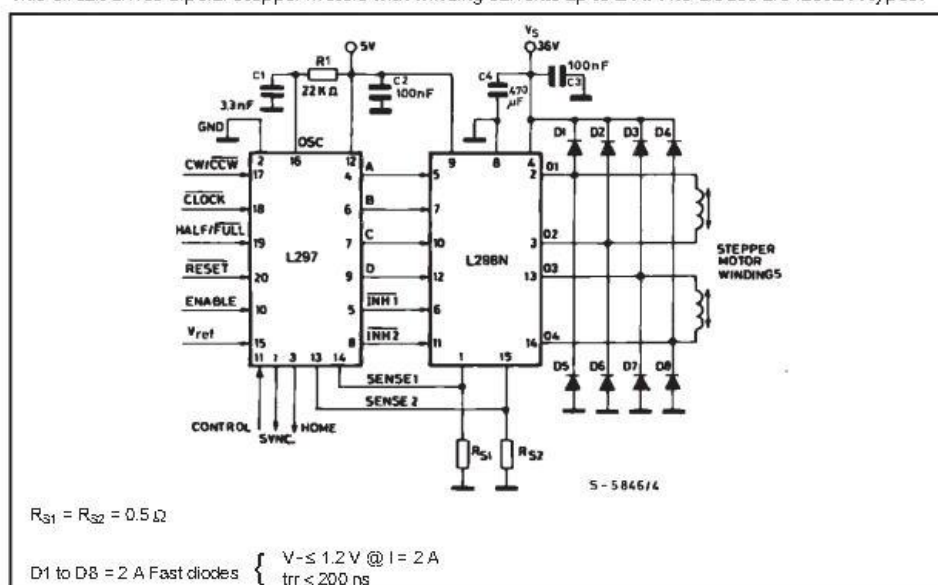
An external bridge of diodes are required when inductive loads are driven and when the inputs of the IC are chopped; Schottky diodes would be preferred.

Fig 9 shows an example of P.C.B. designed for the application of Fig 8.

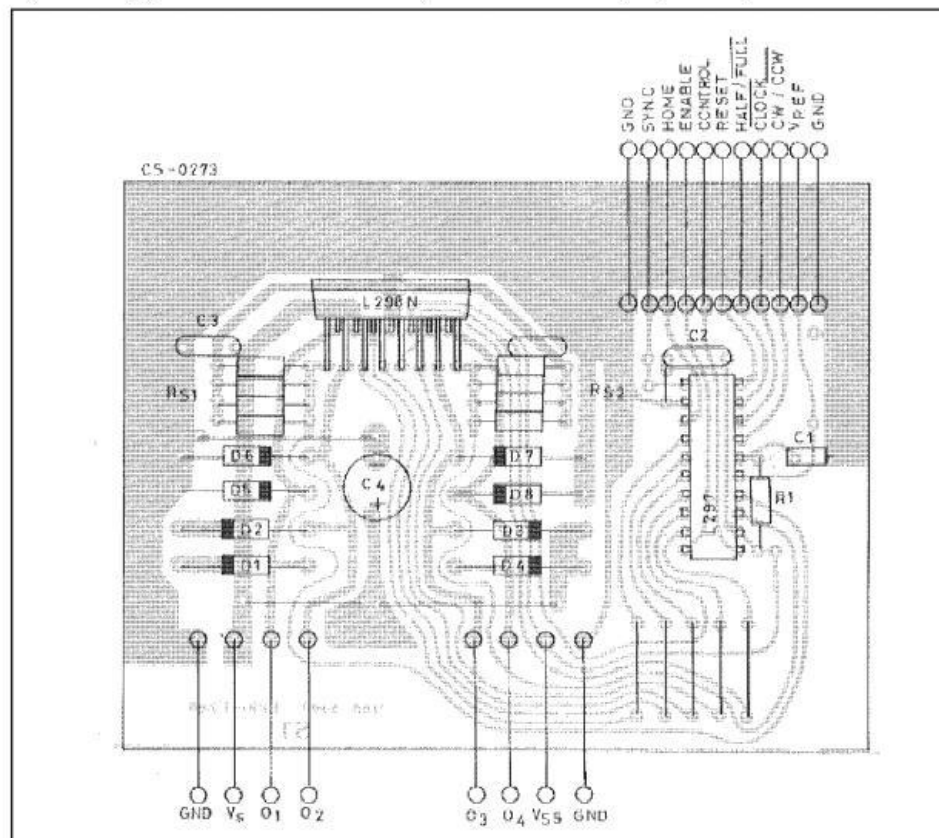
Fig 10 shows a second two phase bipolar stepper motor control circuit where the current is controlled by the I.C. L6506.

**Figure 8 : Two Phase Bipolar Stepper Motor Circuit.**

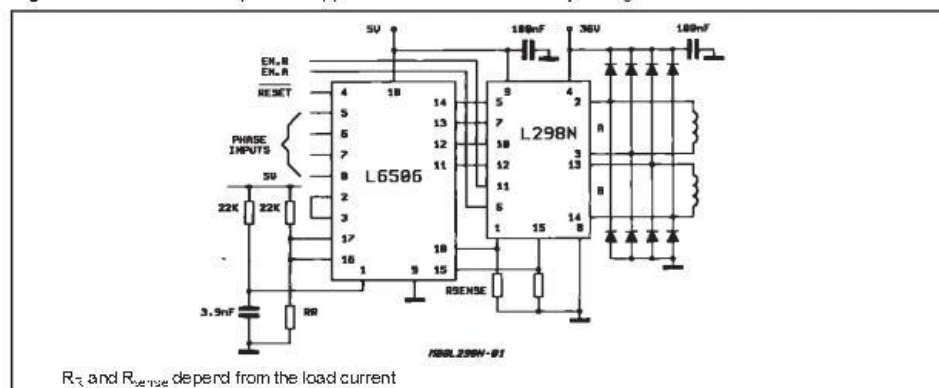
This circuit drives bipolar stepper motors with winding currents up to 2 A. The diodes are fast 2 A types.



**Figure 9 : Suggested Printed Circuit Board Layout for the Circuit of fig. 8 (1:1 scale).**



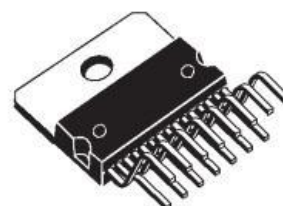
**Figure 10 : Two Phase Bipolar Stepper Motor Control Circuit by Using the Current Controller L6506.**



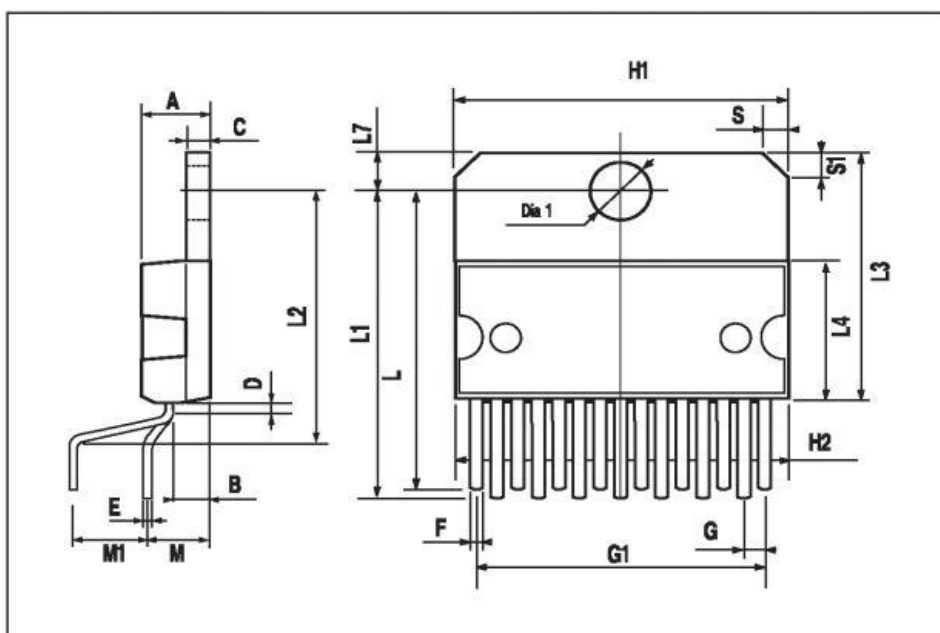
# L298

| DIM. | mm    |       |       | inch  |       |       |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | MIN.  | TYP.  | MAX.  | MIN.  | TYP.  | MAX.  |
| A    |       |       | 5     |       |       | 0.197 |
| B    |       |       | 2.65  |       |       | 0.104 |
| C    |       |       | 1.6   |       |       | 0.063 |
| D    |       | 1     |       |       | 0.039 |       |
| E    | 0.49  |       | 0.55  | 0.019 |       | 0.022 |
| F    | 0.66  |       | 0.75  | 0.026 |       | 0.030 |
| G    | 1.02  | 1.27  | 1.52  | 0.040 | 0.050 | 0.060 |
| G1   | 17.53 | 17.78 | 18.03 | 0.690 | 0.700 | 0.710 |
| H1   | 19.6  |       |       | 0.772 |       |       |
| H2   |       |       | 20.2  |       |       | 0.795 |
| L    | 21.9  | 22.2  | 22.5  | 0.862 | 0.874 | 0.886 |
| L1   | 21.7  | 22.1  | 22.5  | 0.854 | 0.870 | 0.886 |
| L2   | 17.65 |       | 18.1  | 0.695 |       | 0.713 |
| L3   | 17.25 | 17.5  | 17.75 | 0.679 | 0.689 | 0.699 |
| L4   | 10.3  | 10.7  | 10.9  | 0.406 | 0.421 | 0.429 |
| L7   | 2.65  |       | 2.9   | 0.104 |       | 0.114 |
| M    | 4.25  | 4.55  | 4.85  | 0.167 | 0.179 | 0.191 |
| M1   | 4.63  | 5.08  | 5.53  | 0.182 | 0.200 | 0.218 |
| S    | 1.9   |       | 2.6   | 0.075 |       | 0.102 |
| S1   | 1.9   |       | 2.6   | 0.075 |       | 0.102 |
| Dia1 | 3.65  |       | 3.85  | 0.144 |       | 0.152 |

## OUTLINE AND MECHANICAL DATA



Multiwatt15 V



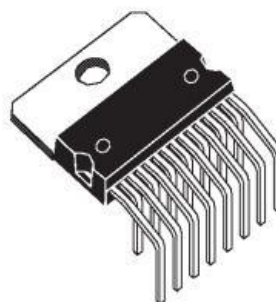
10/13



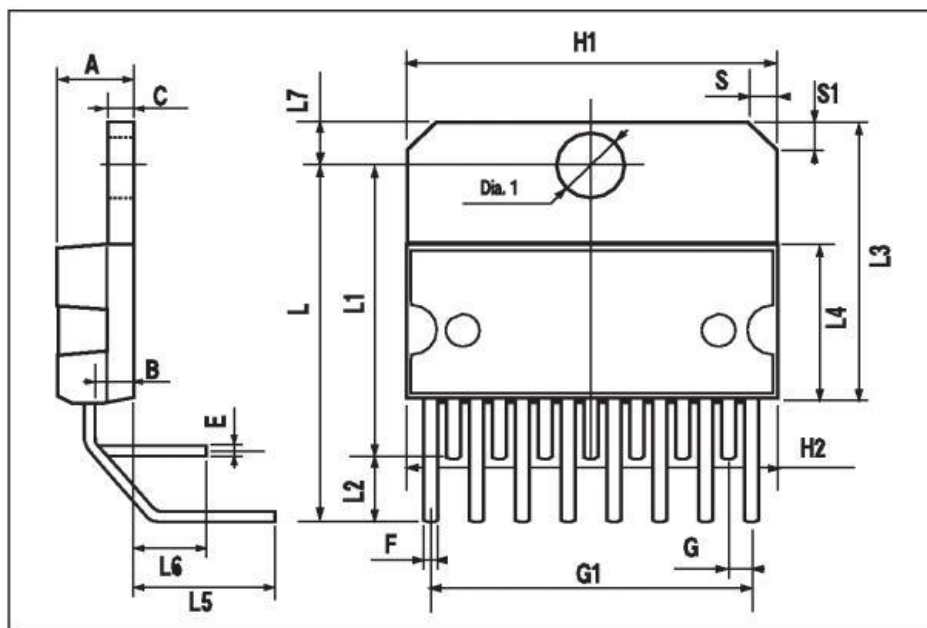
L298

| DIM. | mm    |       |       | inch  |       |       |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | MIN.  | TYP.  | MAX.  | MIN.  | TYP.  | MAX.  |
| A    |       |       | 5     |       |       | 0.197 |
| B    |       |       | 2.65  |       |       | 0.104 |
| C    |       |       | 1.6   |       |       | 0.063 |
| E    | 0.49  |       | 0.55  | 0.019 |       | 0.022 |
| F    | 0.66  |       | 0.75  | 0.026 |       | 0.030 |
| G    | 1.14  | 1.27  | 1.4   | 0.045 | 0.050 | 0.055 |
| G1   | 17.57 | 17.78 | 17.91 | 0.692 | 0.700 | 0.705 |
| H1   | 19.6  |       |       | 0.772 |       |       |
| H2   |       |       | 20.2  |       |       | 0.795 |
| L    |       | 20.57 |       |       | 0.810 |       |
| L1   |       | 18.03 |       |       | 0.710 |       |
| L2   |       | 2.54  |       |       | 0.100 |       |
| L3   | 17.25 | 17.5  | 17.75 | 0.679 | 0.689 | 0.699 |
| L4   | 10.3  | 10.7  | 10.9  | 0.406 | 0.421 | 0.429 |
| L5   |       | 5.28  |       |       | 0.208 |       |
| L6   |       | 2.38  |       |       | 0.094 |       |
| L7   | 2.65  |       | 2.9   | 0.104 |       | 0.114 |
| S    | 1.9   |       | 2.6   | 0.075 |       | 0.102 |
| S1   | 1.9   |       | 2.6   | 0.075 |       | 0.102 |
| Dia1 | 3.65  |       | 3.85  | 0.144 |       | 0.152 |

# OUTLINE AND MECHANICAL DATA



Multiwatt15 H



11/13

# L298

| DIM.   | mm   |       |            | inch  |       |       |
|--------|------|-------|------------|-------|-------|-------|
|        | MIN. | TYP.  | MAX.       | MIN.  | TYP.  | MAX.  |
| A      |      |       | 3.6        |       |       | 0.142 |
| a1     | 0.1  |       | 0.3        | 0.004 |       | 0.012 |
| a2     |      |       | 3.3        |       |       | 0.130 |
| a3     | 0    |       | 0.1        | 0.000 |       | 0.004 |
| b      | 0.4  |       | 0.53       | 0.016 |       | 0.021 |
| c      | 0.23 |       | 0.32       | 0.009 |       | 0.013 |
| D (1)  | 15.8 |       | 16         | 0.622 |       | 0.630 |
| D1     | 9.4  |       | 9.8        | 0.370 |       | 0.386 |
| E      | 13.9 |       | 14.5       | 0.547 |       | 0.570 |
| e      |      | 1.27  |            |       | 0.050 |       |
| e3     |      | 11.43 |            |       | 0.450 |       |
| E1 (1) | 10.9 |       | 11.1       | 0.429 |       | 0.437 |
| E2     |      |       | 2.9        |       |       | 0.114 |
| E3     | 5.8  |       | 6.2        | 0.228 |       | 0.244 |
| G      | 0    |       | 0.1        | 0.000 |       | 0.004 |
| H      | 15.5 |       | 15.9       | 0.610 |       | 0.626 |
| h      |      |       | 1.1        |       |       | 0.043 |
| L      | 0.8  |       | 1.1        | 0.031 |       | 0.043 |
| N      |      |       | 10° (max.) |       |       |       |
| S      |      |       | 8° (max.)  |       |       |       |
| T      |      | 10    |            |       | 0.394 |       |

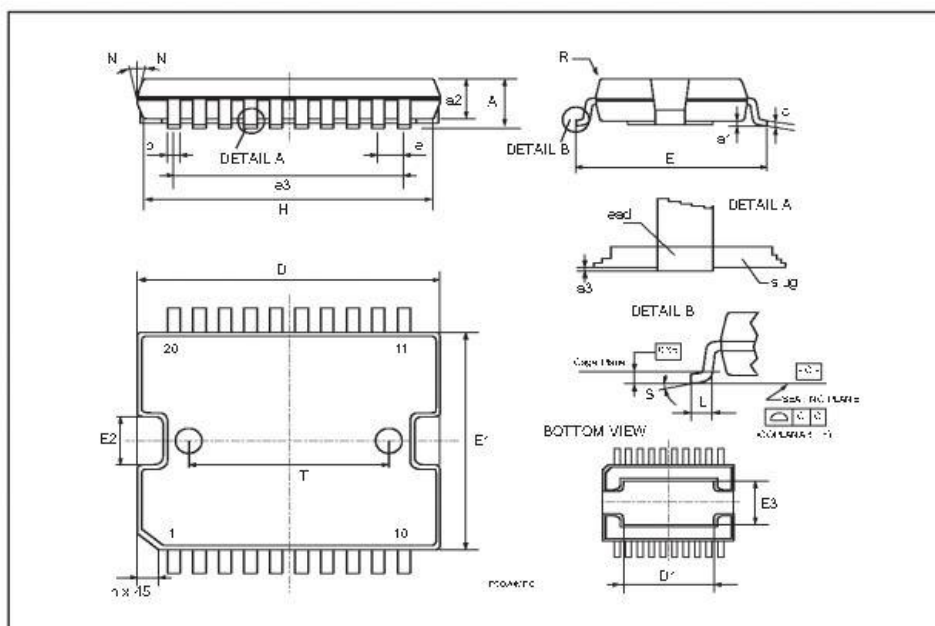
(1) "D" and "F" do not include mold flash or protrusions.  
- Mold flash or protrusions shall not exceed 0.15 mm (0.006").  
- Critical dimensions "E", "G" and "a3"

## OUTLINE AND MECHANICAL DATA



JEDEC MO-166

PowerSO20

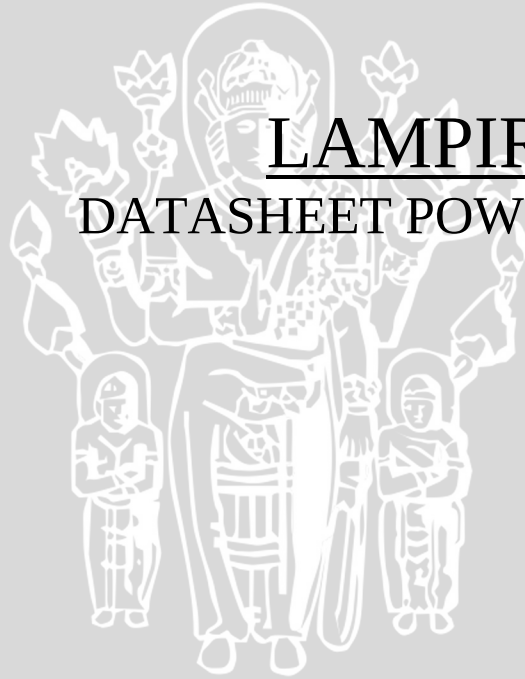


12/13





UNIVERSITAS BRAWIJAYA



## LAMPIRAN VIII DATASHEET POWER SUPPLY

Product  
FolderSample &  
BuyTechnical  
DocumentsTools &  
SoftwareSupport &  
Community

LM2596

SNVS240 – NOVEMBER 1996 – REVISED MAY 2016

## LM2596 SIMPLE SWITCHER® Power Converter 150-kHz 3-A Step-Down Voltage Regulator

### 1 Features

- 3.3-V, 5-V, 12-V, and Adjustable Output Versions
- Adjustable Version Output Voltage Range: 1.2-V to 37-V  $\pm$  4% Maximum Over Line and Load Conditions
- Available in TO-220 and TO-263 Packages
- 3-A Output Load Current
- Input Voltage Range Up to 40 V
- Requires Only 4 External Components
- Excellent Line and Load Regulation Specifications
- 150-kHz Fixed-Frequency Internal Oscillator
- TTL Shutdown Capability
- Low Power Standby Mode,  $I_Q$  Typically 80  $\mu$ A
- High Efficiency
- Uses Readily Available Standard Inductors
- Thermal Shutdown and Current-Limit Protection
- Create a Custom Design Using the LM2596 with the [WEBENCH Power Designer](#)

### 2 Applications

- Simple High-Efficiency Step-Down (Buck) Regulator
- On-Card Switching Regulators
- Positive to Negative Converter

### 3 Description

The LM2596 series of regulators are monolithic integrated circuits that provide all the active functions for a step-down (buck) switching regulator, capable of driving a 3-A load with excellent line and load regulation. These devices are available in fixed output voltages of 3.3 V, 5 V, 12 V, and an adjustable output version.

Requiring a minimum number of external components, these regulators are simple to use and include internal frequency compensation, and a fixed-frequency oscillator.

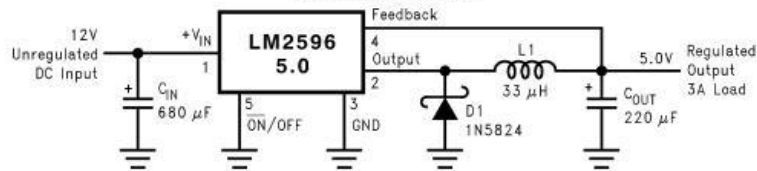
The LM2596 series operates at a switching frequency of 150 kHz, thus allowing smaller sized filter components than what would be required with lower frequency switching regulators. Available in a standard 7-pin TO-220 package with several different lead bend options, and a 7-pin TO-263 surface mount package.

#### Device Information<sup>(1)</sup>

| PART NUMBER | PACKAGE    | BODY SIZE (NOM)             |
|-------------|------------|-----------------------------|
| LM2596      | TO-220 (7) | 14.986 mm $\times$ 10.16 mm |
|             | TO-263 (7) | 10.10 mm $\times$ 8.89 mm   |

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.

#### Typical Application



(Fixed Output Voltage Versions)

Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated



An IMPORTANT NOTICE at the end of this data sheet addresses availability, warranty, changes, use in safety-critical applications, intellectual property matters and other important disclaimers. PRODUCTION DATA.

**LM2596**

SNVS210 – NOVEMBER 1999 – REVISED MAY 2016

www.ti.com

**Table of Contents**

|                                                                    |           |                                                                  |           |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 Features</b> .....                                            | <b>1</b>  | <b>8.2 Functional Block Diagram</b> .....                        | <b>10</b> |
| <b>2 Applications</b> .....                                        | <b>1</b>  | <b>8.3 Feature Description</b> .....                             | <b>10</b> |
| <b>3 Description</b> .....                                         | <b>1</b>  | <b>8.4 Device Functional Modes</b> .....                         | <b>14</b> |
| <b>4 Revision History</b> .....                                    | <b>2</b>  | <b>9 Application and Implementation</b> .....                    | <b>15</b> |
| <b>5 Description (continued)</b> .....                             | <b>3</b>  | 9.1 Application Information .....                                | 15        |
| <b>6 Pin Configuration and Functions</b> .....                     | <b>3</b>  | 9.2 Typical Applications .....                                   | 22        |
| <b>7 Specifications</b> .....                                      | <b>4</b>  | <b>10 Power Supply Recommendations</b> .....                     | <b>31</b> |
| 7.1 Absolute Maximum Ratings .....                                 | 4         | <b>11 Layout</b> .....                                           | <b>31</b> |
| 7.2 CSD Ratings .....                                              | 4         | 11.1 Layout Guidelines .....                                     | 31        |
| 7.3 Operating Conditions .....                                     | 4         | 11.2 Layout Examples .....                                       | 31        |
| 7.4 Thermal Information .....                                      | 4         | 11.3 Thermal Considerations .....                                | 33        |
| 7.5 Electrical Characteristics – 3.3-V Version .....               | 5         | <b>12 Device and Documentation Support</b> .....                 | <b>35</b> |
| 7.6 Electrical Characteristics – 5-V Version .....                 | 5         | 12.1 Custom Design with WEBENCH Tools .....                      | 35        |
| 7.7 Electrical Characteristics – 12-V Version .....                | 5         | 12.2 Receiving Notification of Documentation Updates .....       | 35        |
| 7.8 Electrical Characteristics – Adjustable Voltage Version .....  | 5         | 12.3 Community Resources .....                                   | 35        |
| 7.9 Electrical Characteristics – All Output Voltage Versions ..... | 6         | 12.4 Trademarks .....                                            | 35        |
| 7.10 Typical Characteristics .....                                 | 7         | 12.5 Electrostatic Discharge Caution .....                       | 35        |
| <b>8 Detailed Description</b> .....                                | <b>10</b> | 12.6 Glossary .....                                              | 35        |
| 8.1 Overview .....                                                 | 10        | <b>13 Mechanical, Packaging, and Orderable Information</b> ..... | <b>35</b> |

**4 Revision History**

NOTE: Page numbers for previous revisions may differ from page numbers in the current version.

| <b>Changes from Revision C (April 2013) to Revision D</b>                                                                                                                                                                                                                                   | <b>Page</b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| • Added ESD Ratings table, Feature Description section, Device Functional Modes, Application and Implementation section, Power Supply Recommendations section, Layout section, Device and Documentation Support section, and Mechanical, Packaging, and Orderable Information section. .... | 1           |
| • Removed all references to design software Switchers Made Simple .....                                                                                                                                                                                                                     | 1           |
| <b>Changes from Revision B (April 2013) to Revision C</b>                                                                                                                                                                                                                                   | <b>Page</b> |
| • Changed layout of National Semiconductor Data Sheet to TI format .....                                                                                                                                                                                                                    | 10          |



www.ti.com

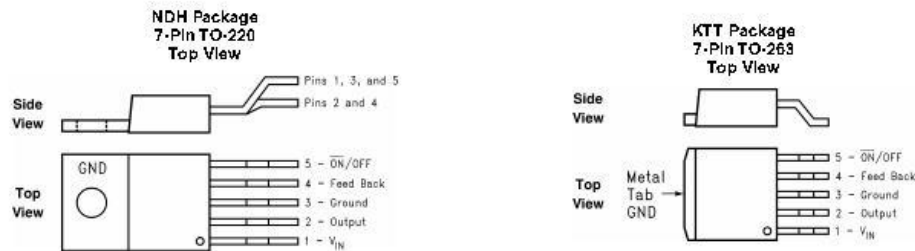
LM2596  
SNVS210 – NOVEMBER 1996 – REVISED MAY 2016

## 5 Description (continued)

A standard series of inductors are available from several different manufacturers optimized for use with the LM2596 series. This feature greatly simplifies the design of switch-mode power supplies.

Other features include a  $\pm 4\%$  tolerance on output voltage under specified input voltage and output load conditions, and  $\pm 15\%$  on the oscillator frequency. External shutdown is included, featuring typically 80  $\mu\text{A}$  standby current. Self-protection features include a two stage frequency reducing current limit for the output switch and an overtemperature shutdown for complete protection under fault conditions.

## 6 Pin Configuration and Functions



Pin Functions

| PIN |          | I/O | DESCRIPTION                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----|----------|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| NO. | NAME     |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 1   | $V_{IN}$ | I   | This is the positive input supply for the IC switching regulator. A suitable input bypass capacitor must be present at this pin to minimize voltage transients and to supply the switching currents required by the regulator.                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 2   | Output   | O   | Internal switch. The voltage at this pin switches between approximately $(+V_{IN} - V_{DS(NT)})$ and approximately $-0.5\text{ V}$ , with a duty cycle of $V_{OUT} / V_{IN}$ . To minimize coupling to sensitive circuitry, the PCB copper area connected to this pin must be kept to a minimum.                                                                                                                                                                                                                      |
| 3   | Ground   | —   | Circuit ground.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 4   | Feedback | I   | Senses the regulated output voltage to complete the feedback loop.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 5   | ON/OFF   | I   | Allows the switching regulator circuit to be shut down using logic signals thus dropping the total input supply current to approximately 80 $\mu\text{A}$ . Pulling this pin below a threshold voltage of approximately 1.3 V turns the regulator on, and pulling this pin above 1.3 V (up to a maximum of 25 V) shuts the regulator down. If this shutdown feature is not required, the ON/OFF pin can be wired to the ground pin or it can be left open. In either case, the regulator will be in the ON condition. |


**LM2596**

SNVS210 – NOVEMBER 1999 – REVISED MAY 2016

[www.ti.com](http://www.ti.com)

## 7 Specifications

### 7.1 Absolute Maximum Ratings

 over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)<sup>(1)(2)</sup>

|                                           |                               |                    | MIN                | MAX | UNIT |
|-------------------------------------------|-------------------------------|--------------------|--------------------|-----|------|
| Maximum supply voltage (V <sub>IN</sub> ) |                               |                    |                    | 45  | V    |
| SD/SS pin input voltage <sup>(3)</sup>    |                               |                    |                    | 6   | V    |
| Delay pin voltage <sup>(3)</sup>          |                               |                    |                    | 1.5 | V    |
| Flag pin voltage                          |                               |                    | −0.3               | 45  | V    |
| Feedback pin voltage                      |                               |                    | −0.3               | 25  | V    |
| Output voltage to ground, steady-state    |                               |                    |                    | −1  | V    |
| Power dissipation                         |                               |                    | Internally limited |     |      |
| Load temperature                          | KTW package                   | Vapor phase (60 s) |                    | 215 | °C   |
|                                           |                               | Infrared (10 s)    |                    | 245 |      |
|                                           | NDZ package, soldering (10 s) |                    |                    | 260 |      |
| Maximum junction temperature              |                               |                    |                    | 150 | °C   |
| Storage temperature, T <sub>stg</sub>     |                               |                    | −65                | 150 | °C   |

- (1) Stresses beyond those listed under *Absolute Maximum Ratings* may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, which do not imply functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under *Recommended Operating Conditions*. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.
- (2) If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the Texas Instruments Sales Office/ Distributors for availability and specifications.
- (3) Voltage internally clamped. If clamp voltage is exceeded, limit current to a maximum of 1 mA.

### 7.2 ESD Ratings

|           |                         |                                                                   | VALUE | UNIT |
|-----------|-------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------|------|
| $V_{ESD}$ | Electrostatic discharge | Human-body model (HBM), per ANSI/ESDA/JEDEC JS-001 <sup>(1)</sup> | ±2000 | V    |

- (1) JEDEC document JEP155 states that 500-V HBM allows safe manufacturing with a standard ESD control process.

### 7.3 Operating Conditions

|                |  | MIN | MAX | UNIT |
|----------------|--|-----|-----|------|
| Supply voltage |  | 4.5 | 40  | V    |
| Temperature    |  | -40 | 125 | °C   |

### 7.4 Thermal Information

| THERMAL METRIC <sup>(1)</sup> |                                                          | LM2596             |              | UNIT |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------|--------------|------|
|                               |                                                          | KTW (TO-263)       | NDZ (TO-220) |      |
|                               |                                                          | 7 PINS             | 7 PINS       |      |
| $R_{\theta JA}$               | Junction-to-ambient thermal resistance <sup>(2)(3)</sup> | See <sup>(4)</sup> | 50           | °C/W |
|                               |                                                          | 50                 | —            |      |
|                               |                                                          | 30                 | —            |      |
|                               |                                                          | 20                 | —            |      |
| $R_{\theta JC}$               | Junction-to-case (top) thermal resistance                | 2                  | 2            | °C/W |

- (1) For more information about traditional and new thermal metrics, see the *Semiconductor and IC Package Thermal Metrics* application report, [SPRA953](#).
- (2) The package thermal impedance is calculated in accordance to JEDEC 51-7.
- (3) Thermal Resistances were simulated on a 4-layer, JEDEC board.
- (4) Junction to ambient thermal resistance (no external heat sink) for the package mounted TO-220 package mounted vertically, with the leads soldered to a printed circuit board with (1 oz.) copper area of approximately 1 in<sup>2</sup>.
- (5) Junction to ambient thermal resistance with the TO-263 package tab soldered to a single sided printed circuit board with 0.5 in<sup>2</sup> of 1-oz copper area.
- (6) Junction to ambient thermal resistance with the TO-263 package tab soldered to a single sided printed circuit board with 2.5 in<sup>2</sup> of 1-oz copper area.
- (7) Junction to ambient thermal resistance with the TO-263 package tab soldered to a double sided printed circuit board with 3 in<sup>2</sup> of 1-oz copper area on the LM2596S side of the board, and approximately 16 in<sup>2</sup> of copper on the other side of the PCB.



### 7.5 Electrical Characteristics – 3.3-V Version

Specifications are for  $T_J = 25^\circ\text{C}$  (unless otherwise noted)

| PARAMETER                                                         | TEST CONDITIONS                                                                             | MIN <sup>(1)</sup>                                                              | TYP <sup>(2)</sup> | MAX <sup>(3)</sup> | UNIT |
|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|------|
| SYSTEM PARAMETERS <sup>(1)</sup> (see Figure 35 for test circuit) |                                                                                             |                                                                                 |                    |                    |      |
| $V_{O\_L}$ Output voltage                                         | $1.75\text{ V} \leq V_I \leq 40\text{ V}$ ,<br>$0.2\text{ A} \leq I_{O\_L} \leq 3\text{ A}$ | $T_J = 25^\circ\text{C}$<br>$-10^\circ\text{C} \leq T_J \leq +25^\circ\text{C}$ | 3.166<br>3.3       | 3.432<br>3.465     | V    |
| $\eta$ Efficiency                                                 | $V_I = 12\text{ V}$ , $I_{O\_L} = 3\text{ A}$                                               |                                                                                 | 73%                |                    |      |

- (1) All room temperature limits are 100% production tested. All limits at temperature extremes are specified via correlation using standard Statistical Quality Control (SQC) methods. All limits are used to calculate Average Outgoing Quality Level (AOQL).
- (2) Typical numbers are at  $25^\circ\text{C}$  and represent the most likely norm.
- (3) External components such as the catch diode, inductor, input and output capacitors can affect switching regulator system performance. When the LM2596 is used as shown in Figure 35, system performance is shown in the test conditions column.

### 7.6 Electrical Characteristics – 5-V Version

Specifications are for  $T_J = 25^\circ\text{C}$  (unless otherwise noted)

| PARAMETER                                                         | TEST CONDITIONS                                                                          | MIN <sup>(1)</sup>                                                              | TYP <sup>(2)</sup> | MAX <sup>(3)</sup> | UNIT |
|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|------|
| SYSTEM PARAMETERS <sup>(1)</sup> (see Figure 35 for test circuit) |                                                                                          |                                                                                 |                    |                    |      |
| $V_{O\_L}$ Output voltage                                         | $7\text{ V} \leq V_I \leq 40\text{ V}$ ,<br>$0.2\text{ A} \leq I_{O\_L} \leq 3\text{ A}$ | $T_J = 25^\circ\text{C}$<br>$-10^\circ\text{C} \leq T_J \leq +25^\circ\text{C}$ | 4.6<br>4.75        | 5.2<br>5.25        | V    |
| $\eta$ Efficiency                                                 | $V_I = 12\text{ V}$ , $I_{O\_L} = 3\text{ A}$                                            |                                                                                 | 80%                |                    |      |

- (1) All room temperature limits are 100% production tested. All limits at temperature extremes are specified via correlation using standard Statistical Quality Control (SQC) methods. All limits are used to calculate Average Outgoing Quality Level (AOQL).
- (2) Typical numbers are at  $25^\circ\text{C}$  and represent the most likely norm.
- (3) External components such as the catch diode, inductor, input and output capacitors can affect switching regulator system performance. When the LM2596 is used as shown in Figure 35, system performance is shown in the test conditions column.

### 7.7 Electrical Characteristics – 12-V Version

Specifications are for  $T_J = 25^\circ\text{C}$  (unless otherwise noted)

| PARAMETER                                                         | TEST CONDITIONS                                                                            | MIN <sup>(1)</sup>                                                              | TYP <sup>(2)</sup> | MAX <sup>(3)</sup> | UNIT |
|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|------|
| SYSTEM PARAMETERS <sup>(1)</sup> (see Figure 35 for test circuit) |                                                                                            |                                                                                 |                    |                    |      |
| $V_{O\_L}$ Output voltage                                         | $1.5\text{ V} \leq V_I \leq 40\text{ V}$ ,<br>$0.2\text{ A} \leq I_{O\_L} \leq 3\text{ A}$ | $T_J = 25^\circ\text{C}$<br>$-10^\circ\text{C} \leq T_J \leq +25^\circ\text{C}$ | 11.52<br>11.4      | 12.48<br>12.6      | V    |
| $\eta$ Efficiency                                                 | $V_I = 25\text{ V}$ , $I_{O\_L} = 3\text{ A}$                                              |                                                                                 | 90%                |                    |      |

- (1) All room temperature limits are 100% production tested. All limits at temperature extremes are specified via correlation using standard Statistical Quality Control (SQC) methods. All limits are used to calculate Average Outgoing Quality Level (AOQL).
- (2) Typical numbers are at  $25^\circ\text{C}$  and represent the most likely norm.
- (3) External components such as the catch diode, inductor, input and output capacitors can affect switching regulator system performance. When the LM2596 is used as shown in Figure 35, system performance is shown in the test conditions column.

### 7.8 Electrical Characteristics – Adjustable Voltage Version

Specifications are for  $T_J = 25^\circ\text{C}$  (unless otherwise noted)

| PARAMETER                                                         | TEST CONDITIONS                                                                                                                                              | MIN <sup>(1)</sup>                                                              | TYP <sup>(2)</sup> | MAX <sup>(3)</sup> | UNIT |
|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|------|
| SYSTEM PARAMETERS <sup>(1)</sup> (see Figure 35 for test circuit) |                                                                                                                                                              |                                                                                 |                    |                    |      |
| $V_{FB}$ Feedback voltage                                         | $1.5\text{ V} \leq V_I \leq 40\text{ V}$ , $0.2\text{ A} \leq I_{O\_L} \leq 3\text{ A}$<br>$V_{O\_L}$ programmed for 3 V<br>(see Figure 35 for test circuit) | $T_J = 25^\circ\text{C}$<br>$-10^\circ\text{C} \leq T_J \leq +25^\circ\text{C}$ | 1.23<br>1.193      | 1.267<br>1.28      | V    |
| $\eta$ Efficiency                                                 | $V_I = 12\text{ V}$ , $V_{O\_L} = 3\text{ V}$ , $I_{O\_L} = 3\text{ A}$                                                                                      |                                                                                 | 73%                |                    |      |

- (1) All room temperature limits are 100% production tested. All limits at temperature extremes are specified via correlation using standard Statistical Quality Control (SQC) methods. All limits are used to calculate Average Outgoing Quality Level (AOQL).
- (2) Typical numbers are at  $25^\circ\text{C}$  and represent the most likely norm.
- (3) External components such as the catch diode, inductor, input and output capacitors can affect switching regulator system performance. When the LM2596 is used as shown in Figure 35, system performance is shown in the test conditions column.



## LM2596

SNVS210 – NOVEMBER 1999 – REVISED MAY 2016

www.ti.com

## 7.9 Electrical Characteristics – All Output Voltage Versions

Specifications are for  $T_c = 25^\circ\text{C}$ ,  $I_{\text{LOAD}} = 500\text{ mA}$ ,  $V_N = 12\text{ V}$  for the 3.3-V, 5-V, and adjustable version, and  $V_N = 24\text{ V}$  for the 12-V version (unless otherwise noted).

| PARAMETER                                                    |                                                              | TEST CONDITIONS                                                           |                                                                           | MIN <sup>(1)</sup> | TYP <sup>(2)</sup> | MAX <sup>(1)</sup> | UNIT          |
|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| DEVICE PARAMETERS                                            |                                                              |                                                                           |                                                                           |                    |                    |                    |               |
| $I_B$                                                        | Feedback bias current                                        | Adjustable version only,<br>$V_{-3} = 1.3\text{ V}$                       | $T_c = 25^\circ\text{C}$<br>$-40^\circ\text{C} < T_c < 125^\circ\text{C}$ |                    | 10                 | 50                 | nA            |
|                                                              |                                                              |                                                                           |                                                                           |                    |                    | 100                |               |
| $f_O$                                                        | Oscillator frequency <sup>(3)</sup>                          | $T_c = 25^\circ\text{C}$<br>$-40^\circ\text{C} < T_c < 125^\circ\text{C}$ |                                                                           | 127                | 150                | 173                | kHz           |
|                                                              |                                                              |                                                                           |                                                                           | 110                |                    | 173                |               |
| $V_{\text{SAT}}$                                             | Saturation voltage <sup>(4)</sup>                            | $I_{\text{OUT}} = 3\text{ A}$                                             | $T_c = 25^\circ\text{C}$<br>$-40^\circ\text{C} < T_c < 125^\circ\text{C}$ |                    | 1.16               | 1.4                | V             |
|                                                              |                                                              |                                                                           |                                                                           |                    |                    | 1.5                |               |
| DC                                                           | Max duty cycle (ON) <sup>(5)</sup>                           |                                                                           |                                                                           |                    | 100%               |                    |               |
|                                                              | Min duty cycle (OFF) <sup>(5)</sup>                          |                                                                           |                                                                           |                    | 0%                 |                    |               |
| $I_{\text{CL}}$                                              | Current limit <sup>(4)</sup>                                 | Peak current                                                              | $T_c = 25^\circ\text{C}$<br>$-40^\circ\text{C} < T_c < 125^\circ\text{C}$ | 3.6                | 4.5                | 6.9                | A             |
|                                                              |                                                              |                                                                           |                                                                           | 3.4                |                    | 7.5                |               |
| $I_L$                                                        | Output leakage current <sup>(4)</sup>                        | Output = 0 V, $V_N = 40\text{ V}$                                         |                                                                           |                    |                    | 50                 | $\mu\text{A}$ |
|                                                              |                                                              | Output = -1 V                                                             |                                                                           |                    | 2                  | 30                 | mA            |
| $I_Q$                                                        | Operating quiescent current <sup>(6)</sup>                   | See <sup>(8)</sup>                                                        |                                                                           |                    | 5                  | 10                 | mA            |
| $I_{\text{STBY}}$                                            | Current standby quiescent                                    | $\overline{\text{ON/OFF}}$ pin = 5 V (OFF) <sup>(7)</sup>                 | $T_c = 25^\circ\text{C}$<br>$-40^\circ\text{C} < T_c < 125^\circ\text{C}$ |                    | 80                 | 200                | $\mu\text{A}$ |
|                                                              |                                                              |                                                                           |                                                                           |                    |                    | 250                | $\mu\text{A}$ |
| SHUTDOWN/SOFT-START CONTROL (see Figure 35 for test circuit) |                                                              |                                                                           |                                                                           |                    |                    |                    |               |
| $V_{\text{IH}}$                                              | $\overline{\text{ON/OFF}}$ pin logic input threshold voltage | Low (regulator ON)                                                        | $T_c = 25^\circ\text{C}$<br>$-40^\circ\text{C} < T_c < 125^\circ\text{C}$ |                    | 1.3                |                    | V             |
|                                                              |                                                              |                                                                           |                                                                           |                    |                    | 0.6                |               |
| $V_{\text{IL}}$                                              |                                                              | High (regulator OFF)                                                      | $T_c = 25^\circ\text{C}$<br>$-40^\circ\text{C} < T_c < 125^\circ\text{C}$ |                    | 1.3                |                    | V             |
|                                                              |                                                              |                                                                           |                                                                           | 2                  |                    |                    |               |
| $I_I$                                                        | $\overline{\text{ON/OFF}}$ pin input current                 | $V_{\text{LOGIC}} = 2.5\text{ V}$ (regulator OFF)                         |                                                                           |                    | 5                  | 15                 | $\mu\text{A}$ |
| $I_L$                                                        |                                                              | $V_{\text{LOGIC}} = 0.5\text{ V}$ (regulator ON)                          |                                                                           |                    | 0.02               | 5                  | $\mu\text{A}$ |

(1) All room temperature limits are 100% production tested. All limits at temperature extremes are specified via correlation using standard Statistical Quality Control (SQC) methods. All limits are used to calculate Average Outgoing Quality Level (AOQL).

(2) Typical numbers are at  $25^\circ\text{C}$  and represent the most likely norm.

(3) The switching frequency is reduced when the second stage current limit is activated. The amount of reduction is determined by the severity of current overload.

(4) No diode, inductor, or capacitor connected to output pin.

(5) Feedback pin removed from output and connected to 0 V to force the output transistor switch ON.

(6) Feedback pin removed from output and connected to 12 V for the 3.3-V, 5-V, and the adjustable versions, and 15 V for the 12-V version, to force the output transistor switch OFF.

(7)  $V_N = 40\text{ V}$ .

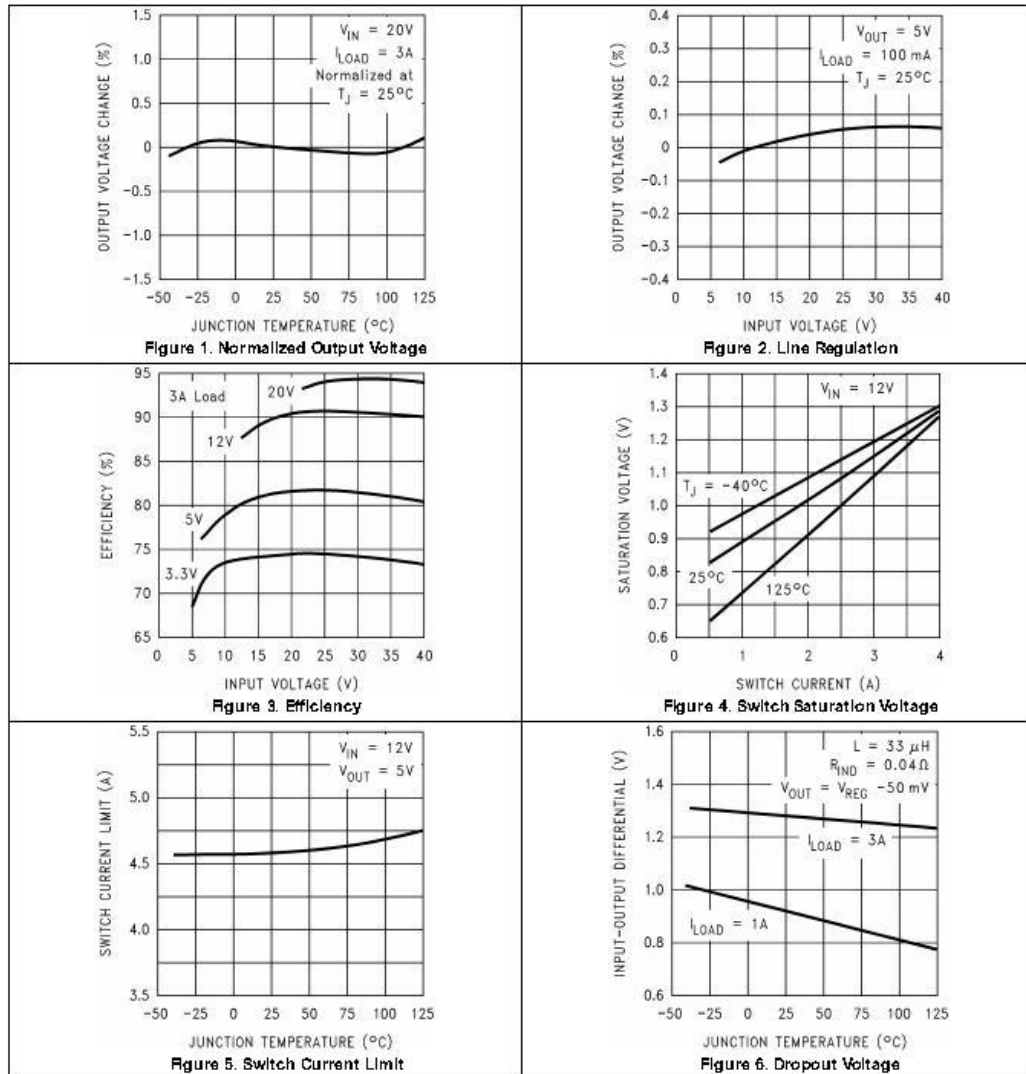


www.ti.com

LM2596  
SNVS210 – NOVEMBER 1996 – REVISED MAY 2016

## 7.10 Typical Characteristics

See Figure 35 for test circuit



LM2596

SNVS210 – NOVEMBER 1999 – REVISED MAY 2016

www.ti.com

Typical Characteristics (continued)

See Figure 35 for test circuit

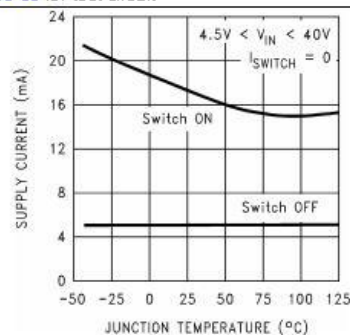


Figure 7. Operating Quiescent Current

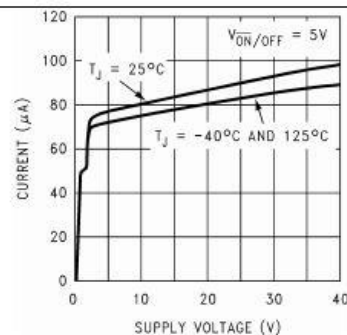


Figure 8. Shutdown Quiescent Current

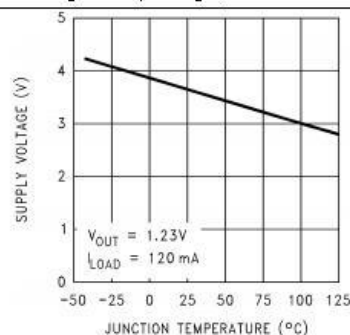


Figure 9. Minimum Operating Supply Voltage

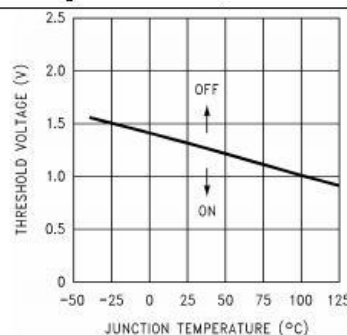


Figure 10. ON/OFF Threshold Voltage

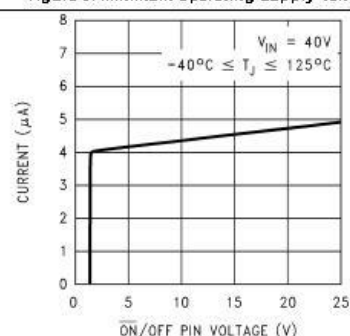


Figure 11. ON/OFF Pin Current (Sinking)

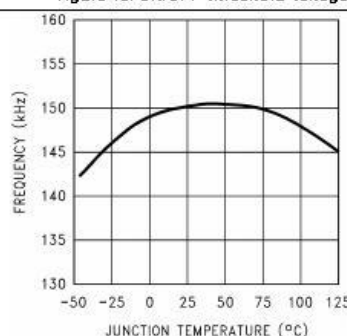


Figure 12. Switching Frequency

**Typical Characteristics (continued)**

See Figure 35 for test circuit

