MAGNETIC LEVITATION DENGAN PENGENDALI LOGIKA FUZZY BERBASIS MIKROKONTROLER ATMEGA8

TUGAS AKHIR

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Jurusan Teknik Elektro Universitas Islam Indonesia



oleh :

Nama : Eko Nugroho
No. Mahasiswa : 02 524 134

J U R U S A N T E K N I K E L E K T R O
F A K U L T A S T E K N O L O G I I N D U S T R I
U N I V E R S I T A S I S L A M I N D O N E S I A
Y O G Y A K A R T A
2 0 0 7

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING

MAGNETIC LEVITATION DENGAN PENGENDALI LOGIKA FUZZY BERBASIS MIKROKONTROLER ATMEGA8

TUGAS AKHIR

Oleh :

Nama : Eko Nugroho

No.Mahasiswa : 02 524 134

Yogyakarta, 11 September 2007

Pembimbing I,	Pembimbing II,
(Ir. Hj. Budi Astuti, MT.)	(Yusuf Aziz Amrullah, ST.)

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI

MAGNETIC LEVITATION DENGAN PENGENDALI LOGIKA FUZZY BERBASIS MIKROKONTROLER ATMEGA8

TUGAS AKHIR

Oleh :

Nama : Eko Nugroho

No.Mahasiswa : 02 524 134

Telah Dipertahankan Di Depan Sidang Penguji Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia

Tim Penguji,

Ir. Hj. Budi Astuti, MT. _____
Ketua

Yusuf Aziz Amrullah, ST. _____
Anggota I

Wahyudi Budi Pramono, ST. _____
Anggota II

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Elektro

(Tito Yuwono, ST, M.Sc)

KATA PENGANTAR



Assalamumu'alaikum Wr.Wb.

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan Rahmat dan Hidayah-Nya sehingga pada akhirnya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul **"Magnetic Levitation Dengan Pengendali Logika Fuzzy Berbasis Mikrokontroler ATMega8"** dengan lancar. Shalawat dan salam senantiasa tercurahkan kepada junjungan kita Nabi Muhamad SAW yang menjadi panutan kita semua hingga akhir zaman.

Penulisan tugas akhir ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Elektro pada Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia. Tugas akhir ini penulis selesaikan dengan mengikuti tahap-tahap pengerjaan dari teori yang telah penulis dapatkan di bangku perkuliahan ditambah dengan pengalaman yang telah penulis dapatkan. Selama proses penyelesaian tugas akhir ini penulis banyak memperoleh ilmu dan pengalaman yang sangat bermanfaat bagi penulis.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa isi dari tugas akhir ini masih jauh dari sempurna karena keterbatasan ilmu dan pengetahuan penulis sebagai mahasiswa, oleh karena itu dengan segala kerendahan hati, penulis menerima saran dan kritik yang sifatnya membangun dari semua pihak.

Pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang tak terhingga kepada :

1. Bpk Fathul Wahid, ST. M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia.
2. Bpk Tito Yuwono, ST, M.Sc selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro.
3. Ibu Ir. Hj. Budi Astuti, MT. dan Bpk Yusuf Aziz Amrullah, ST. Selaku dosen pembimbing yang telah banyak membantu, memberikan bimbingan dan pengarahan kepada penulis dalam penyusunan tugas akhir ini.
4. Dosen dan karyawan Fakultas Teknologi Industri UII, yang bersedia dengan sabar membantu dan berbagi ilmunya.
5. Ayahanda Sumarja dan Ibunda Suparni yang telah bayak memberikan dorongan, limpahan kasih sayang dan selalu mendoakan dengan tulus dan ikhlas.
6. Simbah, Bulik, Adikku Evita dan keluarga di Sleman yang selalu memberikan dorongan dan semangat.
7. Adikku tercinta Ismi Shari, terima kasih atas curahan kasih sayang, dukungan dan motivasi serta doa dan masukan yang diberikan kepada penulis.
8. Teman-teman seperjuangan Sony, Arif, Dadang, Pakdhe, Dodi, Mas Alim, Hamim, Dede, Yudi, V-3, Kembar, Bambong, Katro, Echo, Hardy, Earpan dan Eddy yang telah memberikan semangat dan motivasi, thanks untuk persahabatan dan kebersamaan kita selama ini.

9. Teman-teman yang ada di seberang sana, Rusman, Akhyar, gengnya adikku Ijo Lumut (K' Awa, Yuyun, Iza, Deby, Unhi), Eka, Ode, Dalwi, Hasdin thanks for all.
10. Semua sahabat, rekan-rekan, dan semua pihak yang telah mendukung dan membantu penulis baik secara langsung maupun tidak langsung yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Akhir kata penulis sampaikan pula harapan semoga tugas ini dapat memberi manfaat yang cukup berarti khususnya bagi penulis dan bagi pembaca pada umumnya. Semoga Allah SWT senantiasa selalu memberikan rahmat dan hidayah-Nya kepada kita semua. Amien.

Wassalamu'alaikum Wr.Wb.

Yogyakarta, September 2007

Eko Nugroho

ABSTRAK

Magnetic levitation (pelayangan magnetik) adalah teknik mengangkat suatu obyek dengan menggunakan prinsip magnet akibat dari adanya gaya atau medan magnet yang ditimbulkan dari magnet permanen atau kumparan elektromagnet (selenoida). Pelayangan magnetik terjadi jika besar gaya elektromagnet yang menarik atau mendorong benda tersebut sama dengan besar gaya gravitasi benda. Agar gaya elektromagnet sama dengan gaya gravitasi benda maka perlu sebuah sistem dengan sistem kendali yang dapat mengatur besarnya gaya elektromagnet pada selenoida. Sistem kendali yang digunakan adalah sistem kendali logika *fuzzy*. Dalam sistem ini didisain fungsi keanggotaan masukan *error*(e) dan *delta_error*(de) dengan jumlah label 3, sedangkan fungsi keanggotaan keluaran PWM dengan jumlah label 6. Proses inferensi menggunakan metode MIN-MAX, sedangkan defuzzifikasi dengan metode *Center of Area* (COA). Algoritma yang telah dibuat kemudian diimplementasikan pada mikrokontroler AVR ATMega8 sebagai unit kontrol sistem. *Feedback* sistem adalah posisi pelayangan obyek yang dideteksi dengan sensor hall efek yang kemudian dimasukkan ke mikrokontroler dan diolah sesuai aturan-aturan *fuzzy* yang telah dibuat. Hasil keluaran pengendali berupa sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*) yang mengatur besar medan magnet pada selenoida. Sistem pengendalian yang dibuat ini dapat melayangkan obyek pada jarak 2 sampai 3 mm dari ujung selenoida. Jarak ini adalah jarak dimana sistem mampu melayangkan benda. Pengukuran parameter-parameter sistem sangat sulit dilakukan karena proses yang cepat sehingga alat ukur yang tersedia tidak dapat membaca perubahan parameter tersebut dan juga sistem tidak dapat dipasang alat ukur karena pemasangan alat ukur dapat mengganggu kerja sistem.

Kata kunci : *Magnetic Levitation*, Logika Fuzzy, PWM

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL i

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING ii

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI iii

HALAMAN PERSEMBAHAN iv

HALAMAN MOTTO v

KATA PENGANTAR vi

ABSTRAK ix

DAFTAR ISI x

DAFTAR GAMBAR xiv

DAFTAR TABEL xvii

BAB I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang 1

1.2. Rumusan Masalah 2

1.3. Batasan Masalah 3

1.4. Tujuan Penelitian 3

1.5. Metodologi Penelitian 3

1.6. Sistematika Penulisan 4

BAB II. LANDASAN TEORI

2.1. Selenoida 6

2.2. Mikrokontroler ATMEL AVR ATMega8 11

2.2.1. Kofigurasi Hardware AVR ATmega8 12
2.2.2. Struktur Memori AVR ATMega8 15
2.2.3. Timer-Counter 16
2.2.3.1. Timer-Counter 0 16
2.2.3.1. Timer-Counter 1 17
2.2.4. ADC (Analog to Digital Converter) Internal ATMega8 19
2.2.4.1. Resolusi 21
2.2.4.2. Akurasi 21
2.3. Pulse Width Modulation (PWM) 25
2.4. Sensor Efek Hall UGN3503 27
2.5. Pengkondisi Sinyal 28
2.5.1. Penguat non Inverting 29
2.5.1. Penguat Inverting 30
2.6. Logika *Fuzzy* 30
2.6.1. Notasi Himpunan *Fuzzy* 31
2.6.2. Fungsi Keanggotaan *Fuzzy* 32
2.6.3. Fuzzifikasi 35
2.6.4. Inferensi 36
2.6.5. Defuzzifikasi 37

BAB III.PERANCANGAN SISTEM

3.1. Sistem Pengendali *Magnetic Levitation* 38
3.2. Perancangan Perangkat Keras 39

3.2.1. Selenoida 39
3.2.2. Sensor Hall Efek 39
3.2.3. Rangkaian Pengkondisi Sinyal 40
3.2.4. ADC (Analog to Digital Converter) 41
3.2.5. Rangkaian Mikrokontroler AVR ATMega8 42
3.2.6. Driver Arus 44
3.2.7. Obyek Pelayangan (*objec levitation*) 45
3.2.8. Rangkaian Catu Daya (*Power Supply*) 45
3.3. Perancangan Sistem Kendali Logika *Fuzzy* 46
3.3.1. Fuzzifikasi 46
3.3.1.1. Masukan Kendali *Fuzzy* 47
3.3.1.2. Keluaran Kendali *Fuzzy* 48
3.3.2. Inferensi (Basis Aturan) 49
3.3.3. Defuzzifikasi 50
3.4. Perancangan Perangkat Lunak 51

BAB IV. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1. Pengujian Rangkaian Catu Daya (*power supply*) 53
4.2. Pengujian Sensor Efek Hall Dan Rangkaian Pengkondisi Isyarat 54
4.2.1. Pengujian Rangkaian Pengkondisi Isyarat 55
4.2.2. Pengujian Sensor Efek Hall 57
4.3 Pengujian ADC 62
4.4 Pengujian Driver Arus 64

4.5. Pengujian Kendali Logika *Fuzzy* 65

4.7 Pengujian Seluruh Sistem 72

BAB V. PENUTUP

5.1. Kesimpulan 74

5.2. Saran..... 75

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Arah medan listrik terhadap arus listrik 6

Gambar 2.2. Induktor selenoida 8

Gambar 2.3. Induktor selenoida dengan inti (*core*) 10

Gambar 2.4. Konfigurasi pin mikrokontroler ATMega8 12

Gambar 2.5. Diagram blok mikrokontroler ATMega8 14

Gambar 2.6. Konfigurasi memori data AVR ATmega8 15

Gambar 2.7. Register TCCR0 16

Gambar 2.8. Register TCCR1A 17

Gambar 2.9. Register TCCR1B 18

Gambar 2.10. Diagram blok ADC internal ATmega8 20

Gambar 2.11. Register ADMUX 22

Gambar 2.12. Format data ADC dengan ADLAR = 0 23

Gambar 2.13. Format data ADC dengan ADLAR = 1 23

Gambar 2.14. Register ADCSRA 24

Gambar 2.15. Mekanisme terbentuknya PWM pada Timer-Counter 1 26

Gambar 2.16. Bentuk fisik sensor efek hall 28

Gambar 2.17. Simbol op-amp 28

Gambar 2.18. Rangkaian penguat non-inverting 29

Gambar 2.19. Rangkaian penguat inverting 30

Gambar 2.20. Himpunan *fuzzy* dan fungsi keanggotaan 31

Gambar 2.21. Bentuk keanggotaan S 34

Gambar 2.22. Fungsi keanggotaan segitiga 35
Gambar 2.23. Fungsi keanggotaan trapesium 35
Gambar 2.24. (a) Metode inferensi MAX-MIN
(b) Metode inferensi MAX-DOT 36
Gambar 3.1. Diagram blok sistem pengendalian 38
Gambar 3.2. Rangkaian pengkodisi isyarat 40
Gambar 3.3. Rangkaian ADC internal ATMega8 41
Gambar 3.4. Rangkaian minimum sistem mikrokontroler 43
Gambar 3.5. Rangkaian driver arus 44
Gambar 3.6. Rangkaian catu daya untuk sistem kontrol 46
Gambar 3.7. Rangkaian catu daya untuk driver arus 46
Gambar 3.8. Fungsi keanggotaan *error* (e) 47
Gambar 3.9. Fungsi keanggotaan *delta error* (de) 48
Gambar 3.10. Fungsi keanggotaan keluaran PWM 49
Gambar 3.11 Diagram alir program utama pengendalian 52
Gambar 4.1. Grafik hubungan antara tegangan masukan dengan tegangan keluaran rangkaian pengkondisi isyarat 57
Gambar 4.2. Grafik hubungan antara tegangan sensor dengan jarak obyek tanpa adanya pengaruh medan magnet 58
Gambar 4.3. Grafik hubungan antara tegangan sensor terhadap jarak obyek dengan pengaruh medan magnet dengan PWM *duty cycle* 10 % ... 60

Gambar 4.4. Grafik hubungan antara tegangan keluaran pengkondisi sinyal terhadap jarak obyek dengan pengaruh medan magnet dengan PWM *duty cycle* 10 %..... 60
Gambar 4.5. Grafik hubungan antara tegangan sensor terhadap jarak obyek dengan pengaruh medan magnet dengan PWM *duty cycle* 25 % ... 61
Gambar 4.6. Grafik hubungan antara tegangan keluaran pengkondisi sinyal terhadap jarak obyek dengan pengaruh medan magnet dengan PWM *duty cycle* 25 %..... 62
Gambar 4.7. Grafik pengujian tegangan masukan ADC terhadap nilai ADC 64
Gambar 4.8. Hasil fuzzy inference (MIN) untuk e=0 dan de=0 66
Gambar 4.9. Hasil fuzzy inference (MIN) untuk e=2 dan de=1 67
Gambar 4.10. Hasil fuzzy inference (MIN) untuk e=2 dan de=-7..... 69
Gambar 4.11 Hasil fuzzy inference (MIN) untuk e=-5 dan de=-6 70
Gambar 4.12 Hasil Pengujian Sistem *Magnetic Levitation*..... 73

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Deskripsi pin ATmega8 13

Tabel 2.2. Prescaler TCCR0..... 17

Tabel 2.3. Prescaler TCCR1..... 19

Tabel 2.4. Pemilihan mode tegangan referensi ADC..... 22

Tabel 2.5. Pemilihan bit saluran pembacaan ADC 23

Tabel 2.6. Pemilihan prescaler ADC..... 25

Tabel 3.1 Aturan kendali logika *fuzzy*..... 49

Tabel 4.1. Data regulator tegangan 54

Tabel 4.2. Hasil pengujian regulator 54

Tabel 4.3. Hasil pengujian rangkaian pengkondisi isyarat..... 56

Tabel 4.4. Data hasil pengujian keluaran sensor efek hall..... 58

Tabel 4.5. Data keluaran sensor efek hall dengan *Duty Cycle* PWM 10 %..... 59

Tabel 4.6. Data keluaran sensor efek hall dengan *Duty Cycle* PWM 25 %..... 61

Tabel 4.7. Data hasil pengujian ADC 63

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Perkembangan teori logika *fuzzy* telah menarik pakar sistem kendali untuk memanfaatkannya dalam pengendalian suatu sistem dalam bentuk alogaritma - alogaritma automatik yang dapat dinyatakan, seperti dalam pemakaian pengaturan besar medan magnet pada selenoida, kendali kecepatan motor, sistem transmisi otomatis, alat rumah tangga, industri dan lain-lainnya.

Penggunaan pengendali logika *fuzzy* sangat sesuai untuk sistem-sistem yang sulit dipahami atau diwakilkan dengan suatu model matematik yang teliti, tetapi harus ada suatu operator, dalam hal ini manusia yang telah berpengalaman dan mampu mengendalikan sistem tersebut secara baik dan memuaskan, serta dapat memberikan aturan-aturan pengendalian secara kualitatif dalam bentuk kalimat-kalimat *fuzzy*.

Logika *fuzzy* merupakan pengembangan dari logika primitif yang hanya mengenal dua keadaan, yaitu "ya" atau "tidak". Dengan adanya logika *fuzzy*, dapat mengenal peubah-peubah linguistik seperti agak besar, besar, sangat besar, dan sebagainya. Dengan demikian, aplikasi logika *fuzzy* akan menyebabkan sistem lebih baik.

Pada laporan ini disajikan hasil perancangan tentang implementasi kendali logika *fuzzy* pada sistem *magnetic levitation*. *Magnetic levitation* adalah teknik mengangkat suatu obyek dengan menggunakan prinsip magnet akibat dari adanya

gaya atau medan magnet yang ditimbulkan dari magnet permanen atau kumparan elektromagnet (selenoida). Besarnya gaya atau medan magnet diatur sedemikian rupa agar dapat melayangkan sebuah objek yang berada di atas atau di bawah magnet atau selenoida tersebut. Pengaturan besar medan magnet dilakukan dengan cara mengatur besarnya arus yang mengalir pada selenoida. Untuk mengatur besarnya arus dengan menggunakan metode PWM (*Pulse Width Modulation*).

Logika *fuzzy* di sini berfungsi sebagai algoritma kendali pada sistem dalam mengatur aliran arus yang masuk ke selenoida. Sedangkan secara hardware sistem ini dikendalikan oleh mikrokontroler.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan diatas, maka dapat diambil suatu rumusan masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana merancang dan membuat algoritma *fuzzy* untuk sistem kendali *magnetic levitation* agar *object levitation* dapat mempertahankan posisi pelayangannya..
2. Bagaimana merancang dan membuat prototipe *magnetic levitation*.
3. Bagaimana kendali logika *fuzzy* yang telah dirancang dapat diaplikasikan pada prototipe yang telah dibuat.

1.3. Batasan Masalah

Untuk menyederhanakan masalah, menghindari kerancuan dan pembahasan yang terlalu luas serta memfokuskan pada perancangan sistem pengendalian magnetic levitation maka batasan masalah dalam pembuatan antara lain :

1. Teknik pengendalian pelayangan obyek dengan algoritma *fuzzy*.
2. Variabel input *fuzzy* adalah *eror* (e) dan *delta eror* (de) dan variabel output *fuzzy* adalah PWM.
3. Pengujian sistem dilakukan terbatas pada objek tertentu.

1.4. Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang diatas maka dapat diambil tujuan dan manfaat sebagai berikut :

1. Mampu menggunakan dan memanfaatkan pengendali dari logika *fuzzy* untuk aplikasi kendali *magnetic levitation*.
2. Menciptakan suatu pengendali yang dapat mengatur keseimbangan pelayangan objek levitation.
3. Mempelajari kendali algoritma *fuzzy* yang dapat diaplikasikan pada sistem kontrol.

1.5 Metodologi Penelitian

Beberapa metode penelitian yang digunakan dalam penyelesaian tugas akhir ini adalah :

1. Pengumpulan Data

   Data diperoleh dari studi pustaka berupa buku, artikel, makalah dan tutorial yang tersedia pada *website* di internet.

2. Studi Pustaka

   Pengumpulan data ini digunakan untuk mendapatkan informasi-informasi yang berkaitan dengan proses penyusunan tugas akhir, sehingga dapat digunakan sebagai acuan dalam proses pembuatan target aplikasi.

3. Perancangan dan pembuatan

   Setelah semua data terkumpul, maka dilakukan perancangan dan pembuatan alat.

4. Pengujian dan Analisis

   Pengujian dilakukan setelah alat sudah jadi, dan dilakukan analisis untuk masing-masing percobaan yang berkaitan dengan tugas akhir.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan merupakan bagian dari pendahuluan suatu laporan Tugas Akhir. Sistematika laporan memuat gambaran umum mengenai hal – hal yang akan dibahas dan hal – hal yang akan dimuat dalam laporan Tugas Akhir.

Berikut ini adalah sistematika laporan yang digunakan dalam laporan Tugas Akhir ini :

BAB I : PENDAHULUAN

Memuat gambaran mengenai latar belakang masalah, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian dan sistematika penulisan laporan tugas akhir secara keseluruhan.

BAB II : LANDASAN TEORI

Memuat teori – teori yang berhubungan gambaran sekilas mengenai teori-teori yang berhubungan dengan sistem *magnetic levitation,* algoritma *fuzzy* dan dasar-dasar mikrokontroller .

BAB III : PERANCANGAN SISTEM

Pada bab ini memuat sistem perangkat keras berupa *driver* arus, catu daya, selenoida, sensor hall efek dan perancangan sistem kendali *fuzzy* untuk kendali pelayangan obyek.

BAB IV : HASIL PENGAMATAN DAN PEMBAHASAN

Membahas tentang hasil pengujian dan analisis dari sistem yang dibuat dibandingkan dengan dasar teori sistem atau uraian alasan ilmiah yang lain.

BAB V : PENUTUP

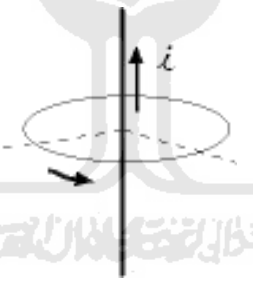
Berisi kesimpulan atas perancangan sistem yang telah dibuat dan saran yang dapat dipergunakan oleh pihak yang berkepentingan maupun untuk penelitian lebih lanjut.

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Selenoida

Jika seutas kawat tembaga diberi aliran listrik, maka di sekeliling kawat tembaga akan terbentuk medan listrik. Dengan aturan tangan kanan dapat diketahui arah medan listrik terhadap arah arus listrik. Caranya sederhana yaitu dengan mengacungkan jari jempol tangan kanan sedangkan keempat jari lain menggenggam. Arah jempol adalah arah arus dan arah ke empat jari lain adalah arah medan listrik yang mengitarinya.



Gambar 2.1. Arah medan listrik terhadap arus listrik

Pada percobaan dua utas kawat tembaga paralel yang keduanya diberi arus listrik. Jika arah arusnya berlawanan, kedua kawat tembaga tersebut saling menjauh. Tetapi jika arah arusnya sama ternyata keduanya berdekatan saling tarik-menarik. Hal ini terjadi karena adanya induksi medan listrik. Dikenal medan listrik dengan simbol B dan satuannya Tesla (T). Besar akumulasi medan listrik B pada suatu luas area A tertentu difenisikan sebagai besar *magnetic flux*. Simbol yang biasa digunakan

untuk menunjukkan besar *magnetic flux* ini adalah F dan satuannya Weber (Wb = $T.m^2$). Secara matematis besarnya adalah :

$$\Phi = BA \tag{2.1}$$

Dimana: Φ = flux magnet (weber)

B = medan magnet (T)

A = luas penampang selenoida (m^2)

Jika kumparan tersebut dialiri listrik maka tiap lilitan akan saling menginduksi satu dengan yang lainnya. Medan listrik yang terbentuk akan segaris dan saling menguatkan. Komponen yang seperti inilah yang dikenal dengan induktor selenoid.

Dari buku Fisika jilid 2 dan teori medan magnet, dibuktikan bahwa induktor adalah komponen yang dapat menyimpan energi magnetik. Energi ini direpresentasikan dengan adanya tegangan emf (*electromotive force*) jika induktor dialiri listrik. Secara matematis tegangan emf ditulis :

$$E = - L\frac{di}{dt} \tag{2.2}$$

Dimana: E = ggl induksi (V)

L = induktansi diri (H)

i = arus (amp)

t = waktu (s)

Jika dibandingkan dengan rumus hukum Ohm V=RI, maka kelihatan ada kesamaan rumus. Jika R disebut resistansi dari resistor dan V adalah besar tegangan jepit jika resistor dialiri listrik sebesar I. Maka L adalah induktansi dari induktor dan E adalah tegangan yang timbul jika induktor dilairi listrik. Tegangan emf di sini

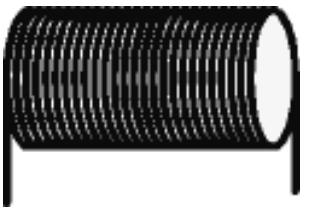
adalah respon terhadap perubahan arus fungsi dari waktu terlihat dari rumus di/dt. Sedangkan bilangan negatif sesuai dengan hukum Lenz yang mengatakan efek induksi cenderung melawan perubahan yang menyebabkannya.

Hubungan antara emf dan arus inilah yang disebut dengan induktansi, dan satuan yang digunakan adalah (H) Henry. Arus listrik yang melewati kabel, jalur-jalur pcb dalam suatu rangkain berpotensi untuk menghasilkan medan induksi. Ini yang sering menjadi pertimbangan dalam mendesain pcb supaya bebas dari efek induktansi terutama jika *multilayer*. Tegangan emf akan menjadi penting saat perubahan arusnya fluktuatif. Efek emf menjadi signifikan pada sebuah induktor, karena perubahan arus yang melewati tiap lilitan akan saling menginduksi. Ini yang dimaksud dengan *self-induced*. Secara matematis induktansi pada suatu induktor dengan jumlah lilitan sebanyak N adalah akumulasi flux magnet untuk tiap arus yang melewatinya :

$$L = \frac{N\Phi}{i} \tag{2.3}$$

Dimana: L = induktansi diri (H)

N = jumlah lilitan



Gambar 2.2. Induktor selenoida

Fungsi utama dari induktor di dalam suatu rangkaian adalah untuk melawan fluktuasi arus yang melewatinya. Aplikasinya pada rangkaian dc salah satunya adalah untuk menghasilkan tegangan dc yang konstan terhadap fluktuasi beban arus. Pada aplikasi rangkaian ac, salah satu gunanya adalah bisa untuk meredam perubahan fluktuasi arus yang tidak dinginkan. Pada aplikasi lain induktor digunakan untuk menghasilkan gaya magnet yang digunakan untuk menggerakkan motor, mengangkat benda dan lain sebagainya.

Dari pemahaman fisika, elektron yang bergerak akan menimbulkan medan elektrik di sekitarnya. Jika suatu induktor diberi sebuah inti besi (*core*) maka gaya elektromagnet yang dihasilkan semakin kuat karena pengaruh adanya nilai konstanta permeabilitas inti tersebut. Berbagai bentuk kumparan, persegi empat, setegah lingkaran ataupun lingkaran penuh, jika dialiri listrik akan menghasilkan medan listrik yang berbeda. Penampang induktor biasanya berbentuk lingkaran, sehingga diketahui besar medan listrik di titik tengah lingkaran adalah :

$$B = \mu\mu_0 nI \tag{2.4}$$

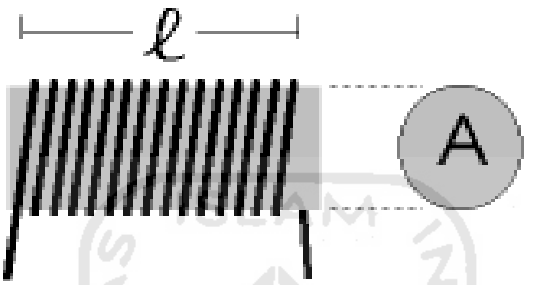
Jika dikembangkan, n adalah jumlah lilitan N relatif terhadap panjang induktor l. Secara matematis ditulis:

$$n = \frac{N}{\ell} \tag{2.5}$$

Lalu I adalah besar arus yang melewati induktor tersebut. Ada simbol μ yang dinamakan permeability dan μ_o yang disebut permeability udara vakum. Besar permeability μ tergantung dari bahan inti (*core*) dari induktor. Untuk induktor tanpa inti (*air winding*) μ = 1.

Jika rumus-rumus di atas di subsitusikan maka rumus besar medan listrik pada ujung selenoida dapat ditulis menjadi :

$$B = \frac{\mu\mu_o N i}{2\ell} \qquad (2.6)$$



Gambar 2.3. Induktor selenoida dengan inti (*core*)

Keterangan:

B = Medan magnet dalam T (Tesla)

μ = Permeability inti (*core*)

μ_0 = Permeability udara vakum

μ_0 = 4Π x 10^{-7}

N = Jumlah lilitan induktor

i = Kuat arus (amp)

ℓ = Panjang selenoida

2.2 Mikrokontroler ATMEL AVR ATMega8

Mikrokontroler digunakan sebagai unit control sistem yang dapat bekerja secara otomatis yang akan mengendalikan kerja sistem secara keseluruhan. Ada 2 jenis mikrokontroller yang berkembang saat ini, tipe CISC (*Complex Instruction Set* Computing) dan RISC (*Reduced Instruction Set Comuting*). Hal ini didasarkan pada arsitektur processor dan set instruksinya. Sebagai contoh MCS51 (AT89S51/52) merupakan tipe CISC yang memerlukan 12 siklus clock untuk melaksanakan satu siklus instruksi. Tipe AVR *(Alf and Vegard's Risc Processor)* yang merupakan jenis RISC, hanya perlu 1 siklus saja, sehingga waktu eksekusinya lebih cepat. Mikrokontroller AVR dikelompokkan menjadi 4 group: keluarga AT90Sxx, keluarga ATmega, keluarga ATtiny dan keluarga AT89RFxx. Tidak ada perbedaan mendasar pada keempatnya, baik arsitektur maupun instruksinya. Kapasitas memori, peripheral dan fungsi adalah yang menjadikan masing – masing keluarga AVR memiliki keunikan tersendiri.

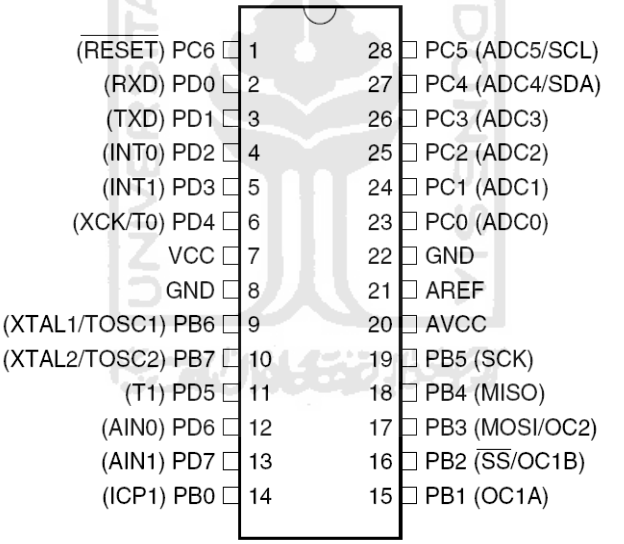
Pada perancangan sistem ini digunakan mikrokontroler AVR ATmega8 sebagai unit control. Adapun fitur yang dimiliki oleh ATmega8, antara lain :

1. Saluran I/O sebanyak 22 buah, yaitu Port B, Port C dan Port D
2. ADC 10 bit sebanyak 6 saluran
3. Tiga buah Timer/Counter
4. CPU dengan 32 buah register
5. Watchdog Timer dengan osilator internal
6. 1 Kbyte internal SRAM
7. Memori flash sebesar 8 Kbytes

8. EEPROM sebesar 512 yang dapat diprogram saat operasi
9. Port USART untuk komunikasi serial

2.2.1 Kofigurasi Hardware AVR ATmega8

AVR ATmega8 memiliki 28 pin yang mempunyai fungsi yang berbeda, tergantung penggunaan port yang tersedia dan tentunya sangat tergantung pada perancangan program yang dituliskan dan di *download* pada mikrokontroler tersebut. Konfigurasi pin ditunjukkan seperti Gambar 2.4 berikut :



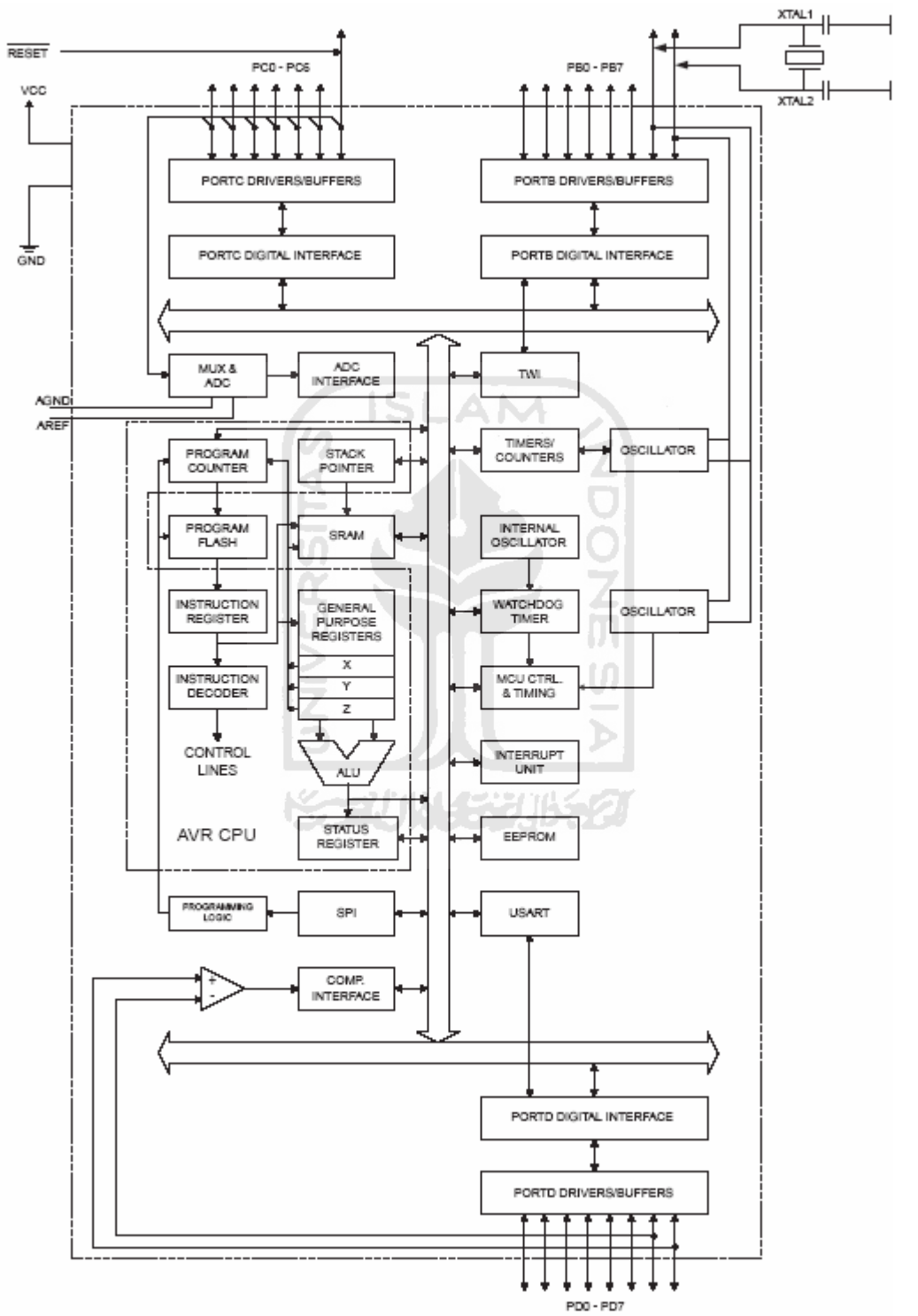
Gambar 2.4. Konfigurasi pin mikrokontroler ATMega8

Deskripsi dari masing – masing pin mikrokontroler ditunjukkan pada Tabel 2.1 berikut:

Tabel 2.1. Deskripsi pin ATmega8

No. Pin	Nama	Fungsi
1	PC6 (RESET)	Port C.6 / Reset mikrokontroler
2	PD0 (RXD)	Port D.0 / Penerima data serial
3	PD1 (TXD)	Port D.1 / Pengirim data serial
4	PD2 (INT0)	Port D.2 / Interupsi eksternal 0
5	PD3 (INT1)	Port D.3 / Interupsi eksternal 1
6	PD4 (XCK/T0)	Port D.4 / Timer-Counter 0 dan clock eksternal untuk USART (XCK)
7	VCC	Catu daya (+)
8	GND	Sinyal ground terhadap catu daya
9	PB6 (XTAL1/TOSC1)	Port B.6 / Sinyal input clock eksternal 1 (XTAL1) / (TOSC1) Timer osilator 1
10	PB7 (XTAL2/TOSC2)	Port B.7 / Sinyal input clock eksternal 2 (XTAL2) / Timer osilator 2 (TOSC2)
11	PD5 (T1)	Port D.5 / Timer-Counter 1
12	PD6 (AIN0)	Port D.6 / Input Analog komparator (AIN0)
13	PD7 (AIN1)	Port D.7 / Input Analog komparator (AIN1)
14	PB0 (ICP1)	Port B.0 / Timer-Counter 1 Input
15	PB1 (OC1A)	Port B.1 / Pembanding Timer-Counter 1
16	PB2 (SS/OC1B)	Port B.2 / SPI Slave Select Input (SS) / Pembanding Timer-Counter 1
17	PB3 (MOSI/OC2)	Port B.3 / SPI bus Master Out Slave In (MOSI) / Pembanding Timer-Counter 2 (OC2)
18	PB4 (MISO)	Port B.4 / SPI bus Master In Slave Out
19	PB5 (SCK)	Port B.5 / sinyal clock serial SPI
20	AVCC	Tegangan ADC
21	AREF	Tegangan referensi ADC
22	GND	Sinyal ground ADC
23-28	PC0 (ADC0) – PC5 (ADC5)	Port C.0 – port C.5 dan input untuk ADC (6 channel: ADC0 – ADC5)

Diagram blok mikrokontroler AVR ATMega8 ditunjukkan pada Gambar 2.5 berikut.



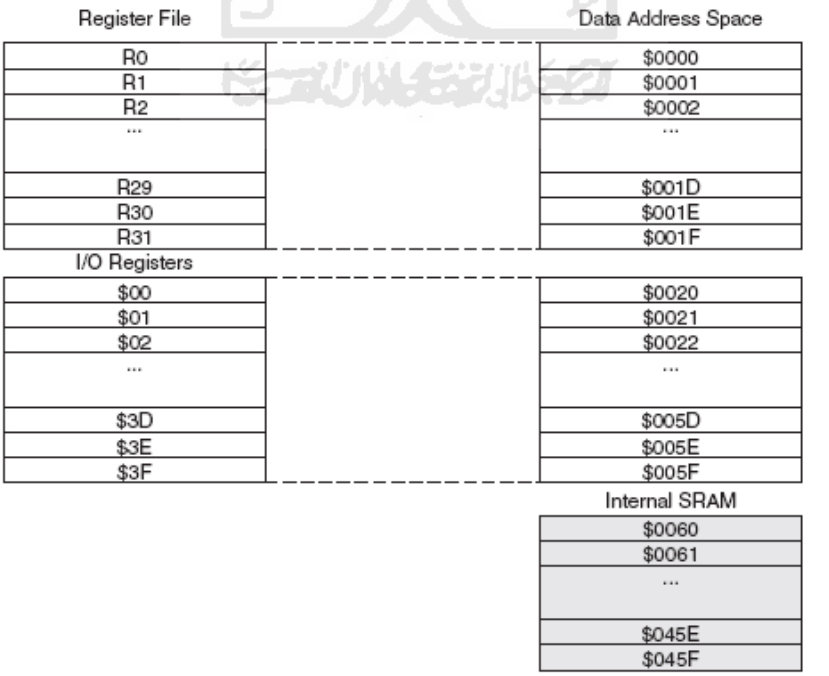
Gambar 2.5. Diagram blok mikrokontroler ATMega8

2.2.2 Struktur Memori AVR ATMega8

AVR ATmega8 mempunyai ruang memori data dan memori program yang terpisah. Memori data terdiri 3 bagian:

- 32 buah General Purpose Register (GPR) / register umum
- 64 buah register I/O
- 1 K byte SRAM Internal

Register keperluan umum menempati space data pada alamat terbawah, yaitu $00 sampai $1F. Sementara itu, register khusus untuk menangani I/O dan kontrol terhadap mikrokontroler menempati alamat berikutnya, yaitu mulai $20 sampai $5F. Register tersebut merupakan register khusus yang digunakan untuk mengatur fungsi terhadap berbagai periperal mikrokontroler, seperti kontrol register, timer/counter, fungsi-fungsi I/O dan sebagainya. Register khusus alamat memori secara lengkap dapat dilihat pada Gambar 2.6 berikut.



Gambar 2.6. Konfigurasi memori data AVR ATmega8

2.2.3 Timer-Counter

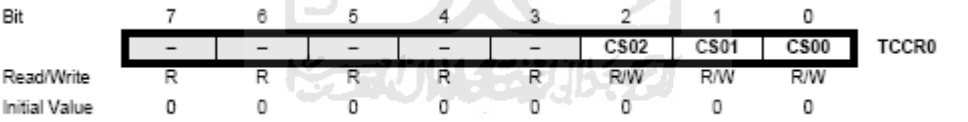
AVR ATmega memiliki tiga buah timer, yaitu Timer/Counter 0 (8 bit), Timer/Counter 1 (16 bit), dan Timer/Counter 2 (8 bit)

2.2.3.1 Timer/Counter 0

Timer/counter 0 merupakan Timer/Counter 8 bit yang multifungsi. Deskripsi untuk timer/counter 0 pada ATmega8 adalah sebagai berikut.

1. Timer dinolkan saat match compare (auto reload)
2. Frekuensi generator
3. Prescaler 10 bit untuk timer
4. Instrupsi timer yang disebabkan timer overflow dan match compare

Pengaturan Timer/Counter 0 diatur oleh TCCRO (Timer/Counter control Register 0) yang dapat dilihat pada Gambar 2.7 berikut



Gambar 2.7. Konfigurasi register TCCR0

Bit 2, 1, 0 – CS02; CS01, CS00 : Clock select

Ketiga bit tersebut digunakan untuk memilih sumber clock oleh timer/counter.

Tabel 2.2. Prescaler TCCR0

CS02	CS01	CS00	Description
0	0	0	No clock source (Timer/Counter stopped).
0	0	1	$clk_{I/O}$/(No prescaling)
0	1	0	$clk_{I/O}$/8 (From prescaler)
0	1	1	$clk_{I/O}$/64 (From prescaler)
1	0	0	$clk_{I/O}$/256 (From prescaler)
1	0	1	$clk_{I/O}$/1024 (From prescaler)
1	1	0	External clock source on T0 pin. Clock on falling edge.
1	1	1	External clock source on T0 pin. Clock on rising edge.

2.2.3.2 Timer/Counter 1

Timer/counter 1 merupakan timer/counter 16 bit yang memungkinkan program pewaktuan lebih akurat.

Pengaturan Timer/Counter 1 diatur melalui register TCCR1A

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	COM1A1	COM1A0	COM1B1	COM1B0	FOC1A	FOC1B	WGM11	WGM10	TCCR1A
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	W	W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

Gambar 2.8. Register TCCR1A

Penjelasan setiap bit

a. Bit 7 : 6 – COM1A1 : 0 : Compare output mode untuk channel A

   Bit 5 : 4 – COM1B1 : 0 : Compare output mode untuk channel B

   Register COM1A 1 : 0 dan COM1B 1 : 0 mengontrol kondisi pin output compare (OC1A dan OC1B). Jika salah satu atau kedua bit pada register COM1A1 : 0 ditulis menjadi satu, maka kaki pin OC1A tidak berfungsi normal sebagai port I/O. Begitu juga pada register COM1B1 : 0 ditulis

menjadi satu, maka kaki pin OC1B juga tidak berfungsi normal sebagai port I/O. Fungsi pada pin OC1A dan OC1B tergantung pada seting bit pada register WGM1 3 : 0 diset sebagai mode PWM atau non PWM.

b. Bit 3 – FOC1A : Force Output Compare untuk Channel A

   Bit 2 – FOC1B : Force Output Compare untuk Channel B

c. Bit 1 : 0 – WGM1 1 : 0 : Waveform Generation Mode

Pengaturan Timer 1 juga diatur oleh register TCCR1B

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	ICNC1	ICES1	–	WGM13	WGM12	CS12	CS11	CS10	TCCR1B
Read/Write	R/W	R/W	R	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

Gambar 2.9. Register TCCR1B

a. Bit 7 – ICNC1 : Input Capture Noise Canceler

b. Bit 6 – ICES 1 : Input Capture Edge Select

c. Reserved Bit

d. Bit 4 : 3 – WGM1 1: 3 : Waveform Generation Mode

e. Bit 2 : 0 – CS12, CS11, CS10 : Clock Select

   Ketiga bit tersebut mengatur sumber clock yang digunakan untuk timer/counter 1 berdasarkan prescaler.

Tabel 2.3. Prescaler TCCR1

CS12	CS11	CS10	Description
0	0	0	No clock source. (Timer/Counter stopped)
0	0	1	$clk_{I/O}$/1 (No prescaling)
0	1	0	$clk_{I/O}$/8 (From prescaler)
0	1	1	$clk_{I/O}$/64 (From prescaler)
1	0	0	$clk_{I/O}$/256 (From prescaler)
1	0	1	$clk_{I/O}$/1024 (From prescaler)
1	1	0	External clock source on T1 pin. Clock on falling edge.
1	1	1	External clock source on T1 pin. Clock on rising edge.

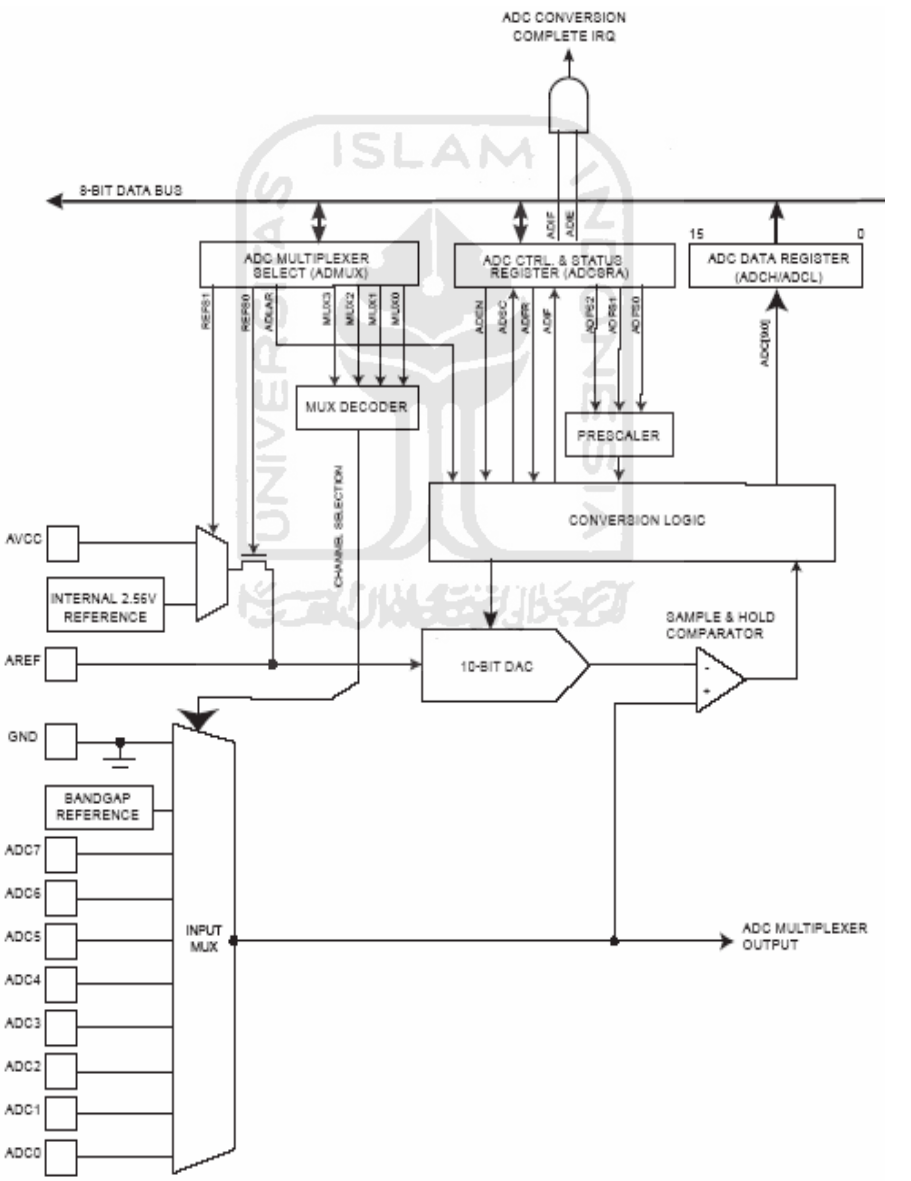
2.2.4 ADC (Analog to Digital Converter) Internal ATMega8

ADC adalah sebuah rangkaian yang berfungsi mengubah sinyal analog menjadi bit-bit sinyal digital. Sinyal analog yang masuk ke input ADC diubah menjadi suatu deretan bilangan biner yang mempresentasikan besarnya input sinyal analog yang masuk ke ADC.

Spesifikasi dari ADC Internal ATmega8 antara lain:

a. Resolusi: 10 bit ADC0 – ADC3 dan 8 bit ADC4 – ADC5
b. Tegangan Catu: 4.5 – 5.5V
c. Tegangan Input 0 - VCC
d. Waktu konversi: 65 - 260µs
e. Mode konversi *free running* dan *single conversion*
f. Tegangan Referensi *Internal* 2.56V
g. *Interrupt on* ADC *Conversion Complete*
h. 2 kanal input dengan penguatan 10 dan 200x (*differensial*)

ADC ini dapat menggunakan dua mode, yaitu *single conversion* dan *free running* untuk melakukan konversi sinyal analog yang masuk ke pin input menjadi sinyal digital. Bilangan biner yang mewakili sinyal analog pada suatu harga tertentu dikenal dengn nama cuplikan (*sample*), sedangkan frekuensi untuk mencuplik tersebut laju cuplikan (*sampling rate*). Diagram blok ADC internal ATmega8 ditunjukan pada Gambar 2.13 berikut.



Gambar 2.10. Diagram blok ADC internal ATmega8

2.2.4.1 Resolusi

Resolusi merupakan perubahan yang dapat terjadi pada keluaran digital sebagai hasil perubahan pada input analog. Proses perubahan data analog menjadi data digital tergantung dari jumlah bit pada suatu ADC yang digunakan. Dimana resolusi adalah besaran terkecil (analog) yang masih dapat dikonversikan menjadi satuan digital.

$$\text{Resolusi} = (1/2^n) \times \text{Vref} \quad (2.7)$$

Dimana :

n : Banyaknya bit ADC

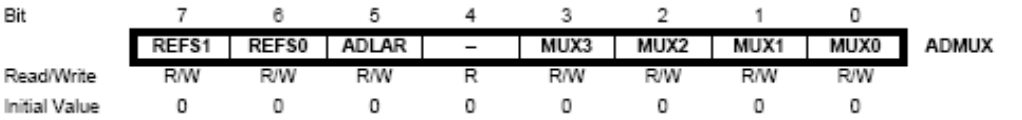
Vref : Tegangan referensi yang digunakan (volt)

2.2.4.2 Akurasi

Akurasi dari ADC ditentukan oleh ketelitian dari komponen – komponen pada rangkaiannya. Seperti perbandingan kepresisian nilai tahanan – tahanan ADC, sumber tegangan referensi. Selain itu, akurasi merupakan spesifikasi yang menunjukan suatu ADC untuk mengkonversi suatu input analog. Semakin tinggi akurasi yang dimiliki ADC maka keluaran ADC ini mempunyai besaran yang semakin mendekati nilai yang seharusnya.

Proses inisialisasi ADC dengan proses penentuan clock, tegangan referensi, format output data, dan mode pembacaan yang digunakan. Register yang perlu diset diantaranya ADMUX (*ADC Multipexer Selection Register)*, ADCSRA (*ADC Control and Status Register A*), dan SFIOR (*Special Function IO Register*). ADMUX merupakan register 8 bit yang berfungsi menentukan tegangan referensi

ADC, Format data Output, dan saluran ADC yang digunakan. Konfigurasi seperti gambar dibawah ini.



Gambar 2.11 Register ADMUX

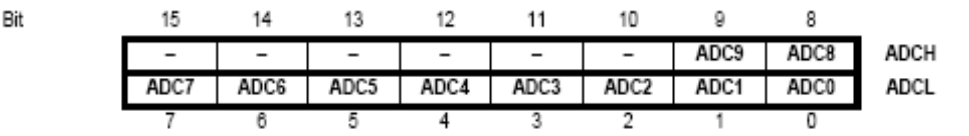
Bit penyusun register ADMUX dapat dijelaskan sebagai berikut.

a. REFS [1..0] merupakan bit pengatur tegangan referensi ADC yang memiliki nilai awal 00 sehingga tegangan referensi berasal dari AREF. Detailnya dapat dilihat dalam tabel berikut.

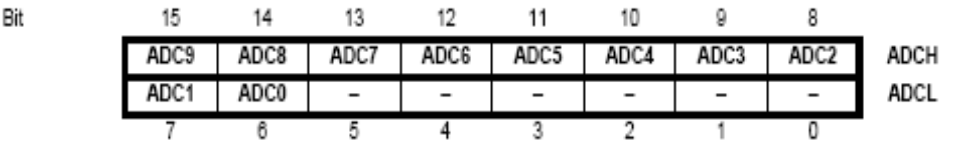
Tabel 2.4. Pemilihan mode tegangan referensi ADC

REFS1	REFS0	Voltage Reference Selection
0	0	AREF, Internal V_{ref} turned off
0	1	AV_{CC} with external capacitor at AREF pin
1	0	Reserved
1	1	Internal 2.56V Voltage Reference with external capacitor at AREF pin

b. Bit 5 - ADLAR merupakan bit pemilih mode data keluaran ADC. Bernilai awal 0 sehingga 2 bit tertinggi data hasil konversi berada pada register ADCH dan 8 bit sisanya berada di register ADCL, seperti gambar dibawah ini.



Gambar 2.12. Format data ADC dengan ADLAR = 0



Gambar 2.13. Format data ADC dengan ADLAR = 1

c. Bit 3:0 – MUX 3:0 merupakan bit pemilih saluran pembacaan ADC. Bit ini akan berubah selama konversi, perubahan tersebut tidak akan berdampak selama konversi belum lengkap (ADIF di ADCSRA set)

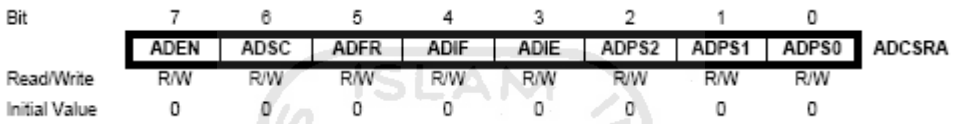
Tabel 2.5. Pemilihan bit saluran pembacaan ADC

MUX3..0	Single Ended Input
0000	ADC0
0001	ADC1
0010	ADC2
0011	ADC3
0100	ADC4
0101	ADC5
0110	ADC6
0111	ADC7
1000	
1001	
1010	
1011	
1100	
1101	
1110	1.23V (V_{BG})
1111	0V (GND)

Setelah konversi lengkap (ADIF tinggi) hasil konversi akan ditemukan di register hasil ADC (ADCL, ADCH)

$$\text{ADC} = \frac{Vin.1024}{Vref} \tag{2.8}$$

ADCSRA merupakan register 8 bit yang berfungsi melakukan managemen control dan status dari ADC.



Gambar 2.14. Register ADCSRA

Bit penyusun register ADCSRA sebagai berikut.

a. ADEN merupakan bit pengatur aktivasi ADC. Bernilai awal 0, jika bernilai 1 maka ADC aktif.

b. ADSC (ADC *Start Conversion*)

   Untuk memulai konversi di set (1) pada mode konversi tunggal, setelah konversi selesai maka akan menjadi nol dan memulai konversi lagi.

c. ADFR jika bit ini set (1) maka ADC akan beropersi *Free Running Mode.*

d. ADIF Merupakan bit penanda akhir suatu konversi ADC. Bernilai awal 0. jika bernilai 1, maka konversi ADC pada suatu saluran telah selesai dan data siap diakses.

e. ADIE merupakan bit pengatur aktivasi interupsi yang berhubungan dengan akhir konversi ADC. Bernilai awal 0, jika bernilai 1 dan jika sebuah konversi ADC telah selesai, sebuah interupsi akan dieksekusi.

f. ADPS [2..0] merupakan bit pengatur clock ADC. Bernilai awal 000. selengkapnya dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 2.6. Pemilihan prescaler ADC

ADPS2	ADPS1	ADPS0	Division Factor
0	0	0	2
0	0	1	2
0	1	0	4
0	1	1	8
1	0	0	16
1	0	1	32
1	1	0	64
1	1	1	128

2. 3 Pulse Width Modulation (PWM)

Salah satu keunggulan AVR ATmega8 yaitu adanya fasilitas PWM. PWM yaitu suatu sinyal dengan frekuensi tetap, tetapi lebar pulsa ‘high’ dan lebar pulsa ‘low’ dapat diatur. Fungsi dari PWM antara lain untuk mengontrol motor DC, motor servo, atau mengatur terang redup LED. Pulsa PWM ini dapat diambil dari pin OC1A,OC1B atau OC2. Untuk membangkitkan pulsa PWM yaitu dengan mengatur register TCCR, OCR dan TCNT. Besarnya frekuensi PWM yang akan digunakan dapat ditentukan dari *prescaler* pada register TCCR1B. Bentuk persamaannnya adalah :

$$f_{PWM} = \frac{f_{clk_I/O}}{2 \cdot N \cdot TOP} \qquad (2.9)$$

f_{PWM} = frekuensi PWM

$f_{clk_I/O}$ = frekuensi osilator eksternal

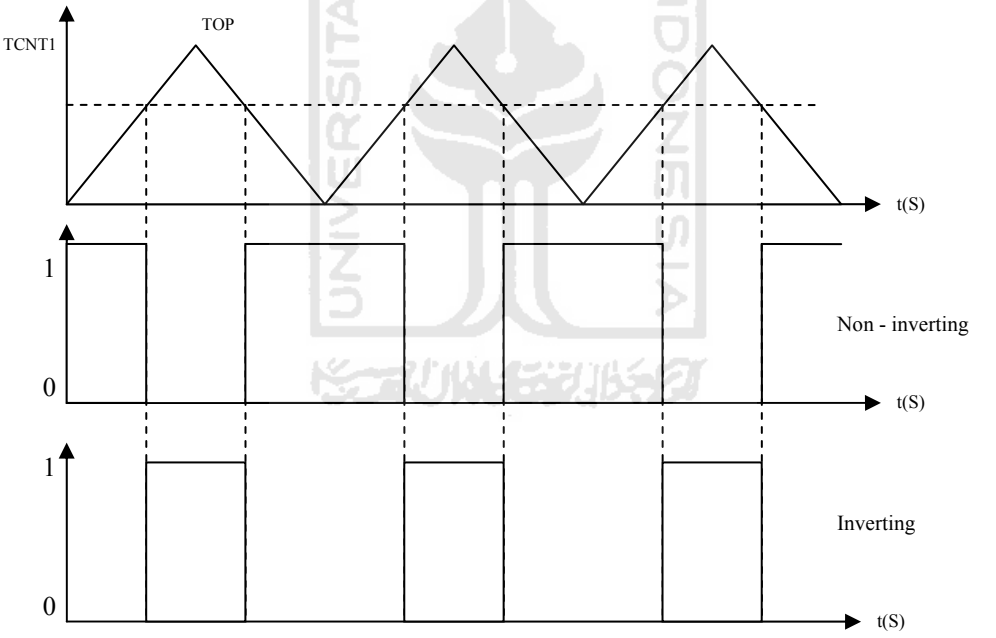
N = prescaler timer

TOP = nilai maksimal TCNT1

Mekanisme terbentuknya PWM sebagai berikut, sebagai contoh PWM pada OC1A:

- Nilai antara OCR dibandingkan dengan TCNT (TCNT mencacah naik dan mencacah turun).
- Jika nilai TCNT1A < OCR1A (up-counting), maka OC1A = '1' (mode non inverting).
- Jika nilai TCNT1A > OCR1A (down-counting), maka OC1A = '0' (mode non inverting).

Bentuk timing diagramnya sebagai berikut:



Gambar 2.15. Mekanisme terbentuknya PWM pada Timer-Counter 1

Untuk mode inverting, nilai OC1A kebalikan dari mode non inverting untuk kondisi yang sama. Hal ini tergantung nilai COM01 dan COM00 pada register TCCR1A.

2.4 Sensor Efek Hall UGN3503

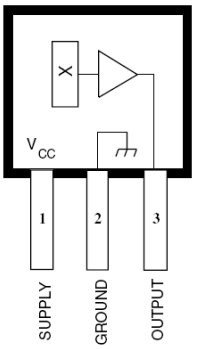
Sensor efek hall adalah sensor yang bekerja berdasarkan efek hall yaitu efek yang ditimbulkan oleh medan magnet disekitar kawat yang di aliri arus listrik. Sensor ini banyak diaplikasikan dalam pengukuran besaran magnetis (contohnya : medan magnet), pengukuran arus yang mangalir pada kawat atau kumparan.

Salah satu jenis sensor efek hall yang tersedia di pasaran adalah tipe UGN 3503 yang diproduksi oleh Allegro. Sensor ini mendeteksi perubahan medan magnet yang sangat kecil. Adapun Spesifikasi teknis dari sensor ini, antara lain :

- DC power supply (VCC) = 4.5 – 6 V
- Sensitivitas pada supply 5V = 1.3 mV/G
- Resistansi Output = 50 – 220 Ohm

Pada saat tidak mendeteksi adanya medan magnet (B = 0) dan sensor terhubung dengan VCC output tegangan = 2.5 – 2.6 V. Apabila sensor dihadapkan pada permukaan kutub utara dari magnet maka tegangan output sensor akan semakin lebih kecil dari pada tegangan sensor mula-mula (pada saat B=0) apabila mendeteksi adanya medan magnet. Apabila sensor dihadapkan pada kutub selatan magnet, maka yang terjadi adalah sebaliknya, tegangan output sensor akan bertambah lebih besar dari pada tegangan mula-mula seiring dengan perubahan medan magnet yang dideteksi oleh sensor tersebut.

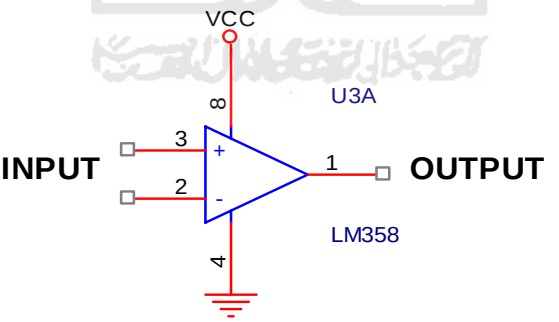
Bentuk fisik sensor efek hall sebagai berikut:



Gambar 2.16. Bentuk fisik sensor efek hall

2.5 Pengkondisi Isyarat

Sinyal listrik yang akan diolah umumnya sangat kecil, rangkaian Op-Amp (*Operational Amplifier*) dapat digunakan untuk memperkuat sinyal listrik tersebut. Simbol dasar Op-Amp ditunjukan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.17. Simbol op-amp

Karakteristik ideal dari Op-Amp ideal adalah :

a. Resistansi masukan R_i sampai tak hingga

b. Resistansi keluaran R_0 sama dengan nol

c. Penguatan tegangan (ΔV) sampai tak hingga

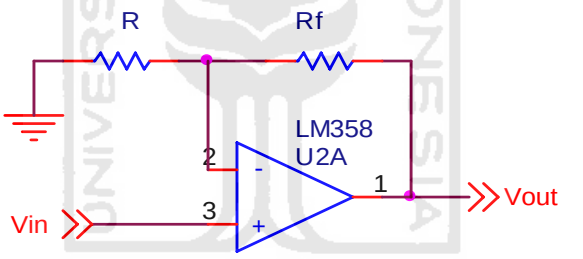
d. *Bandwidth* sampai tak hingga

e. Arus masukkan sama dengan nol

f. Offset tegangan dan arus sama dengan nol

2.5.1. Penguat non Inverting

Rangkaian Op-Amp yang akan dibahas adalah rangkaian penguat non-inverting atau tak membalik fasa. Penguat non-Inverting adalah penguat dimana sinyal input akan masuk pada Op-Amp pada pin non-inverting atau tanda (+) yang berarti keluaran dari penguat ini akan sefasa dengan input .



Gambar 2.18. Rangkaian penguat non-inverting

$$\text{Besarnya penguatannya } (\Delta V) = \frac{Vout}{Vin} = 1 + \frac{Rf}{R} \qquad (2.10)$$

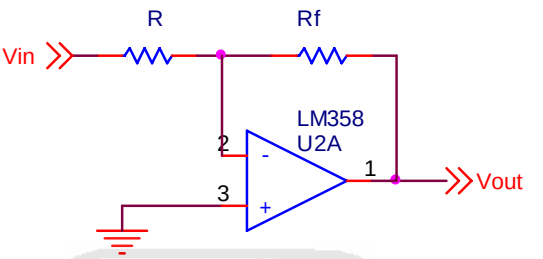
Dimana: Vin = Tegangan masukan (V)

Vout = Tegangan keluaran (V)

Rf = R = nilai resistansi (Ω)

2.5.2 Penguat Inverting

Penguat Inverting adalah penguat dimana sinyal input akan masuk pada Op-Amp pada pin inverting atau tanda (-) yang berarti output dari penguat ini akan berlawanan fasa dengan input.



Gambar 2.19. Rangkaian penguat inverting

Dari Gambar 2.7 diperoleh persamaan:

Besar penguatannya (ΔV) = $\frac{Vout}{Vin} = -\frac{Rf}{R}$ (2.11)

2.6 Logika *Fuzzy*

Pada tahun 1965, Zadeh memodifikasi teori himpunan yaitu setiap anggotanya memiliki derajat keanggotaan yang bernilai kontinyu antara 0 sampai 1. himpunan ini disebut dengan himpunan kabur (*fuzzy set*).

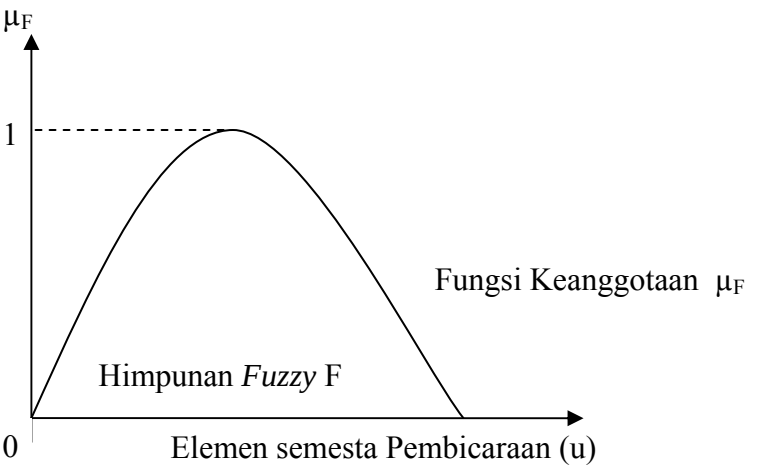
Logika *fuzzy* adalah suatu cara yang tepat untuk memetakan suatu ruang input ke dalam suatu ruang output. Himpunan *fuzzy* didasarkan pada gagasan untuk memperluas jangkauan fungsi karakteristik sedemikian hingga fungsi tersebut akan mencakup bilangan real pada interval [0,1]. Nilai keanggotaannya menunjukkan bahwa suatu item dalam semesta pembicaraan tidak hanya berada pada 0 atau 1, namun juga nilai yang terletak diantaranya. Dengan kata lain, nilai kebenaran suatu

item tidak hanya bernilai benar atau salah. Nilai 0 menunjukkan salah, nilai 1 menunjukkan benar, dan masih ada nilai-nilai yang terletak diantara benar dan salah.

Sistem pengendali *fuzzy* adalah sistem aturan dasar di dalam sebuah himpunan yang disebut aturan *fuzzy*. Tujuan dari sistem pengendali *fuzzy* yaitu untuk mengganti pengoperasian suatu alat yang dilakukan oleh manusia dengan sebuah sistem aturan *fuzzy*. Pengendali *fuzzy* mengambil bentuk dari aturan *IF-THEN* dimana sebab (*IF*) dan akibat (*THEN*) adalah sebagai fungsi anggota. Dengan aturan seperti ini, semua aturan numeris (suatu nilai yang menunjukan ukuran dari suatu variabel) dapat diselesaikan kedalam bentuk bahasa *fuzzy*.

2.6.1 Notasi Himpunan *Fuzzy*

Misal U kumpulan obyek yang dinotasikan dengan {u}. U disebut semesta pembicaraan dan u menyatakan suatu elemen dari U. Suatu himpunan *fuzzy* F di dalam semesta pembicaraan U ditentukan melalui fungsi keanggotaan μ_F yang mempunyai nilai dalam interval [0,1]. Yang diilustrasikan pada gambar 2.6.



Gambar 2.20. Himpunan *fuzzy* dan fungsi keanggotaan

Suatu himpunan kabur (*fuzzy*) biasanya dinyatakan sebagai himpunan pasangan elemen u dan nilai derajat keanggotaan sebagai barikut :

$$F = \{(u, \mu_F(u)) \mid u \varepsilon U\} \tag{2.12}$$

Jika U kontinyu, himpunan *fuzzy* F dapat ditulis sebagai berikut :

$$F = \int_u \mu_F(u)/u \tag{2.13}$$

Jika U diskret, himpunan *fuzzy* F dapat di tulis sebagai berikut :

$$F = \sum \mu_F(u_i)/u_i \tag{2.14}$$

Pada pernyataan diatas, 'Σ', '$\int u$', mempunyai arti sebagai unit himpunan, dan '/' hanya digunakan untuk menghubungkan suatu elemen dengan nilai kenggotaannya dan tidak berhubungan dengan pembagian aritmatik.

2.6.2 Fungsi Keanggotaan *Fuzzy*

Fungsi keanggotaan *fuzzy* adalah kurva yang menggambarkan pemetaan setiap elemen dalam semesta wacana kepada derajat keanggotaan. Ada dua definisi keanggotaan, yaitu numeris dan fungsional. Definisi numeris menyatakan fungsi keanggotaan himpunan *fuzzy* sebagai vektor bilangan yang dimensinya tergantung pada level diskretisasi, yakni cacah elemen diskret didalam semesta. Definisi fungsional menyatakan fungsi keanggotaan himpunan *fuzzy* dalam ekspresi analitik yang memungkinkan derajat kenggotaan untuk setiap elemen didalam semesta pembicaraan yang didefinisikan harus dihitung.

Tipe fungsi keanggotaan yang berbeda dapat digunakan sebagai nilai linguistik pada setiap variabel linguistik. Terdapat dua metode dalam memilih fungsi keanggotaan tersebut :

- Yang pertama menggunakan pengalaman dan pengetahuan teknisi untuk memilih variabel masukan keluaran yang mungkin dan sesuai, kemudian dengan prosedur *cut* and *try* untuk menemukan partisi *fuzzy* yang sesuai, dan pendekatan trial and *error* untuk menentukan fungsi keanggotaan yang sesuai.
- Yang kedua dengan menggunakan pembelajaran (*learning*) atau *self organization technique*. Idenya adalah untuk memutuskan dan menyetel partisi *fuzzy* dan fungsi keanggotaan dan untuk memilih variabel masukan dan variabel keluaran yang sesuai. Ada berbagai macam bentuk fungsi keanggotaan, yaitu trapesium, segitiga, fungsi s, dll. Kemudian parameter-parameter fungsi keanggotaan dioptimalkan berdasarkan data yang ada.

Dari dua pendekatan diatas, dipilih pendekatan kedua dengan bentuk fungsi keanggotaan segitiga selain mampu mendeskripsikan wilayah keanggotaan *fuzzy* juga cepat dalam perhitungan.

Fungsi keanggotaan yang sering digunakan dalam praktek adalah :

a. Fungsi keanggotaan S

Fungsi S dinyatakan sebagai berikut :

$$S(u;a,b,c)=\begin{cases}0 & u<a\\ 2[(u-a)/(c-a)]^2 & a\le u\le b\\ 1-2[(u-c)/(c-a)]^2 & b\le u\le c\\ 1 & u>c\end{cases} \qquad (2.15)$$

dengan a = elemen semesta pembicaraan (u) yang membuat pemetaan

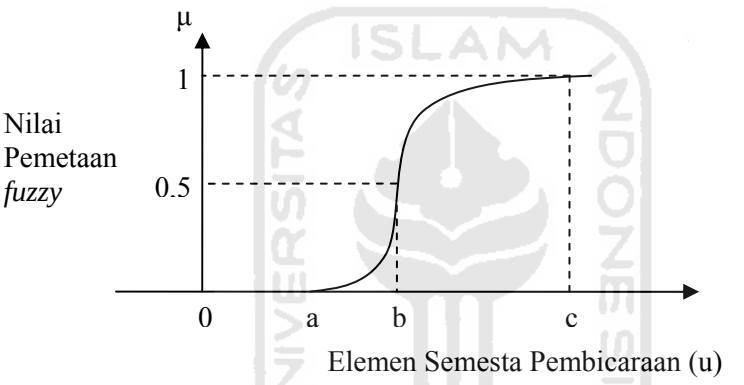
$$\mu_F = 0$$

b = *crossover point*

c = elemen semesta pembicaraan (u) yang membuat pemetaan

$$\mu_F = 1$$

Bentuk S ditentukan oleh nilai parameter a, b, c seperti pada gambar 2.7. titik *crossover* 0,5 terjadi pada b = (a + c)/2.



Gambar 2.21. Bentuk keanggotaan S

b. Fungsi keanggotaan π

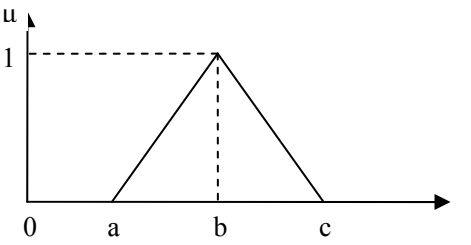
Fungsi F dinyatakan sebagai berikut :

$$\pi(u;b,c) = \begin{cases} S(u;c-b,c-b/2,c) & u \le c \\ 1-S(u;c+b/2,c+b) & u \ge c \end{cases} \tag{2.16}$$

c. Fungsi keanggotaan segitiga

Fungsi segitiga dinyatakan sebagai berikut :

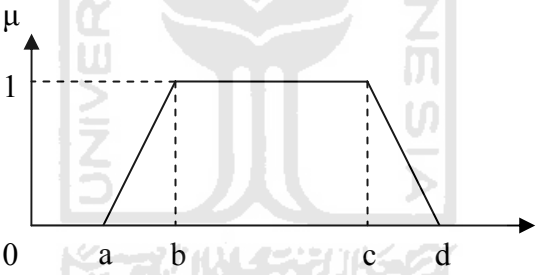
$$T(u;a,b,c) = \begin{cases} 0 & u < a \\ (u-a)/(b-a) & a \le u \le b \\ (c-u)/(c-b) & b \le u \le c \\ 0 & u > c \end{cases} \tag{2.17}$$



Gambar 2.22. Fungsi keanggotaan segitiga

d. Fungsi keanggotaan trapesium

$$F(x,a,b,c,d)=\begin{cases}0 & x\le a\\ (x-a)/(b-a) & a\le x\le b\\ 1 & b\le x\le c\\ (d-x)/(d-c) & c\le x\le d\\ 0 & x\ge d\end{cases} \tag{2.18}$$



Gambar 2.23. Fungsi keanggotaan trapesium

2.6.3 Fuzzifikasi

Fuzzifikasi adalah proses pemetaan dari masukan himpunan tegas kedalam himpunan *fuzzy* yang terdapat dalam semesta pembicaraan, dalam proses kendali biasanya masukan berupa data hasil pengukuran.

Beberapa hal yang harus dilakukan dalam proses fuzzifikasi adalah sebagai berikut :

a. Mendapatkan masukan tegas sebagai variabel

b. Pemetaan dari nilai tegas tersebut menjadi besaran *fuzzy*

c. Mengubah besaran *fuzzy* tersebut ke dalam himpunan *fuzzy*

Jumlah dan besaran himpunan *fuzzy* sangat tegantung pada resolusi kuantisasi dan kompleksitas masalah perancangan dan banyaknya jumlah himpunan *fuzzy* sangat berdampak pada jumlah aturan.

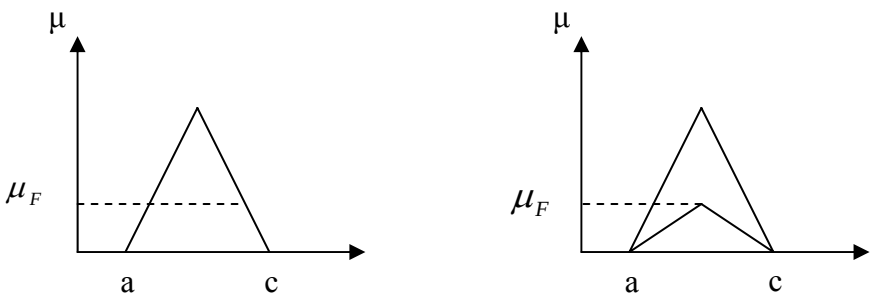
2.6.4 Inferensi

Ada beberapa cara untuk menentukan aturan yang dipakai dan menghasilkan aksi kendali *fuzzy* yang sesuai. Dari banyak metode yang ada, yang paling banyak digunakan adalah metode MAX-MIN dan MAX-DOT, yang ditunjukkan sebagai berikut :

Misal diasumsikan terdapat basis aturan pengendali *fuzzy* terdiri dari dua aturan :

Aturan 1 : *IF* x *is* A_1 *and* y *is* B_1 *then* Z *is* C_1

Aturan 2 : *IF* x *is* A_2 *and* y *is* B_2 *then* Z *is* C_2



(a) (b)

Gambar 2.24. (a) Metode inferensi MAX-MIN (b) Metode inferensi MAX-DOT

2.6.5 Defuzzifikasi

Defuzzifikasi merupakan proses pemetaan dari aksi kendali *fuzzy* yang didefinisikan pada semesta pembicaraan keluaran ke ruang aksi kendali *nonfuzzy* (numerik). Proses ini penting karena pada aplikasi praktis aksi kendali numerik diperlukan untuk melakukan pengendalian. Strategi defuzzifikasi membantu menemukan aksi kendali *nonfuzzy* yang paling baik dalam mewakili distribusi peluang aksi kendali *fuzzy* hasil inferensi. Sayangnya, tidak terdapat satupun prosedur yang sistematik dalam memilih strategi defuzzifikasi tersebut. Metode defuzzifikasi yang paling umum digunakan adalah *center of area* (COA) dan *mean of Maximum* (MOM).

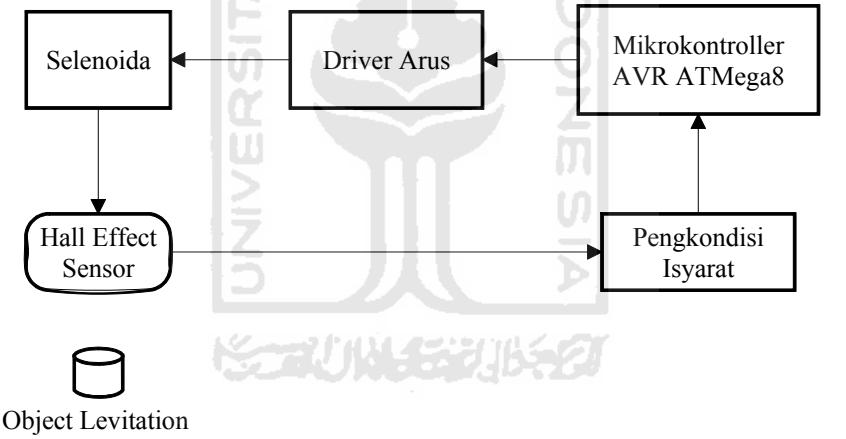
Metode yang lebih sering digunakan adalah metode COA, menentukan pusat gravitasi (titik berat) distribusi peluang aksi kendali. Metode MOM menentukan aksi kendali yang mewakili nilai rataan (*mean*) dari aksi kendali lokal yang fungsi keanggotaannya mencapai maksimum. Dari kedua metode tersebut, metode COA terbukti lebih baik. Metode MOM menghasilkan kondisi transien yang lebih baik, sedangkan metode COA menghasilkan *steady state* yang lebih baik.

BAB III

PERANCANGAN SISTEM

3.1 Sistem Pengendali *Magnetic Levitation*

Sistem pengendalian yang digunakan yaitu berupa kendali kalang tertutup. Pengendalian ini mempunyai unit umpan balik dimana besaran keluaran diukur dan dibandingkan dengan *set-point.* Gambar 3.1. memperlihatkan blok diagram sistem pengendali *magnetic levitation.*.



Gambar 3.1. Diagram blok sistem pengendalian

Sensor efek hall berfungsi mendeteksi posisi obyek melayang. Keluaran dari sensor berupa tegangan yang bervariasi sesuai dengan posisi *object levitation*. Keluaran dari sensor efek hall dimasukkan ke rangkaian pengkondisi sinyal untuk menyesuaikan besar tegangan yang dibutuhkan ke mikrokontroler. Di mikrokontroler data yang diperoleh diolah sesuai dengan aturan-aturan dari algoritma fuzzy yang dirancang. Keluaran dari mikrokontroler akan men-drive tegangan dan arus yang

lebih besar pada rangkaian driver arus yang kemudian akan mengendalikan besarnya medan magnet pada selenoida.

3.2 Perancangan Perangkat Keras

3.2.1 Selenoida

Selenoida adalah sebuah kawat yang dililitkan pada sebuah inti besi yang berbentuk silinder. Jika lilitan kawat dialiri arus listrik maka akan timbul medan magnet di sekitar selenoida. Medan magnet yang timbul akan menarik obyek dimana arus yang mengalir ke selenoida telah diatur oleh driver arus dengan menggunakan PWM. Selenoida tersebut dibuat dengan inti besi berdiameter (A) = 12 mm, panjang (l) = 150 mm, yang dililitkan dengan kawat email berdiameter (D) = 0,7 mm, jumlah lilitan (N) = ±1100 lilitan, 17 layer, panjang lilitan (ℓ) = 58 mm. Besarnya hambatan yang dihasilkan lilitan selenoida sebesar 7 Ohm (Ω). Selenoida ini dicatu dengan tegangan sebesar 21.4 Volt dan menyerap arus maksimal sebesar 2,6 amp. Besar medan magnet (B) maksimum yang dihasilkan sebesar 20 μT.

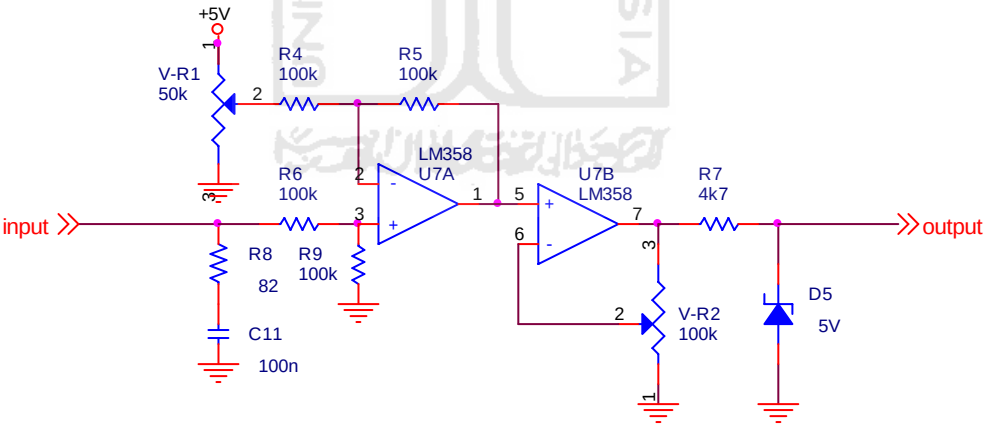
3.2.2 Sensor Hall Efek

Sensor efek hall dalam rangkaian ini berfungsi mengubah besaran fisik berupa kuat medan magnet menjadi besaran listrik berupa tegangan. Sensor tersebut membutuhkan tegangan catu daya sebesar 5 volt dan diletakkan di ujung bagian bawah selenoida. Jika tidak ada medan magnet yang terdeteksi maka tegangan keluaran sensor sebesar 2,5 volt. Jika sensor dihadapkan pada permukaan kutub utara magnet maka tegangan output sensor akan semakin lebih kecil dari tegangan sensor

mula-mula (pada saat B=0) apabila mendeteksi adanya medan magnet. Dan jika sensor dihadapkan pada kutub selatan magnet, maka yang terjadi adalah sebaliknya, tegangan output sensor akan bertambah lebih besar dari pada tegangan mula-mula seiring dengan perubahan medan magnet yang dideteksi oleh sensor tersebut.

3.2.3 Rangkaian Pengkondisi Isyarat

Rangkaian pengkondisi isyarat berfungsi untuk menyesuaikan keluaran tegangan dari sensor sesuai dengan yang dibutuhkan mikrokontroler untuk diolah. Rangkaian ini terdiri dari 2 bagian, yaitu rangkaian *diferensiator* dan rangkaian penguat. Dalam rangkaian ini menggunakan IC LM358 yang berisi 2 buah Op-Amp. Rangkaian ini diberi catu daya sebesar 12 volt. Rangkaiannya ditunjukkan pada Gambar 3.2.



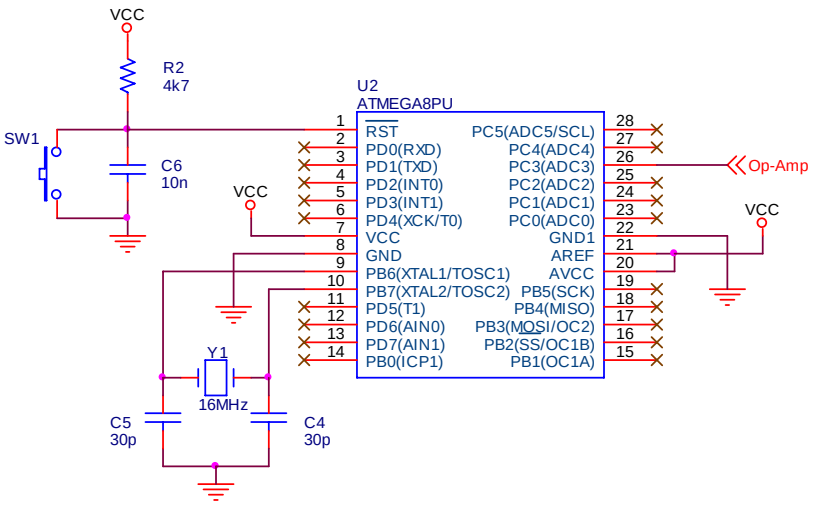
Gambar 3.2. Rangkaian pengkodisi isyarat

Pada gambar 3.2 digunakan V-R2 sebesar 100 KΩ berfungsi untuk memperbesar dan memperkecil penguatan dari op-amp selain itu juga dapat digunakan sebagai buffer (penyangga). Jika besar penguatan pada Op-Amp U7B sama dengan 1, maka Op-Amp berfungsi sebagai buffer (penyangga). Sedangkan V-

R1 sebesar 50 KΩ berfungsi sebagai *diferensiator* yang dapat mengurangkan atau menjumlahkan besar tegangan dari sensor. Rangkaian *diferensiator* ini digunakan untk menyesuaikan besar tegangan keluaran sensor dengan besarnya *set point* yang ditentukan di mikrokontroler dan memiliki penguatan sebesar 1 kali. R8 dan C11 digunakan sebagai filter untuk mengurangi noise pada keluaran sensor. Dioda zener D5 berfungsi untuk membatasi tegangan keluaran agar tidak melebihi 5 volt. Hal ini karena mikrokontroler hanya mampu menerima masukan tegangan maksimal sebesar 5 volt.

3.2.4 ADC (Analog to Digital Converter)

ADC yang digunakan dalam perancangan ini menggunakan ADC internal mikrokontroler ATMega8. Input dari ADC ini berada pada Port C yaitu pada pin ADC0/PC0 – ADC5/PC5. Pada perancangan ini ADC yang digunakan yaitu ADC3/PC3 dimana inputnya adalah data dalam bentuk tegangan dari rangkaian pengkondisi sinyal, rangkaiannya ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3. Rangkaian ADC internal ATMega8

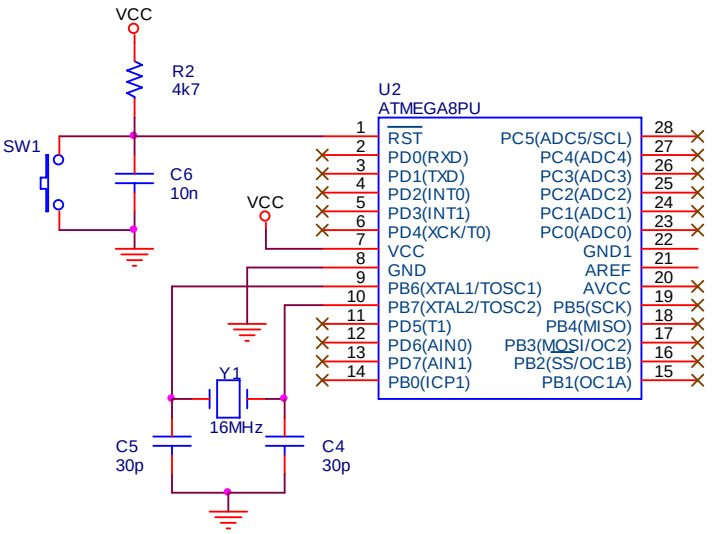
Proses inisialisasi ADC meliputi prosses penentuan clock, tegangan referensi, format output data, dan mode pembacaan. Register yang perlu diset nilainya adalah ADMUX (ADC *Multiplexer Selection Register*), dan SFIOR (*Special Function IO Register*). ADMUX merupakan register 8 bit yang berfungsi menentukan tegangan referensi ADC, format data output, dan saluran ADC yang digunakan. Untuk mengkonversi data analog terdapat 2 mode yaitu, mode *single conversion* dan mode *free running*.

Proses pembacaan hasil konversi ADC, dilakukan dengan melakukan pengecekan terhadap bit ADIF (*ADC Interupt Flag*) pada register ADCSRA. ADIF akan bernilai satu jika konversi sebuah saluran ADC telah selesai dilakukan dan data hasil konversi siap untuk diambil, demikian sebaliknya. Data disimpan dalam 2 buah register yaitu, ADCH dan ADCL.

Dalam perancangan digunakan ADC 10 bit sehingga hasil konversi memiliki rentang 0 – 1023 yang berasal dari $2^{10} = 1024$, untuk tegangan referensi atau AREF digunakan VCC atau 5V dengan menggabungkan pin AREF dan pin AVCC dengan VCC. Untuk mode konversinya dengan mode *single convertion* karena proses pembacaan harus berurutan sesuai program.

3.2.5 Rangkaian Mikrokontroler AVR ATMega8

Rangkaian minimum sistem dari mikrokontroller AVR ATMega8 adalah rangkaian *oscilator* dan *reset*. Rangkaian *oscilator* digunakan untuk membangkitkan *clock* dan rangkaian *reset* digunakan untuk mereset mikrokontroler. Rangkaiannya ditunjukkan pada Gambar 3.4 berikut.

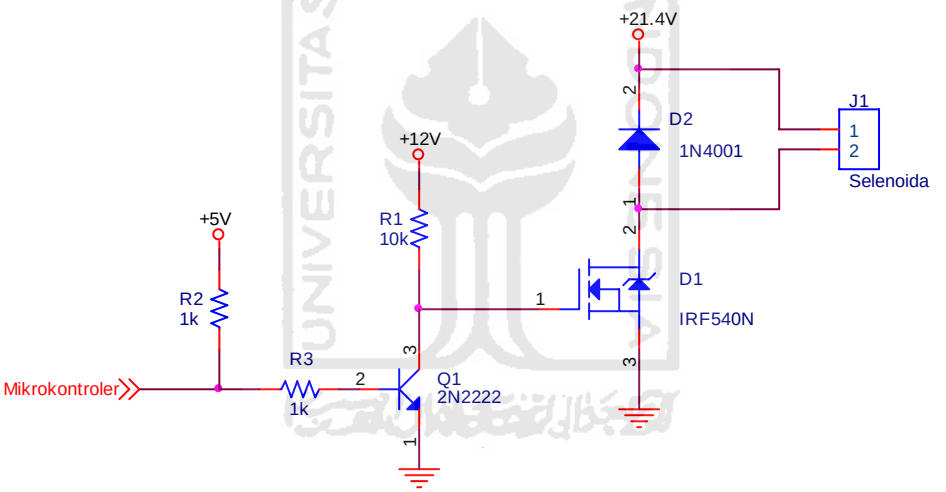


Gambar 3.4. Rangkaian minimum sistem mikrokontroler

Pada rangkaian *ocsilator* menggunakan kristal dengan frekuensi 16 MHz dengan dua buah kapasitor 30 pf. Sedangkan rangkaian *reset* berfungsi untuk menjaga agar pin RST mikrokontroler selalu berlogika rendah saat mikrokontroler mengeksekusi program. Mikrokontroler direset pada transisi tegangan rendah ke tegangan tinggi oleh karena itu pada pin RST dipasang kapasitor yang terhubung ke *ground* dan resistor ke VCC yang menjaga RST bernilai 1 saat pengisian kapasitor dan bernilai 0 saat kapasitor penuh. Pada saat sumber tegangan diaktifkan kapasitor terhubung singkat sehingga arus mengalir dari VCC langsung ke pin RST sehingga reset berlogika 1, kemudian kapasitor terisi hingga tegangan pada kapasitor sama dengan VCC pada saat ini kapasitor penuh. Dengan demikian tegangan reset akan turun menjadi 0 sehingga pin RST berlogika 0.

3.2.6 Driver Arus

Tegangan keluaran port mikrokontroler hanya 5 V dan arusnya pun kecil yaitu ± 20 mA, sedangkan selenoida yang digunakan membutuhkan arus dan tegangan yang lebih besar. Untuk dapat mencatu selenoida tersebut digunakan driver untuk menguatkan arus dan tegangan dari mikrokontroler. Rangkaian driver yang digunakan memakai MOSFET IRF540N yang dapat melakukan *fast switching* dan dapat mengalirkan arus hingga 33 amp serta tegangan hingga 100 volt. Rangkaian driver arus ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5. Rangkaian driver arus

Masukan rangkaian driver dari keluaran mikrokontroler (PORT B.1) yang keluarannya berupa sinyal PWM. Pada masukan *gate* IRF540N besar tegangan agar dapat bekerja harus lebih dari 10 volt, maka digunakan transistor 2N2222 sebagai penguat tegangan dari 5 volt menjadi 12 volt.

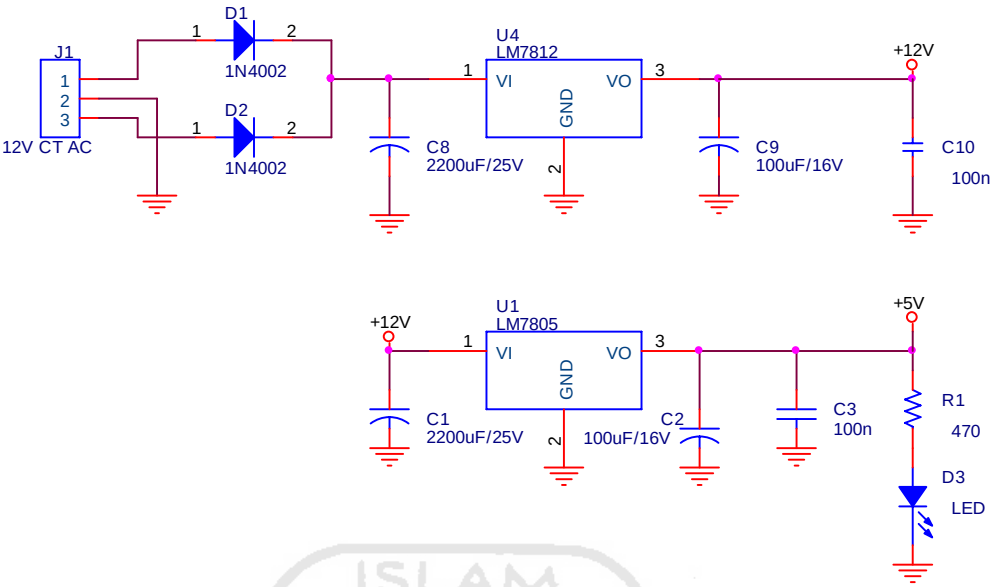
3.2.7 Obyek Pelayangan (*object levitation*)

Obyek pelayangan (*object levitation*) adalah benda yang digunakan untuk diambangkan oleh sistem ini. Benda yang digunakan terbatas pada benda tertentu yang mampu diambangkan oleh sistem ini. Benda yang digunakan yaitu sebuah baut berukuran panjang = 42 mm, diameter ulir = 6 mm dan diameter ujung baut = 16 mm. Sedangkan berat baut = 20 gram.

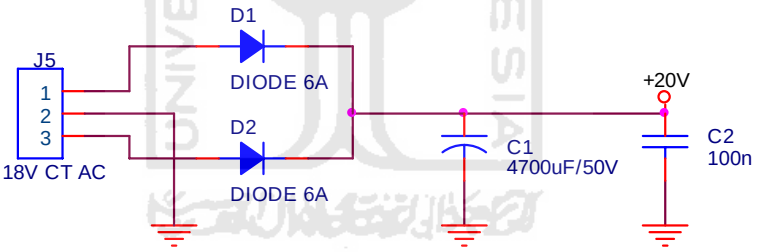
3.2.8 Rangkaian Catu Daya (*Power Supply*)

Untuk rangkaian catu daya digunakan transformator CT (*Center Tap*) dengan kemampuan menghantarkan arus maksimal 5 Amp. Pemberian catu daya dibagi menjadi 2 bagian, yaitu catu daya untuk driver arus dan catu daya untuk rangkaian sistem kontrol yang terdiri dari mikrokontroler, sensor dan rangkaian pengkondisi sinyal. Untuk catu daya driver arus tegangan yang diambil dari trafo sebesar 18Volt CT AC, untuk mengubahnya menjadi DC digunakan rangkaian penyearah dengan menggunakan 2 buah diode 6 Amp dan kapasitor untuk menghilangkan efek *noise* yang timbul.

Untuk catu daya rangkaian sistem kontrol tegangan yang diambil dari trafo sebesar 12 Volt CT AC 500 mA. Pada bagian ini terdiri dari 2 bagian, 10 Volt untuk catu daya IC LM358 dan 5 Volt untuk mikrokontroler dan sensor. Untuk mendapatkan catu daya sebesar 12 Volt digunakan regulator LM7812 dan untuk catu daya 5 Volt digunakan regulator LM7805. Rangkaian catu daya selengkapnya ditunjukkan pada Gambar 3.6 dan Gambar 3.7.



Gambar 3.6. Rangkaian catu daya untuk sistem kontrol



Gambar 3.7. Rangkaian catu daya untuk driver arus

3.3 Perancangan Sistem Kendali Logika *Fuzzy*

3.3.1 Fuzifikasi

Fuzzifikasi adalah proses dekomposisi suatu masukan dan atau keluaran sistem ke dalam satu atau lebih himpunan *fuzzy*. Perancangan sistem yang digunakan sebagai pengendali ini mempunyai masukan yang berasal dari sensor hall efek berupa tegangan. Dari sensor dibentuk dua buah masukan untuk pengendali logika

fuzzy yaitu *error* (*e*) dan *delta error* (*de*). Sedangkan keluaran pengendali logika fuzzy berupa nilai PWM.

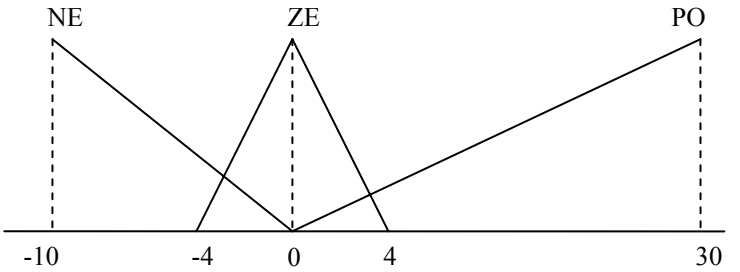
3.3.1.1 Masukan Kendali *Fuzzy*

a. Masukan *Eror* (e)

Error didefinisikan sebagai perbedaan besar tegangan keluaran sensor yang diinginkan (*set point*) dimana obyek dapat melayang dengan besar tegangan keluaran sensor aktual yang didapatkan (*present value*).

Error (e) = *present value* (PV) – *set point* (SP) (3.1)

Dalam sistem ini didisain *membership function* untuk masukan *eror* dengan jumlah label sebanyak 3 label dan dengan bentuk segitiga dan trapezoid. Keanggotaan untuk *error* mempunyai rentang -10 sampai 30. Nilai ini diperoleh dari percobaan mencari titik – titik pelayangan obyek. Nilai *eror* negatif berarti obyek berada di bawah batas pelayangan, sedangkan nilai *eror* positif berarti obyek berada di atas batas pelayangan. Fungsi keanggotaan dari *error* mempunyai tiga keanggotaan yaitu *Negative* (NE), *Zero* (ZE), *Positive* (PO). Bentuk fungsi keanggotaan *eror* ditunjukkan pada Gambar 3.8.



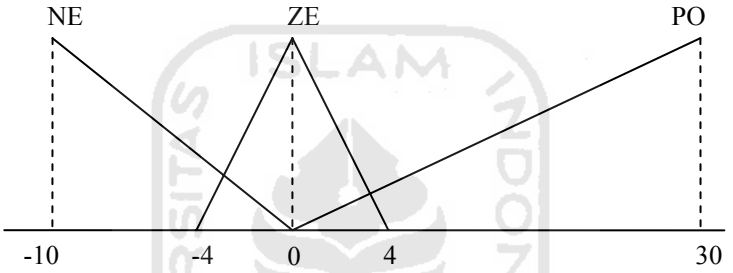
Gambar 3.8. Fungsi keanggotaan *error* (e)

b. Masukan *Delta Eror* (de)

Derror didefinisikan sebagai selisih antara *error*(n) dengan *eror*(n-1) dimana *eror*(n) adalah *error* sekarang dan *eror*(n-1) adalah *error* sebelumnya.

Delta error (de) = *error*(n) – *error*(n-1) (3.2)

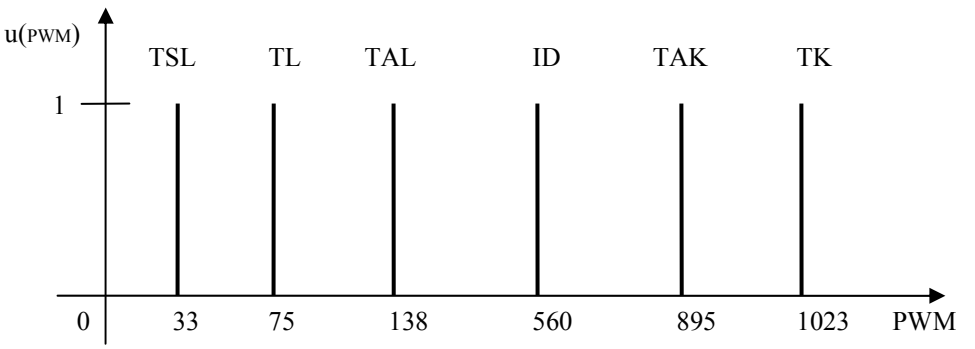
Untuk fungsi keanggotaan *delta eror* ini sama dengan fungsi keanggotaan *eror*. Bentuk fungsi keanggotaan *eror* dtunjukkan pada Gambar 3.9 berikut.



Gambar 3.9. Fungsi keanggotaan *delta error* (de)

3.3.1.2 Keluaran Kendali *Fuzzy*

Keluaran dari kendali *fuzzy* berupa nilai PWM yang akan mengendalikan besar arus yang mengalir ke selenoida. Besarnya nilai PWM ini mempengaruhi besar medan magnet yang ditimbulkan oleh selenoida. Untuk fungsi keanggotaan keluaran PWM didisian dengan jumlah label sebanyak 5 label dan dengan bentuk *single tone* (himpunan tunggal). Keanggotaan untuk PWM mempunyai rentang 0 sampai 1023. Sedangkan fungsi keanggotaan dari PWM mempunyai enam keanggotaan yaitu Tarik Sangat Lemah (TSL), Tarik Lemah (TL), Tarik Agak Lemah (TAL), Ideal (ID), Tarik Agak Kuat (TAK) dan Tarik Kuat (TK). Fungsi keanggotaannya ditunjukkan pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10. Fungsi keanggotaan keluaran PWM

3.3.2 Inferensi (Basis Aturan)

Setelah masukan dan keluaran didekomposisikan ke dalam himpunan *fuzzy*, selanjutnya membuat basis aturan yang mengatur tingkah laku sistem tiap kombinasi masukan. Masing-masing aturan terdiri atas satu kondisi dan satu tindakan. Kondisi diintepretasikan dari masukan himpunan *fuzzy* dan tindakan ditentukan oleh keluaran himpunan *fuzzy*. Basis aturan *fuzzy* pada pengendali ini masih tetap berbasis pada aturan jika-maka dan metode inferensi yang digunakan adalah MIN-MAX. Basis aturan sistem ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1. Aturan kendali logika *fuzzy*

Error\delta error	NE	ZE	PO
NE	TK	TAK	TAK
ZE	ID	ID	TAL
PO	TL	TAL	TSL

Keterangan :

NE = Negatif	ID = Ideal
ZE = Zero	TAL = Tarik Agak Lemah
PO = Positif	TL = Tarik Lemah
TK = Tarik Kuat	TSL = Tarik Sangat Lemah
TAK = Tarik Agak Kuat	

3.3.3 Defuzzifikasi

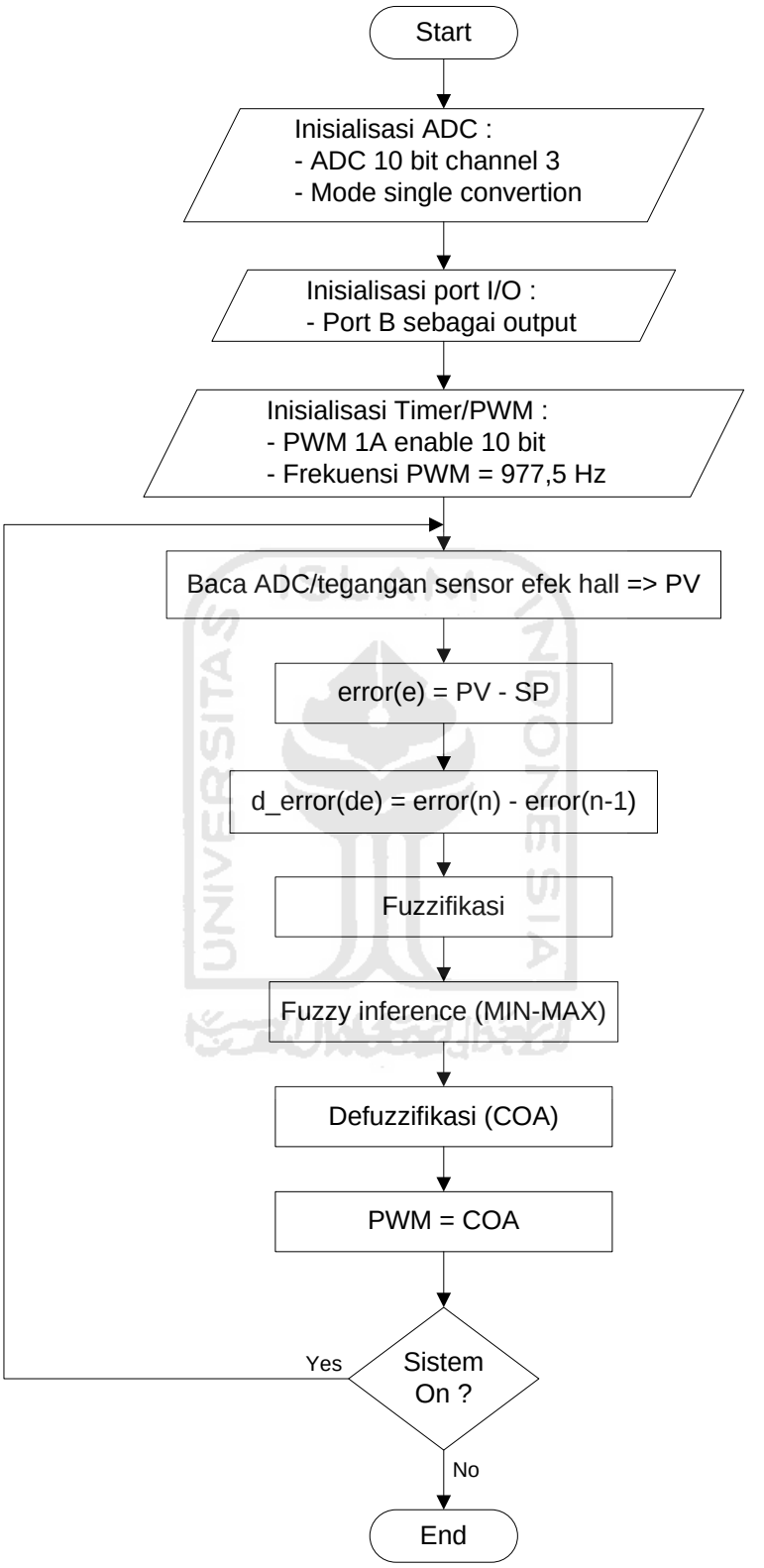
Defuzzifikasi adalah perubahan dari suatu besaran *fuzzy* ke suatu besaran numerik. Dalam prosedur defuzifikasi ini bertujuan untuk mencari keluaran berdasarkan hasil keluaran inferensi. Keluaran dari hasil defuzzifikasi ini dalam bentuk nilai PWM yang diberikan oleh mikrokontroler ke selenoida yang akan mengendalikan besarnya medan magnet yang ditimbulkan agar obyek tetap melayang. Metode yang digunakan pada proses defuzifikasi ini adalah metode COA (*Center of Area*). Sehingga persamaan yang digunakan adalah:

$$PWM = \frac{\sum^{n}(rule_strength)n \times (action_PWM)}{\sum^{n}(rule_strength)n} \tag{3.3}$$

3.4 Perancangan Perangkat Lunak

Perancangan perangkat lunak digunakan sebagai cara pengimplementasian algoritma *fuzzy* yang telah dirancang ke dalam *plant* agar dapat berjalan sesuai dengan aturan yang telah dirancang. Untuk bahasa pemrograman yang digunakan adalah bahasa C. sedangkan software compiler yang digunakan adalah *CodeVisionAVR C Compiler*. Diagram alir program ditunjukkan pada gambar 3.11.

Dari diagram alir tersebut mejelaskan bahwa program berjalan secara berulang-ulang dengan membandingkan nilai masukan dengan nilai *set-point* yang telah dtentukan. Dari nilai-nilai tersebut diperoleh nilai keluaran untuk menentukan aksi yang akan dikerjakan *plant*.



Gambar 3.11. Diagram alir program utama pengendalian

BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Rangkaian Catu Daya (*Power Supply*)

Rangkaian catu daya merupakan salah satu rangkaian pokok yang berperan penting dalam penyediaan sumber tegangan dalam suatu rangkaian elektronika, sehingga pada bagian ini perlu diperhatikan agar kebutuhan sumber tegangan dapat mencukupi sesuai dengan besar tegangan yang dibutuhkan. Dalam hal ini penyediaan sumber tegangan untuk rangkaian *magnetic levitation*. Rangkaian catu daya ini menggunakan transformator CT dengan kemampuan menghantarkan arus maksimal 5 amp. Pemberian catu daya dibagi menjadi 2 bagian, yaitu catu daya untuk driver arus dan catu daya untuk rangkaian sistem kontrol.

1. Catu Daya Untuk Driver Arus

Untuk driver arus tegangan tegangan yang diambil dari transformator sebesar 18 volt CT AC. Sebagai rangkaian penyearah digunakan 2 buah dioda 6 Amp sebagai penyearah gelombang penuh dan kapasitor sebagai filter untuk meredam *niose* yang timbul. Besar tegangan keluaran rangkaian penyearah sebesar 21,4 volt, nilai tegangan ini yang akan mencatu driver arus.

2. Catu Daya Untuk Sistem Kontrol

Untuk rangkaian sistem kontrol tegangan yang diambil dari transformator sebesar 12 volt CT AC. Sebagai rangkaian penyearah digunakan 2 buah dioda 2 Amp

sebagai penyearah gelombang penuh. Pada rangkaian sistem kontrol ini dibutuhkan 2 bagian catu daya, yaitu catu daya untuk rangkaian pengkondisi sinyal sebesar 12 volt dan rankaian mikrokontroler dan sensor sebesar 5 volt. Untuk memenuhi kebutuhan catu daya ini digunakan regulator LM7812 sebagai pencatu 12 volt dan LM7805 sebagai pencatu 5 volt. Karakteristik LM7812 dan LM7805 ditunjukkan pada Tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1. Data regulator tegangan

Jenis Regulator	Tegangan Input (v)	Tegangan Output (v)		
		Min	Typ	Max
LM7805	7,5 - 20	4,8	5	5,2
LM7812	14,5 - 27	11,5	12	12,5

Pada perancangan tegangan masukan LM7812 sebesar 13,46 volt yang berasal dari rangkaian penyearah dan tegangan masukan LM7805 sebesar 9,88 yang berasal dari tegangan keluaran LM7812. Berdasarkan pengujian rangkaian LM7805 dan LM7812 dalam sistem rangkaian catu daya didapatkan data seperti pada Tabel 4.2 berikut.

Tabel 4.2. Hasil pengujian regulator.

Jenis Regulator	Tegangan Input(V)	Tegangan Output(V)
LM7812	13,46	11,89
LM7805	11,89	4,98

4.2 Pengujian Sensor Efek Hall Dan Rangkaian Pengkondisi Isyarat

Sensor efek hall bekerja jika mendeteksi adanya medan magnet. Keluaran dari sensor efek hall berupa tegangan yang bervariasi sesuai dengan besar medan magnet yang terdeteksi. Jika tidak ada medan magnet yang terdeteksi besar tegangan

keluaran sebesar 2,58 volt. Pengujian dilakukan dengan memberikan medan magnet yang bervariasi dari selenoida terhadap jarak *object levitation* dan mengamati terhadap perubahan tegangan pada keluaran sensor dan pada keluaran rangkaian pengkondisi isyarat..

Rangkaian pengkondisi isyarat digunakan untuk menyesuaikan tegangan keluaran sensor dengan nilai tegangan yang dibutuhkan pada masukan ADC mikrokontroler. Nilai tegangan keluaran rangkaian dapat diubah-ubah dengan memberikan penguatan naik atau penguatan turun. Selain sebagai penguat rangkaian ini dapat juga berfungsi sebagai penyangga (*buffer*) agar tidak membebani mikrokontroler. Untuk memenuhi hal itu dalam rangkaian digunakan IC LM358 yang memiliki 2 buah Op-Amp. Op-Amp ke-1 dirangkai sebagai penguat diferensail dan Op-Amp ke-2 dirangkai sebagai penguat akhir dan sebagai penyangga (*buffer*). Berikut data yang diperoleh dari hasil pengujian.

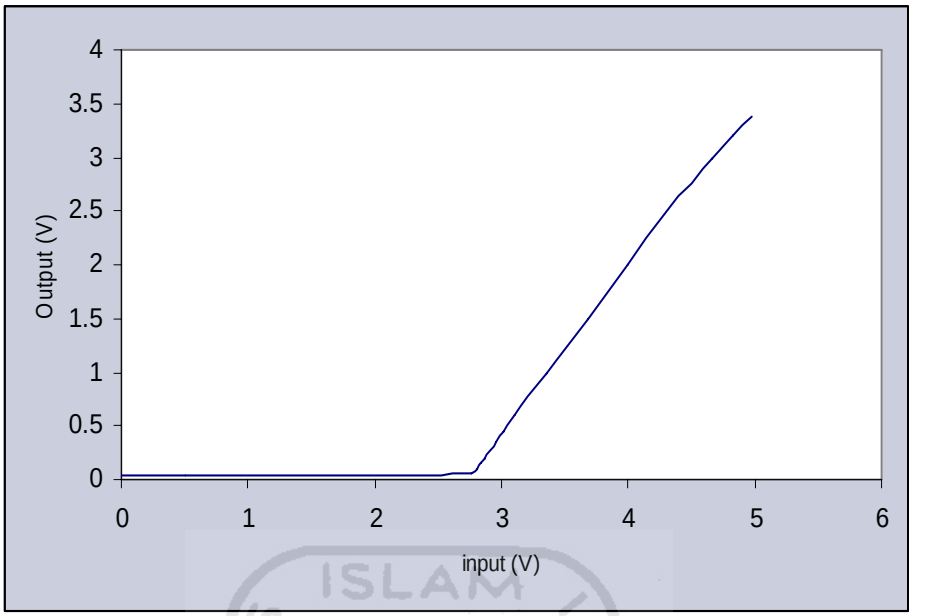
4.2.1 Pengujian Rangkaian Pengkondisi Isyarat

Pada pengujian ini dilakukan dengan mengamati perbandingan antara besar tegangan masukan dengan tegangan keluaran rangkaian pengkondisi isyarat pada setiap perubahan nilai tegangan masukan yang terjadi. Hasil pengamatan ditunjukkan pada Tabel 4.3 berikut.

Tabel 4.3. Hasil pengujian rangkaian pengkondisi isyarat

Tegangan Masukan (V)	Tegangan Keluaran (V)
0	0,03
0,5	0,03
1	0,03
1,5	0,03
2	0,03
2,76	0,05
2,80	0,10
2,83	0,15
2,86	0,20
2,95	0,35
3,01	0,45
3,11	0,60
3,36	1,00
3,68	1,50
3,99	2,00
4,31	2,50
4,66	3,00
4,82	3,20
4,98	3,37

Dari data yang diperoleh pada Tabel 4.3 dapat dibuat grafik hubungan antara tegangan masukan dan keluaran rangkaian pengkondisi isyarat. Gambar grafik ditunjukkan pada Gambar 4.1 berikut.



Gambar 4.1. Grafik hubungan antara tegangan masukan dengan tegangan keluaran rangkaian pengkondisi isyarat

Dari Tabel 4.3 dan Gambar 4.1 dapat dilihat perubahan tegangan keluaran terjadi pada saat besar tegangan masukan lebih dari 2 volt, saat besar tegangan kurang dari 2 volt besar tegangan keluaran (Vo) = 0,03 volt. Nilai tersebut adalah tegangan *off-set* dari Op-Amp yang menjadi karakterikstik Op-Amp tersebut. Jika nilai keluaran rangkaian dibandingkan dengan nilai masukan rangkaian terjadi pengurangan dari nilai masukan. Hal ini menunjukkan bahwa penguatan yang digunakan adalah penguat diferensial.

4.2.2. Pengujian Sensor Efek Hall

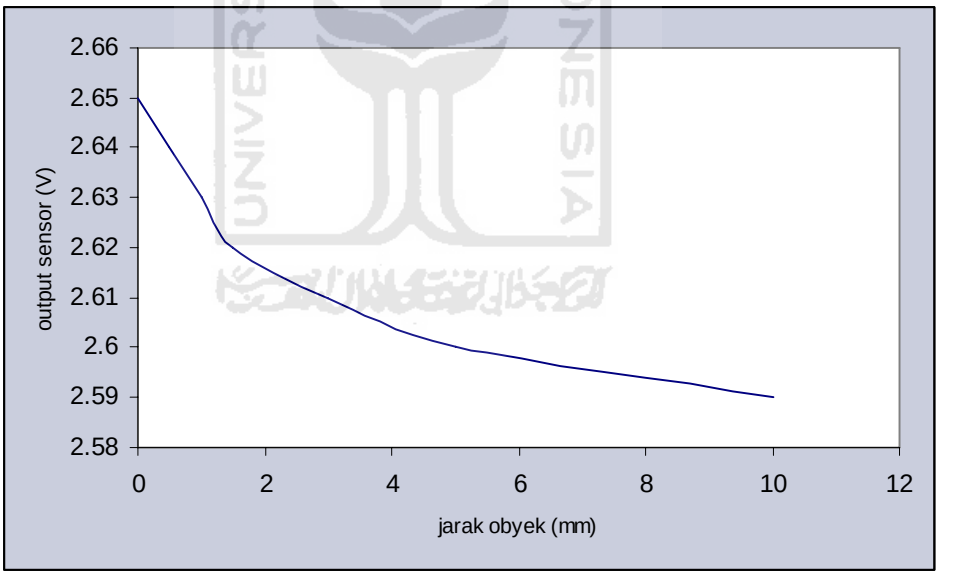
Hasil dari pengamatan pengujian sensor hall efek ditunjukkan pada data berikut.

a. Pengujian Tanpa Pengaruh Medan Magnet

Data hasil pengujian sensor ditunjukkan pada Tabel 4.4 berikut.

Tabel 4.4. Data hasil pengujian keluaran sensor hall efek

Jarak (mm)	Output sensor hall efek (V)	Output Pengkondisi Isyarat (V)
10	2,59	0,03
5	2,60	0,03
3	2,61	0,03
1,5	2,62	0,03
1	2,63	0,03
0,5	2,64	0,03
0	2,65	0,03



Gambar 4.2. Grafik hubungan antara tegangan sensor dengan jarak obyek tanpa adanya pengaruh medan magnet

Dari hasil pengujian dapat dilihat grafik pada Gambar 4.2 nilai keluaran sensor bertambah besar jika jarak benda semakin dekat, tetapi pada keluaran pengkondisi isyarat tidak mengalami perubahan. Hal ini karena sesuai

karakteristik rangkaian pengkondisi isyarat tersebut akan mengeluarkan nilai keluarannya jika nilai tegangan masukannya lebih dari 2,67 volt.

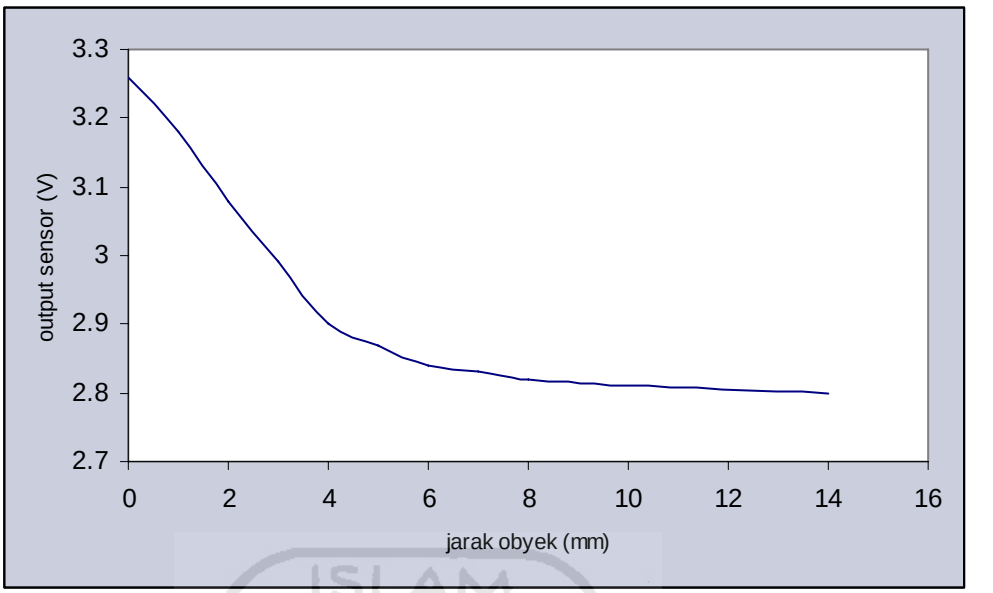
b. Pengujian Dengan Pengaruh Medan Magnet

1. Pengujian Dengan *Duty Cycle* PWM 10 %

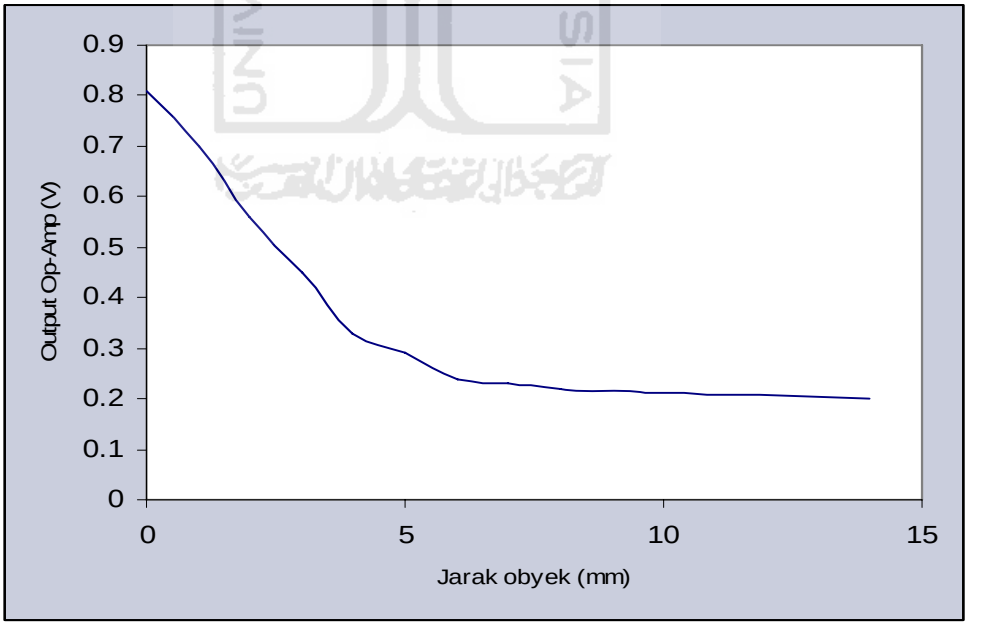
Data hasil pengujian sensor ditunjukkan pada Tabel 4.5 berikut.

Tabel 4.5. Data keluaran sensor hall efek dengan *Duty Cycle* PWM 10 %

Jarak (mm)	Output sensor hall efek (V)	Output Pengkondisi Isyarat (V)
14	2,80	0,20
10	2,81	0,21
8	2,82	0,22
7	2,83	0,23
6	2,84	0,24
5	2,87	0,29
4	2,90	0,33
3	2,99	0,45
2	3,08	0,56
1	3,18	0,70
0	3,26	0,81



Gambar 4.3. Grafik hubungan antara tegangan sensor terhadap jarak obyek dengan pengaruh medan magnet dengan PWM *duty cycle* 10 %



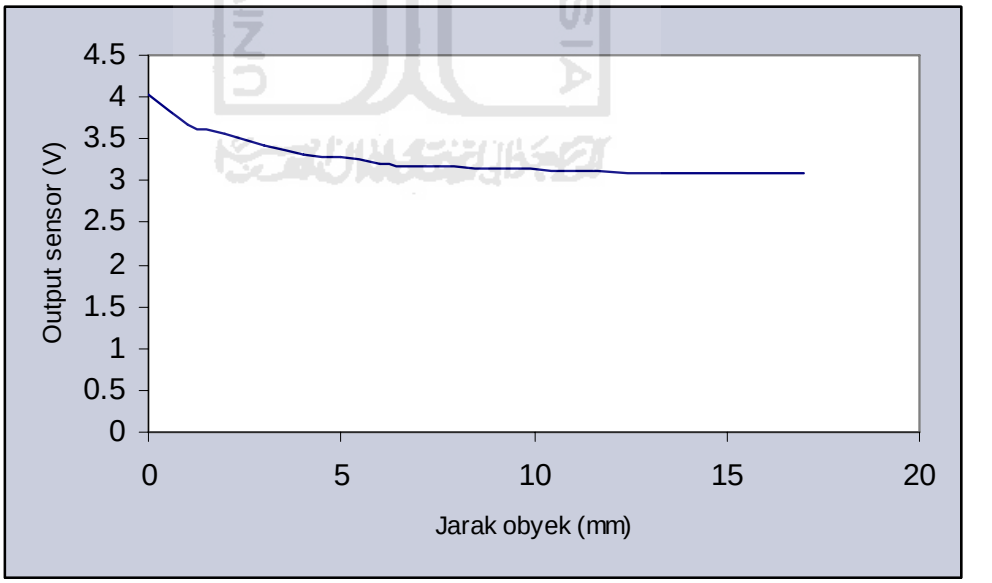
Gambar 4.4. Grafik hubungan antara tegangan keluaran pengkondisi isyarat terhadap jarak obyek dengan pengaruh medan magnet dengan PWM *duty cycle* 10 %

2. Pengujian Dengan *Duty Cycle* PWM 25 %

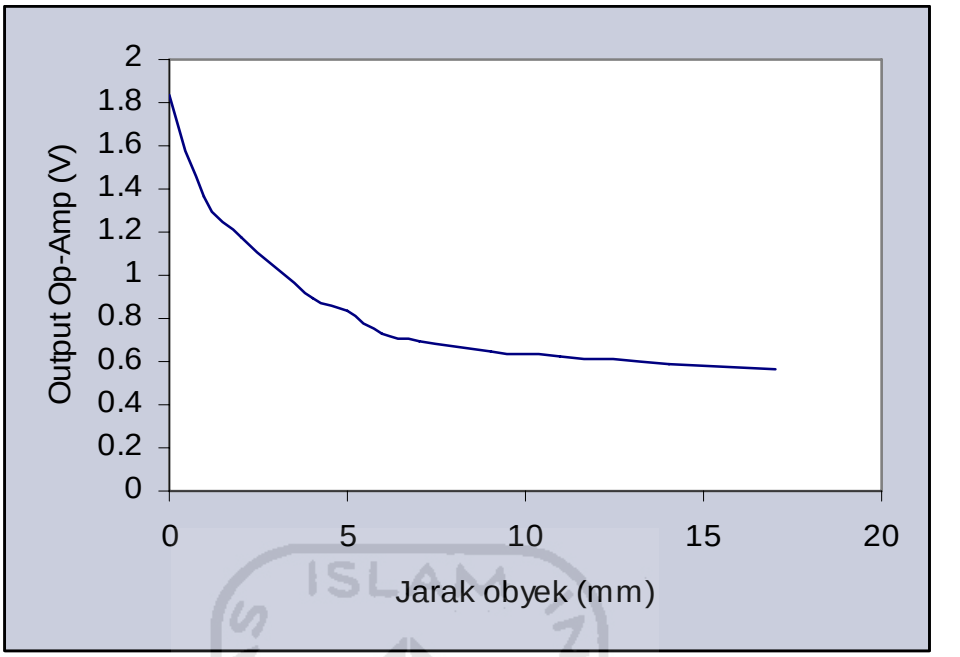
Data hasil pengujian sensor ditunjukkan pada Tabel 4.6 berikut.

Tabel 4.6. Data keluaran sensor hall efek dengan *Duty Cycle* PWM 25 %

Jarak (mm)	Output sensor hall efek (V)	Output Pengkondisi Isyarat (V)
17	3,08	0,57
14	3,10	0,59
11	3,12	0,62
9	3,14	0,65
7	3,17	0,69
6	3,20	0,73
5	3,28	0,83
4	3,32	0,89
3	3,43	1,03
2	3,55	1,18
1	3,68	1,36
0	4,04	1,83



Gambar 4.5. Grafik hubungan antara tegangan sensor terhadap jarak obyek dengan pengaruh medan magnet dengan PWM *duty cycle* 25 %



Gambar 4.6. Grafik hubungan antara tegangan keluaran pengkondisi isyarat terhadap jarak obyek dengan pengaruh medan magnet dengan PWM *duty cycle* 25 %

Dari data hasil pengujian yang diperoleh menunjukkan adanya perbedaan pengaruh dari pemberian besar medan magnet yang berbeda-beda dengan jenis obyek yang tetap. Semakin besar medan magnet yang diberikan semakin besar perbedaan tegangan dari keluaran sensor. Sedangkan pengaruh terhadap jarak obyek, semakin dekat jarak obyek dari sensor semakin besar pula tegangan keluaran sensor.

4.3 Pengujian ADC

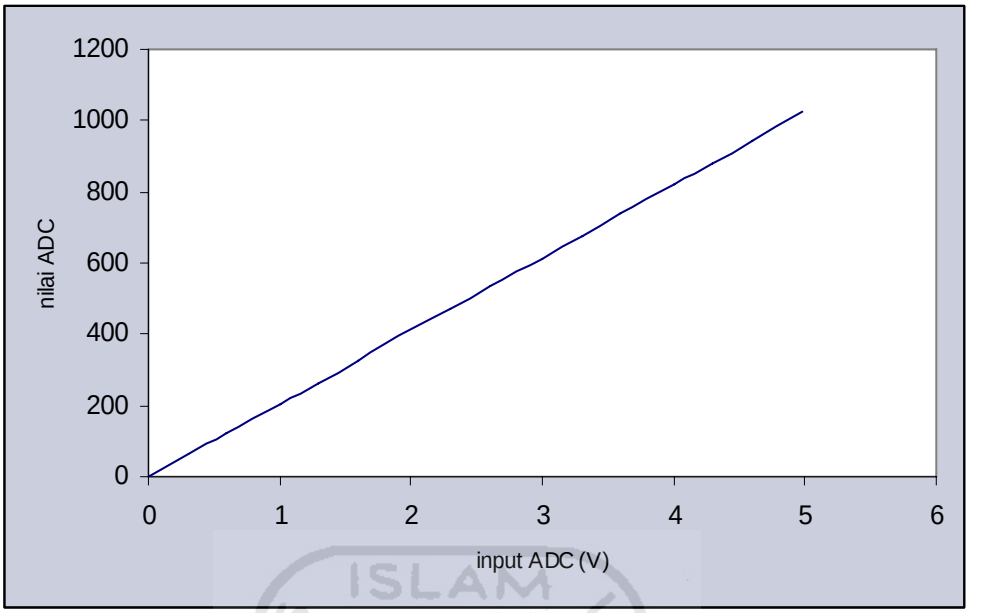
Pada perancangan ADC yang digunakan adalah ADC internal mikrokontroler ATMega8 dengan resolusi 10 bit. Mikrokontroler ATMega8 memiliki 6 kanal ADC dan yang digunakan pada perancangan adalah kanal 4 sebagai masukan dari

rangkaian pengkondisi sinyal. Mode operasi yang digunakan adalah mode *single conversion* karena proses pembacaan ADC harus berurutan sesuai alur program. Tegangan referensi (Vref) yang digunakan sebesar 5 volt. Pengujian ADC dilakukan dengan membandingkan antara nilai masukan ADC dengan nilai yang terbaca pada ADC. Nilai yang terbaca pada ADC dalam bentuk bilangan hexa. Dari hasil pengujian diperoleh data seperti pada Tabel 4.7 brikut.

Tabel 4.7. Data hasil pengujian ADC

Input ADC (V)	Nilai ADC (V)
0	0
0,3	62
0,6	120
1,0	202
1,3	265
1,6	324
2,0	414
2,3	470
2,6	537
3,0	612
3,3	673
3,6	740
4,0	821
4,3	882
4,6	942
4,98	1023

Dari data hasil pengujian yang diperoleh dapat dibuat grafik seperti pada Gambar 4.7 berikut.



Gambar 4.7. Grafik pengujian tegangan masukan ADC terhadap nilai ADC

Dari Gambar 4.7 grafik tersebut menunjukkan perubahan nilai masukan ADC dengan nilai yang terbaca pada ADC berubah secara linier mengikuti perubahan nilai masukan. Hal ini menunjukkan bahwa ADC yang digunakan sudah bekerja dengan baik.

4.4 Pengujian Driver Arus

Pada sistem yang dirancang driver arus berfungsi sebagai penguat tegangan dan arus karena tegangan dan arus keluaran dari mikrokontroler sangat kecil sedangkan selenoida membutuhkan tegangan dan arus yang lebih besar. Pada pengujian driver arus ini diberi masukan sinyal PWM dengan frekuensi sebesar 977,5 Hz dan membandingkan hasil sinyal keluaran dengan sinyal masukan dari pembangkit PWM (mikrokontroler). Keluaran driver arus kemudian dimasukkan ke selenoida. PWM berfungsi untuk mengatur besarnya arus yang mengalir ke

selenoida. Prinsip pengaturan PWM sama dengan prinsip penyaklaran (*swicthing*) yaitu “on” dan “off”. Dengan PWM lama “on” dan “off” dapat diatur dan lama penyaklaran dapat mempengaruhi besarnya arus yang mengalir. Hal ini juga mempengaruhi besarnya medan magnet yang ditimbulkan selenoida. Dalam PWM lama waktu penyaklaran dinamakan besar *duty cycle*. *Duty cycle* dinyatakan dalam satuan persen (%). Semakin besar nilai *duty cycle* maka waktu penyaklaran semakin lama dan arus yang mengalir semakin besar. Untuk melihat bentuk sinyal PWM yang dihasilkan dengan menggunakan osiloskop dengan besar volt/div = 5 V dan time/div = 2 ms. Hasil dari pengujian driver arus dapat dilihat pada Lampiran II.

Dari hasil pengujian yang diperoleh dapat dilihat perubahan yang terjadi antara masukan dan keluaran driver arus. Pada keluaran driver arus terjadi penguatan tegangan dimana besar tegangan keluaran sama dengan besar tegangan catu daya yang diberikan. Pada gambar hasil pengujian dapat dilihat perubahan yang terjadi pada setiap nilai *duty cycle* yang berbeda. Semakin besar nilai *duty cycle* semakin lebar pulsa PWM. Dengan penambahan lebar pulsa tersebut akan menambah besar arus yang dialirkan ke selenoida dan besar medan magnet yang ditimbulkan semakin besar.

4.5 Pengujian Kendali Logika *Fuzzy*

Pada pengujian sistem kendali logika *fuzzy* yaitu dengan membandingkan nilai keluaran *fuzzy* pada perangkat keras sesuai dengan program yang telah dibuat dengan perhitungan secara teori *fuzzy*. Untuk membandingkan diambil beberapa nilai masukan *eror*(e) dan *delta eror*(de). Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui

seberapa tepat hasil kendali *fuzzy* yang telah dirancang dibandingkan dengan teori *fuzzy* itu sendiri. Dari hasil pengujian diperoleh data sebagai berikut:

1. Untuk nilai *eror*(e) = 0 dan *delta eror*(de) = 0

   a. Pengujian Pada Program

      • Fuzzifikasi

      $u_e = \{u_N = 0 , u_Z = 1 , u_P = 0 \}$

      $u_{de} = \{u_N = 0 , u_Z = 1 , u_P = 0 \}$

      • Fuzzy Inference (MIN-MAX)

      Hasil dari *fuzzy inference* ditunjukkan pada gambar berikut.

e \ de	0 NE	1 ZE	0 PO
0 NE	TK 0	TK 0	TAK 0
1 ZE	ID 0	ID 1	TAL 0
0 PO	TL 0	TAL 0	TSL 0

Gambar 4.8. Hasil fuzzy inference (MIN) untuk e=0 dan de=0

      - max(0,1) = 1

      • Defuzzifikasi (COA)

      COA = 560

   b. Perhitungan Secara Teori

      • Fuzzifikasi

      $u_{eN}[x] = 0$ $\qquad$ $u_{deN}[y] = 0$

      $u_{eZ}[x] = \frac{4-0}{4} = 1$ $\qquad$ $u_{deZ}[y] = \frac{4-0}{4} = 1$

      $u_{eP}[x] = 0$ $\qquad$ $u_{deP}[y] = 0$

$u_e = \{u_N = 0 , u_Z = 1 , u_P = 0 \}$

$u_{de} = \{u_N = 0 , u_Z = 1 , u_P = 0 \}$

- Fuzzy Inference (MIN-MAX)

Hasil dari *fuzzy inference* secara teori sama dengan hasil *fuzzy inference* pada mikrokontroler seperti pada Gambar 4.8. Kemudian hasil untuk MAX adalah:

- max(0,1) = 1

- Defuzzifikasi (COA)

$$COA = \frac{(1x560)}{1} = 560$$

2. Untuk nilai *eror*(e) = 2 dan *delta eror*(de) = 1

   a. Pengujian Pada Program

   - Fuzzifikasi

   $u_e = \{u_N = 0 , u_Z = 0.5 , u_P = 0.06 \}$

   $u_{de} = \{u_N = 0 , u_Z = 0.75 , u_P = 0.03 \}$

   - Fuzzy Inference (MIN-MAX)

   Hasil dari *fuzzy inference* ditunjukkan pada gambar berikut.

e \ de		0	0.75	0.03
		NE	ZE	PO
0	NE	TK 0	TK 0	TAK 0
0.5	ZE	ID 0	ID 0.5	TAL 0.03
0.06	PO	TL 0	TAL 0.06	TSL 0.03

Gambar 4.9. Hasil fuzzy inference (MIN) untuk e=2 dan de=1

- max(0,0.5) = 0.5
- max(0.03,0.06) = 0.06

• Defuzzifikasi (COA)

COA = 483

b. Perhitungan Secara Teori

• Fuzzifikasi

$u_{eN}[x] = 0$ $u_{deN}[y] = 0$

$u_{eZ}[x] = \frac{4-2}{4} = 0{,}5$ $u_{deZ}[y] = \frac{4-1}{4} = 0{,}75$

$u_{eP}[x] = \frac{2-0}{30} = 0{,}06$ $u_{deP}[y] = \frac{1-0}{30} = 0{,}03$

$u_e = \{u_N = 0 , u_Z = 0.5 , u_P = 0.06 \}$

$u_{de} = \{u_N = 0 , u_Z = 0.75 , u_P = 0.03 \}$

• Fuzzy Inference (MIN-MAX)

Hasil dari *fuzzy inference* secara teori sama dengan hasil *fuzzy inference* pada mikrokontroler seperti pada Gambar 4.9. Kemudian hasil untuk MAX adalah:

- max(0,0.5) = 0.5
- max(0.03,0.06) = 0.06

• Defuzzifikasi (COA)

$$COA = \frac{(0{,}5x560) + (0{,}06x138) + (0{,}03x33)}{0{,}5 + 0{,}06 + 0{,}03} = 490{,}2$$

3. Untuk nilai *eror*(e) = 2 dan *delta eror*(de) = -7

   a. Pengujian Pada Program

      • Fuzzifikasi

      $u_e = \{u_N = 0 , u_Z = 0.5 , u_P = 0.06 \}$

      $u_{de} = \{u_N = 0.7 , u_Z = 0 , u_P = 0 \}$

      • Fuzzy Inference (MIN-MAX)

      Hasil dari *fuzzy inference* ditunjukkan pada gambar berikut.

de		0.7	0	0
e		NE	ZE	PO
0	NE	TK 0	TK 0	TAK 0
0.5	ZE	ID 0.5	ID 0	TAL 0
0.06	PO	TL 0.06	TAL 0	TSL 0

Gambar 4.10. Hasil fuzzy inference (MIN) untuk e=2 dan de=-7

- max(0.5,0) = 0.5

      • Defuzzifikasi (COA)

      COA = 502

   b. Perhitungan Secara Teori

      • Fuzzifikasi

      $u_{eN}[x] = 0$ $\qquad$ $u_{deN}[y] = \frac{0-(-7)}{10} = 0{,}7$

      $u_{eZ}[x] = \frac{4-2}{4} = 0{,}5$ $\qquad$ $u_{deZ}[y] = 0$

      $u_{eP}[x] = \frac{2-0}{30} = 0{,}06$ $\qquad$ $u_{deP}[y] = 0$

      $u_e = \{u_N = 0 , u_Z = 0.5 , u_P = 0.06 \}$

$u_{de} = \{u_N = 0.7 , u_Z = 0 , u_P = 0 \}$

- Fuzzy Inference (MIN-MAX)

Hasil dari *fuzzy inference* secara teori sama dengan hasil *fuzzy inference* pada mikrokontroler seperti pada Gambar 4.10. Kemudian hasil untuk MAX adalah:

- max(0.5,0) = 0.5

- Defuzzifikasi (COA)

$$COA = \frac{(0{,}5x560) + (0{,}06x75)}{0{,}5 + 0{,}06} = 508{,}03$$

4. Untuk nilai *eror*(e) = -5 dan *delta eror*(de) = -6

a. Pengujian Pada Program

- Fuzzifikasi

$u_e = \{u_N = 0.5 , u_Z = 0 , u_P = 0 \}$

$u_{de} = \{u_N = 0.6 , u_Z = 0 , u_P = 0 \}$

- Fuzzy Inference (MIN-MAX)

Hasil dari *fuzzy inference* ditunjukkan pada gambar berikut.

	de	0.6	0	0
e		NE	ZE	PO
0.5	NE	TK 0.5	TK 0	TAK 0
0	ZE	ID 0	ID 0	TAL 0
0	PO	TL 0	TAL 0	TSL 0

Gambar 4.11. Hasil fuzzy inference (MIN) untuk e=-5 dan de=-6

- max(0.5,0) = 0.5

- Defuzzifikasi (COA)

  COA = 1023

b. Perhitungan Secara Teori

- Fuzzifikasi

  $u_{eN}[x] = \frac{0-(-5)}{10} = 0{,}5$ $\quad$ $u_{deN}[y] = \frac{0-(-6)}{10} = 0{,}6$

  $u_{eZ}[x] = 0$ $\quad$ $u_{deZ}[y] = 0$

  $u_{eP}[x] = 0$ $\quad$ $u_{deP}[y] = 0$

  $u_e = \{u_N = 0.5 , u_Z = 0 , u_P = 0 \}$

  $u_{de} = \{u_N = 0.6 , u_Z = 0 , u_P = 0 \}$

- Fuzzy Inference (MIN-MAX)

  Hasil dari *fuzzy inference* secara teori sama dengan hasil *fuzzy inference* pada mikrokontroler seperti pada Gambar 4.11. Kemudian hasil untuk MAX adalah:

  - max(0.5,0) = 0.5

- Defuzzifikasi (COA)

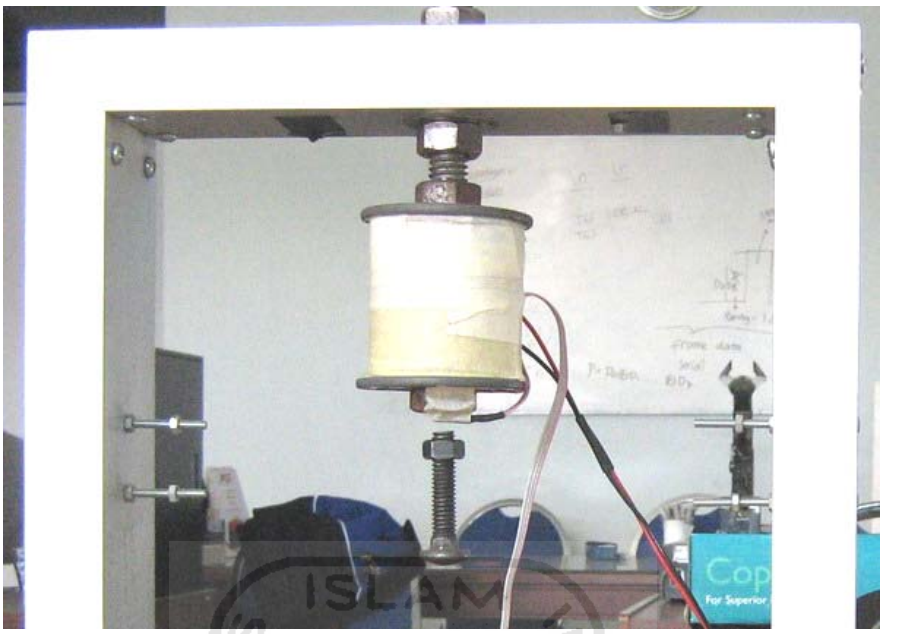
  $COA = \frac{0{,}5x1023}{0{,}5} = 1023$

Dari data-data di atas dapat dilihat perbandingan hasil yang diperoleh dari hasil pengujian program dengan hasil perhitungan sesuai dengan teori aturan *fuzzy*. Pada beberapa nilai masukan *error*(e) dan *delta error*(de) terdapat sedikit perbedaan hasil dari proses defuzzifikasi. Perbedaan tersebut dapat disebabkan karena dari

proses mikrokontroler itu sendiri yang tidak dapat dihindari, tetapi nilai tersebut sudah mendekati nilai perhitungan yang dikehendaki.

4.6 Pengujian Seluruh Sistem

Pengujian ini dilakukan dengan mengoperasikan seluruh sistem. Hal yang diperhatikan pada pengujian ini adalah posisi dan kestabilan pelayangan *object levitation* (baut). Program pengendali *magnetic levitation* ini telah berjalan dengan baik, *object levitation* dapat melayang di bawah selenoida dengan jarak pelayangan antara 2 sampai 3 mm. Akan tetapi dilihat dari kestabilan obyek selama pelayangan belum stabil. Gerakan obyek selama pelayangan masih kasar dan sesekali obyek jatuh dari posisi pelayangannya. Hal ini disebabkan karena proses pengendali *fuzzy* yang panjang sedangkan kecepatan proses mikrokontroler terbatas. Mikrokontroler yang digunakan hanya mampu diberi *clock* maksimal 16 MHz. Hal ini dapat mengakibatkan pada beberapa posisi tidak terbaca oleh mikrokontroler karena selama proses *fuzzy* berjalan telah terjadi perubahan posisi dan sensor efek hall telah memberikan keluaran tetapi mikrokontroler masih memproses data sebelumnya sehingga nilai keluaran (kuat medan magnet) yang dikehendaki pada saat tertentu tidak sesuai dengan posisi obyek yang terbaca pada sensor. Hasil dari pengujian sistem ditunjukkan pada Gambar 4.12 berikut.



Gambar 4.12. Hasil Pengujian Sistem *Magnetic Levitation*

Selama proses sistem berjalan untuk melihat parameter-parameter keluaran sangat sulit. Hal ini karena proses sistem yang sangat cepat dan jika pada program kendali ditambahkan program untuk menampilkan parameter keluaran akan mengganggu kerja sistem sehingga sistem tidak dapat bekerja dengan baik. Begitu pula untuk pengecekan secara *hardware* sangat sulit dilakukan karena perubahan nilai keluaran yang sangat cepat sehingga alat ukur yang tersedia tidak dapat membaca perubahan-perubahan tersebut. Selain itu terkadang pemasangan alat ukur pada *hardware* mengganggu proses kerja sistem. Hal ini karena arus atau tegangan yang mengalir pada alat ukur membebani kerja sistem. Dari pernyataan tersebut menunjukkan proses selama sistem bekerja sangat rentan terhadap faktor eksternal sehingga harus dijaga semaksimal mungkin agar sistem terhindar dari gangguan-gangguan luar.

BAB V

PENUTUP

Berdasarkan dari proses perancangan, pembuatan, pengamatan dan hasil uji sistem yang dibuat, maka dapat diambil beberapa kesimpulan dan saran untuk kemajuan, perbaikan dan pengembangan dari aplikasi sistem.

5.1 Kesimpulan

Dari proses perancangan, implementasi, analisis kinerja sistem elektronis dan pengujian sistem dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Dari prototipe yang telah dibuat obyek pelayangan (*object levitation*) dapat melayang di bawah selenoida dengan jarak pelayangan antara 2 sampai 3 mm dari ujung selenoida.
2. Proses kerja pengendalian sistem sudah berjalan sesuai program, akan tetapi dari segi kestabilan pelayangan obyek belum stabil, karena pengaruh dari kecepatan proses pada mikrokontroler masih lambat sedangkan aturan *fuzzy* pada program membutuhkan waktu yang cepat agar sistem dapat bekerja dengan baik.
3. Pada saat sistem bekerja sangat sulit untuk melakukan pengukuran parameter-parameter keluaran sistem, karena pemasangan alat ukur pada sistem dapat mengganggu proses kerja sistem sehingga obyek jatuh dari posisi pelayangannya.

4. Sistem kendali algoritma *fuzzy* tidak selamanya dapat diaplikasikan secara sempurna pada suatu sistem terlebih jika sistem mempunyai kecepatan proses yang terbatas sedangkan sistem membutuhkan kecepatan proses yang sangat cepat.

5.2 Saran

Untuk pengembangan lebih lanjut bagi mahasiswa yang ingin menyempurnaan prototipe ini, penulis dapat memberikan saran-saran antara lain :

1. Prototipe *magnetic levitation* ini dapat disempurnakan lagi dengan mengganti mikrokontroler yang memiliki kemampuan proses yang lebih cepat atau dengan menggunakan aplikasi algoritma pemrograman yang lebih sesuai untuk prototipe ini.
2. Dalam perancangan perangkat keras harus diperhatikan kualitas kinerja dari komponen yang akan digunakan, karena sistem ini sangat rentan terhadap faktor eksternal. Sedangkan pada kendali algoritma *fuzzy* hal yang harus diperhatikan adalah nilai-nilai untuk variabel masukan dan keluaran karena sangat mempengaruhi hasil dari proses *fuzzy* tersebut.
3. Jika perangkat kontroler dapat bekerja lebih cepat kemungkinan parameter-parameter keluaran sistem dapat diukur dengan menambahkan program untuk pengukuran dan dapat ditampilkan pada LCD atau PC (*Personal Computer*) melalui jalur komunkasi serial.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Budioko, Totok, 2005. *Belajar dengan Mudah dan Cepat Pemrograman Bahasa C dengan SDCC (Small Device C Compiler) pada Mikrokontroler AT89X051/AT89C51/52*. Yogyakarta: Gava Media.

[2] Halawa, Edward E. H. & Setyawan P. Sakti, 1995. *Pemrograman Dengan C/C++ Dan Aplikasi Numerik*. Jakarta: Erlangga.

[3] Hansen, Barry, 2006. *Barry's Magnetic Levitation*, (On-line) Available at http://www.oz.net_coilgun\levitation\home.htm.

[4] Kurnia, Danny, 2006. *Induktor* (On-line) Available at http://www.ElectronicLab.com.

[5] Kusumadewi, Sri, 2002. *Analisis Dan Desain Sistem Fuzzy Menggunakan Tool Box Matlab*. Yogyakarta: Graha Ilmu.

[6] Kusumadewi, Sri & Hari Purnomo, 2004. *Aplikasi Logika Fuzzy Untuk Pendukung Keputusan*. Yogyakarta: Graha Ilmu.

[7] Ontario, Waterloo, 2002. *Fuzzy Logic In Embedded Microcomputers And Control Systems* (On-line) Available at http://www.bytecraft.com/Fuzz-C__Fuzzy_Logic_Preprocessor.

[8] Pandjaitan, Lanny W., 2007. *Dasar – Dasar Komputasi Cerdas*. Yogyakarta: ANDI.

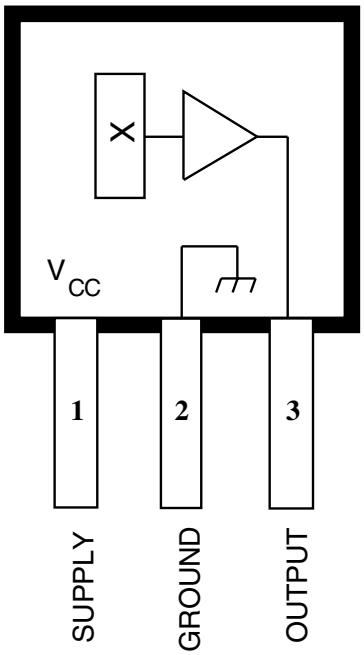
[9] Wardhana, Lingga, 2006. *Belajar Sendiri Mikrokontroler AVR Seri ATMega8535 Simulasi Hardware, dan Aplikasi*. Yogyakarta: ANDI.

[10] _____, 2003, *8-bit AVR with 8K Bytes In-System Programmable Flash* (On-line) Available at http://www.atmel.com.

3503

Data Sheet 27501B*

RATIOMETRIC, LINEAR HALL-EFFECT SENSORS



Dwg. PH-006

Pinning is shown viewed from branded side.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Supply Voltage, V_{CC} ..... **8 V**
Magnetic Flux Density, B ..... **Unlimited**
Operating Temperature Range,
T_A ..... **-20°C to +85°C**
Storage Temperature Range,
T_S ..... **-65°C to +150°C**

The UGN3503LT, UGN3503U, and UGN3503UA Hall-effect sensors accurately track extremely small changes in magnetic flux density—changes generally too small to operate Hall-effect switches.

As motion detectors, gear tooth sensors, and proximity detectors, they are magnetically driven mirrors of mechanical events. As sensitive monitors of electromagnets, they can effectively measure a system's performance with negligible system loading while providing isolation from contaminated and electrically noisy environments.

Each Hall-effect integrated circuit includes a Hall sensing element, linear amplifier, and emitter-follower output stage. Problems associated with handling tiny analog signals are minimized by having the Hall cell and amplifier on a single chip.

Three package styles provide a magnetically optimized package for most applications. Package suffix 'LT' is a miniature SOT-89/TO-243AA transistor package for surface-mount applications; suffix 'U' is a miniature three-lead plastic SIP, while 'UA' is a three-lead ultra-mini-SIP. All devices are rated for continuous operation over the temperature range of -20°C to +85°C.

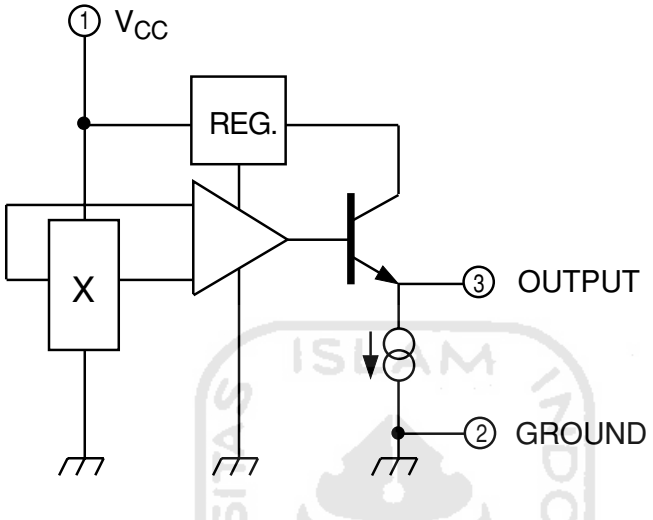
FEATURES

- Extremely Sensitive
- Flat Response to 23 kHz
- Low-Noise Output
- 4.5 V to 6 V Operation
- Magnetically Optimized Package

Always order by complete part number, e.g., **UGN3503UA**.

3503
RATIOMETRIC, LINEAR HALL-EFFECT SENSORS

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



ELECTRICAL CHARACTERISTICS at T_A = +25°C, V_{CC} = 5 V

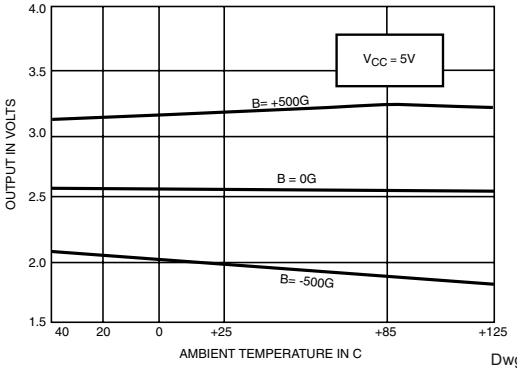
Characteristic	Symbol	Test Conditions	Limits			
			Min.	Typ.	Max.	Units
Operating Voltage	V_{CC}		4.5	—	6.0	V
Supply Current	I_{CC}		—	9.0	13	mA
Quiescent Output Voltage	V_{OUT}	B = 0 G	2.25	2.50	2.75	V
Sensitivity	ΔV_{OUT}	B = 0 G to ±900 G	0.75	1.30	1.75	mV/G
Bandwidth (-3 dB)	BW		—	23	—	kHz
Broadband Output Noise	V_{out}	BW = 10 Hz to 10 kHz	—	90	—	µV
Output Resistance	R_{OUT}		—	50	220	Ω

All output-voltage measurements are made with a voltmeter having an input impedance of at least 10 kΩ.

Magnetic flux density is measured at most sensitive area of device located 0.016" (0.41 mm) below the branded face of the 'U' package; 0.020" (0.51 mm) below the branded face of the 'UA' package; and 0.030" (0.76 mm) below the branded face of the 'LT' package.

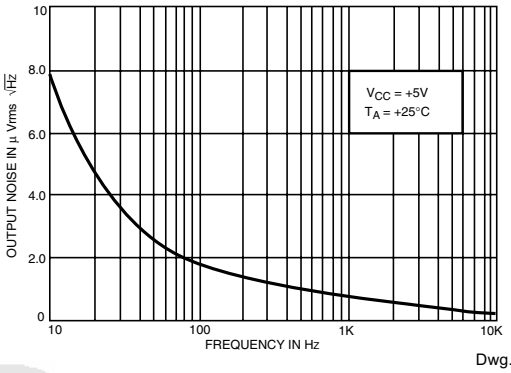
Allegro® MicroSystems, Inc.
115 Northeast Cutoff, Box 15036
Worcester, Massachusetts 01615-0036 (508) 853-5000
Copyright © 1985, 1999, Allegro MicroSystems, Inc.

OUTPUT VOLTAGE AS A FUNCTION OF TEMPERATURE



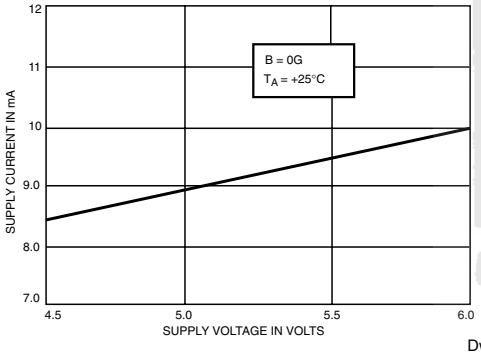
Dwg. A-12,573

OUTPUT NOISE AS A FUNCTION OF FREQUENCY



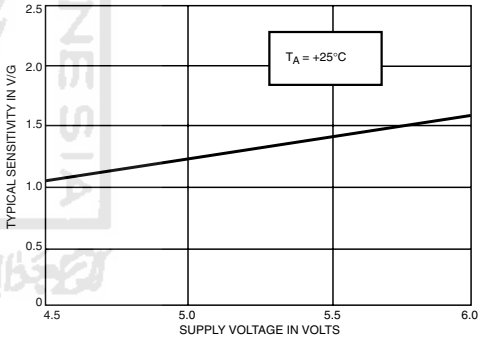
Dwg. A-12,505

SUPPLY CURRENT AS A FUNCTION OF SUPPLY VOLTAGE



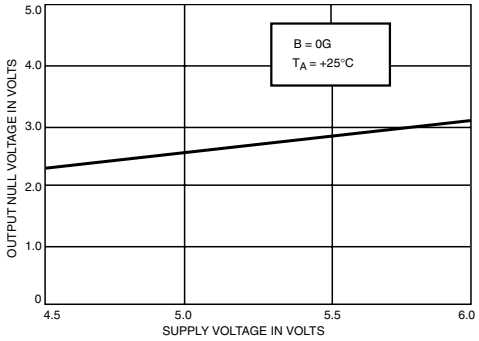
Dwg. A-12,506

DEVICE SENSITIVITY AS A FUNCTION OF SUPPLY VOLTAGE



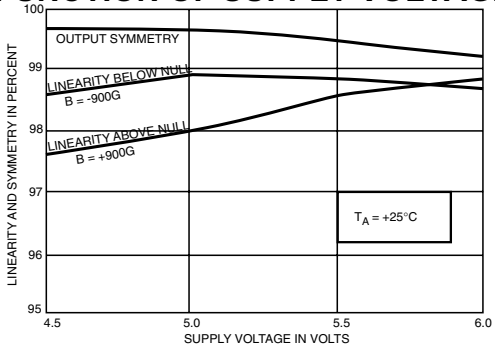
Dwg. A-12,507

OUTPUT NULL VOLTAGE AS A FUNCTION OF SUPPLY VOLTAGE



Dwg. A-12,508

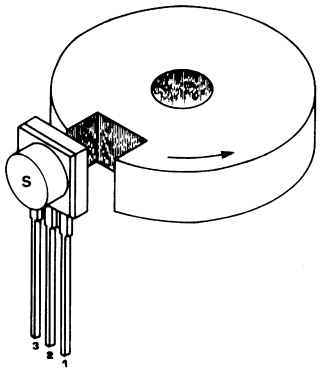
LINEARITY AND SYMMETRY AS A FUNCTION OF SUPPLY VOLTAGE



Dwg.A-12,509

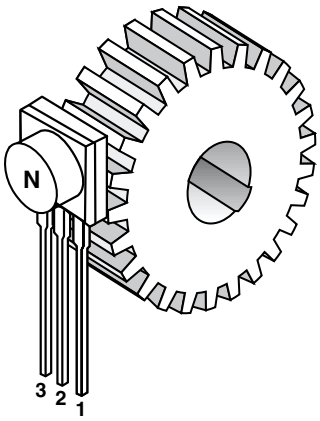
3503
RATIOMETRIC, LINEAR HALL-EFFECT SENSORS

NOTCH SENSOR



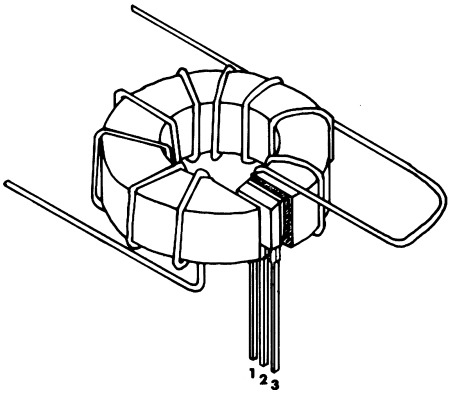
Dwg. A-12,574

GEAR TOOTH SENSOR



Dwg. A-12,512

CURRENT MONITOR



Dwg. A-12,513

OPERATION

The output null voltage (B = 0 G) is nominally one-half the supply voltage. A south magnetic pole, presented to the branded face of the Hall-effect sensor will drive the output higher than the null voltage level. A north magnetic pole will drive the output below the null level.

In operation, instantaneous and proportional output-voltage levels are dependent on magnetic flux density at the most sensitive area of the device. Greatest sensitivity is obtained with a supply voltage of 6 V, but at the cost of increased supply current and a slight loss of output symmetry. The sensor's output is usually capacitively coupled to an amplifier that boosts the output above the millivolt level.

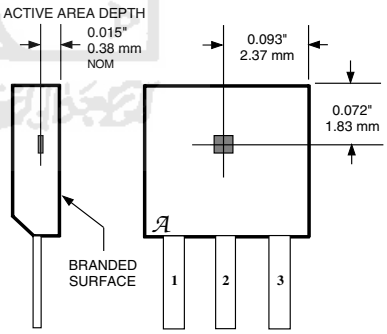
In two applications shown, a permanent bias magnet is attached with epoxy glue to the back of the epoxy package. The presence of ferrous material at the face of the package acts as a flux concentrator.

The south pole of a magnet is attached to the back of the package if the Hall-effect IC is to sense the presence of ferrous material. The north pole of a magnet is attached to the back surface if the integrated circuit is to sense the absence of ferrous matrial.

Calibrated linear Hall devices, which can be used to determine the actual flux density presented to the sensor in a particular application, are available.

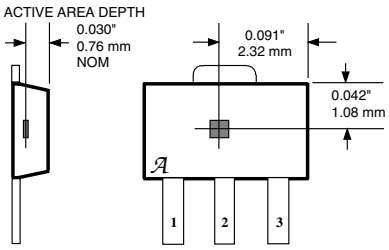
SENSOR LOCATIONS

SUFFIX “U”



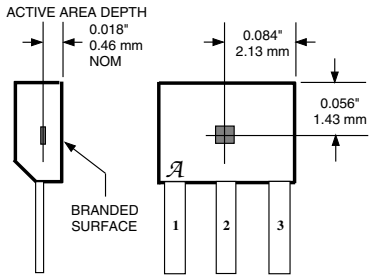
Dwg. MH-002-5C

SUFFIX “LT”



Dwg. MH-008-9

SUFFIX “UA”



Dwg. MH-011-3C

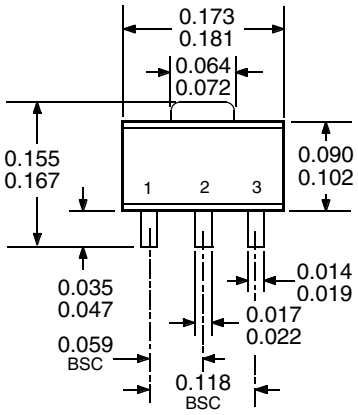
Allegro MicroSystems, Inc.

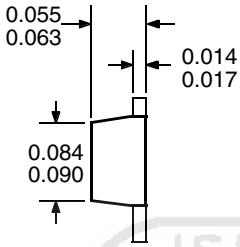
115 Northeast Cutoff, Box 15036
Worcester, Massachusetts 01615-0036 (508) 853-5000

UGN3503LT

(SOT-89/TO-243AA)

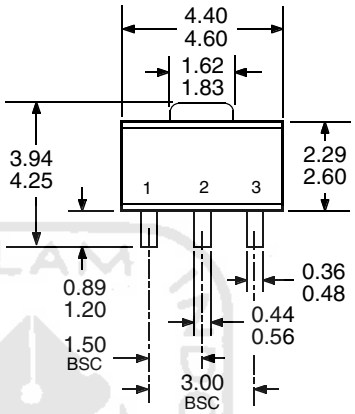
Dimensions in Inches
(for reference only)

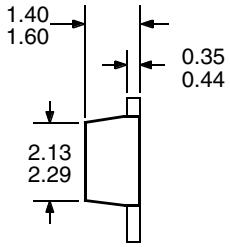




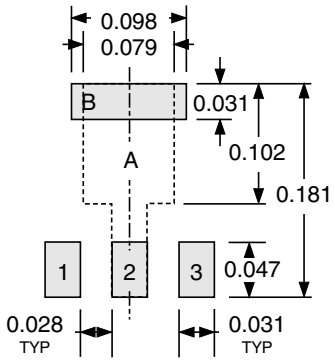
Dwg. MA-009-3 in

Dimensions in Millimeters
(controlling dimensions)



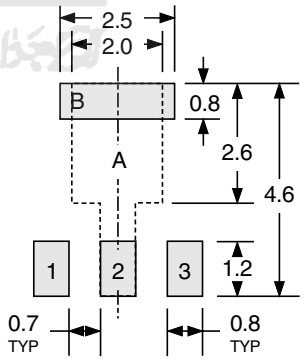


Dwg. MA-009-3 mm



Pads 1, 2, 3, and A — Standard SOT-89 Layout
Pads 1, 2, 3, and B — Low-Stress Version
Pads 1, 2, and 3 only — Lowest Stress, But Not Self Aligning

Dwg. MA-012-3 in



Pads 1, 2, 3, and A — Standard SOT-89 Layout
Pads 1, 2, 3, and B — Low-Stress Version
Pads 1, 2, and 3 only — Lowest Stress, But Not Self Aligning

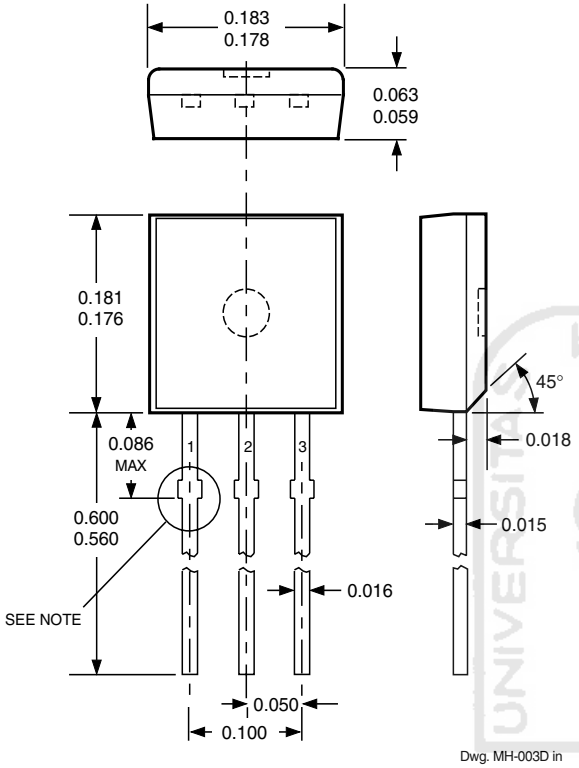
Dwg. MA-012-3 mm

NOTE:Exact body and lead configuration at vendor's option within limits shown.

3503
RATIOMETRIC, LINEAR HALL-EFFECT SENSORS

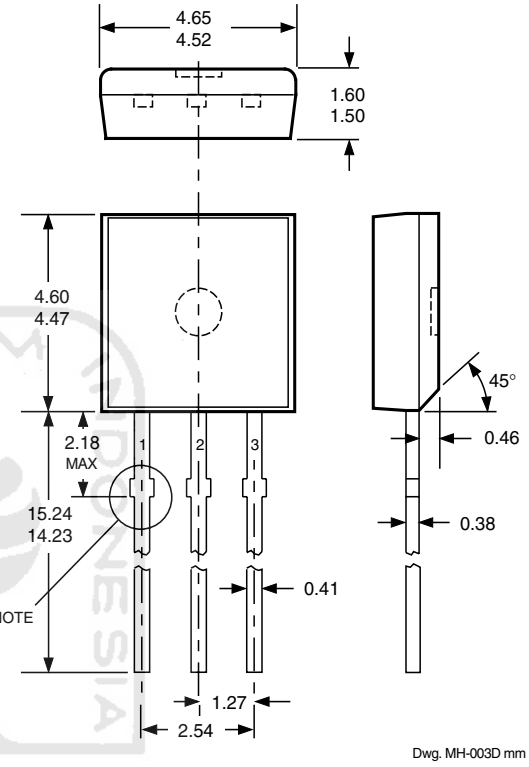
UGN3503U

Dimensions in Inches
(controlling dimensions)



Dwg. MH-003D in

Dimensions in Millimeters
(for reference only)



Dwg. MH-003D mm

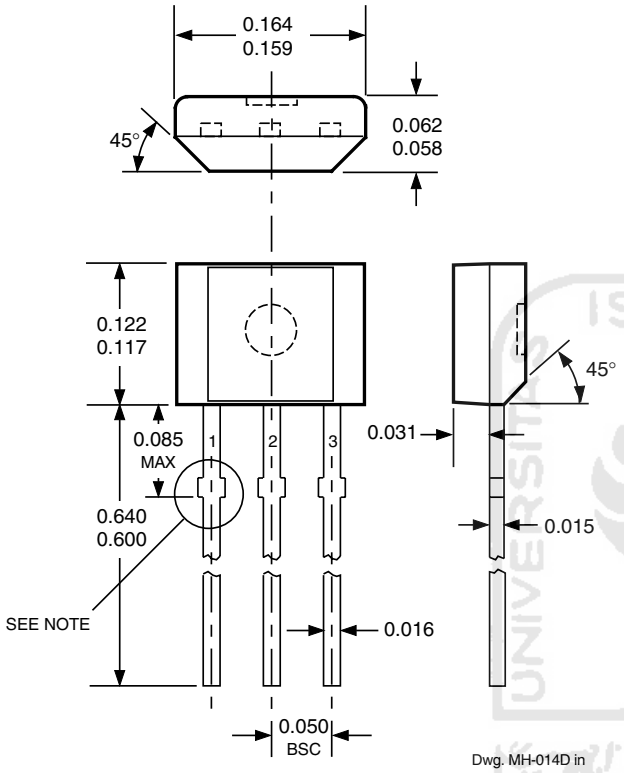
Devices in the ‘U’ package are NOT RECOMMENDED FOR NEW DESIGN

NOTES:
1. Tolerances on package height and width represent allowable mold offsets. Dimensions given are measured at the widest point (parting line).
2. Exact body and lead configuration at vendor’s option within limits shown.
3. Height does not include mold gate flash.
4. Recommended minimum PWB hole diameter to clear transition area is 0.035" (0.89 mm).
5. Minimum lead length was 0.500" (12.70 mm). If existing product to the original specifications is not acceptable, contact sales office before ordering.

Allegro® MicroSystems, Inc.
115 Northeast Cutoff, Box 15036
Worcester, Massachusetts 01615-0036 (508) 853-5000

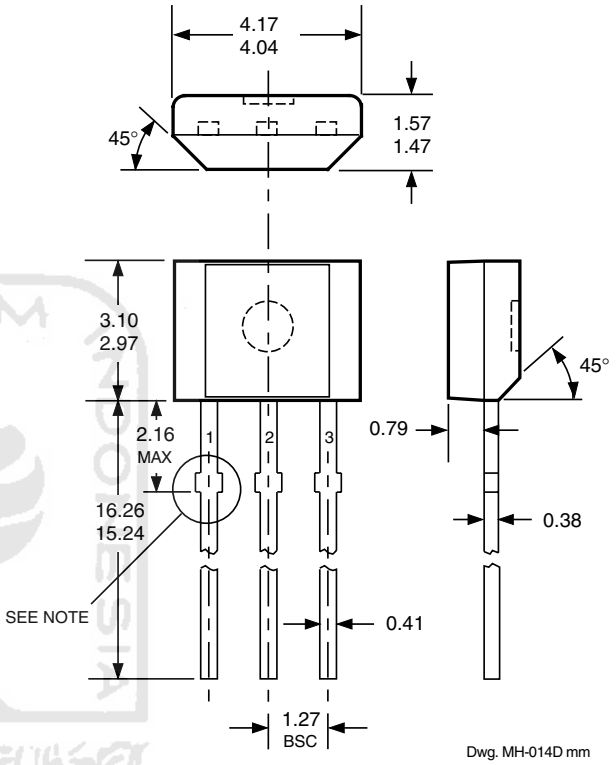
UGN3503UA

Dimensions in Inches
(controlling dimensions)



Dwg. MH-014D in

Dimensions in Millimeters
(for reference only)



Dwg. MH-014D mm

NOTES: 1. Tolerances on package height and width represent allowable mold offsets. Dimensions given are measured at the widest point (parting line).

2. Exact body and lead configuration at vendor's option within limits shown.

3. Height does not include mold gate flash.

4. Minimum lead length was 0.500" (12.70 mm). If existing product to the original specifications is not acceptable, contact sales office before ordering.

3503
RATIOMETRIC, LINEAR HALL-EFFECT SENSORS

Allegro MicroSystems, Inc. reserves the right to make, from time to time, such departures from the detail specifications as may be required to permit improvements in the design of its products.

The information included herein is believed to be accurate and reliable. However, Allegro MicroSystems, Inc. assumes no responsibility for its use; nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use.

Allegro® MicroSystems, Inc.

115 Northeast Cutoff, Box 15036
Worcester, Massachusetts 01615-0036 (508) 853-5000

LM158,A-LM258,A
LM358,A

LOW POWER DUAL OPERATIONAL AMPLIFIERS

- INTERNALLY FREQUENCY COMPENSATED
- LARGE DC VOLTAGE GAIN: 100dB
- WIDE BANDWIDTH (unity gain): 1.1MHz (temperature compensated)
- VERY LOW SUPPLY CURRENT/OP (500µA) ESSENTIALLY INDEPENDENT OF SUPPLY VOLTAGE
- LOW INPUT BIAS CURRENT: 20nA (temperature compensated)
- LOW INPUT OFFSET VOLTAGE: 2mV
- LOW INPUT OFFSET CURRENT: 2nA
- INPUT COMMON-MODE VOLTAGE RANGE INCLUDES GROUND
- DIFFERENTIAL INPUT VOLTAGE RANGE EQUAL TO THE POWER SUPPLY VOLTAGE
- LARGE OUTPUT VOLTAGE SWING 0V TO (Vcc - 1.5V)



N
DIP8
(Plastic Package)



D & S
SO8 & miniSO8
(Plastic Micropackage)



P
TSSOP8
(Thin Shrink Small Outline Package)

DESCRIPTION

These circuits consist of two independent, high gain, internally frequency compensated which were designed specifically to operate from a single power supply over a wide range of voltages. The low power supply drain is independent of the magnitude of the power supply voltage.

Application areas include transducer amplifiers, dc gain blocks and all the conventional op-amp circuits which now can be more easily implemented in single power supply systems. For example, these circuits can be directly supplied with the standard +5V which is used in logic systems and will easily provide the required interface electronics without requiring any additional power supply.

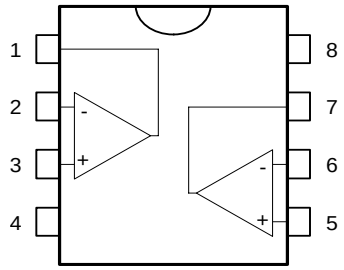
Inthe linear mode the input common-mode voltage range includes ground and the output voltage can also swing to ground, even though operated from only a single power supply voltage.

ORDER CODE

Part Number	Temperature Range	Package			
		N	S	D	P
LM158,A	-55°C, +125°C	•		•	•
LM258,A	-40°C, +105°C	•		•	•
LM358,A	0°C, +70°C	•	•	•	•
Example : LM258N					

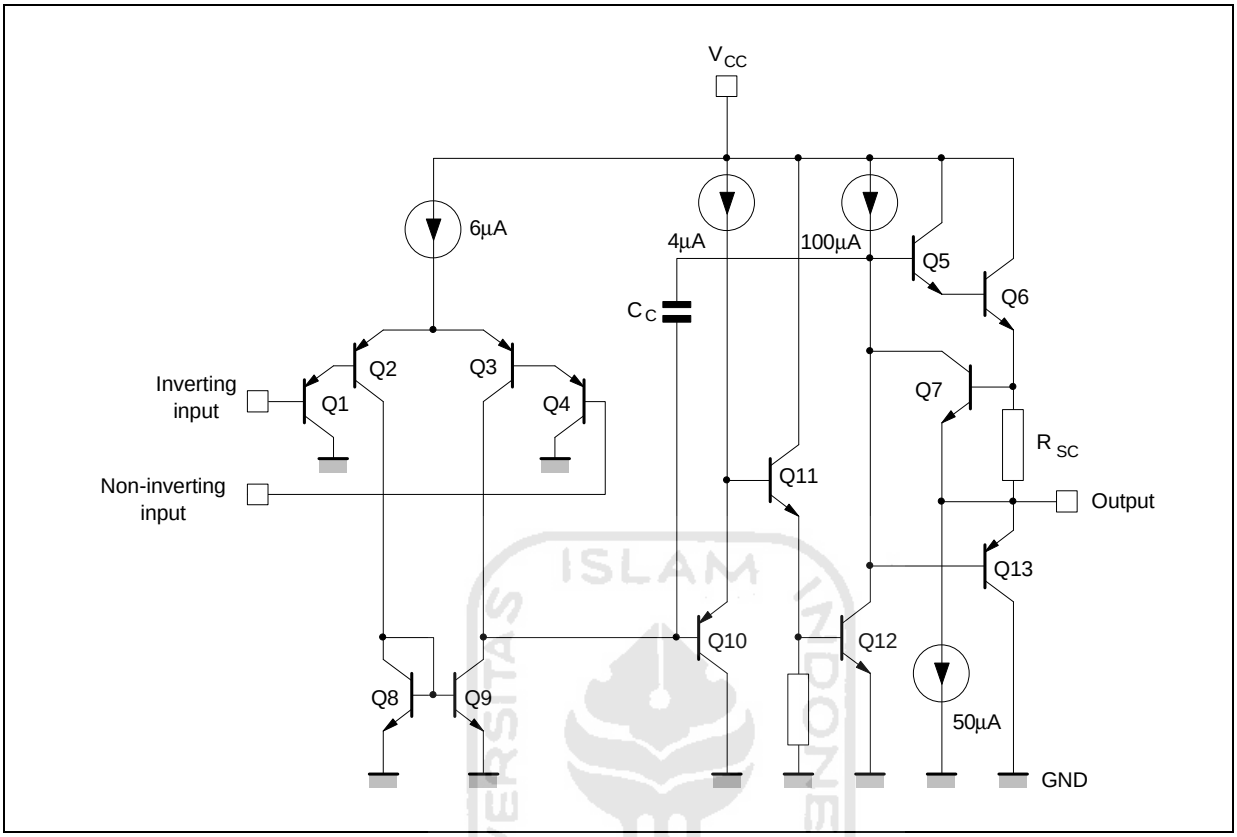
N = Dual in Line Package (DIP)
D = Small Outline Package (SO) - also available in Tape & Reel (DT)
S = Small Outline Package (miniSO) only available in Tape & Reel (DT)
P = Thin Shrink Small Outline Package (TSSOP) - only available in Tape &Reel (PT)

PIN CONNECTIONS (top view)



1 - Output 1
2 - Inverting input
3 - Non-inverting input
4 - V_{CC}^-
5 - Non-inverting input 2
6 - Inverting input 2
7 - Output 2
8 - V_{CC}^+

SCHEMATIC DIAGRAM (1/2 LM158)



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	LM158,A	LM258,A	LM358,A	Unit
V_{CC}	Supply voltage	+/-16 or 32			V
V_i	Input Voltage	-0.3 to +32			V
V_{id}	Differential Input Voltage	+32			V
P_{tot}	Power Dissipation 1)	500			mW
	Output Short-circuit Duration 2)	Infinite			
I_{in}	Input Current 3)	50			mA
T_{oper}	Opearting Free-air Temperature Range	-55 to +125	-40 to +105	0 to +70	°C
T_{stg}	Storage Temperature Range	-65 to +150			°C

1. Power dissipation must be considered to ensure maximum junction temperature (Tj) is not exceeded.
2. Short-circuits from the output to V_{CC} can cause excessive heating if V_{CC} > 15V. The maximum output current is approximately 40mA independent of the magnitude of V_{CC}. Destructive dissipation can result from simultaneous short-circuit on all amplifiers.
3. This input current only exists when the voltage at any of the input leads is driven negative. It is due to the collector-base junction of the input PNP transistor becoming forward biased and thereby acting as input diodes clamps. In addition to this diode action, there is also NPN parasitic action on the IC chip. this transistor action can cause the output voltages of the Op-amps to go to the V_{CC} voltage level (or to ground for a large overdrive) for the time duration than an input is driven negative.
This is not destructive and normal output will set up again for input voltage higher than -0.3V.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

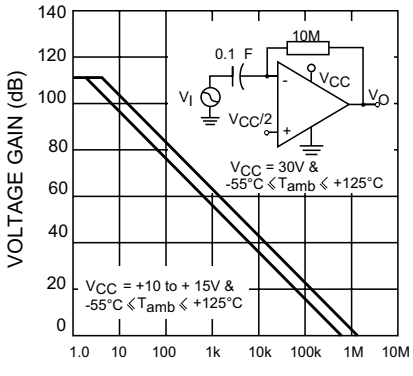
V_{CC}^+ = +5V, V_{CC}^-= Ground, V_o = 1.4V, T_{amb} = +25°C (unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	LM158A-LM258A LM358A			LM158-LM258 LM358			Unit
		Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
V_{io}	Input Offset Voltage - note 1) T_{amb} = +25°C LM158, LM258 LM158A $T_{min} \le T_{amb} \le T_{max}$ LM158, LM258		1	3 2 4		2	7 5 9 7	mV
I_{io}	Input Offset Current T_{amb} = +25°C $T_{min} \le T_{amb} \le T_{max}$		2	10 30		2	30 40	nA
I_{ib}	Input Bias Current - note 2) T_{amb} = +25°C $T_{min} \le T_{amb} \le T_{max}$		20	50 100		20	150 200	nA
A_{vd}	Large Signal Voltage Gain V_{CC} = +15V, R_L = 2kΩ, V_o = 1.4V to 11.4V T_{amb} = +25°C $T_{min} \le T_{amb} \le T_{max}$	50 25	100		50 25	100		V/mV
SVR	Supply Voltage Rejection Ratio ($R_s \le 10k\Omega$) V_{CC}^+ = 5V to 30V T_{amb} = +25°C $T_{min} \le T_{amb} \le T_{max}$	65 65	100		65 65	100		dB
I_{CC}	Supply Current, all Amp, no load $T_{min} \le T_{amb} \le T_{max}$ V_{CC} = +5V $T_{min} \le T_{amb} \le T_{max}$ V_{CC} = +30V		0.7	1.2 1		0.7	1.2 2	mA
V_{icm}	Input Common Mode Voltage Range V_{CC} = +30V - note 3) T_{amb} = +25°C $T_{min} \le T_{amb} \le T_{max}$	0 0		V_{CC}^+ -1.5 V_{CC}^+ -2	0 0		V_{CC}^+ -1.5 V_{CC}^+ -2	V
CMR	Common Mode Rejection Ratio ($R_s \le 10k\Omega$) T_{amb} = +25°C $T_{min} \le T_{amb} \le T_{max}$	70 60	85		70 60	85		dB
I_{source}	Output Current Source V_{CC} = +15V, V_o = +2V, V_{id} = +1V	20	40	60	20	40	60	mA
I_{sink}	Output Sink Current (V_{id} = -1V) V_{CC} = +15V, V_o = +2V V_{CC} = +15V, V_o = +0.2V	10 12	20 50		10 12	20 50		mA µA
V_{OPP}	Output Voltage Swing (R_L = 2kΩ) T_{amb} = +25°C $T_{min} \le T_{amb} \le T_{max}$	0 0		V_{CC}^+ -1.5 V_{CC}^+ -2	0 0		V_{CC}^+ -1.5 V_{CC}^+ -2	

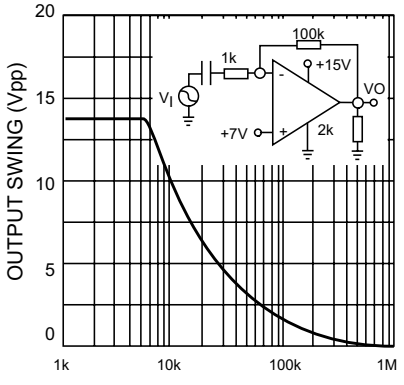
Symbol	Parameter	LM158A-LM258A LM358A			LM158-LM258 LM358			Unit
		Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
V_{OH}	High Level Output Voltage (V_{CC}^+ = 30V) T_{amb} = +25°C R_L = 2kΩ $T_{min} \le T_{amb} \le T_{max}$ T_{amb} = +25°C R_L = 10kΩ $T_{min} \le T_{amb} \le T_{max}$	26 26 27 27	27 28 		26 26 27 27	27 28 		V
V_{OL}	Low Level Output Voltage (R_L = 10kΩ) T_{amb} = +25°C $T_{min} \le T_{amb} \le T_{max}$		5	20 20		5	20 20	mV
SR	Slew Rate V_{CC} = 15V, V_i = 0.5 to 3V, R_L = 2kΩ, C_L = 100pF, unity Gain	0.3	0.6		0.3	0.6		V/µs
GBP	Gain Bandwidth Product V_{CC} = 30V, f =100kHz,V_{in} = 10mV, R_L = 2kΩ, C_L = 100pF	0.7	1.1		0.7	1.1		MHz
THD	Total Harmonic Distortion f = 1kHz, A_v = 20dB, R_L = 2kΩ, V_o = $2V_{pp}$, C_L = 100pF, V_O = 2Vpp		0.02			0.02		%
e_n	Equivalent Input Noise Voltage f = 1kHz, R_S = 100Ω, V_{CC} = 30V		55			55		$\frac{nV}{\sqrt{Hz}}$
DV_{io}	Input Offset Voltage Drift		7	15		7	30	µV/°C
DI_{Iio}	Input Offset Current Drift		10	200		10	300	pA/°C
V_{o1}/V_{o2}	Channel Separation - note 4) 1kHz ≤ f ≤ 20kHZ		120			120		dB

1. V_o = 1.4V, R_s = 0Ω, 5V < V_{CC}^+ < 30V, 0 < V_{ic} < V_{CC}^+ - 1.5V
2. The direction of the input current is out of the IC. This current is essentially constant, independent of the state of the output so no loading change exists on the input lines.
3. The input common-mode voltage of either input signal voltage should not be allowed to go negative by more than 0.3V. The upper end of the common-mode voltage range is V_{CC}^+ - 1.5V, but either or both inputs can go to +32V without damage.
4. Due to the proximity of external components insure that coupling is not originating via stray capacitance between these external parts. This typically can be detected as this type of capacitance increases at higher frequences.

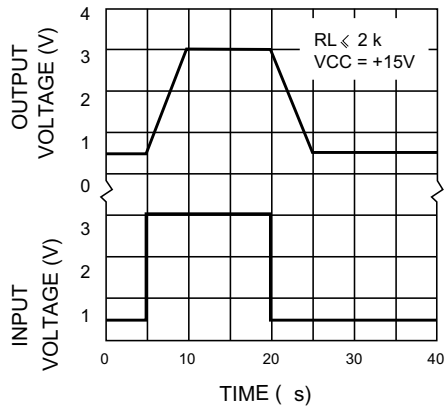
OPEN LOOP FREQUENCY RESPONSE (NOTE 3)



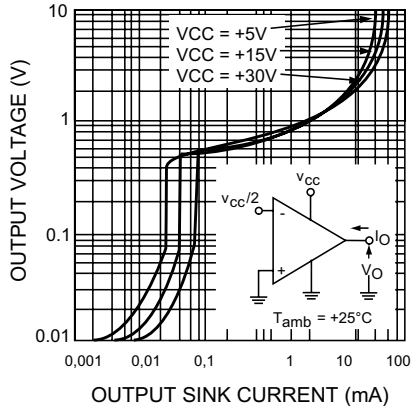
LARGE SIGNAL FREQUENCY RESPONSE



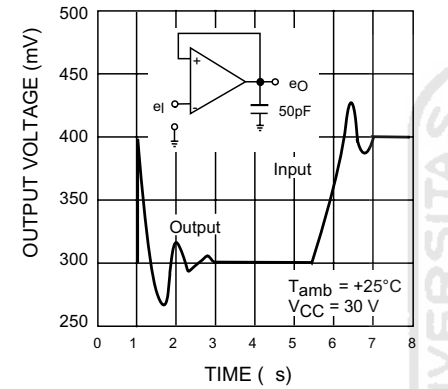
VOLAGE FOLLOWER PULSE RESPONSE



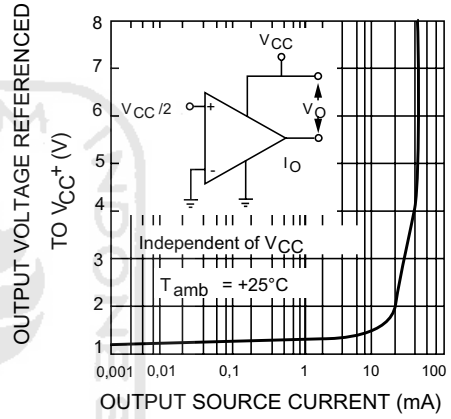
OUTPUT CHARACTERISTICS



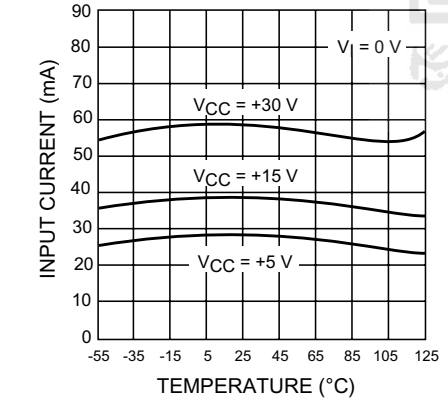
VOLTAGE FOLLOWER PULSSE RESPONSE (SMALL SIGNAL)



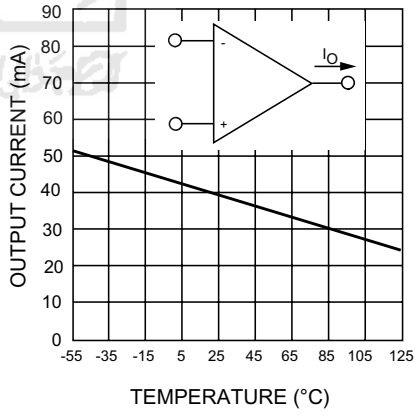
OUTPUT CHARACTERISTICS



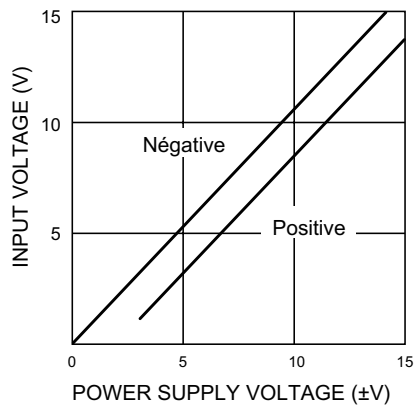
INPUT CURRENT (Note 1)



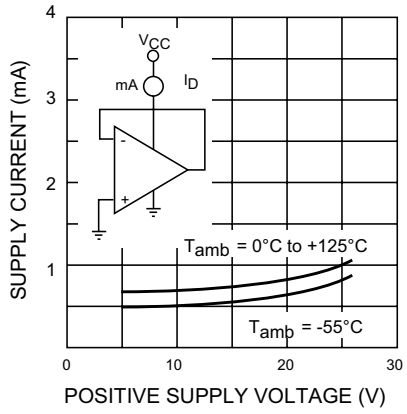
CURRENT LIMITING (Note 1)

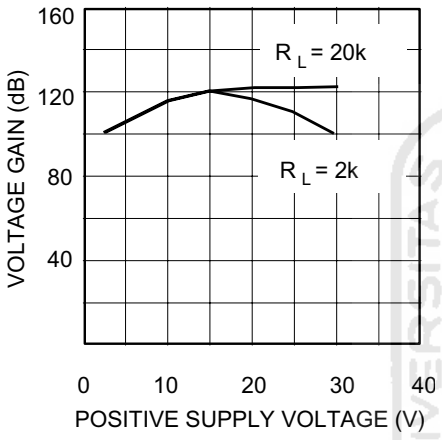


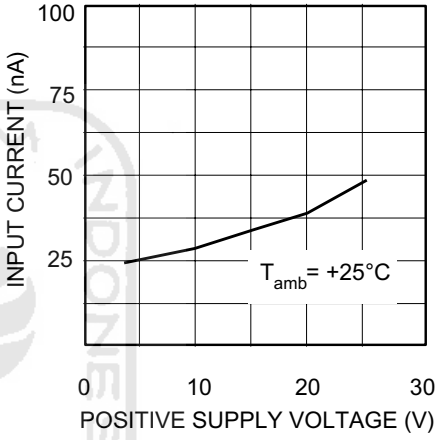
INPUT VOLTAGE RANGE

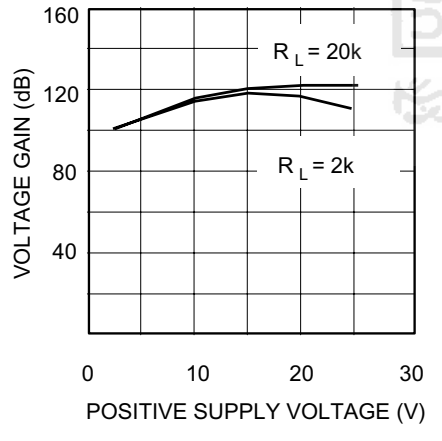


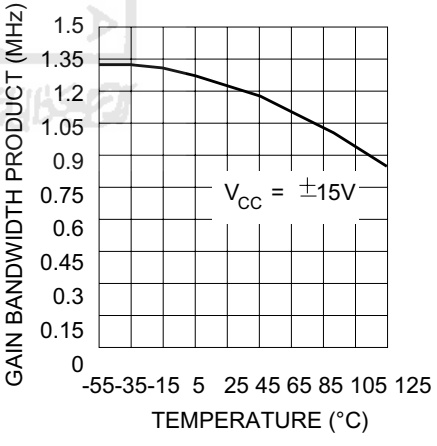
SUPPLY CURRENT

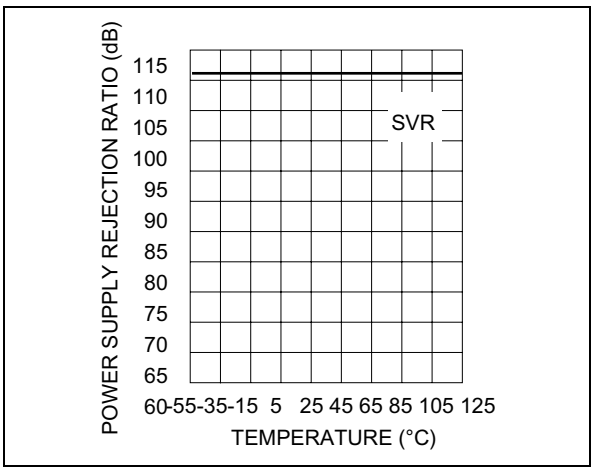


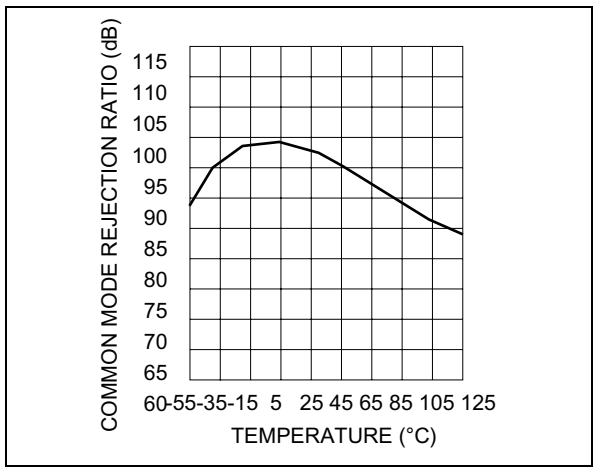






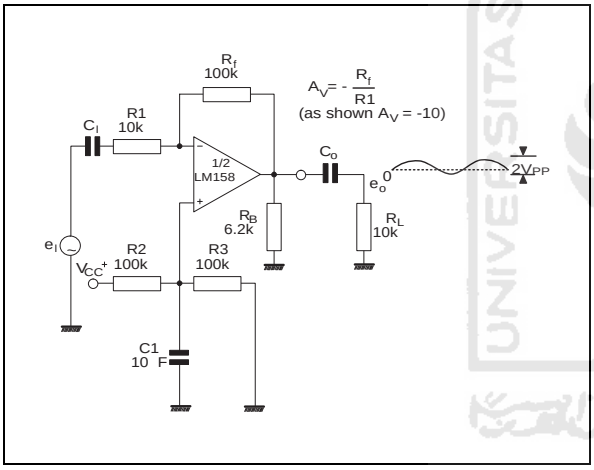




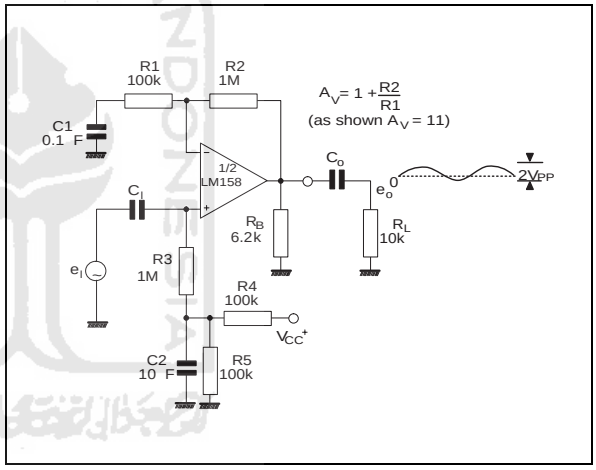


TYPICAL APPLICATIONS (single supply voltage) $V_{cc} = +5V_{dc}$

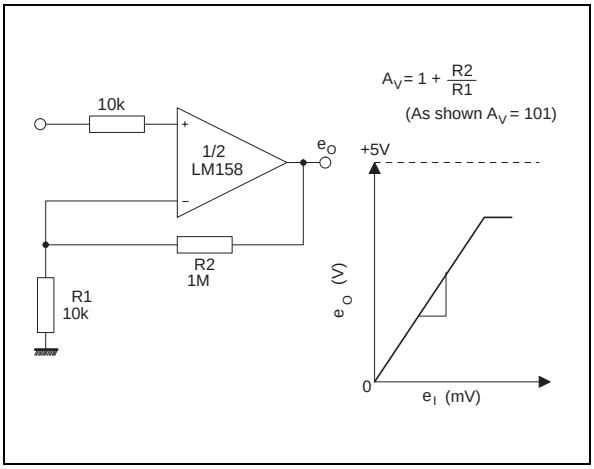
AC COUPLED INVERTING AMPLIFIER



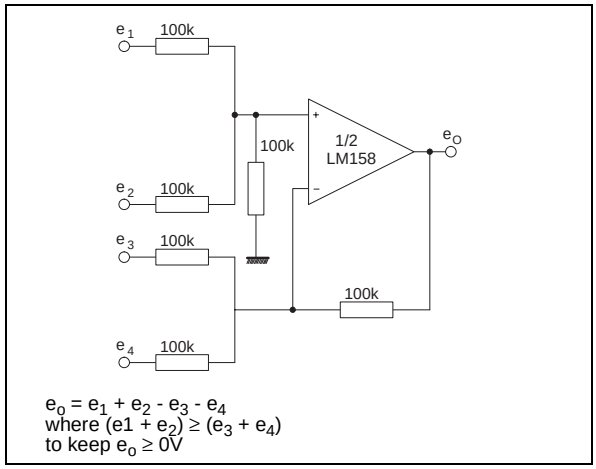
AC COUPLED NON-INVERTING AMPLIFIER



NON-INVERTING DC AMPLIFIER

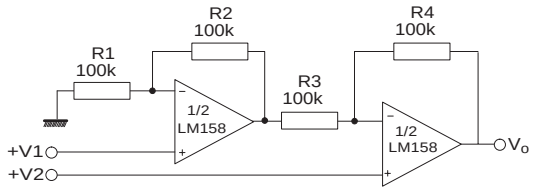


DC SUMMING AMPLIFIER



$e_o = e_1 + e_2 - e_3 - e_4$
where $(e1 + e_2) \geq (e_3 + e_4)$
to keep $e_o \geq 0V$

HIGH INPUT Z, DC DIFFERENTIAL AMPLIFIER

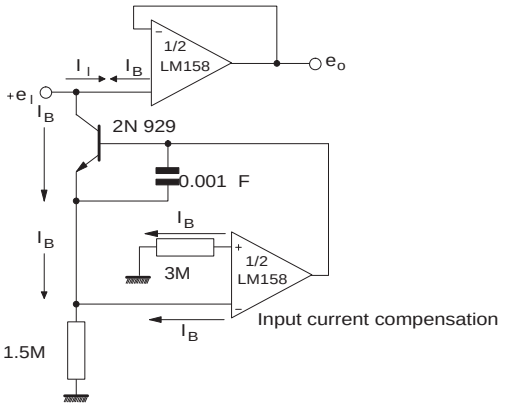


if R1 = R5 and R3 = R4 = R6 = R7

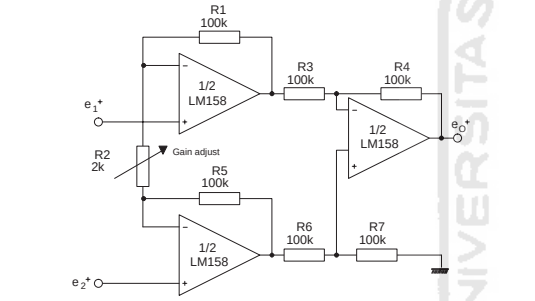
$e_o = [1 + \frac{2R1}{R2}] ((e_2 + e_1)$

As shown $e_o = 101 (e_2 + e_1)$

USING SYMMETRICAL AMPLIFIERS TO REDUCE INPUT CURRENT



HIGH INPUT Z ADJUSTABLE GAIN DC INSTRUMENTATION AMPLIFIER

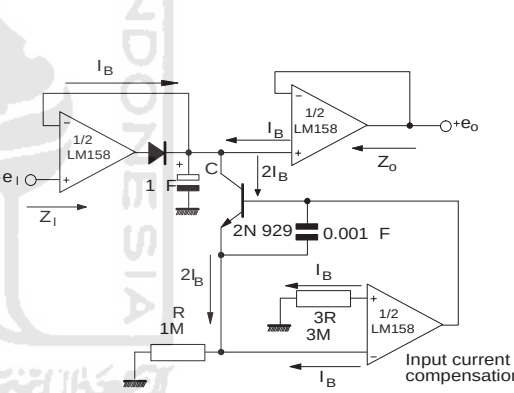


if R1 = R5 and R3 = R4 = R6 = R7

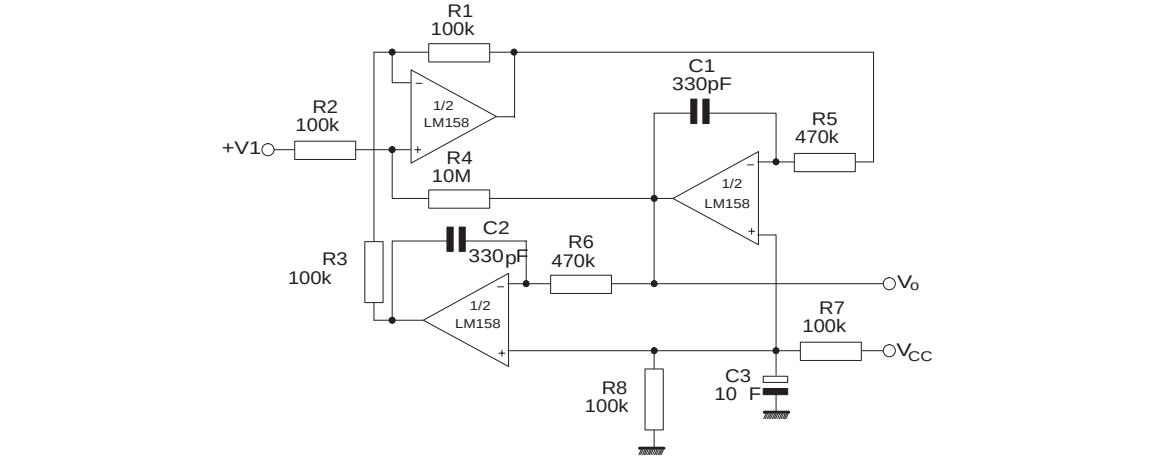
$e_o = [1 + \frac{2R1}{R2}] ((e_2 + e_1)$

As shown $e_o = 101 (e_2 + e_1)$

LOW DRIFT PEAK DETECTOR

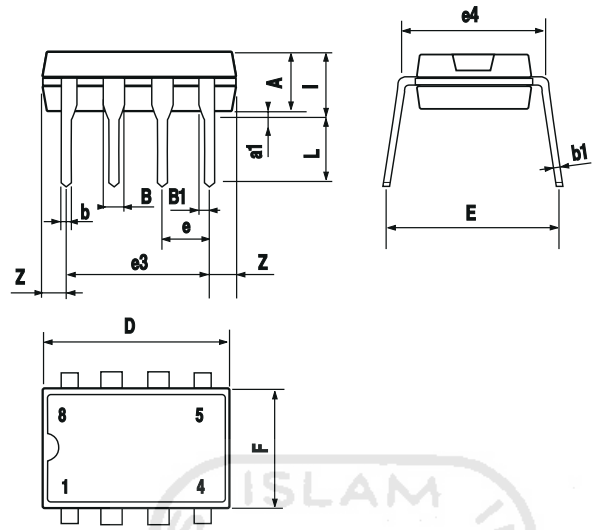


ACTIVE BAND-PASS FILTER



PACKAGE MECHANICAL DATA

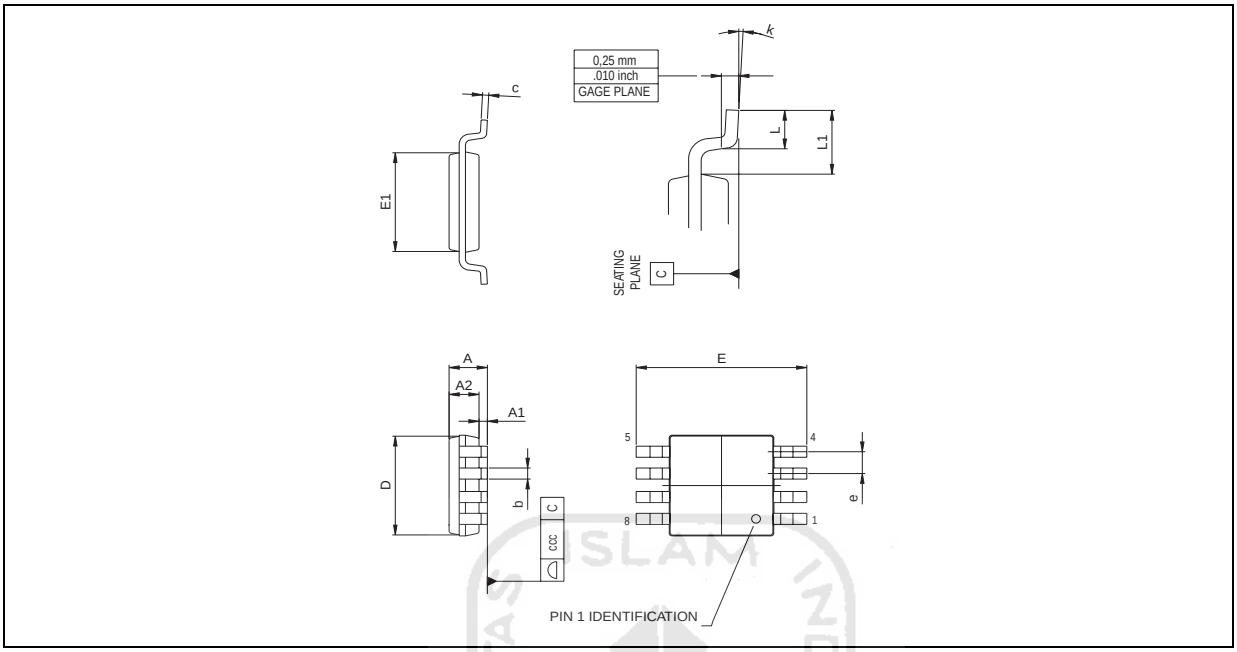
8 PINS - PLASTIC DIP



Dim.	Millimeters			Inches		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
A		3.32			0.131	
a1	0.51			0.020		
B	1.15		1.65	0.045		0.065
b	0.356		0.55	0.014		0.022
b1	0.204		0.304	0.008		0.012
D			10.92			0.430
E	7.95		9.75	0.313		0.384
e		2.54			0.100	
e3		7.62			0.300	
e4		7.62			0.300	
F			6.6			0260
i			5.08			0.200
L	3.18		3.81	0.125		0.150
Z			1.52			0.060

PACKAGE MECHANICAL DATA

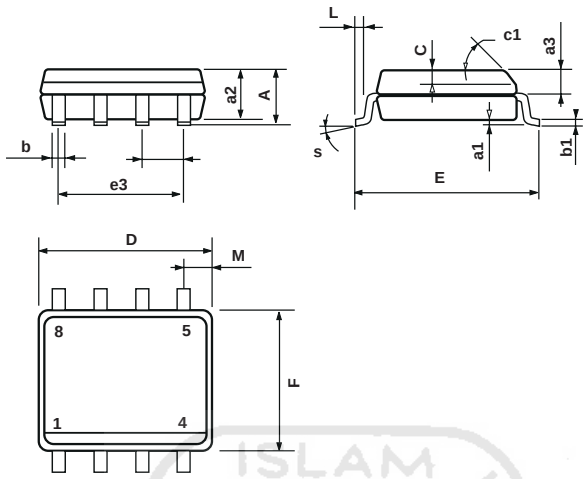
8 PINS - PLASTIC MICROPACKAGE (miniSO)



Dim.	Millimeters			Inches		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
A			1.100			0.043
A1	0.050	0.100	0.150	0.002	0.004	0.006
A2	0.780	0.860	0.940	0.031	0.034	0.037
b	0.250	0.330	0.400	0.010	0.013	0.016
c	0.130	0.180	0.230	0.005	0.007	0.009
D	2.900	3.000	3.100	0.114	0.118	0.122
E	4.750	4.900	5.050	0.187	0.193	0.199
E1	2.900	3.000	3.100	0.114	0.118	0.122
e		0.650			0.026	
L	0.400	0.550	0.700	0.016	0.022	0.028
L1		0.950			0.037	
k	0d	3d	6d	0d	3d	6d
ccc			0.100			0.004

PACKAGE MECHANICAL DATA

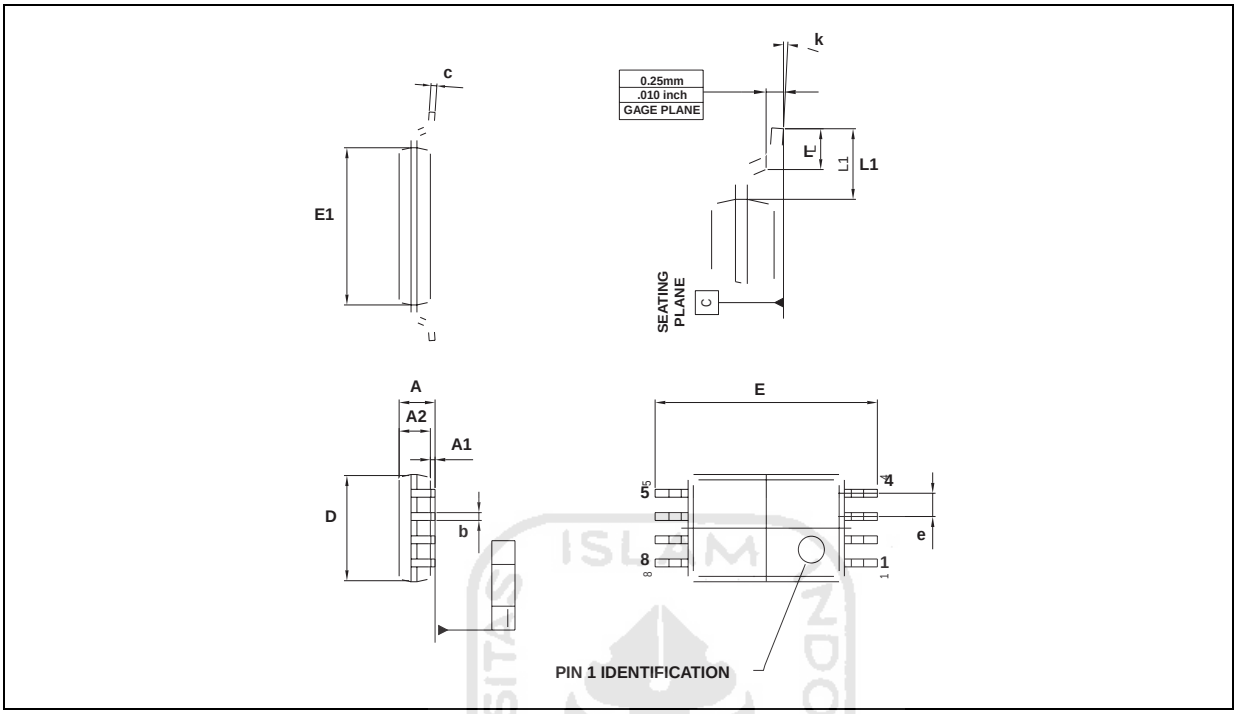
8 PINS - PLASTIC MICROPACKAGE (SO)



Dim.	Millimeters			Inches		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
A			1.75			0.069
a1	0.1		0.25	0.004		0.010
a2			1.65			0.065
a3	0.65		0.85	0.026		0.033
b	0.35		0.48	0.014		0.019
b1	0.19		0.25	0.007		0.010
C	0.25		0.5	0.010		0.020
c1	45° (typ.)					
D	4.8		5.0	0.189		0.197
E	5.8		6.2	0.228		0.244
e		1.27			0.050	
e3		3.81			0.150	
F	3.8		4.0	0.150		0.157
L	0.4		1.27	0.016		0.050
M			0.6			0.024
S	8° (max.)					

PACKAGE MECHANICAL DATA

8 PINS - THIN SHRINK SMALL OUTLINE PACKAGE (TSSOP)



Dim.	Millimeters			Inches		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
A			1.20			0.05
A1	0.05		0.15	0.01		0.006
A2	0.80	1.00	1.05	0.031	0.039	0.041
b	0.19		0.30	0.007		0.15
c	0.09		0.20	0.003		0.012
D	2.90	3.00	3.10	0.114	0.118	0.122
E		6.40			0.252	
E1	4.30	4.40	4.50	0.169	0.173	0.177
e		0.65			0.025	
k	0°		8°	0°		8°
l	0.50	0.60	0.75	0.09	0.0236	0.030
L	0.45	0.600	0.75	0.018	0.024	0.030
L1		1.000			0.039	

Information furnished is believed to be accurate and reliable. However, STMicroelectronics assumes no responsibility for the consequences of use of such information nor for any infringement of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of STMicroelectronics. Specifications mentioned in this publication are subject to change without notice. This publication supersedes and replaces all information previously supplied. STMicroelectronics products are not authorized for use as critical components in life support devices or systems without express written approval of STMicroelectronics.

The ST logo is a registered trademark of STMicroelectronics

© 2003 STMicroelectronics - All Rights Reserved
STMicroelectronics GROUP OF COMPANIES
Australia - Brazil - China - Finland - France - Germany - Hong Kong - India - Italy - Japan - Malaysia - Malta - Morocco
Singapore - Spain - Sweden - Switzerland - United Kingdom
http://www.st.com

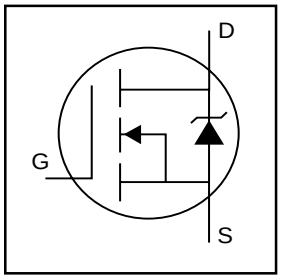
PD - 91341B

International
IOR Rectifier

IRF540N

HEXFET® Power MOSFET

- Advanced Process Technology
- Ultra Low On-Resistance
- Dynamic dv/dt Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated



V_{DSS} = 100V

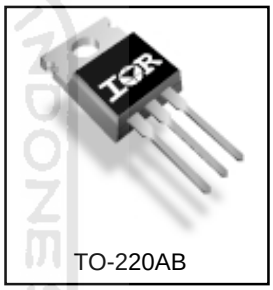
$R_{DS(on)}$ = 44mΩ

I_D = 33A

Description

Advanced HEXFET® Power MOSFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.



TO-220AB

Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
I_D @ T_C = 25°C	Continuous Drain Current, V_{GS} @ 10V	33	A
I_D @ T_C = 100°C	Continuous Drain Current, V_{GS} @ 10V	23	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①	110	
P_D @T_C = 25°C	Power Dissipation	130	W
	Linear Derating Factor	0.87	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
I_{AR}	Avalanche Current①	16	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy①	13	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ③	7.0	V/ns
T_J T_{STG}	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to + 175	°C
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting torque, 6-32 or M3 srew	10 lbf•in (1.1N•m)	

Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	1.15	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	62	

03/13/01

Electrical Characteristics @ T_J = 25°C (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	100	—	—	V	V_{GS} = 0V, I_D = 250µA
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.12	—	V/°C	Reference to 25°C, I_D = 1mA
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	44	mΩ	V_{GS} = 10V, I_D = 16A ④
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250µA
g_{fs}	Forward Transconductance	21	—	—	S	V_{DS} = 50V, I_D = 16A④
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	µA	V_{DS} = 100V, V_{GS} = 0V
		—	—	250		V_{DS} = 80V, V_{GS} = 0V, T_J = 150°C
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	V_{GS} = 20V
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		V_{GS} = -20V
Q_g	Total Gate Charge	—	—	71	nC	I_D = 16A
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	14		V_{DS} = 80V
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	21		V_{GS} = 10V, See Fig. 6 and 13
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	11	—	ns	V_{DD} = 50V
t_r	Rise Time	—	35	—		I_D = 16A
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	39	—		R_G = 5.1Ω
t_f	Fall Time	—	35	—		V_{GS} = 10V, See Fig. 10 ④
L_D	Internal Drain Inductance	—	4.5	—	nH	Between lead, 6mm (0.25in.) from package and center of die contact
L_S	Internal Source Inductance	—	7.5	—		
C_{iss}	Input Capacitance	—	1960	—	pF	V_{GS} = 0V
C_{oss}	Output Capacitance	—	250	—		V_{DS} = 25V
C_{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	40	—		f = 1.0MHz, See Fig. 5
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy②	—	700⑤	185⑥	mJ	I_{AS} = 16A, L = 1.5mH

Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
I_S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	33	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
I_{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode)①	—	—	110		
V_{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	1.2	V	T_J = 25°C, I_S = 16A, V_{GS} = 0V ④
t_{rr}	Reverse Recovery Time	—	115	170	ns	T_J = 25°C, I_F = 16A
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	—	505	760	nC	di/dt = 100A/µs ④
t_{on}	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by L_S+L_D)				

Notes:

① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature. (See fig. 11)

② Starting T_J = 25°C, L =1.5mH R_G = 25Ω, I_{AS} = 16A. (See Figure 12)

③ I_{SD} ≤ 16A, di/dt ≤ 340A/µs, V_{DD} ≤ $V_{(BR)DSS}$, T_J ≤ 175°C

④ Pulse width ≤ 400µs; duty cycle ≤ 2%.

⑤ This is a typical value at device destruction and represents operation outside rated limits.

⑥ This is a calculated value limited to T_J = 175°C .

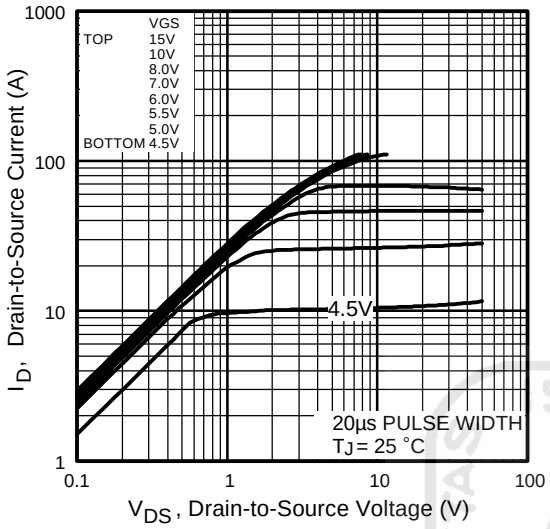


Fig 1. Typical Output Characteristics

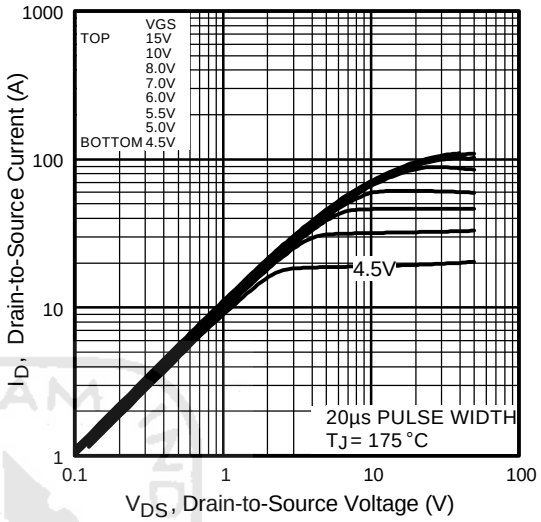


Fig 2. Typical Output Characteristics

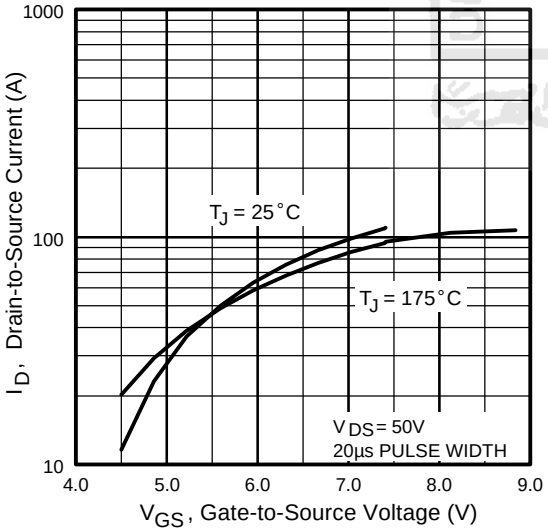


Fig 3. Typical Transfer Characteristics

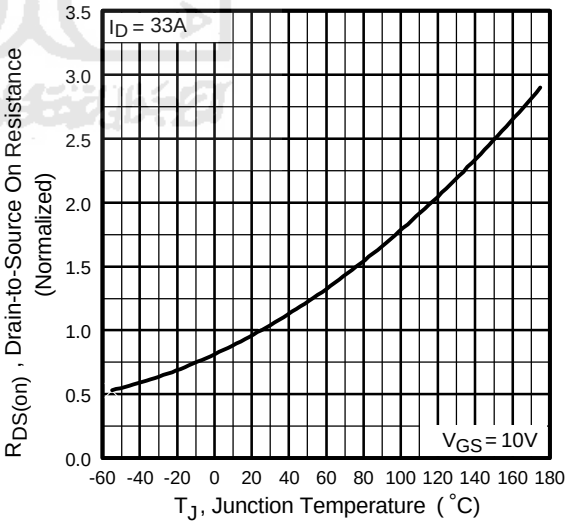


Fig 4. Normalized On-Resistance Vs. Temperature

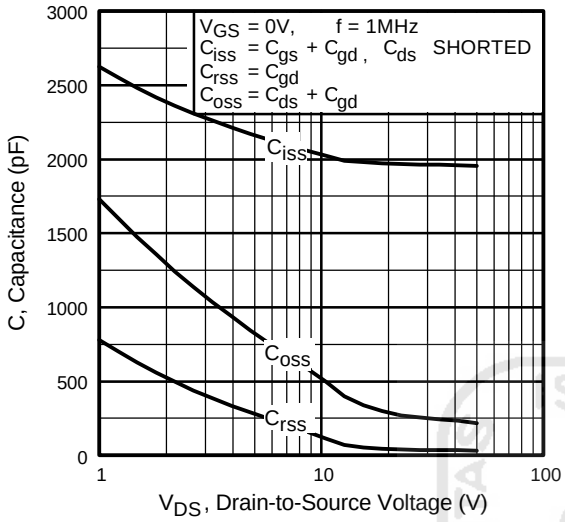


Fig 5. Typical Capacitance Vs. Drain-to-Source Voltage

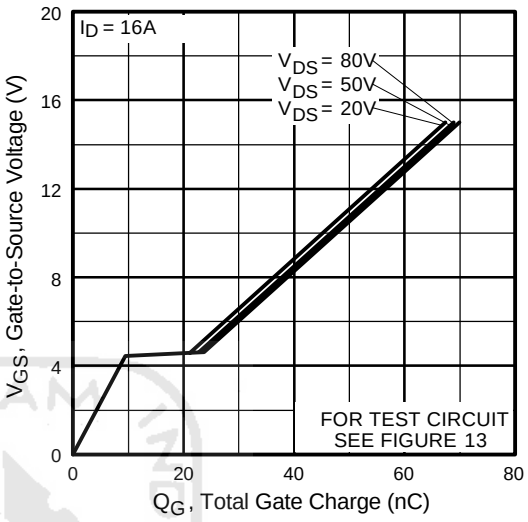


Fig 6. Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage

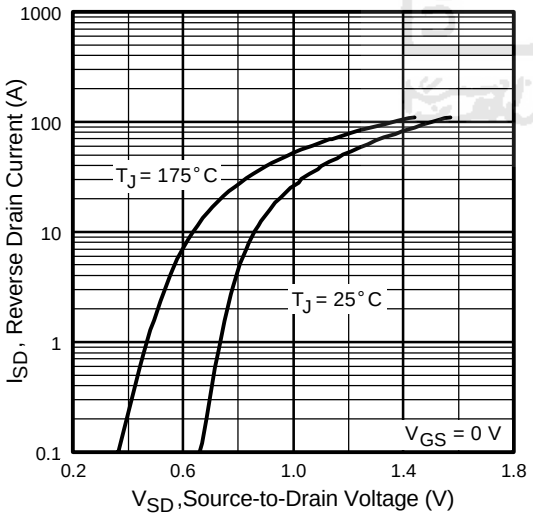


Fig 7. Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

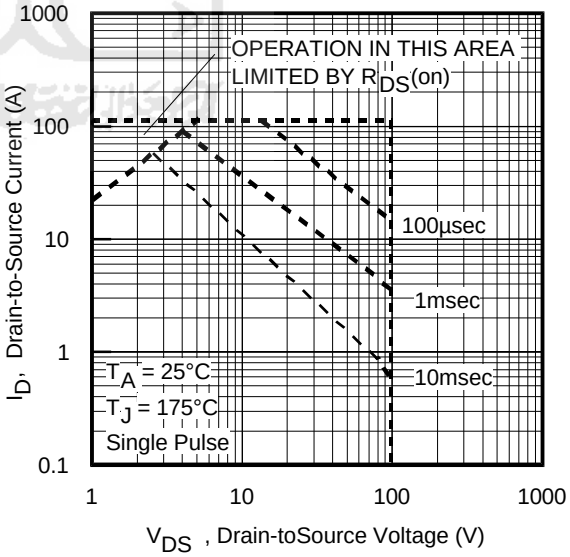


Fig 8. Maximum Safe Operating Area

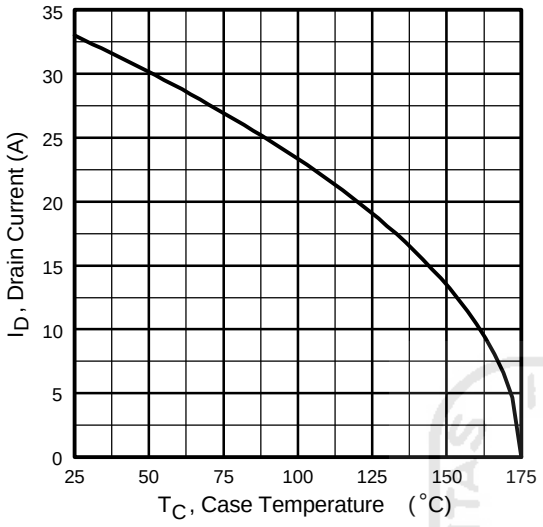


Fig 9. Maximum Drain Current Vs. Case Temperature

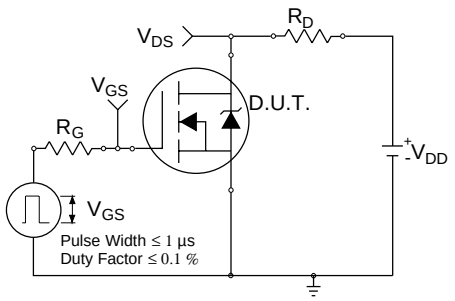


Fig 10a. Switching Time Test Circuit

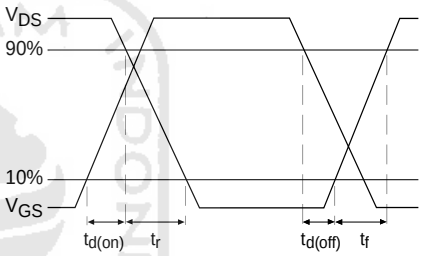


Fig 10b. Switching Time Waveforms

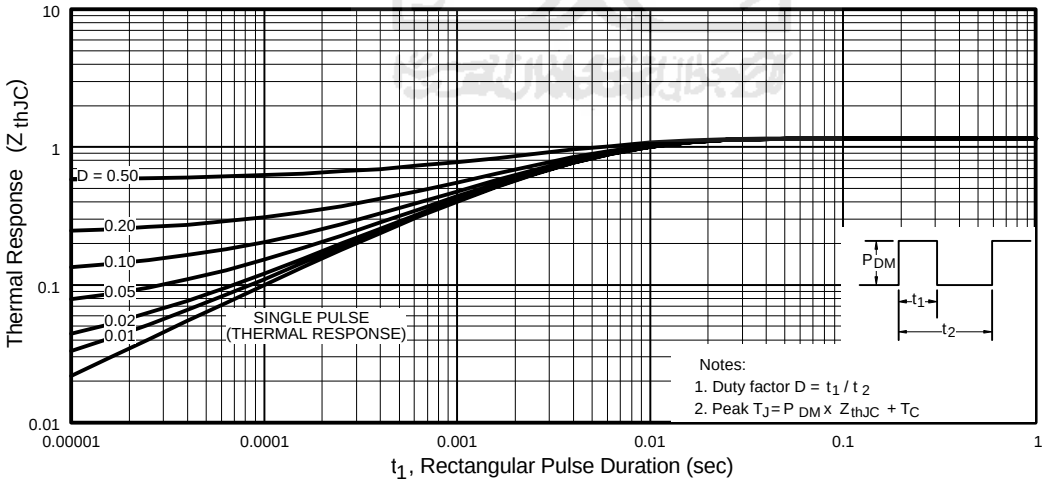


Fig 11. Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

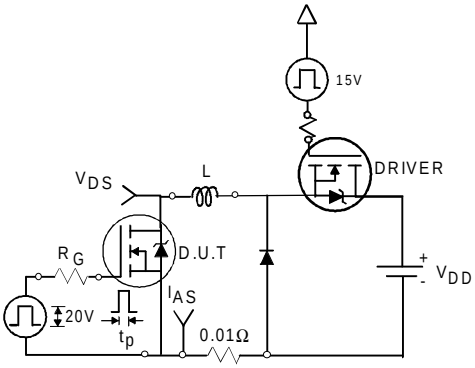


Fig 12a. Unclamped Inductive Test Circuit

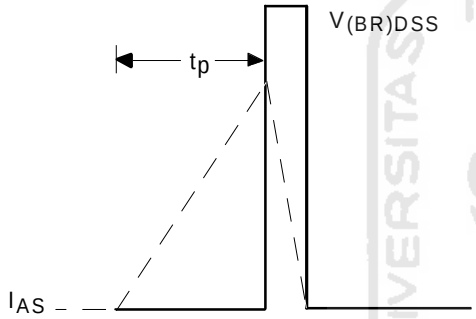


Fig 12b. Unclamped Inductive Waveforms

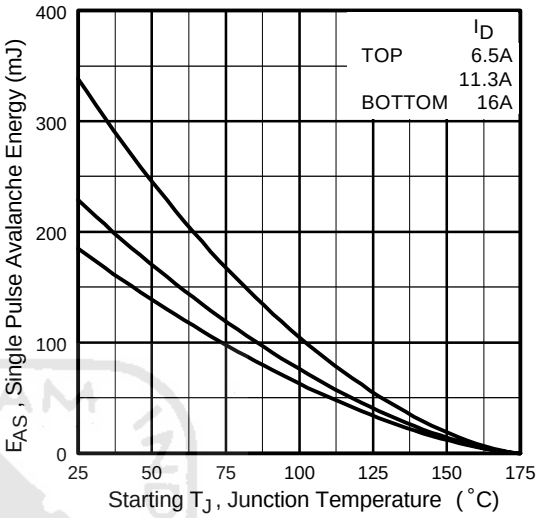


Fig 12c. Maximum Avalanche Energy Vs. Drain Current

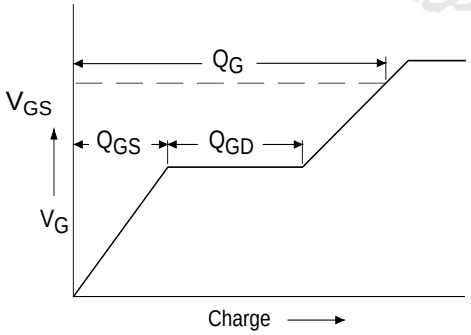


Fig 13a. Basic Gate Charge Waveform

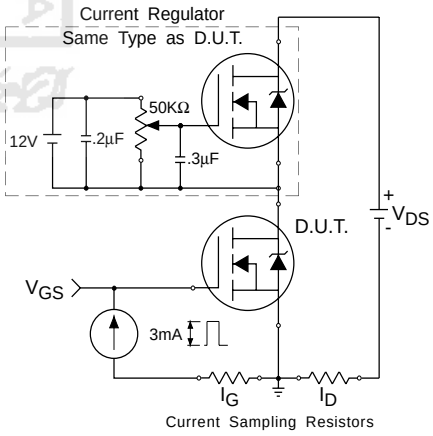
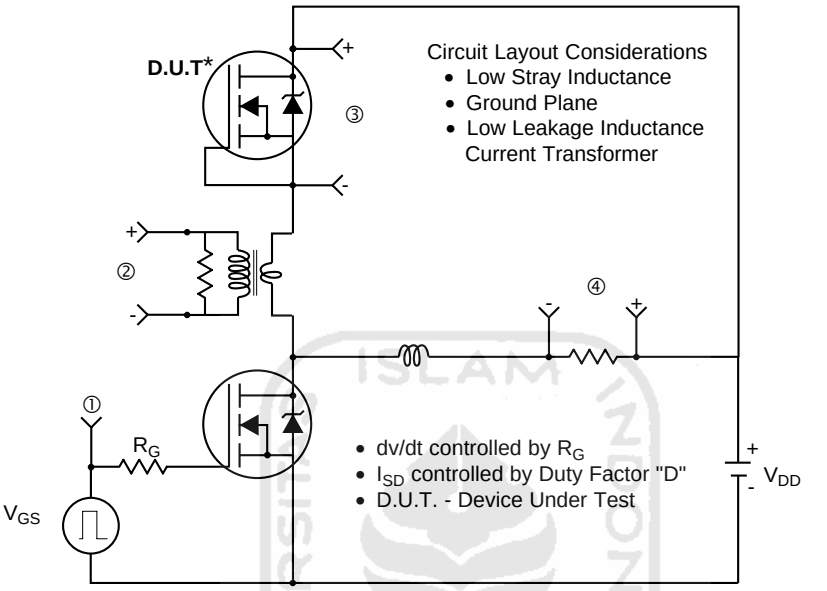
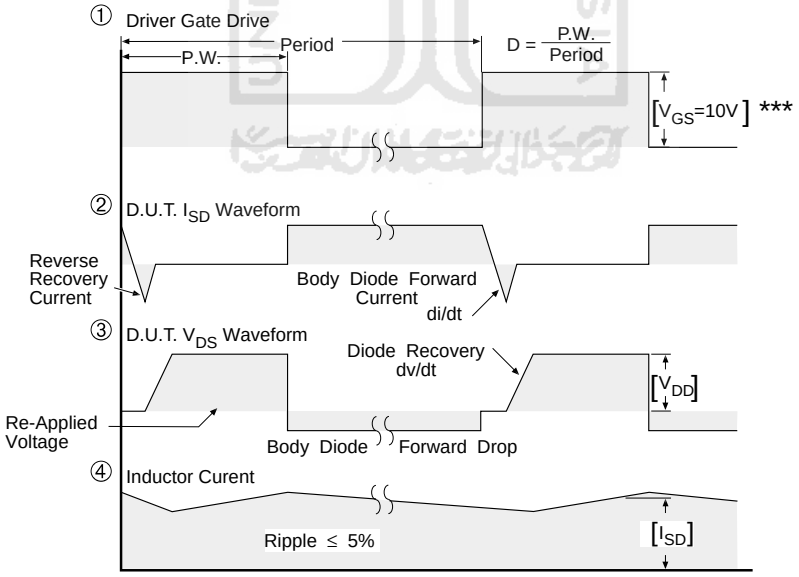


Fig 13b. Gate Charge Test Circuit

Peak Diode Recovery dv/dt Test Circuit



* Reverse Polarity of D.U.T for P-Channel



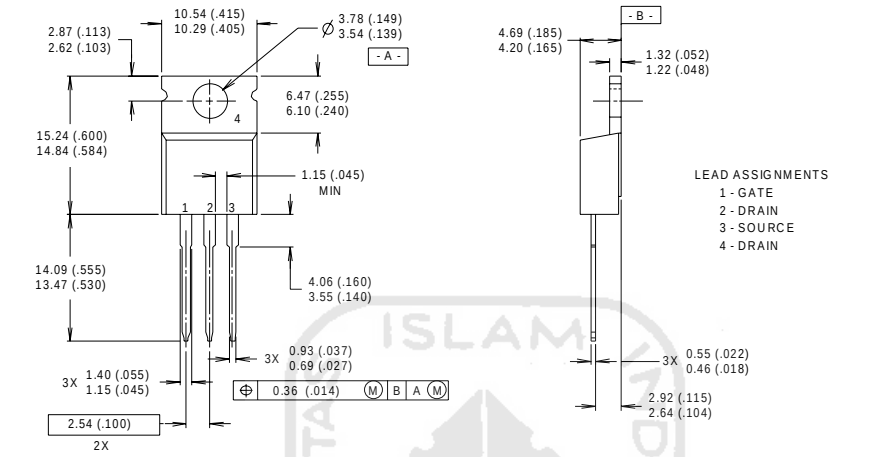
*** V_{GS} = 5.0V for Logic Level and 3V Drive Devices

Fig 14. For N-channel HEXFET® power MOSFETs

Package Outline

TO-220AB

Dimensions are shown in millimeters (inches)



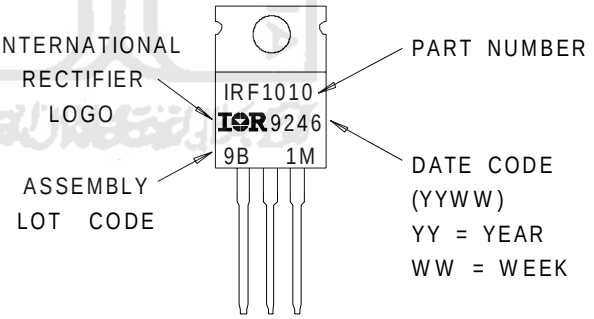
NOTES:

1 DIMENSIONING & TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2 CONTROLLING DIMENSION : INCH
3 OUTLINE CONFORMS TO JEDEC OUTLINE TO-220AB.
4 HEATSINK & LEAD MEASUREMENTS DO NOT INCLUDE BURRS.

Part Marking Information

TO-220AB

EXAMPLE : THIS IS AN IRF1010
WITH ASSEMBLY
LOT CODE 9B1M



Data and specifications subject to change without notice.
This product has been designed and qualified for the industrial market.
Qualification Standards can be found on IR's Web site.

International
IOR Rectifier

IR WORLD HEADQUARTERS: 233 Kansas St., El Segundo, California 90245, USA Tel: (310) 252-7105
TAC Fax: (310) 252-7903
Visit us at www.irf.com for sales contact information.03/01