

**PERANCANGAN DAN PEMBUATAN DRIVER MOTOR DC BRUSHED
MENGUNAKAN H-BRIDGE E-MOSFET KANAL N
UNTUK ROBOT KRI DAN KRCI**

SKRIPSI

Diajukan Untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan

Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh :

AHMAD FIRDAUS SYAHPUTRA

NIM. 0510630010



DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2009

**PERANCANGAN DAN PEMBUATAN DRIVER MOTOR DC BRUSHED
MENGUNAKAN H-BRIDGE E-MOSFET KANAL N
UNTUK ROBOT KRI DAN KRCI**

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan

Memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

AHMAD FIRDAUS SYAHPUTRA

NIM 0510630010

Mengetahui dan menyetujui

Dosen pembimbing:

Ir. NANANG SULISTIYANTO

NIP. 19700113 199403 1 002

ADHARUL MUTTAQIN, ST, MT.

NIP. 19760121 200501 1 001

**PERANCANGAN DAN PEMBUATAN DRIVER MOTOR DC BRUSHED
MENGUNAKAN H-BRIDGE E-MOSFET KANAL N
UNTUK ROBOT KRI DAN KRCI**

Disusun oleh :

AHMAD FIRDAUS SYAHPUTRA

NIM 0510630010

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus
pada tanggal 30 Desember 2009

Dosen penguji:

Ir. BAMBANG SISWOJO, MT.

NIP. 19621211 198802 1 001

MOCH. RIF'AN, ST., MT

NIP. 19710301 200012 1 001

R. ARIEF SETYAWAN, ST., MT

NIP. 19750819 199903 1 001

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Elektro

RUDY YUWONO, ST., M.Sc

NIP. 19710615 199802 1 003

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum wr.wb. Alhamdulillah, puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik dari jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan, bimbingan serta dorongan dari semua pihak penyelesaian skripsi ini tidak mungkin bisa terwujud. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ibu dan Bapak tercinta.
2. Bapak Rudy Yuwono, ST.,M.Sc. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
3. Bapak M. Azis Muslim, ST., MT., Ph.D selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
4. Bapak Ir. M. Julius, ST.,MS. selaku KKDK Teknik Elektronika.
5. Bapak Ir. Nanang Sulistiyanto dan Bapak Adharul Muttaqin, ST., MT. selaku dosen pembimbing skripsi yang telah banyak memberikan pengarahan dan bimbingan dalam penyelesaian skripsi ini serta atas segala bentuk bantuan dan saran yang membangun.
6. Bapak, Ibu dosen serta segenap staf dan karyawan Jurusan Teknik Elektro.
7. Rekan-rekan Asisten Laboratorium Sistem Digital, Asisten Laboratorium Dasar Elektronika dan Workshop Teknik Elektro.
8. Teman-teman Tim Robot Elektro 2009, 2010 terima kasih atas kerjasama dan bantuannya.
9. Rekan-rekan mahasiswa Teknik Elektro Brawijaya.
10. Semua pihak yang telah memberikan bantuan serta dukungan baik secara langsung maupun tidak langsung atas penyusunan skripsi ini.

Dalam penyusunan skripsi ini, penulis menyadari bahwa skripsi ini belum sempurna, karena keterbatasan ilmu dan kendala-kendala lain yang terjadi selama pengerjaan skripsi ini. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat dan dapat digunakan untuk pengembangan lebih lanjut. Wassalamualaikum wr.wb.

Malang, Desember 2009

Penulis

ABSTRAK

Ahmad Firdaus Syahputra, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Desember 2009, Perancangan Dan Pembuatan Driver Motor DC Brushed Menggunakan H-Bridge E-MOSFET Kanal N Untuk Robot KRI Dan KRCI, Dosen pembimbing: Ir. Nanang Sulistiyanto dan Adharul Muttaqin, ST., MT.

Teknologi robotika di dunia telah berkembang dengan sangat pesat. Indonesia sebagai negara berkembang ikut berpartisipasi dalam perkembangan teknologi robotika dunia dengan mengadakan kontes robot tiap tahunnya dengan nama KRI (Kontes Robot Indonesia) dan KRCI (Kontes Robot Cerdas Indonesia). Dalam kontes robot ini setiap tim dituntut untuk menunjukkan performa terbaiknya. Performa terbaik tidak hanya diwujudkan dengan strategi yang matang, namun juga dengan *part* robot yang handal. Salah satu *part* robot yang cukup penting adalah *part* robot untuk pergerakan. *Part* ini meliputi bagian mekanik, motor DC, dan *driver* motor. Salah satu alternatif *driver* motor yang dapat digunakan adalah menggunakan *driver H-bridge* E-MOSFET kanal N.

Driver motor DC *brushed* menggunakan *H-bridge* E-MOSFET kanal N dirancang dengan 4 blok, yaitu : *multivibrator*, *charge pump*, *driver* optik dan *H-bridge* E-MOSFET kanal N. *Driver* ini diuji pada *plan* simulasi dengan bobot 10 kg yang bergerak selama 7 menit dengan arah dan kecepatan yang berubah-ubah secara periodik dan berulang setiap 30 detik, serta menggunakan motor DC *brushed* dengan arus maksimal 3,7A pada kondisi terbeban.

Dari hasil perancangan dan pengujian dapat disimpulkan bahwa *driver* dapat dirancang dan dibuat serta dapat diaplikasikan pada *plan* simulasi dengan *rise time* dan *fall time* sinyal keluaran *driver* dengan masukan sinyal pengontrol arah motor masing-masing adalah 188,5 μ s dan 1,8ms, dan sinyal PWM efektif yang dapat diterapkan adalah dengan frekuensi 1kHz dan duty cycle 0%-90%.

Kata kunci: *H-bridge*, E-MOSFET kanal N

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
ABSTRAK	ii
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL	viii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Ruang Lingkup.....	3
1.4 Tujuan.....	4
1.5 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Motor DC <i>Brushed</i>	5
2.1.1 Stator	5
2.1.2 Rotor.....	5
2.1.3 <i>Brush</i> dan Komutator	6
2.2 Driver Konfigurasi <i>H-bridge</i>	7
2.3 E-MOSFET Kanal N.....	9
2.4 <i>Charge Pump</i>	14
2.5 <i>Multivibrator Astable</i>	16
2.5.1 Prinsip Kerja.....	17
2.5.2 Frekuensi <i>Multivibrator</i>	17
2.5.3 Pengoperasian Awal.....	18
2.5.4 Periode Osilasi.....	18
2.5.5 Komponen Pengaman.....	19
2.6 <i>Optocoupler</i>	19
2.6.1 Cara Kerja <i>Optocoupler</i>	19
2.6.2 Parameter Kunci	20
2.6.3 Penggunaan <i>Optocoupler</i>	20

BAB III METODE PENELITIAN	24
3.1 Studi Literatur.....	24
3.2 Perancangan Alat.....	24
3.3 Pembuatan Alat	25
3.3.1 Pembuatan Perangkat Keras	25
3.3.2 Pembuatan Perangkat Lunak.....	25
3.4 Pengujian Alat.....	27
3.5 Pengambilan Kesimpulan dan Saran.....	28
BAB IV PERANCANGAN DAN PEMBUATAN.....	29
4.1 Perancangan Perangkat Keras	29
4.1.1 Perancangan <i>H-bridge</i> E-MOSFET Kanal N.....	29
4.1.2 Perancangan <i>Driver</i> Optik.....	31
4.1.2.1 Perancangan Nilai Resistor untuk Q_1 dan Q_2	34
4.1.2.2 Perancangan Nilai Resistor untuk Q_3 dan Q_4	35
4.1.3 Perancangan <i>Multivibrator</i>	37
4.1.3.1 Perancangan Nilai Resistor pada Sisi Kolektor.....	38
4.1.3.2 Perancangan Nilai Resistor dan Kapasitor pada Sisi Basis.....	39
4.1.4 Perancangan <i>Charge Pump</i>	44
4.2 Pembuatan Perangkat Keras	47
4.2.1 Pembuatan <i>H-bridge</i> E-MOSFET Kanal N.....	47
4.2.2 Pembuatan <i>Driver</i> Optik	47
4.2.3 Pembuatan <i>Multivibrator</i>	48
4.2.4 Pembuatan <i>Charge Pump</i>	49
BAB V PENGUJIAN DAN ANALISIS	50
5.1 Pengujian Rangkaian <i>Multivibrator</i>	50
5.2 Pengujian Rangkaian <i>Charge Pump</i>	52
5.3 Pengujian Rangkaian <i>Driver</i> Optik.....	54
5.3.1 Pengujian <i>Driver</i> Optik dengan Sinyal Arah	55
5.3.2 Pengujian <i>Driver</i> Optik dengan Sinyal Kecepatan (PWM)	56
5.4 Pengujian Rangkaian <i>H-Bridge</i> E-MOSFET Kanal N.....	58
5.4.1 Pengujian Respon <i>H-Bridge</i> E-MOSFET Kanal N terhadap Masukan Sinyal Arah	59
5.4.2 Pengujian Respon <i>H-bridge</i> E-MOSFET Kanal N terhadap Masukan Sinyal Kecepatan (PWM).....	60

5.5 Pengujian Alat Keseluruhan.....	61
BAB VI PENUTUP	65
6.1 Kesimpulan.....	65
6.2 Saran.....	65
DAFTAR PUSTAKA	66
LAMPIRAN	67



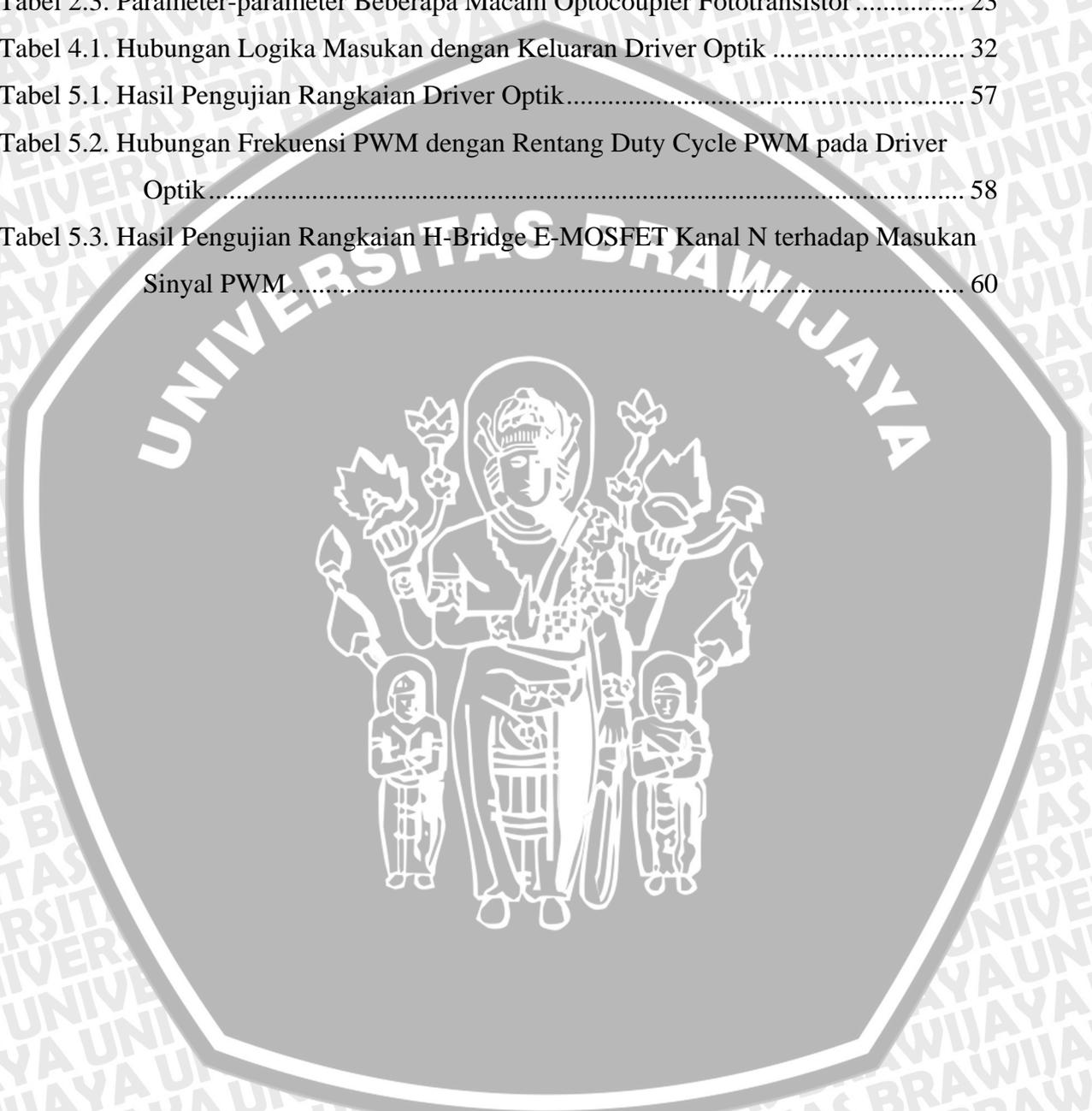
DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Motor DC Brushed Sederhana.....	6
Gambar 2.2. Struktur Sebuah H-bridge.....	8
Gambar 2.3. Konstruksi E-MOSFET Kanal N.....	9
Gambar 2.4. (a) E-MOSFET Kanal N Normally Off tanpa Tegangan pada Gate. (b) Pembentukan Kanal Tipe N pada E-MOSFET.....	10
Gambar 2.5. (a) MOSFET dengan V_{GS} yang Dapat Diubah-ubah. (b) MOSFET dengan V_{GS} dan V_{DS} yang Dapat Diubah-ubah.	12
Gambar 2.6. (a) Kurva Drain E-MOSFET Kanal N. (b) E-MOSFET Kanal N sebagai Sumber Arus.	13
Gambar 2.7. Pengganda Tegangan Sederhana	14
Gambar 2.8. Pengganda Tegangan Praktis.....	14
Gambar 2.9. Dickson Charge Pump.....	15
Gambar 2.10. Rangkaian Multivibrator Astable BJT Sederhana.....	17
Gambar 2.11. Simbol Optocoupler.....	19
Gambar 2.12. Penempatan Dioda Pengaman untuk Menghindari Kerusakan LED Optocoupler.....	20
Gambar 2.13. Penyusunan Transistor Keluaran dengan Konfigurasi (a) Pull-down atau (b) Pull-up	21
Gambar 2.14. Dua Konfigurasi Penggunaan Optocoupler untuk Meningkatkan Bandwidth. (a) Sambungan Kolektor-Basis sebagai Fotodioda, atau (b) Penambahan R_b untuk Membantu Menghilangkan Muatan yang Tersimpan pada Basis	22
Gambar 2.15. Dua Pilihan Konfigurasi Optocoupler Darlington (a) Kaki Basis Dibiarkan Mengambang, atau (b) Kaki Basis Dihubungkan dengan R_b	22
Gambar 3.1. Diagram Blok Driver Motor DC Brushed Menggunakan H-bridge E- MOSFET Kanal N untuk Robot KRI dan KRCI.....	24
Gambar 3.2. Diagram Alir Program Pengujian Driver Motor DC Brushed Menggunakan H-bridge E-MOSFET Kanal N untuk Robot KRI dan KRCI	26
Gambar 4.1. Susunan H-bridge E-MOSFET Kanal N	29
Gambar 4.2. Rangkaian H-bridge E-MOSFET Kanal N.....	31
Gambar 4.3. Diagram Blok Hubungan Pengontrol dengan Driver Optik.....	31
Gambar 4.4. Rangkaian Driver Optik	33

Gambar 4.5. Rangkaian Multivibrator Astable	38
Gambar 4.6. Rangkaian Multivibrator	40
Gambar 4.7. Rangkaian yang Mempengaruhi Charging C_1	41
Gambar 4.8. Charge pump Dickson	45
Gambar 4.9. Skematik H-bridge E-MOSFET kanal N	47
Gambar 4.10. Layout Board H-Bridge E-MOSFET Kanal N	47
Gambar 4.11. Skematik Driver Optik	48
Gambar 4.12. Layout Board Driver Optik	48
Gambar 4.13. Skematik Multivibrator	48
Gambar 4.14. Layout Board Multivibrator	49
Gambar 4.15. Skematik Charge Pump	49
Gambar 4.16. Layout Board Charge Pump	49
Gambar 5.1. Diagram Blok Pengujian Rangkaian Multivibrator	50
Gambar 5.2. Proses Pengujian Rangkaian Multivibrator	51
Gambar 5.3. Hasil Pengujian Multivibrator	51
Gambar 5.4. Diagram Blok Pengujian Rangkaian Charge Pump	52
Gambar 5.5. Proses Pengujian Rangkaian Charge Pump	53
Gambar 5.6. Hasil Pengujian Charge Pump	53
Gambar 5.7. Diagram Blok Pengujian Rangkaian Driver Optik	54
Gambar 5.8. Proses Pengujian Rangkaian Driver Optik	54
Gambar 5.9. Skematik Rangkaian Driver Optik	55
Gambar 5.10. Hasil Pengujian Driver Optik dengan Sinyal Arah. (a) Keluaran A1. (b) Keluaran A2. (c) Keluaran B1. (d) Keluaran B2.	56
Gambar 5.11. Diagram Blok Pengujian H-Bridge E-MOSFET Kanal N	59
Gambar 5.12. Hasil Pengujian Respon H-Bridge E-MOSFET Kanal N terhadap Masukan Sinyal Arah	59
Gambar 5.13. Grafik Perbandingan Keluaran Ideal Rangkaian dengan Keluaran Rangkaian H-Bridge E-MOSFET Kanal N sebenarnya	61
Gambar 5.14. Desain plan simulasi	62
Gambar 5.15. Diagram Alir Program Pengujian Driver Motor DC Brushed Menggunakan H-bridge E-MOSFET Kanal N untuk Robot KRI dan KRCI	63

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Kondisi yang Diperbolehkan dalam Pengoperasian H-bridge	9
Tabel 2.2. Daerah Kerja MOSFET Beserta Rumus-rumus	13
Tabel 2.3. Parameter-parameter Beberapa Macam Optocoupler Fototransistor	23
Tabel 4.1. Hubungan Logika Masukan dengan Keluaran Driver Optik	32
Tabel 5.1. Hasil Pengujian Rangkaian Driver Optik.....	57
Tabel 5.2. Hubungan Frekuensi PWM dengan Rentang Duty Cycle PWM pada Driver Optik.....	58
Tabel 5.3. Hasil Pengujian Rangkaian H-Bridge E-MOSFET Kanal N terhadap Masukan Sinyal PWM.....	60



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi robotika di dunia sudah semakin pesat. Hampir setiap industri besar di negara-negara maju menggunakan robot dalam proses produksinya, baik robot yang digerakkan secara manual maupun yang bergerak secara otomatis.

Indonesia pun tidak mau tertinggal dari negara-negara maju tersebut. Oleh karena itu tiap tahunnya DIKTI menggelar suatu kontes robotika yang bernama KRI (Kontes Robot Indonesia) dan KRCI (Kontes Robot Cerdas Indonesia). Peserta kontes robotika ini berasal dari mahasiswa-mahasiswa perguruan tinggi di Indonesia, salah satunya adalah dari Teknik Elektro Universitas Brawijaya. Diharapkan dengan adanya KRI dan KRCI ini Indonesia dapat keluar dari krisis teknologi, khususnya dalam bidang robotika.

Menurut Dr. Endro Pitowarno, seorang pakar robotika Indonesia, dalam kuliah tamu di Teknik Elektro Universitas Brawijaya pada tanggal 1 Desember 2007, peserta KRI maupun KRCI setiap tahunnya mengalami peningkatan. Hal ini menunjukkan bahwa minat mahasiswa dalam bidang robotika meningkat setiap tahunnya. Hal ini juga berarti bahwa persaingan dalam kontes robotika nasional semakin ketat. Setiap tim dari setiap perguruan tinggi di Indonesia diharapkan mampu selalu menunjukkan performa terbaiknya untuk mendapatkan peringkat teratas dalam kontes ini.

Performa terbaik tersebut tidak hanya diwujudkan dalam bentuk strategi yang matang, namun juga dalam hal *part* robot yang handal. Sebuah robot yang digunakan untuk kontes akan sulit memenangkan kejuaraan jika bagian-bagian robot tersebut tidak mampu mendukung kinerja robot yang berat. Mengingat robot dalam kontes ini selalu bergerak, maka dibutuhkan suatu *part* robot untuk pergerakan yang handal. *Part* robot untuk pergerakan ini meliputi mekanik pergerakan (roda, as, *belt*, dll), motor DC beserta rangkaian *driver* -nya, serta komponen pendukung lainnya seperti *rotary encoder*.

Vexta adalah merek sebuah produk motor DC brushless yang cukup dikenal di dunia robotika Indonesia. Beberapa tim unggulan dalam kontes robotika menggunakan Vexta sebagai *part* pendukung pergerakan robot mereka. Satu paket Vexta terdiri atas sebuah motor DC *brushless*, sebuah *rotary encoder*, dan sebuah *driver* untuk motor DC *brushless* tersebut. Keunggulan Vexta adalah pada motor DC *brushless* yang digunakan. Motor DC *brushless* tersebut memiliki torsi cukup tinggi sehingga mampu menggerakkan sebuah robot KRI yang berbobot 10 kg sekalipun. Selain itu, motor DC *brushless* sendiri mampu digerakkan dengan

tingkat kepresisian yang tinggi. Seluruh keunggulan tersebut harus dibayar dengan harga 3,5 juta rupiah per paket (harga pada Februari 2009).

Beberapa tim robot, termasuk tim robot Teknik Elektro Brawijaya menganggap harga Vexta tersebut terlalu mahal untuk sebuah *part* pergerakan robot, mengingat sebuah robot tidak hanya tersusun atas *part* pergerakan saja. Sebagai gantinya, tim robot Teknik Elektro Brawijaya menggunakan motor DC *brushed*. Harga sebuah motor DC *brushed* paling mahal yang pernah dibeli oleh tim robot Teknik Elektro Brawijaya adalah Rp 600.000 (harga pada Januari 2008).

Sebagai kompensasi motor DC *brushed* yang digunakan, tim robot Teknik Elektro Brawijaya menggunakan *driver* motor rakitan sendiri. *Driver* motor adalah sebuah *part* yang menjembatani antara pengontrol dengan motor agar logika pengontrolan dengan daya yang kecil tersebut mampu menggerakkan motor yang membutuhkan daya yang lebih besar. *Driver* motor yang dibutuhkan untuk keperluan kontes robot ini harus mampu melewati arus yang cukup besar, sesuai yang dibutuhkan oleh motor yang bersangkutan. Selain itu respon pengontrolan arah juga harus cepat, mengingat pergerakan robot yang kompleks dan menuntut pergerakan robot yang lincah. Dan sebagai kompensasi dari motor DC *brushed* yang digunakan, maka *driver* juga harus dapat meneruskan logika pengontrolan kecepatan sehingga tetap dapat menjaga kepresisian pergerakan robot.

Driver rakitan yang pernah digunakan oleh tim robot Teknik Elektro Brawijaya salah satunya merupakan *driver* yang menggunakan relay dengan konfigurasi *H-bridge*. Dengan menggunakan relay yang berada di pasaran, *driver* mampu mengalirkan arus besar, namun memiliki kelemahan dalam hal respon. Kelemahan semacam ini membuat pergerakan robot menjadi kaku. Selain itu, konstruksi relay yang tersusun atas saklar mekanis menyebabkan komponen ini sering kali rusak karena seringnya terjadi percikan api ketika pergantian kontak. Untuk pengontrolan kecepatan digunakan E-MOSFET pada bagian *ground H-bridge*. E-MOSFET difungsikan sebagai komponen *switching* untuk pengontrolan kecepatan dengan metode PWM. Dapat disimpulkan bahwa *driver* menggunakan relay tidak mampu memenuhi kebutuhan pergerakan robot dalam hal respon.

Driver rakitan lain yang pernah digunakan oleh tim robot Teknik Elektro Brawijaya adalah *driver* yang menggunakan transistor Darlington dengan konfigurasi *H-bridge*. Dengan pemilihan transistor yang tepat di pasaran, *driver* ini mampu menghantarkan arus yang cukup besar. Respon pengontrolan arah untuk pergerakan robot juga cukup cepat. Untuk pengontrolan kecepatan, digunakanlah E-MOSFET sebagai komponen *switching* untuk pengontrolan dengan metode PWM. *Driver* inilah yang digunakan oleh tim KRI Teknik

Elektro Brawijaya ketika meraih peringkat kedua dalam kontes robot pada tahun 2008. Namun *driver* ini juga memiliki kelemahan, yaitu dalam hal ukuran. Karena transistor Darlington yang digunakan dalam *driver* memiliki dimensi yang cukup besar, *driver* ini tidak terlalu sesuai untuk digunakan pada robot KRCI yang memiliki batasan ukuran hanya sebesar 30 cm x 30 cm x 30 cm.

Alternatif solusi yang ditawarkan dalam skripsi ini adalah penggunaan *driver* motor DC *brushed* menggunakan *H-bridge* E-MOSFET. Seperti yang telah dijelaskan dalam *driver* menggunakan relay maupun menggunakan transistor Darlington, komponen E-MOSFET selalu digunakan untuk pengontrolan kecepatan. Karena E-MOSFET menjadi satu bagian dalam kedua *driver* tersebut, dapat disimpulkan bahwa E-MOSFET juga dapat menghantarkan arus yang cukup besar. Selain itu, kemampuan *switching* yang dimilikinya membuat E-MOSFET adalah komponen dengan respon paling cepat dibanding relay maupun transistor Darlington. Dengan adanya kemampuan *switching* tersebut *driver* menggunakan E-MOSFET ini tidak membutuhkan komponen tambahan untuk pengontrolan kecepatan. Karena dimensi E-MOSFET yang cukup kecil pula sehingga *driver* E-MOSFET ini sesuai diterapkan pada robot KRCI.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang di atas maka pembahasan dalam skripsi ini ditekankan pada:

- 1) Bagaimana merancang *driver* motor DC *brushed* menggunakan komponen E-MOSFET kanal N.
- 2) Bagaimana penerapan *driver H-bridge* E-MOSFET kanal N pada robot KRI maupun KRCI.

1.3 Ruang Lingkup

Berdasarkan penekanan pembahasan di atas maka ruang lingkup pada skripsi ini adalah:

- 1) Tegangan catu daya 24V berasal dari baterai SLA.
- 2) Bobot *plan* simulasi yang digunakan untuk pengujian adalah 10 kg, sama dengan bobot rata-rata robot KRI.
- 3) Waktu pengujian adalah 7 menit, sesuai dengan waktu maksimal *trial* robot KRCI.
- 4) Pengujian dilakukan dengan menjalankan *plan* simulasi dengan program sederhana selama 7 menit.
- 5) Motor yang digunakan adalah motor DC *brushed* dengan stator magnet permanen dan arus terbeban maksimum 3,7 A pada 24 V_{DC}.

1.4 Tujuan

Tujuan skripsi ini adalah untuk merancang dan membuat *driver* motor DC *brushed* menggunakan *H-bridge* E-MOSFET kanal N untuk Robot KRI dan KRCI sebagai alternatif *part* pendukung pergerakan robot yang handal.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan pada skripsi ini adalah sebagai berikut:

BAB I Pendahuluan

Memuat latar belakang, rumusan masalah, ruang lingkup, tujuan, dan sistematika penulisan.

BAB II Tinjauan Pustaka

Memuat teori tentang motor DC *brushed*, *driver* konfigurasi *H-bridge*, E-MOSFET kanal N, *charge pump*, *multivibrator*, dan *optocoupler*.

BAB III Metode Penelitian

Memuat tahapan penyelesaian skripsi ini yang meliputi studi literatur, perancangan dan pembuatan alat, pengujian dan analisis, serta pengambilan kesimpulan dan saran.

BAB IV Perancangan dan Pembuatan Alat

Memuat perancangan dan pembuatan *driver* motor DC *brushed* menggunakan *H-bridge* E-MOSFET kanal N.

BAB V Pengujian dan Analisis

Memuat pengujian per blok maupun alat secara keseluruhan dan hasil analisis performansi dari *driver* motor DC *brushed* menggunakan *H-bridge* E-MOSFET kanal N untuk plan simulasi.

BAB VI Penutup

Memuat kesimpulan dari *driver* motor DC *brushed* menggunakan *H-bridge* E-MOSFET kanal N untuk robot KRI dan KRCI yang telah dibuat dan beberapa saran untuk penerapan dan pengembangan lebih lanjut.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Untuk mendukung perancangan dan pembuatan *driver* motor DC *brushed* menggunakan *H-bridge* E-MOSFET kanal N untuk robot KRI dan KRCI maka dilakukan studi pustaka untuk beberapa bagian sistem, meliputi motor DC *brushed*, *driver* konfigurasi *H-bridge*, E-MOSFET kanal N, *charge pump*, *multivibrator*, dan *optocoupler*.

2.1 Motor DC *Brushed*

Motor DC *brushed* adalah motor elektrik dengan komutasi internal dan bekerja dengan sumber daya DC. Motor DC *brushed* banyak digunakan dalam berbagai bidang, mulai dari mainan anak-anak hingga untuk keperluan industri. Motor DC *brushed* relatif lebih murah jika dibandingkan dengan motor induksi, mudah dioperasikan, dan umumnya telah tersedia dalam berbagai ukuran dan bentuk.

Secara umum motor DC *brushed* tersusun dari komponen dasar yang sama, yaitu stator, rotor, *brush*, dan komutator.

2.1.1 Stator

Stator berfungsi untuk menghasilkan sebuah medan magnet stasioner yang melingkupi rotor. Medan semacam ini dapat dihasilkan baik oleh magnet permanen atau kumparan elektromagnet. Perbedaan tipe motor DC *brushed* ditentukan oleh konstruksi stator atau cara bagaimana kumparan elektromagnet terhubung ke catu daya.

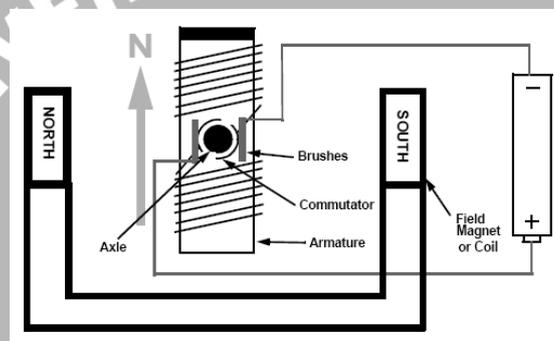
2.1.2 Rotor

Rotor, atau disebut juga armatur, terbuat dari satu atau lebih kumparan. Ketika kumparan-kumparan ini dialiri arus akan timbul suatu medan magnet di sekelilingnya. Kutub-kutub magnet dari rotor ditarik ke kutub-kutub yang berlawanan oleh stator, menyebabkan rotor berputar. Selagi rotor berputar, kumparan-kumparan ini akan selalu dialiri arus dalam urutan yang berbeda sehingga kutub-kutub magnet yang berlawanan pada rotor dan stator tidak akan saling bertemu. Pergantian medan dalam kumparan rotor semacam ini disebut dengan komutasi.

2.1.3 *Brush dan Komutator*

Tidak seperti motor DC *brushless* atau motor induksi, motor DC *brushed* tidak memerlukan suatu pengontrol untuk merubah arus pada kumparan-kumparan dalam motor. Komutasi pada kumparan-kumparan motor DC *brushed* dilakukan secara mekanis. Suatu segmen tembaga, disebut dengan komutator, terpasang pada sumbu sebuah motor DC *brushed*. Ketika motor berputar, sikat (*brush*) karbon meluncur pada komutator, bersentuhan dengan segmen-segmen yang berbeda pada komutator. Segmen-segmen ini melekat pada ujung-ujung kumparan yang berbeda sehingga medan magnet dinamis dihasilkan di dalam motor ketika sumber tegangan dihubungkan dengan sikat-sikat pada motor.

Susunan bagian-bagian motor dalam motor DC *brushed* sederhana ditunjukkan dalam Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Motor DC *Brushed* Sederhana

Sumber : Condit, 2004: 1

Ketika arus melewati kumparan di sekitar inti besi lunak (pada armatur), sisi kutub positif dikenai gaya ke atas, sedangkan sisi yang lain dikenai gaya ke bawah. Berdasarkan aturan tangan kiri Fleming, gaya ini menyebabkan kumparan/armatur berputar. Untuk membuat motor berputar pada arah yang sama terdapat komutator DC yang membuat arus mengalir dengan arah yang berlawanan setiap setengah siklus (dalam motor dua kutub).

Masalah yang terjadi pada motor di atas adalah ketika kumparan dalam posisi paralel dengan medan magnet stator, misalnya ketika sumbu rotor berada 90 derajat terhadap sumbu stator, torsi motor menjadi nol. Rotor tidak akan dapat mulai berputar dari posisi semacam ini. Akan tetapi, sekali berputar, rotor akan terus berputar melewati posisi ini dikarenakan adanya kelembaman rotor.

Terdapat masalah kedua dari desain dua kutub sederhana ini. Pada posisi dengan torsi nol seperti yang telah disebutkan sebelumnya, kedua sikat komutator saling menyentuh lempeng komutator, menghasilkan suatu hubung singkat. Kutub-kutub catu daya terhubung

singkat melalui pelat komutator, dan kumparan juga terhubung singkat melalui kedua sikat. Terlepas dari masalah sebelumnya, bahkan jika terdapat arus yang sangat besar dalam kumparan pada posisi semacam ini akan tetap menghasilkan torsi nol. Masalah yang terjadi ini sebenarnya adalah adanya konsumsi daya dalam jumlah besar tanpa menghasilkan gerakan. Pada beberapa kasus, masalah ini akan mengakibatkan kerusakan motor atau kerusakan catu daya.

Satu solusi sederhana adalah dengan meletakkan sebuah celah diantara pelat-pelat komutator yang lebih lebar daripada tepi-tepi sikat. Solusi semacam ini akan meningkatkan peluang terjadinya torsi nol namun dapat mengatasi masalah hubung singkat; jika rotor mulai berputar dikarenakan gaya dari luar, maka rotor akan terus berputar. Dengan modifikasi semacam ini motor dapat pula dihentikan dengan hanya menghentikan rotornya pada posisi torsi nol (komutator tidak bersentuhan dengan sikat). Motor dengan desain semacam ini sering dijumpai untuk keperluan hobi maupun proyek-proyek ilmiah sederhana. Motor DC yang umumnya digunakan untuk keperluan praktis lainnya biasanya memiliki lebih dari 2 kutub, dan dapat mulai bekerja dari posisi manapun, dan tidak memiliki posisi di mana arus mengalir tanpa menghasilkan daya elektromotif.

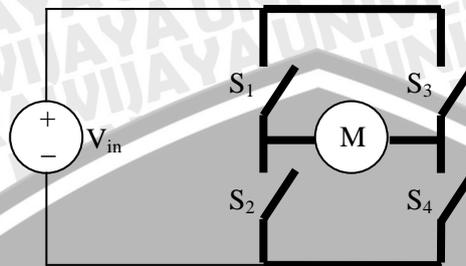
Secara umum, kecepatan putar rotor dalam motor DC *brushed* sebanding dengan tegangan yang dikenakan pada kutub-kutubnya, sedangkan torsi sebanding dengan arus. Pengaturan kecepatan dapat dicapai dengan sumber tegangan variabel menggunakan resistor atau pengontrolan elektronik lainnya.

Tegangan efektif dapat diubah-ubah dengan menyisipkan suatu rangkaian resistor dengan prinsip bagi tegangan atau dengan pengontrolan elektronis menggunakan komponen *switching* seperti thyristor, transistor, atau *mercury arc rectifiers*. Dalam suatu metode yang disebut *pulse width modulation* (PWM), tegangan rata-rata yang dikenakan pada motor diubah-ubah dengan *switching* sumber tegangan dengan sangat cepat. Dengan rasio lama waktu “on” dan “off” yang berbeda-beda pada sumber tegangan mengakibatkan kecepatan motor yang berbeda-beda pula. Persentase lama “on” dikalikan dengan tegangan sumber menghasilkan tegangan rata-rata yang dikenakan pada motor. Karena itu, dengan 100V tegangan sumber dan 25% waktu “on” akan menghasilkan 25V tegangan rata-rata pada motor. *Switching* cepat semacam ini membuang lebih sedikit daya dibandingkan dengan rangkaian resistor seri.

2.2 Driver Konfigurasi H-bridge

H-bridge adalah suatu rangkaian elektronik yang memungkinkan suatu tegangan diterapkan pada suatu beban dengan arah yang berbeda-beda. Rangkaian semacam ini sering

digunakan dalam robotika dan aplikasi lain yang memungkinkan rotor pada motor DC berputar ke satu arah dan ke arah kebalikannya. *H-bridge* tersedia dalam bentuk rangkaian terpadu, atau dapat dibentuk pula dari komponen-komponen diskrit. Struktur rangkaian *H-bridge* secara umum ditunjukkan dalam Gambar 2.3.



Gambar 2.2. Struktur Sebuah *H-bridge*

Sumber : McManis, 2006: 2

Istilah “*H-bridge*” diilhami dari bentuk grafis rangkaian tersebut. *H-bridge* dalam Gambar 3 dibentuk dari 4 saklar. Ketika S_1 dan S_4 tertutup sedangkan S_2 dan S_3 terbuka maka suatu tegangan akan dikenakan pada motor M dengan polaritas positif di kiri. Dengan membuka S_1 dan S_4 kemudian menutup S_2 dan S_3 , polaritas tegangan pada motor M akan berbalik, dan akan menghasilkan kerja motor yang berkebalikan.

Berdasar Gambar 2.3, S_1 dan S_2 tidak boleh ditutup di saat yang bersamaan. Jika hal ini dilakukan, akan terjadi hubung singkat pada sumber tegangan. Hal yang sama juga berlaku untuk S_3 dan S_4 .

Penyusunan *H-bridge* umumnya digunakan agar pengguna dapat membalik polaritas kumparan rotor, tetapi susunan semacam ini juga dapat digunakan untuk “mengerem” motor, dimana rotor pada motor akan seketika berhenti. Kemungkinan yang dapat diterapkan pada *H-bridge* ditunjukkan dalam Tabel 2.1. Angka 1 pada tabel menunjukkan bahwa saklar yang bersangkutan dalam kondisi tertutup. S_{1-4} mengacu dalam Gambar 2.2.

Kondisi motor mengerem tercipta ketika kutub-kutub kumparan pada rotor dihubungkan pada tegangan yang sama, mengakibatkan motor menghasilkan efek yang melawan dirinya sendiri. Rotor pada motor yang berputar dalam kondisi ini akan menghasilkan tegangan yang akan memaksa rotor untuk berputar ke arah kebalikannya. Inilah yang kemudian mengakibatkan rotor segera berhenti berputar.

Tabel 2.1. Kondisi yang Diperbolehkan dalam Pengoperasian *H-bridge*

S1	S2	S3	S4	Hasil
1	0	0	1	Rotor berputar ke kanan
0	1	1	0	Rotor berputar ke kiri
0	0	0	0	Rotor bebas berputar
0	1	0	1	Motor mengerem
1	0	1	0	Motor mengerem

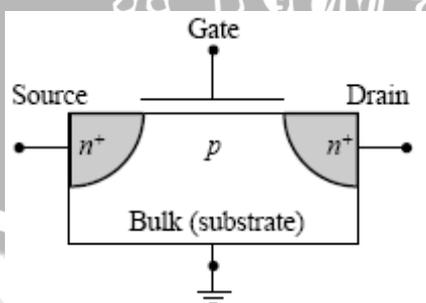
Sumber : McManis, 2006: 2

H-bridge semikonduktor umumnya dibentuk menggunakan komponen-komponen dengan polaritas yang berkebalikan, misalnya BJT PNP atau MOSFET kanal P yang dihubungkan dengan tegangan yang lebih tinggi dan BJT NPN atau MOSFET kanal N yang dihubungkan dengan tegangan yang lebih rendah.

Desain MOSFET yang paling efisien menggunakan MOSFET kanal N baik pada *high side* maupun *low side*-nya karena MOSFET kanal N memiliki resistansi *on* sepertiga dari resistansi *on* MOSFET kanal P. Konsekuensinya suatu rangkaian yang lebih kompleks meliputi penganda tegangan harus dihubungkan pada *gate* MOSFET *high side*.

2.3 E-MOSFET Kanal N

MOSFET adalah sebuah transistor yang menggunakan suatu elektroda pengontrol, yang disebut *gate*, yang secara kapasitif mengatur konduktansi suatu kanal di permukaan yang menghubungkan 2 ujung kontak, yang disebut *source* dan *drain*. Konstruksi E-MOSFET kanal N ditunjukkan dalam Gambar 2.3.

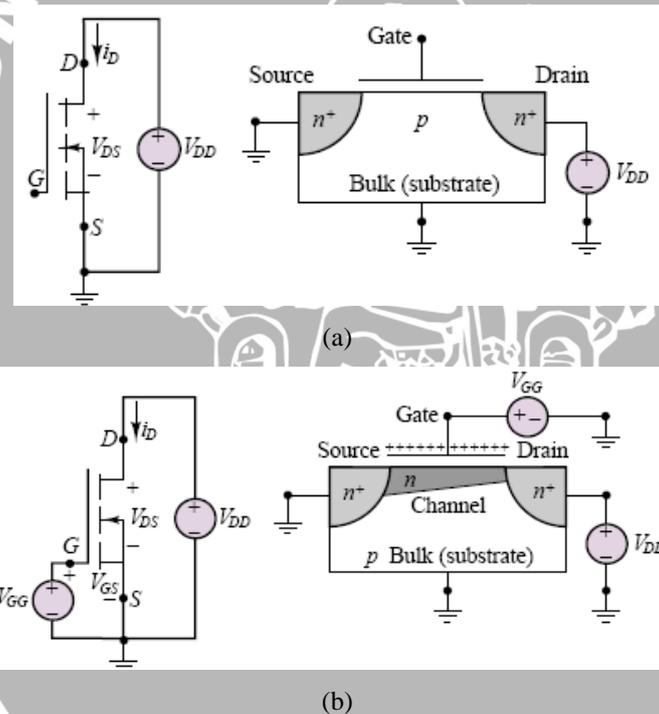


Gambar 2.3. Konstruksi E-MOSFET Kanal N.

Sumber : Schuler, 2004: 415

Bulk atau substrat komponen ini seperti ditunjukkan dalam lambang elektroniknya terhubung dengan *source*, dan oleh karena itu tidak tampak sebagai terminal yang terpisah. *gate* tersusun atas lapisan film metal, terpisah dari *bulk* tipe p oleh sebuah lapisan oksida tipis (asal istilah *metal-oxide-semiconductor*). Baik *drain* dan *source* disusun dari semikonduktor n^+ .

Jika pin drain dihubungkan dengan sumber tegangan positif, V_{DD} , dan *source*-nya dihubungkan dengan *ground*, karena *bulk* tipe p terhubung ke *source* dan terhubung pula ke *ground*, *drain* dan *bulk* mengalami *reverse bias*. Tegangan pada sambungan pn+ yang dibentuk oleh *bulk* dan *source* adalah nol karena keduanya terhubung ke *ground*. Jadi jalur antara *drain* dan *source* terdiri atas dua sambungan p-n yang *reverse bias*, dan tidak ada arus yang dapat mengalir. Tanpa adanya tegangan pada *gate*, E-MOSFET kanal N berlaku seperti rangkaian terbuka. Oleh karena itu, E-MOSFET kanal N adalah komponen yang *normally off*. Kondisi E-MOSFET ini ditunjukkan dalam Gambar 2.4.(a).



Gambar 2.4. (a) E-MOSFET Kanal N *Normally Off* tanpa Tegangan pada *Gate*.

(b) Pembentukan Kanal Tipe N pada E-MOSFET.

Sumber : Schuler, 2004

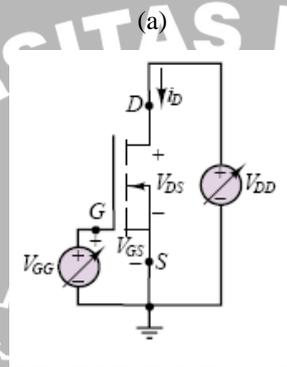
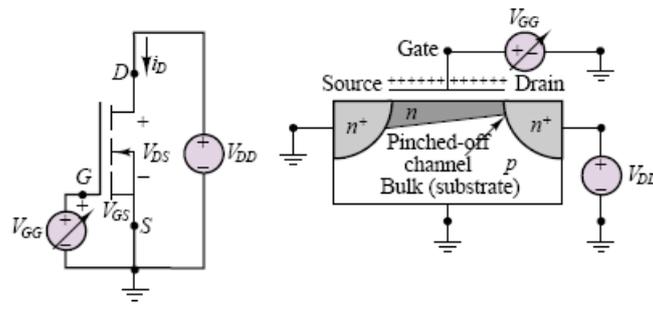
Jika sekarang suatu tegangan positif diterapkan pada *gate*; tegangan ini akan membentuk suatu medan listrik dengan arah seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.4.(b). Efek medan listrik adalah untuk menghilangkan pembawa muatan positif dari permukaan substrat tipe p yang berdekatan dengan *gate*, dan untuk membentuk suatu kanal sempit di dekat permukaan

substrat yang didominasi oleh pembawa muatan negatif dan memungkinkan terjadinya konduksi. Untuk bias *drain* yang tetap, semakin besar medan listrik yang diterapkan, yang berarti pula semakin tinggi tegangan pada *gate*, semakin besar kanal yang dapat dibentuk.

Telah diketahui bahwa jika tidak ada tegangan pada *gate*, kedua sambungan pn mengalami *reverse bias* dan FET tidak dapat mengalirkan arus (ditunjukkan dalam Gambar 5(a)). Ini adalah kondisi *cutoff* sebuah E-MOSFET kanal N. Ketika suatu tegangan dikenakan pada *gate*, suatu medan listrik dihasilkan dan suatu kanal terbentuk ketika tegangan *gate-source* melebihi suatu tegangan *threshold*, V_T (ditunjukkan dalam Gambar 2.4.(b)). Tegangan *threshold* adalah suatu karakteristik elektronis komponen, dan dapat dianggap sebagai suatu parameter (seperti tegangan sambungan dalam dioda atau BJT). Kanal yang terbentuk ternyata lebih sempit di dekat *drain* dan lebih lebar di dekat *source*. Ini dikarenakan medan listrik terbagi secara tidak merata, dan lebih kuat di dekat *source* (dekat dengan 0 V) dibanding dengan pada *drain* (dekat dengan V_{DD} V). Ketika suatu kanal terbentuk, konduksi dapat terjadi antara *drain* dan *source*. Karena kanal yang terbentuk adalah tipe n, pembawa muatan yang bekerja adalah pembawa muatan negatif; karena itu MOSFET adalah komponen unipolar. Konduksi terjadi melalui elektron yang dilewatkan melalui daerah n+ *source*, kemudian menuju kanal, dan terakhir menuju n+ *drain*. Oleh karena itu arus mengalir dari *drain* ke *source*, dan kita menyebut arus ini sebagai arus *drain* (I_D).

Jika tegangan *drain-source* dibuat tetap pada suatu nilai tertentu, seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.5.(a), kemudian tegangan *gate-source* ditingkatkan hingga pada suatu nilai di atas tegangan *threshold*-nya (sehingga suatu kanal terbentuk), lebar kanal konduksi meningkat karena peningkatan medan listrik. Pada *mode* kerja semacam ini, MOSFET berlaku seperti resistor yang dikontrol tegangan; semakin besar tegangan pada *gate*, resistansi kanal semakin kecil karena lebar kanal meningkat. Akan tetapi fenomena ini hanya dapat terjadi pada beberapa tegangan *gate-source* saja. Ketika perbedaan antara tegangan *gate-source* dan tegangan *threshold*, $V_{GS} - V_T$, sama dengan tegangan *drain-source*, V_{DS} , lebar kanal mencapai suatu nilai minimum pada daerah *drain*. Hal ini terjadi karena kuat medan listrik mendekati nol di sekitar *drain*. Kondisi semacam ini disebut dengan *pinch-off*. Sekali *pinch-off* terjadi, peningkatan tegangan *gate-source* tidak akan meningkatkan nilai arus *drain* secara signifikan karena lebar kanal pada daerah *drain* tetap, dan MOSFET berlaku lebih seperti sumber arus konstan, dengan arus *drain* terbatas pada nilai saturasi yang dikarenakan lebar kanal yang di-*pinch-off*. Gambar 2.6.(a) menunjukkan hubungan antara arus *drain* dengan tegangan *gate-source* untuk tegangan *drain-source* yang tetap dari sebuah E-MOSFET kanal N. Dengan adanya kondisi *pinch-off*, daerah kerja E-MOSFET kanal N dapat dikelompokkan

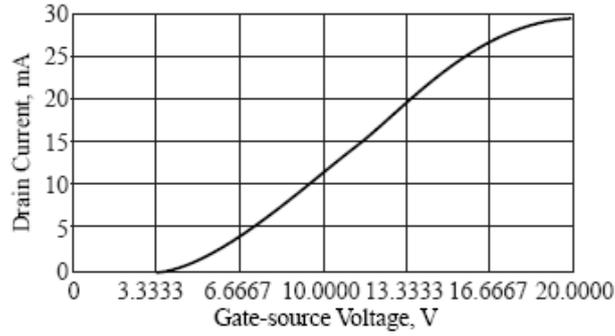
menjadi 2 macam, yaitu: daerah *ohmic* atau *triode* (sebelum *pinch-off* terjadi), dan daerah saturasi (setelah *pinch-off* terjadi). Pada daerah *ohmic*, MOSFET bekerja seperti resistor yang dikontrol tegangan, dan pada daerah saturasi bekerja seperti sumber arus.



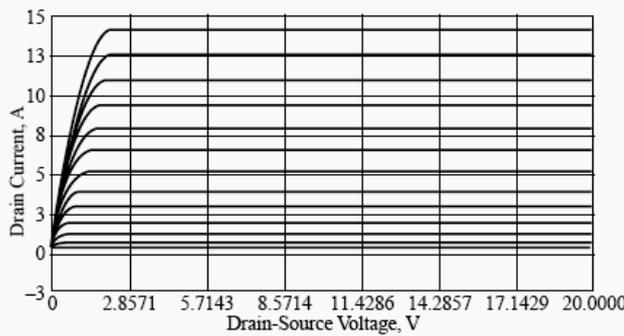
Gambar 2.5. (a) MOSFET dengan V_{GS} yang Dapat Diubah-ubah.
 (b) MOSFET dengan V_{GS} dan V_{DS} yang Dapat Diubah-ubah.

Sumber : Schuler, 2004: 416

Jika baik tegangan *drain* dan *gate* dapat diubah-ubah, seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.5.(b), hubungan antara V_{DS} dengan I_D pada V_{GS} yang berbeda-beda dapat digambarkan dengan kurva seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.6.(b). Kurva ini disebut dengan kurva karakteristik *drain*. Jika tegangan *drain-source* ditingkatkan di atas nilai *breakdown*, V_B , arus *drain* akan meningkat dengan cepat, bahkan dapat mengakibatkan rusaknya komponen dikarenakan peningkatan suhu. Kondisi ini merupakan daerah kerja MOSFET yang lain dan disebut sebagai daerah *breakdown*.



(a)



(b)

Gambar 2.6. (a) Kurva *Drain* E-MOSFET Kanal N.

(b) E-MOSFET Kanal N sebagai Sumber Arus.

Sumber : Schuler, 2004: 418

Empat daerah kerja MOSFET dijelaskan dalam Tabel 2.2.

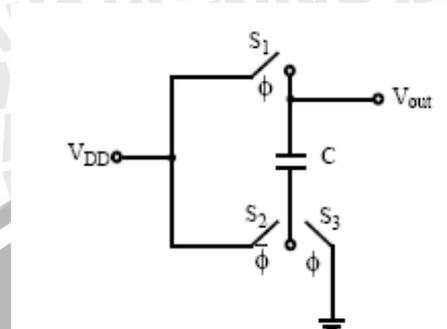
Tabel 2.2. Daerah Kerja MOSFET Beserta Rumus-rumus

Daerah kerja	Rumus-rumus
Cutoff	$V_{GS} < V_T$
Ohmic atau triode	$V_{DS} < 0,25(V_{GS} - V_T), V_{GS} > V_T$ $R_{DS} = \frac{V_T^2}{2I_{DSS}(V_{GS} - V_T)}$ $I_D \approx \frac{V_{DS}}{R_{DS}}$
Saturasi	$V_{DS} \geq V_{GS} - V_T, V_{GS} > V_T$ $I_D = \frac{I_{DSS}}{V_T^2} (V_{GS} - V_T)^2 = k(V_{GS} - V_T)^2$
Breakdown	$V_{DS} > V_B$

Sumber : Schuler, 2004: 418

2.4 Charge Pump

Charge pump adalah rangkaian yang menghasilkan tegangan yang lebih tinggi dari tegangan catu daya yang digunakan untuk beroperasi. Rangkaian pengganda tegangan sederhana ditunjukkan dalam Gambar 2.8.



Gambar 2.7. Pengganda Tegangan Sederhana

Sumber : Pan, 2006: 4

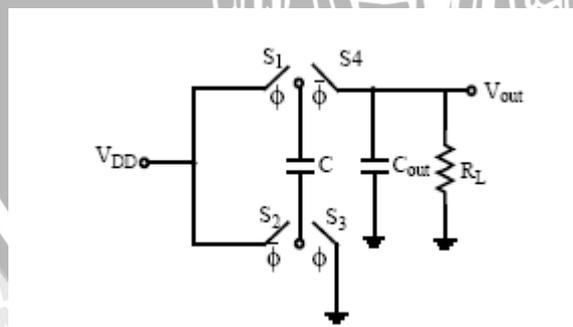
Dalam suatu fasa ϕ , saklar S_1 dan S_3 tertutup dan kapasitor terisi muatan hingga tegangannya sama dengan tegangan catu daya, V_{DD} . Berikutnya saklar S_2 tertutup dan pada pelat bawah kapasitor terpasang sebuah tegangan V_{DD} . Pada kapasitor masih tersimpan muatan $V_{DD} \cdot C$ dari fasa sebelumnya. Ini berarti bahwa selama $\bar{\phi}$

$$(V_{out} - V_{DD}) \cdot C = V_{DD} \cdot C \tag{2-1}$$

sehingga

$$V_{out} = 2V_{DD} \tag{2-2}$$

Tanpa beban DC, tegangan keluaran yang dihasilkan 2 kali tegangan catu daya. Untuk mengakomodasi sebuah beban pada keluaran, sebuah kapasitor ditambahkan pada keluaran seperti dalam Gambar 2.9.



Gambar 2.8. Pengganda Tegangan Praktis

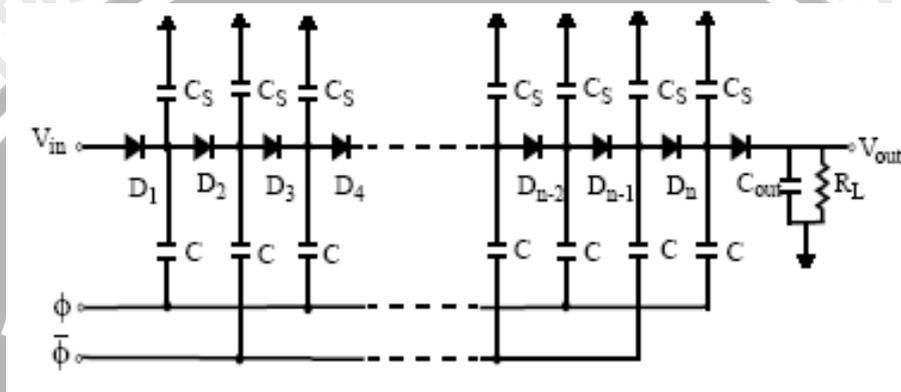
Sumber : Pan, 2006: 4

Dalam kasus ini, tegangan keluaran ideal diberikan oleh persamaan

$$V_{out} = \frac{C}{C + C_{out}} \cdot 2 \cdot V_{DD} \tag{2-3}$$

Jika sebuah R_L ditambahkan, maka sebuah tegangan *ripple*, V_R , dihasilkan pada keluaran. Tegangan *ripple* dapat dikurangi dengan membuat C_{out} cukup besar hingga V_R dapat diabaikan dibandingkan dengan V_{out} .

Salah satu jenis *charge pump* yang sering digunakan adalah Dickson *charge pump*. Rangkaian Dickson *charge pump* ditunjukkan dalam Gambar 2.10. Pada rangkaian terdapat masukan untuk 2 fasa *clock*, ϕ dan $\bar{\phi}$, yang saling berlawanan dan memiliki amplitudo tegangan V_ϕ . Dioda berfungsi sebagai saklar otomatis dengan tegangan *bias* maju, V_d . Kapasitansi *stray*, C_s , disertakan pada tiap titik untuk kelengkapan.



Gambar 2.9. Dickson Charge Pump

Sumber : Pan, 2006: 6

Pengali tegangan ini bekerja dengan memompakan muatan ke sepanjang rantai dioda dan kapasitor sebagai penyimpan muatan yang bekerja dengan *charged* dan *discharged* setiap siklus *clock*. Ketika fasa *clock* ϕ memiliki tegangan rendah (0V), D_1 terkonduksi sehingga tegangan pada titik pertama (pada kaki katode D_1) menjadi $V_{in} - V_d$. Ketika ϕ memiliki tegangan V_ϕ , tegangan pada titik pertama sekarang menjadi $V_{in} + (V_\phi - V_d)$. Ini menyebabkan dioda D_2 terkonduksi hingga tegangan pada titik ke dua setara dengan $V_{in} + (V_\phi - V_d) - V_d$. Ketika ϕ memiliki tegangan rendah lagi (0V), tegangan pada titik ke dua menjadi $V_{in} + 2(V_\phi - V_d)$. Setelah N tingkat, dapat disimpulkan bahwa

$$V_{out} = V_{in} + N(V_\phi - V_d) - V_d \quad (2-4)$$

Kapasitansi *stray*, C_s , dapat diikutkan dalam perhitungan dengan mengetahui bahwa C_s mengurangi tegangan *clock*, V_ϕ , yang ditransfer, dengan sebuah faktor $\frac{C}{C + C_s}$. Dengan ini, tegangan keluaran menjadi

$$V_{out} = V_{in} + N \left(\left(\frac{C}{C + C_s} \right) \cdot V_{\phi} - V_d \right) - V_d \quad (2-5)$$

Rumusan di atas berlaku jika tidak terdapat beban elektrik yang terhubung dengan keluaran *charge pump*. Jika terdapat suatu beban elektrik sedemikian hingga mengalir arus sebesar I_{out} pada beban, tegangan keluaran berkurang sebesar $\frac{N \cdot I_{out}}{(C + C_s) \cdot f_{osc}}$, di mana f_{osc} adalah frekuensi kerja *charge pump*. Tegangan keluaran *charge pump* kini menjadi

$$V_{out} = V_{in} + N \left(\left(\frac{C}{C + C_s} \right) \cdot V_{\phi} - V_d - \frac{I_{out}}{(C + C_s) \cdot f_{osc}} \right) - V_d \quad (2-6)$$

Kini semakin jelas bahwa penambahan tegangan hanya akan terjadi jika

$$\frac{C}{C + C_s} \cdot V_{\phi} - V_d - \frac{I_{out}}{(C + C_s) \cdot f_{osc}} > 0 \quad (2-7)$$

Perlu disadari bahwa akan terdapat suatu tegangan *ripple* kecil, V_R , pada tegangan keluaran dikarenakan adanya resistansi beban R_L . Tegangan *ripple* ini diberikan oleh

$$V_R = \frac{I_{out}}{f_{osc} \cdot C_{out}} = \frac{V_{out}}{f_{osc} \cdot R_L \cdot C_{out}} \quad (2-8)$$

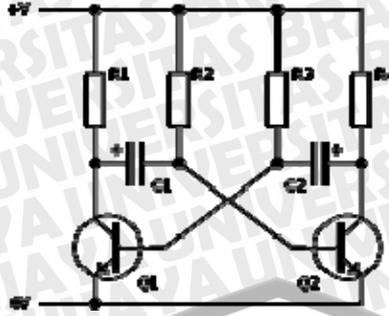
Tegangan *ripple* dapat dikurangi dengan memperbesar frekuensi *clock* atau memperbesar C_{out} . Akan tetapi, hal ini akan membuat *charge pump* lebih lama mencapai kondisi *steady state*-nya.

2.5 Multivibrator Astable

Multivibrator adalah suatu rangkaian elektronik yang digunakan untuk diterapkan pada sistem 2 kondisi sederhana seperti *oscillator*, *timer*, dan *flip-flop*. Rangkaian ini disusun dari 2 komponen penguat (transistor, tabung elektron, atau komponen lain) dengan rangkaian resistor dan kapasitor.

Bentuk paling sederhana dari rangkaian *multivibrator* adalah dua buah transistor dengan rangkaian resistor kapasitor yang digunakan untuk menentukan periode kondisi tidak stabilnya. *Multivibrator* banyak digunakan pada banyak aplikasi dimana gelombang persegi atau interval waktu dibutuhkan. Rangkaian yang sederhana semacam ini berakibat ke keluaran yang tidak akurat karena banyak faktor mempengaruhi timingnya sehingga rangkaian ini jarang digunakan ketika dibutuhkan ketelitian tinggi.

Rangkaian *multivibrator astable* sederhana ditunjukkan dalam Gambar 2.10.



Gambar 2.10. Rangkaian *Multivibrator Astable* BJT Sederhana

Sumber : Soclof, 2000: 660

2.5.1 Prinsip Kerja

Rangkaian menjaga agar satu transistor *on* dan yang lainnya *off*. Jika pada awalnya Q_1 *on* dan Q_2 *off* maka Kondisi 1 yang terjadi adalah:

- 1) Karena *on*, tegangan pada kaki kolektor Q_1 mendekati 0V.
- 2) Sisi kanan C_1 (dan kaki basis Q_2) di-charge oleh R_2 hingga 0,6V (V_{BE} Q_1 dan Q_2).
- 3) R_3 mem-*pull up* kaki basis Q_1 , namun V_{BE} pada Q_1 mencegah tegangannya naik lebih dari 0,6V.
- 4) R_4 men-charge sisi kanan C_2 hingga mendekati tegangan *supply* (+V). Karena resistansi R_4 kurang dari resistansi R_2 , C_2 ter-charge lebih cepat daripada C_1 .

Ketika kaki basis Q_2 mencapai 0,6V, Q_2 *on*, dan suatu umpan balik terjadi:

- 1) Q_2 seketika mem-*pull down* sisi kanan C_2 mendekati 0V.
- 2) Karena tegangan pada kapasitor tidak dapat seketika berubah, hal ini akan menyebabkan tegangan pada sisi kiri C_2 jatuh hingga mendekati -V (di bawah 0V).
- 3) Q_1 *off* dikarenakan jatuhnya tegangan pada kaki basisnya.
- 4) R_1 dan R_2 mem-*pull up* tegangan pada kaki-kaki C_1 menuju +V, meneruskan kondisi *on* pada Q_2 . Proses ini dihentikan oleh V_{BE} Q_2 yang mencegah tegangan pada sisi kanan C_1 naik lebih dari 0,6V.

Keadaan semacam ini akan membawa rangkaian pada Kondisi 2 selanjutnya, di mana Q_1 *off* dan Q_2 *on*, kebalikan dari Kondisi 1, dan proses semacam ini akan berulang.

2.5.2 Frekuensi *Multivibrator*

Setengah periode *multivibrator* diberikan oleh rumusan $t = \ln 2 \cdot R \cdot C$. Total periode osilasi diberikan oleh rumusan:

$$T = t_1 + t_2 = \ln 2 \cdot R_2 C_1 + \ln 2 \cdot R_3 C_2 = \ln 2 \cdot (R_2 C_1 + R_3 C_2) \quad (2-9)$$

,sehingga

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{\ln 2 \cdot (R_2 C_1 + R_3 C_2)} \approx \frac{1}{0,693 \cdot (R_2 C_1 + R_3 C_2)} \quad (2-10)$$

di mana:

- 1) f adalah frekuensi dalam Hertz.
- 2) R_2 dan R_3 adalah nilai resistansi dalam ohm.
- 3) C_1 dan C_2 adalah kapasitansi dalam farad.
- 4) T adalah periode osilasi.

Untuk kasus khusus di mana dibutuhkan *duty cycle* 50%, maka $R_2 = R_3$ dan $C_1 = C_2$, sehingga :

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{\ln 2 \cdot 2RC} \approx \frac{0,721}{RC} \quad (2-11)$$

2.5.3 Pengoperasian Awal

Ketika rangkaian pertama kali terhubung ke catu daya, hanya satu transistor saja yang akan *on*. Akan tetapi, ini berarti bahwa pada kondisi ini keduanya akan memiliki tegangan basis yang tinggi dan karena itu memiliki kecenderungan untuk *on*, dan suatu kondisi asimetris kecil dari rangkaian inilah yang kemudian mengakibatkan hanya satu transistor saja yang *on*. Ini akan segera menempatkan rangkaian pada salah satu kondisi seperti telah dijelaskan dalam sub bab 2.5.1.1. Dalam prakteknya, osilasi akan selalu terjadi untuk beberapa nilai R dan C.

Akan tetapi, jika kedua transistor dalam rangkaian memiliki tegangan basis yang tinggi untuk waktu yang lebih lama dari waktu yang dibutuhkan kedua kapasitor untuk ter-charge penuh, maka rangkaian akan terus berada pada kondisi stabil semacam ini, dengan kedua basis 0,6V, kedua kolektor 0V, dan kedua kapasitor memiliki tegangan -0,6V. Ini dapat terjadi pada pengoperasian awal tanpa intervensi eksternal, jika baik R dan C terlalu kecil. Contohnya untuk osilator 10MHz. Osilator semacam ini seringkali sulit diwujudkan dengan rangkaian sederhana seperti pada contoh di atas.

2.5.4 Periode Osilasi

Durasi Kondisi 1 akan berhubungan dengan konstanta waktu $R_2 \cdot C_1$ yang berarti bergantung pada *charging* C_1 , dan Kondisi 2 akan berhubungan dengan konstanta waktu $R_3 \cdot C_2$ yang berarti bergantung pada *charging* C_2 . Karena tidak dibutuhkan nilai yang sama, maka *duty cycle* yang asimetris akan mudah dicapai.

Akan tetapi, durasi setiap kondisi juga bergantung pada kondisi awal muatan dalam kapasitor, dan ini juga berarti bergantung pada jumlah muatan yang di-*discharge* dari kondisi sebelumnya, yang juga bergantung pada nilai resistor yang digunakan selama *discharge* (R_1 dan R_4) dan juga dari durasi *state* sebelumnya, dan seterusnya. Hasilnya, ketika pertama kali dioperasikan, periode kondisi akan memakan waktu sepanjang kapasitor yang bersangkutan ter-*charge* penuh, namun periode ini akan semakin singkat dan semakin stabil.

2.5.5 Komponen Pengaman

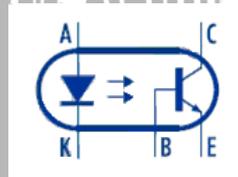
Meskipun bukan hal yang dasar, dioda yang dihubungkan seri dengan basis atau emitor transistor dibutuhkan untuk mencegah sambungan basis-emitor transistor dalam kondisi *breakdown* ketika tegangan *supply* melebihi tegangan V_{EB} *breakdown*.

2.6 Optocoupler

Optocoupler adalah suatu komponen kombinasi sumber cahaya, biasanya adalah LED galium arsenid, dan suatu detektor sensitif cahaya, dapat berupa fototransistor atau diac yang dipicu cahaya.

2.6.1 Cara Kerja *Optocoupler*

Dalam *optocoupler*, kopling tercipta oleh cahaya yang dihasilkan oleh sumber cahaya dan terdeteksi oleh detektor sensitif cahaya tanpa suatu koneksi elektrik di antara dua sisi tersebut. Simbol *optocoupler* yang digunakan dalam tinjauan pustaka ini ditunjukkan dalam Gambar 2.11, yang terdiri atas komponen led sebagai input dan komponen fototransistor sebagai output.



Gambar 2.11. Simbol *Optocoupler*

Sumber : *Electus*, 2001: 1

Umumnya koneksi elektrik ke bagian LED melalui pin-pin IC di salah satu sisi dan koneksi fototransistor di sisi lainnya, untuk memisahkan keduanya sedapat mungkin. Dengan konstruksi semacam ini, umumnya *optocoupler* dapat bertahan hingga 7500 V antara masukan dan keluarannya. *Optocoupler* pada dasarnya merupakan komponen digital atau *switching*, jadi *optocoupler* paling baik digunakan untuk mentransfer baik sinyal kontrol *on-off* atau data digital. Sinyal analog dapat ditransfer melalui PWM atau sinyal berfrekuensi.

2.6.2 Parameter Kunci

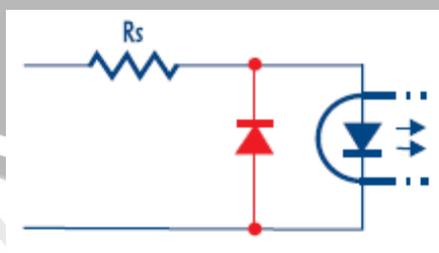
Parameter paling penting dari kebanyakan *optocoupler* adalah efisiensi transfer, umumnya diukur dalam satu besaran yang disebut *Current Transfer Ratio* (CTR). Secara sederhana ini adalah rasio antara perubahan arus pada transistor keluaran terhadap perubahan arus pada LED masukan. Nilai tipikal untuk CTR bervariasi antara 10% hingga 50% untuk komponen dengan keluaran fototransistor dan mencapai 2000% untuk keluaran sepasang transistor Darlington.

Parameter *optocoupler* lainnya menyertakan rating tegangan kolektor-emitor maksimum ($V_{CE(max)}$), yang akan membatasi tegangan *supply* yang digunakan pada rangkaian keluaran; rating arus maksimum LED masukan ($I_{F(max)}$), yang digunakan untuk menghitung nilai minimum untuk resistor serinya; dan *bandwidth optocoupler*, yang akan menentukan sinyal frekuensi tertinggi yang dapat ditransfer melalui *optocoupler*. Dengan ditentukan utamanya oleh konstruksi internal komponen dan kemampuan fototransistor keluaran, sebuah *optocoupler* dengan satu transistor keluaran dapat memiliki *bandwidth* hingga 300 kHz, sedangkan untuk pasangan transistor Darlington hanya 30 kHz.

2.6.3 Penggunaan Optocoupler

Cara penggunaan *optocoupler* secara sederhana adalah dengan mengubah-ubah LED masukan *on* dan *off*, dan menggunakan fototransistor atau diac untuk menghasilkan gelombang atau logika keluaran.

Pada beberapa rangkaian, ada suatu kemungkinan di mana tegangan yang diterapkan pada LED masukan terbalik polaritasnya. Ini dapat menyebabkan kerusakan pada komponen karena LED pada *optocoupler* hanya memiliki rating tegangan *reverse* rendah, umumnya hanya 3-5V. Jadi, jika dimungkinkan, dioda dengan penempatan seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.12 dapat dipasang untuk mencegah hal ini.

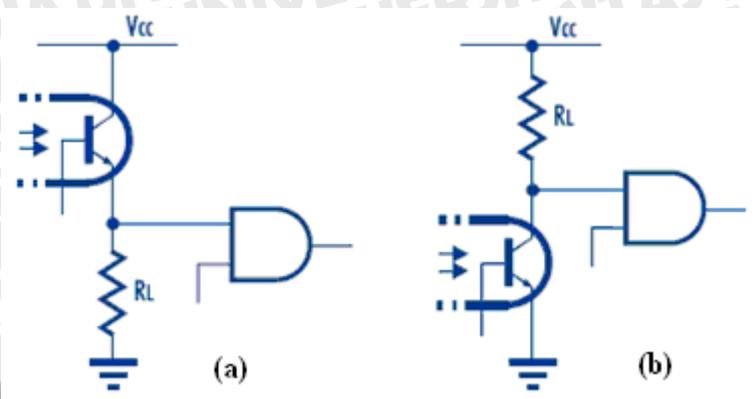


Gambar 2.12. Penempatan Dioda Pengaman untuk Menghindari Kerusakan LED *Optocoupler*

Sumber : *Electus*, 2001

Pada bagian keluaran juga terdapat sejumlah kemungkinan koneksi bahkan dengan *optocoupler* yang hanya memiliki sebuah penerima fototransistor (seperti 4N25 atau 4N28).

Pada kasus yang banyak terjadi, fototransistor secara sederhana dihubungkan seperti saklar yang dipicu cahaya, disusun seri dengan sebuah resistor beban R_L , seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.13.



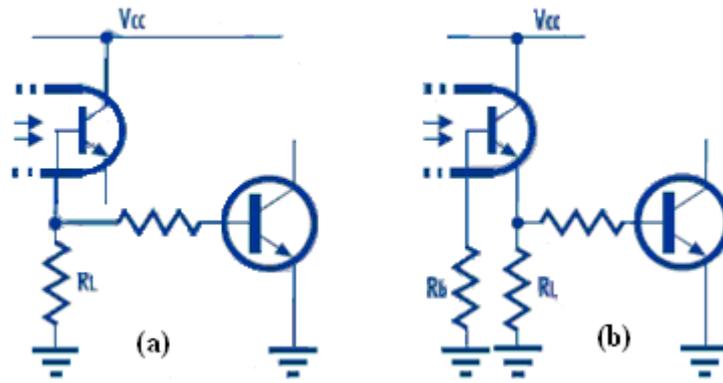
Gambar 2.13. Penyusunan Transistor Keluaran dengan Konfigurasi (a) *Pull-down* atau (b) *Pull-up*

Sumber : *Electus*, 2001: 2

Kaki basis pada transistor dibiarkan tidak terhubung, dan ini memberikan banyak kemudahan untuk men-drive rangkaian logika maupun transistor.

Jika dibutuhkan *bandwidth* yang lebih tinggi, koneksi yang hanya melibatkan basis dan kolektor saja dapat digunakan, dan memanfaatkan transistor sebagai fotodiode, seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.14.(a). Ini akan menurunkan CTR dari *optocoupler* secara signifikan, namun dapat meningkatkan *bandwidth* hingga 30MHz. Alternatif lain yang dapat digunakan adalah dengan menghubungkan basis fototransistor dengan resistor R_b ke *ground* seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.14.(b). Hal ini akan membantu menghilangkan muatan yang tersimpan.

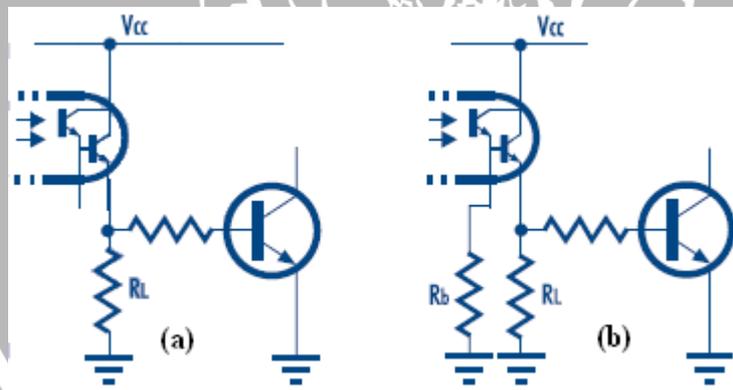
Dengan konfigurasi seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.14.(b) *bandwidth optocoupler* dapat meningkat, meskipun tidak terlalu besar, tanpa mengurangi CTR. R_b dapat bernilai $1M\Omega$ dan terus diturunkan hingga $47k\Omega$ untuk mengetahui apakah *bandwidth* yang diinginkan dapat tercapai.



Gambar 2.14. Dua Konfigurasi Penggunaan *Optocoupler* untuk Meningkatkan *Bandwidth*. (a) Sambungan Kolektor-Basis sebagai Fotodiode, atau (b) Penambahan R_b untuk Membantu Menghilangkan Muatan yang Tersimpan pada Basis

Sumber : *Electus*, 2001: 2

Selain penggunaan *optocoupler* dengan satu fototransistor keluaran, *optocoupler* dengan pasangan transistor Darlington seperti 6N138 juga dapat digunakan. Seperti yang telah dijelaskan dalam sub bab 2.6.2, komponen ini memiliki CTR yang jauh lebih tinggi, namun dengan kekurangan yang cukup signifikan dalam hal *bandwidth*. Seperti pada satu fototransistor, pada *optocoupler* Darlington peningkatan *bandwidth* juga dapat dilakukan dengan penempatan resistor pada kaki basis seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.15.(b).



Gambar 2.15. Dua Pilihan Konfigurasi *Optocoupler* Darlington (a) Kaki Basis Dibiarkan Mengambang, atau (b) Kaki Basis Dihubungkan dengan R_b .

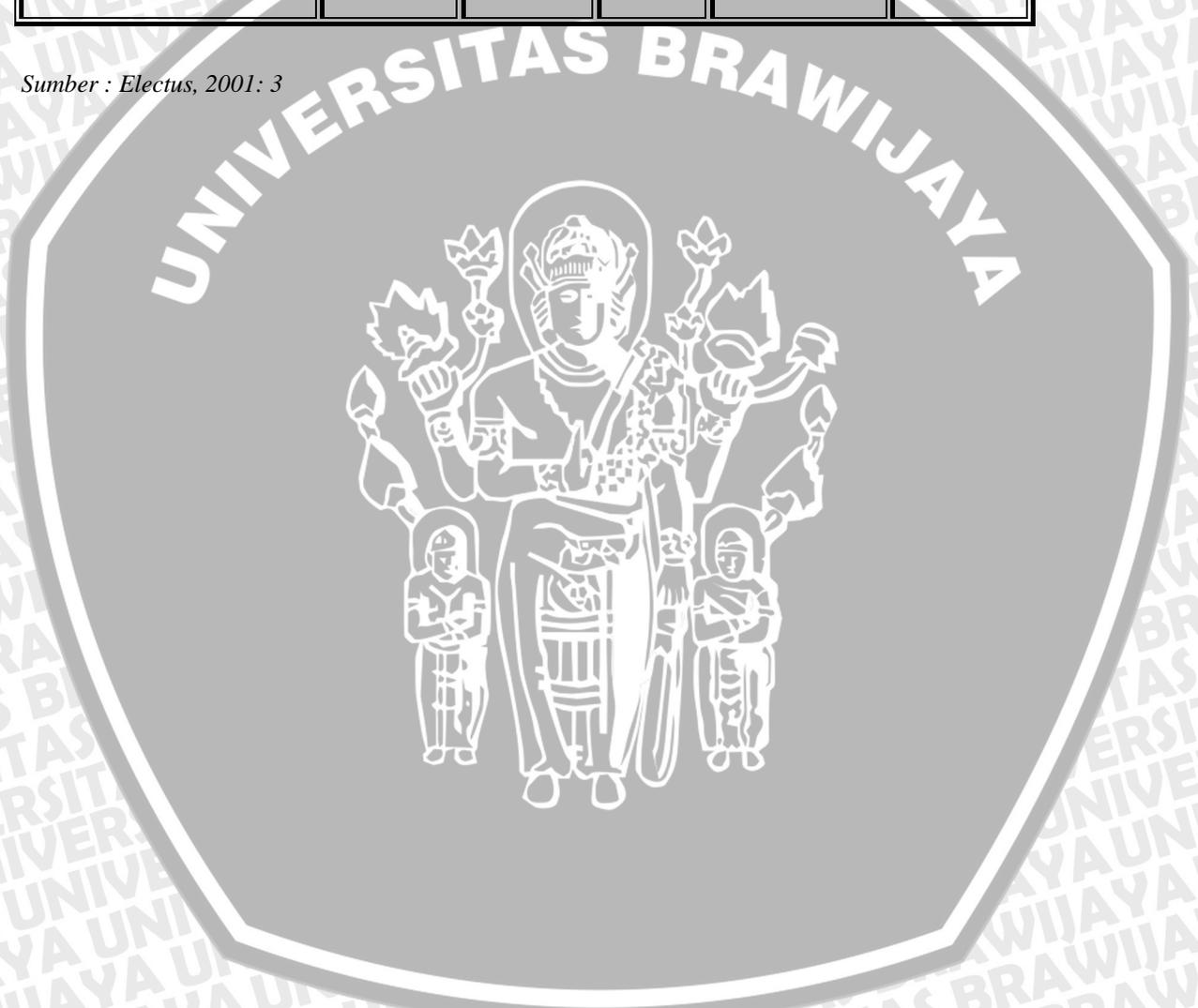
Sumber : *Electus*, 2001: 2

Beberapa macam *optocoupler* dengan spesifikasi parameter-parameter kuncinya ditunjukkan dalam Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Parameter-parameter Beberapa Macam *Optocoupler* Fototransistor

Type	Isolation	Input led $I_{F(max)}$	Output $V_{CE(max)}$	Ctr (@ I_F)	Bandwidth (kHz)
4N25 (single transistor)	5300 V_{rms}	80 mA	7 V	20% (10mA)	300
4N28 (single transistor)	5300 V_{rms}	80 mA	7 V	10% (10mA)	300
6N138 (Darlington transistor)	2500 V_{rms}	20 mA	7 V	300% (1,6mA)	~20

Sumber : *Electus*, 2001: 3



BAB III

METODE PENELITIAN

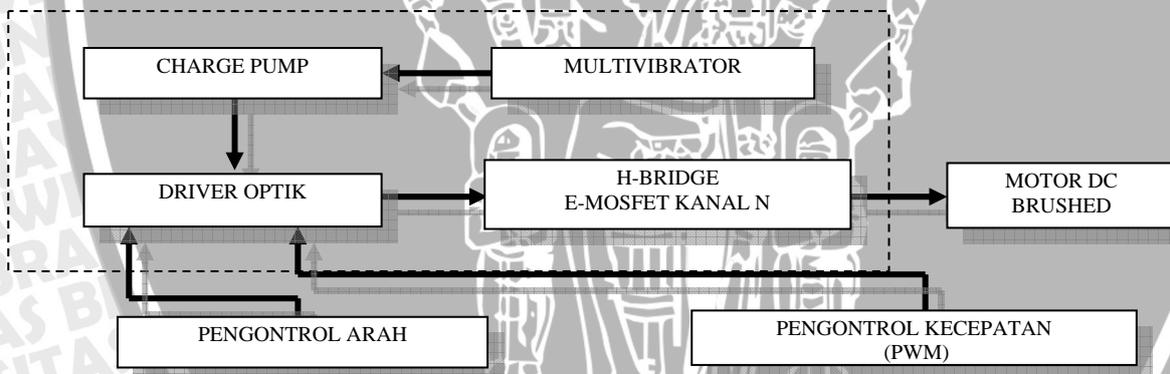
Untuk merealisasikan alat ini, langkah-langkah yang diambil adalah:

3.1 Studi Literatur

Berupa kajian pustaka terhadap sumber-sumber bacaan yang relevan yang dapat menunjang proses pengembangan sistem. Kajian terhadap berbagai literatur ini ditujukan untuk mendapatkan landasan teori yang diperlukan guna merealisasikan alat. Studi literatur yang dilakukan meliputi motor DC *brushed*, *driver* konfigurasi *H-bridge*, E-MOSFET kanal N, *charge pump*, *multivibrator*, dan *optocoupler*.

3.2 Perancangan Alat

Agar perancangan dan perealisasiian alat berjalan secara sistematis maka perlu dirancang diagram blok yang menjelaskan alat yang dirancang dibuat secara garis besar. Diagram blok *driver* motor DC *brushed* menggunakan *H-bridge* E-MOSFET kanal N untuk robot KRI dan KRCI secara keseluruhan ditunjukkan dalam Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Diagram Blok *Driver* Motor DC *Brushed* Menggunakan *H-bridge* E-MOSFET Kanal N untuk Robot KRI dan KRCI

Penjelasan fungsi bagian-bagian alat dalam Gambar 3.1. adalah sebagai berikut:

1. *Multivibrator* berfungsi untuk membangkitkan gelombang dengan frekuensi tertentu bagi *charge pump*.
2. *Charge pump* berfungsi untuk meningkatkan tegangan untuk men-*drive* E-MOSFET kanal N sisi atas.

3. Rangkaian *H-bridge* E-MOSFET kanal N berfungsi untuk men-*drive* motor DC *brushed*.
4. *Driver* optik berupa *optocoupler* yang berfungsi untuk memisahkan rangkaian *H-bridge* dengan rangkaian pengontol²⁴ ada *optocoupler* yang terhubung dengan E-MOSFET kanal N sisi atas, kaki kolektor *optocoupler* terhubung dengan keluaran *charge pump* sedangkan masukan *optocoupler* terhubung dengan pengontrol arah. Pada *optocoupler* yang terhubung dengan E-MOSFET kanal N sisi bawah, kaki kolektor *optocoupler* terhubung dengan catu daya 24V sedangkan masukan *optocoupler* terhubung dengan pengontrol kecepatan dan pengontrol arah.
5. Pengontrol arah dan pengontrol kecepatan (menggunakan metode PWM) berupa suatu logika pengontrolan yang berasal dari komponen pengontrol, yaitu Atmega8.

3.3 Pembuatan Alat

Pembuatan alat meliputi pembuatan perangkat keras sebagai komponen utama serta pembuatan perangkat lunak sebagai komponen pendukung pengujian.

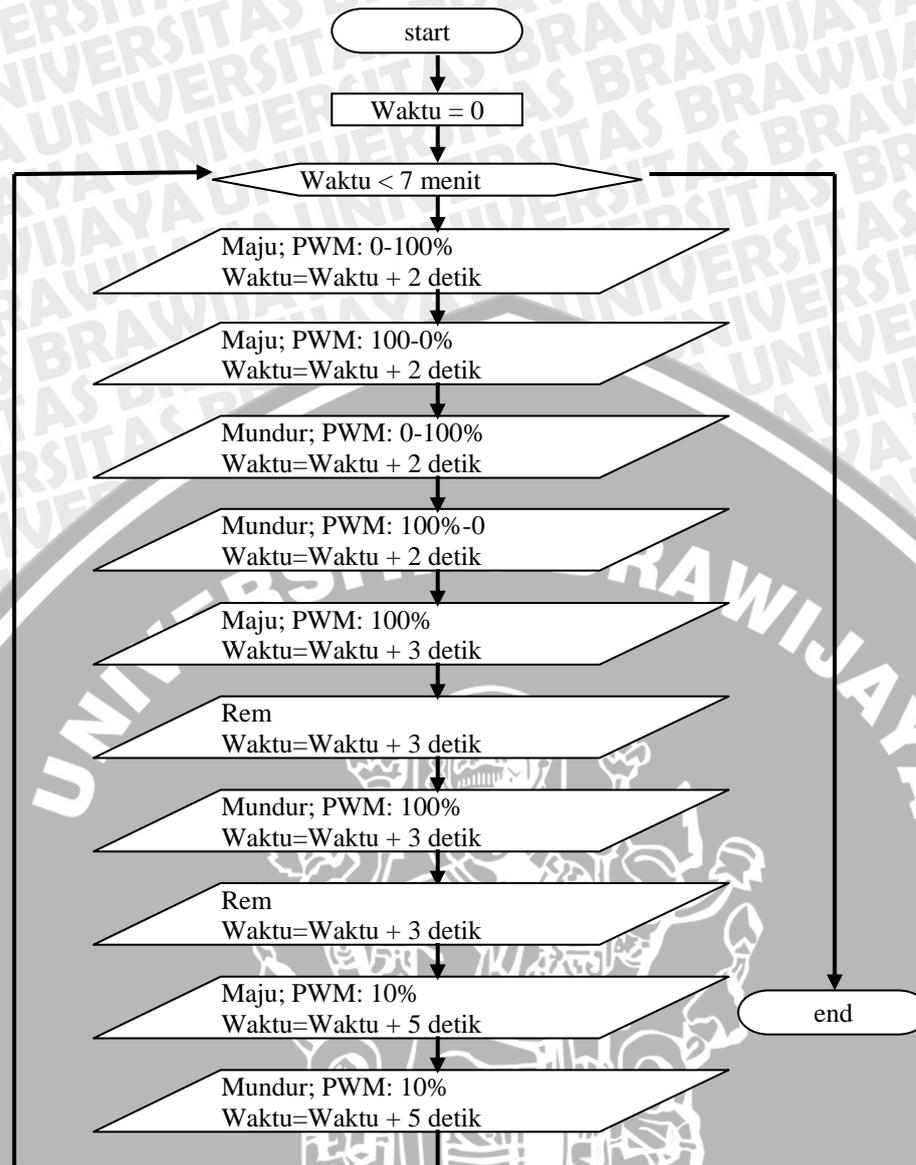
3.3.1 Pembuatan Perangkat Keras

Pembuatan alat dengan menggunakan komponen elektronika yang telah direncanakan. Pembuatan alat untuk perangkat keras juga meliputi pembuatan PCB (pembuatan layout dengan menggunakan software Eagle 4.11, pengetsaan dan pengeboran). Perakitan komponen dan penyolderan dilakukan pada PCB.

3.3.2 Pembuatan Perangkat Lunak

Untuk pembuatan software dilakukan dengan pembuatan flowchart terlebih dahulu kemudian dibuat programnya.

Perangkat lunak yang akan diterapkan pada plan simulasi didesain sedemikian hingga setiap kemungkinan pergerakan motor yang akan terjadi pada sebuah robot KRI maupun KRCI terwakili. Pergerakan tersebut meliputi perubahan kecepatan, baik secara bertahap maupun secara mendadak, dan perubahan arah gerak motor. Diagram alir program secara keseluruhan ditunjukkan dalam Gambar 3.2.



Gambar 3.2. Diagram Alir Program Pengujian *Driver* Motor DC *Brushed* Menggunakan *H-bridge* E-MOSFET Kanal N untuk Robot KRI dan KRCI

Penjelasan diagram alir dalam Gambar 3.2 di atas adalah sebagai berikut:

- 1) Inisialisasi “Waktu = 0”

Waktu adalah suatu variabel yang menandakan lama pengujian. Diawali dengan nilai 0 dan dibatasi hingga 7 menit, sesuai waktu *trial* maksimum dalam KRCI.

- 2) “Waktu < 7 menit”

Selama variabel Waktu bernilai kurang dari 7 menit program simulasi akan dijalankan. Ketika variabel Waktu telah mencapai 7 menit program simulasi akan berhenti dengan perintah “Rem” pada motor.

- 3) Instruksi oleh pengontrol pada *driver* (ditandai dengan lambang jajar genjang pada diagram alir):
 - a) Maju: instruksi agar motor menyebabkan pergerakan *plan* simulasi maju
 - b) Mundur: instruksi agar motor menyebabkan pergerakan *plan* simulasi mundur
 - c) Rem: instruksi agar motor mengerem
 - d) PWM: instruksi yang diberikan untuk pengontrolan kecepatan motor
 - i) 0-100%: peningkatan kecepatan motor secara bertahap dari kecepatan minimum (0%) hingga kecepatan maksimum (100%) dengan step 1%
 - ii) 100-0%: penurunan kecepatan motor secara bertahap dari kecepatan maksimum (100%) hingga kecepatan minimum (0%) dengan step 1%
 - iii) 100%: pengesetan kecepatan motor maksimum
 - iv) 10%: pengesetan kecepatan motor 10% dari kecepatan maksimum
 - e) Waktu = Waktu + 2 detik: lama waktu instruksi adalah 2 detik
 - f) Waktu = Waktu + 3 detik: lama waktu instruksi adalah 3 detik

3.4 Pengujian Alat

Untuk mengetahui unjuk kerja alat apakah sesuai dengan yang direncanakan maka dilakukan pengujian rangkaian. Pengujian dilakukan pada masing-masing blok dan secara keseluruhan.

1) Pengujian rangkaian *multivibrator*

Pengujian rangkaian *multivibrator* bertujuan untuk mengetahui frekuensi serta tegangan keluaran *multivibrator*. Dengan menggunakan osiloskop frekuensi dan tegangan keluaran *multivibrator* dapat diketahui.

2) Pengujian rangkaian *charge pump*

Pengujian rangkaian *charge pump* bertujuan untuk mengetahui tegangan keluaran *charge pump*. Dengan menggunakan osiloskop tegangan keluaran *charge pump* dapat diketahui.

3) Pengujian rangkaian *driver* optik

Pengujian rangkaian *driver* optik bertujuan untuk mengetahui respon *driver* optik terhadap sinyal masukan berupa sinyal arah maupun sinyal kecepatan dengan metode pwm. Dengan menggunakan osiloskop respon rangkaian *driver* optik terhadap sinyal masukan dapat diketahui.

4) Pengujian rangkaian *H-bridge* E-MOSFET kanal N

Pengujian rangkaian *H-bridge* E-MOSFET kanal N bertujuan untuk mengetahui respon rangkaian *H-bridge* E-MOSFET kanal N terhadap masukan berupa sinyal arah dan kecepatan. Dengan menggunakan osiloskop respon rangkaian *H-bridge* E-MOSFET kanal N terhadap sinyal masukan dapat diketahui.

5) Pengujian Alat Keseluruhan

Pengujian keseluruhan sistem dilakukan dengan menyambungkan blok-blok perangkat keras dan mengoperasikan alat ini pada plan simulasi. Operasional plan simulasi mengikuti prosedur perangkat lunak. Pengujian alat secara keseluruhan bertujuan untuk mengetahui unjuk kerja sistem secara keseluruhan ketika telah diaplikasikan pada plan simulasi. Pengujian alat secara keseluruhan berupa pengujian sinkronisasi gerak dan uji ketahanan sistem yang diterapkan pada plan simulasi dengan bobot 10kg dan dijalankan dalam waktu 7 menit.

3.5 Pengambilan Kesimpulan dan Saran

Pada tahap ini akan diambil kesimpulan dari hasil perancangan, pembuatan, pengujian dan analisis terhadap alat yang dibuat. Dari hasil perancangan dan pembuatan akan dapat disimpulkan cara merancang yang tepat untuk alat tersebut. Dari hasil pengujian dan analisis akan dapat disimpulkan tentang rekomendasi penggunaan alat tersebut untuk robot KRI maupun KRCI. Tahap yang paling akhir adalah pengambilan saran untuk penelitian selanjutnya sehingga bisa memberikan langkah-langkah penyempurnaan kekurangan yang ada dan mengembangkan pada tingkat pokok kajian yang lebih lanjut.

BAB IV

PERANCANGAN DAN PEMBUATAN

Perancangan dalam skripsi ini bertujuan untuk merancang bagian-bagian alat dan menentukan besarnya nilai komponen yang dipilih, sedangkan pembuatan bertujuan untuk menghasilkan setiap bagian sistem.

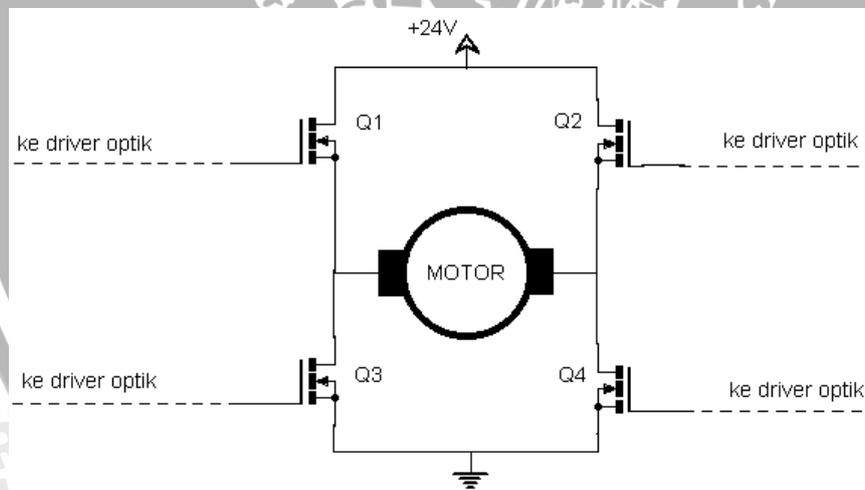
4.1 Perancangan Perangkat Keras

Perancangan perangkat keras dalam skripsi ini meliputi perancangan *H-bridge* E-MOSFET kanal N, perancangan *driver* optik, perancangan *multivibrator*, dan perancangan *charge pump*.

4.1.1 Perancangan *H-bridge* E-MOSFET Kanal N

H-bridge E-MOSFET kanal N merupakan suatu rangkaian *H-bridge* yang terdiri dari 4 E-MOSFET kanal N yang berfungsi untuk mengatur arah dan kecepatan perputaran rotor pada motor.

Susunan *H-bridge* E-MOSFET kanal N dengan motor ditunjukkan dalam Gambar 4.1.



Gambar 4.1. Susunan *H-bridge* E-MOSFET Kanal N

FET yang digunakan adalah IRFZ44N dengan spesifikasi sebagai berikut:

- $V_{DS\ max} = 55V$
- $I_{D\ max} = 49A$
- $R_{DS\ on\ max} = 22\Omega$
- $V_{GS\ max} = 20V$
- $V_{GS\ threshold} = 3V$

Alasan pemilihan IRFZ44N sebagai komponen FET yang akan digunakan adalah karena IRFZ44N memiliki $I_{D \max}$ cukup besar dan $R_{DS \text{ on } \max}$ lebih kecil dibanding beberapa jenis E-MOSFET kanal N lain, contohnya IRF520, IRF540, IRF630, IRF720, IRF820, dan IRFZ40. Dengan $I_{D \max}$ yang cukup besar dan $R_{DS \text{ on } \max}$ yang kecil membuat IRFZ44N tidak cepat panas ketika dilewati arus yang cukup besar.

Untuk aplikasi *driver* motor, FET selalu dikondisikan dalam keadaan saturasi atau *cut off*-nya. Hal ini dimaksudkan agar tidak terlalu banyak daya yang terbuang dalam FET itu sendiri.

Untuk E-MOSFET kanal N syarat agar komponen dalam kondisi *cut off* adalah ketika $V_{GS} < V_{\text{threshold}}$. Dengan $V_{\text{threshold}} \text{ IRFZ44N} = 3 \text{ V}$, maka $V_{GS \text{ cut off}}$ yang digunakan kurang dari 3 V. V_{GS} yang digunakan adalah 0V.

Untuk E-MOSFET kanal N syarat agar komponen dalam kondisi aktif saturasi adalah ketika $V_{GS} > V_{\text{threshold}}$, dan $V_{DS} > (V_{GS} - V_{\text{threshold}})$. Dengan V_{DS} yang digunakan adalah sebesar 24V, maka $V_{GS} < 27\text{V}$. Mengingat $V_{GS \max} = 20 \text{ V}$, maka $3\text{V} < V_{GS} < 20\text{V}$. V_{GS} saturasi yang digunakan adalah 10V. Untuk membatasi tegangan V_{GS} saturasi ini digunakan dioda zener 10V.

FET akan berfungsi seperti saklar yang dikontrol secara elektronik karena FET selalu dalam kondisi saturasi dan *cut off*. Karena berfungsi seperti saklar inilah maka di antara kaki-kaki motor akan timbul suatu tegangan balik yang cukup besar yang diakibatkan perubahan arus yang melalui motor secara besar dan mendadak. Tegangan balik yang cukup besar tersebut dapat muncul jika terjadi pengereman motor, awal rotor berputar dengan kecepatan maksimum, atau perubahan arah motor.

Untuk melindungi FET dari tegangan balik yang cukup besar dipasang dioda 1N4001 paralel dengan pin *drain* dan *source* FET.

Pada saat E-MOSFET dalam kondisi saturasi akan muncul suatu hambatan $R_{DS \text{ on}}$ antara pin *drain* dan *source* yang akan mengurangi tegangan yang bekerja pada motor. Tegangan minimum yang bekerja pada motor ketika rotor berputar dengan PWM maksimum adalah

$$V_{\text{motor}} = V_{\text{catu}} - 2I_{\text{max}} \cdot R_{DS \text{ on } \max}$$

$$V_{\text{motor}} = 24 - 2 \cdot 10 \cdot 77 \cdot 10^{-3}$$

$$V_{\text{motor}} = 24 - 1,54$$

$$V_{\text{motor}} = 22,46 \text{ V}$$

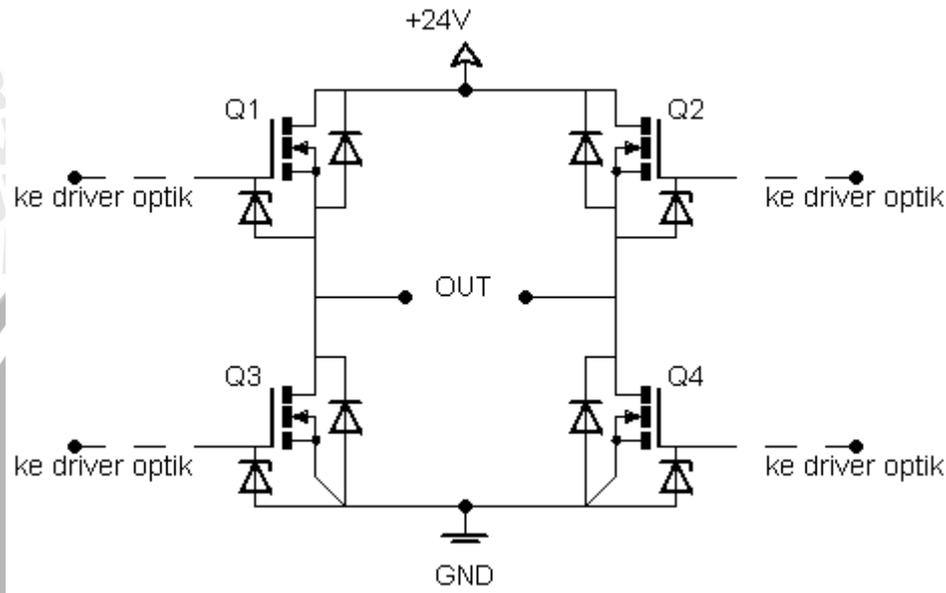
Daya maksimum yang terbuang dalam E-MOSFET ketika rotor berputar adalah:

$$P_{LOSS} = I_{max}^2 \cdot R_{DSon}$$

$$P_{LOSS} = 10^2 \cdot 77 \cdot 10^{-3}$$

$$P_{LOSS} = 7,7W$$

Berdasar perancangan, rangkaian *H-bridge* E-MOSFET kanal N yang digunakan ditunjukkan dalam Gambar 4.2.

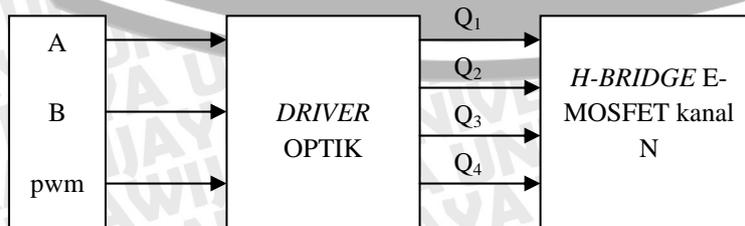


Gambar 4.2. Rangkaian *H-bridge* E-MOSFET Kanal N

4.1.2 Perancangan *Driver* Optik

Driver optik adalah suatu rangkaian yang berfungsi sebagai pen jembatan antara logika pengontrolan dengan *H-bridge* E-MOSFET kanal N. Komponen utama *driver* optik adalah *optocoupler*. Pemisahan secara optik ini dimaksudkan agar antara pengontrol dan *driver* terpisah secara elektronis, sehingga perubahan tegangan maupun arus yang terjadi pada bagian *H-bridge* E-MOSFET kanal N tidak akan mempengaruhi kinerja pengontrol.

Hubungan antara pengontrol dengan *driver* optik secara umum ditunjukkan dalam Gambar 4.3.



Gambar 4.3. Diagram Blok Hubungan Pengontrol dengan *Driver* Optik

Keterangan Gambar 4.3 sebagai berikut:

- 1) A & B adalah logika pengontrol arah
- 2) pwm adalah logika pengontrol kecepatan
- 3) Q₁ adalah logika pengontrolan pada FET Q₁ (berdasar Gambar 4.2)
- 4) Q₂ adalah logika pengontrolan pada FET Q₂ (berdasar Gambar 4.2.)
- 5) Q₃ adalah logika pengontrolan pada FET Q₃ (berdasar Gambar 4.2)
- 6) Q₄ adalah logika pengontrolan pada FET Q₄ (berdasar Gambar 4.2)

Sesuai perancangan blok *H-bridge* E-MOSFET kanal N ditetapkan bahwa V_{GS} tiap E-MOSFET kanal N yang digunakan adalah 10V agar saturasi dan 0V agar *cut off*. Untuk E-MOSFET kanal N sisi bawah (Q₃ dan Q₄), V_G minimum yang digunakan sama dengan tetapan V_{GS}, yaitu 10V agar saturasi dan 0V agar *cut off* karena sisi *source* E-MOSFET kanal N sisi bawah terhubung dengan *ground*. Untuk E-MOSFET kanal N sisi atas (Q₁ dan Q₂) V_G minimum yang digunakan agar E-MOSFET kanal N sisi atas berada pada kondisi saturasi adalah V_{GS} + V_{motor}, yaitu 34V. Tegangan sebesar 34V dibangkitkan oleh rangkaian *charge pump*. Sedangkan V_G yang digunakan agar E-MOSFET kanal N sisi atas berada pada kondisi *cut off* adalah 0V.

FET sisi atas (Q₁ dan Q₂) tidak efektif bila dihubungkan dengan logika pengontrolan arah karena pengontrolan kecepatan menggunakan metode pwm dengan frekuensi tertentu berarti membuat *gate* FET sisi atas dikenai sinyal dengan frekuensi tertentu pula. Perubahan dengan frekuensi yang tinggi akan membuat tegangan keluaran *charge pump* menjadi tidak stabil. Pengontrolan kecepatan dengan metode PWM terhubung dengan pengontrolan arah pada FET sisi bawah (Q₃ dan Q₄). Untuk menggabungkan logika pengontrolan arah dengan pengontrolan kecepatan digunakan transistor 2N3904.

Hubungan logika masukan dengan keluaran *driver* optik dijelaskan dalam Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Hubungan Logika Masukan dengan Keluaran *Driver* Optik

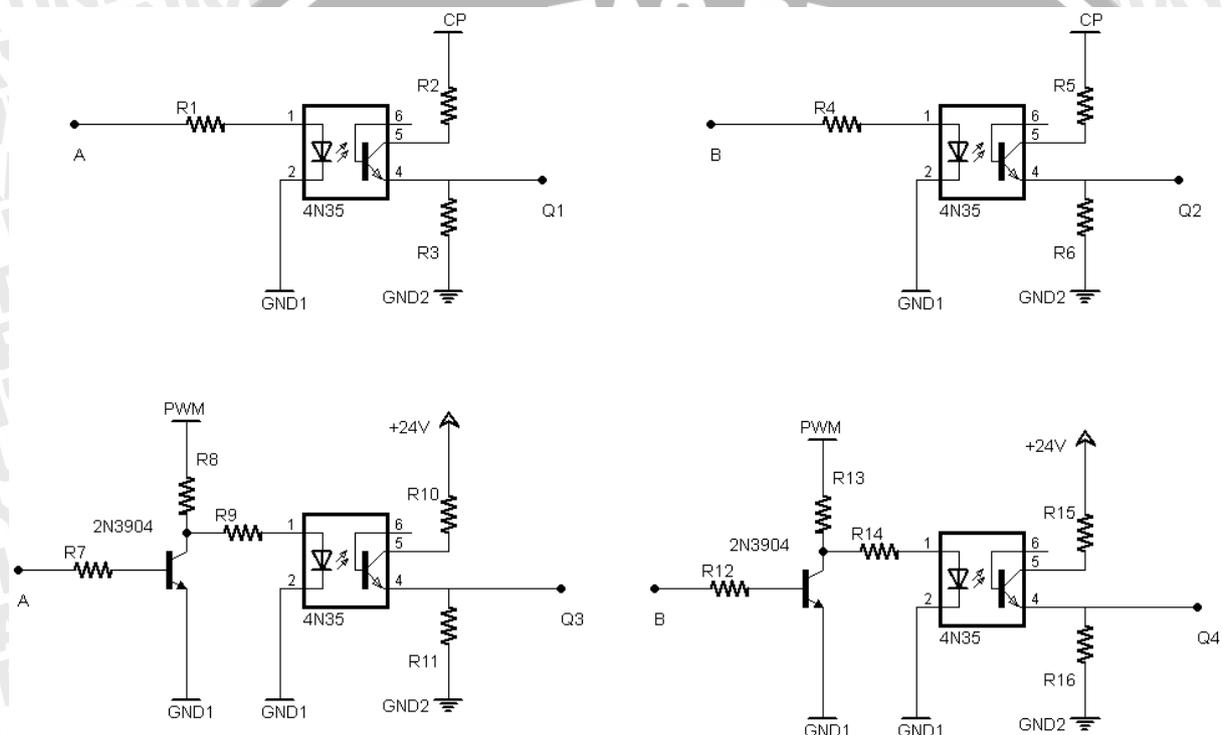
Masukan + pwm		Keluaran				Ket
A	B	Q ₁	Q ₂	Q ₃ + pwm	Q ₄ + pwm	
0	0	0	0	1	1	Motor mengerem
0	1	0	1	1	0	Rotor berputar
1	0	1	0	0	1	Rotor beputar berlawanan
1	1	1	1	0	0	Motor mengerem

Logika 1 pada masukan berarti $V_{\text{masukan}} = 5V$, sedangkan logika 0 pada masukan berarti $V_{\text{keluaran}} = 0V$. Logika 1 pada keluaran berarti E-MOSFET dalam kondisi saturasi, sedangkan logika 0 pada keluaran berarti E-MOSFET dalam kondisi *cut off*.

Dengan demikian maka:

- 1) $Q_1 = A$
- 2) $Q_2 = B$
- 3) $Q_3 + \text{pwm} = A' + \text{pwm}$
- 4) $Q_4 + \text{pwm} = B' + \text{pwm}$

Rangkaian *driver* optik ditunjukkan dalam Gambar 4.4.



Gambar 4.4. Rangkaian *Driver* Optik

CP dalam Gambar 4.4 adalah keluaran *charge pump*. Tegangan keluaran *charge pump* ini bernilai 34 V. *Optocoupler* yang akan digunakan adalah 4N25, dengan spesifikasi:

- $\text{turn on time} = 2\mu\text{s}$
- $\text{turn off time} = 2\mu\text{s}$
- $I_{F\text{max}} = 60\text{mA}$
- $V_F = 1,2 \text{ V}$
- $I_{C\text{max}} = 100\text{mA}$
- $V_{\text{Cesat}} = 0,3 \text{ V}$

Alasan pemilihan 4N25 sebagai komponen *optocoupler* yang akan digunakan adalah karena 4N25 memiliki *turn on time* dan *turn off time* cukup kecil yaitu $2\mu\text{s}$. Dengan *turn on time* dan *turn off time* yang kecil memungkinkan *optocoupler* meneruskan sinyal dengan frekuensi tinggi.

Transistor yang digunakan adalah 2N3904, dengan spesifikasi:

- $\beta_{\min} = 30$
- $I_{C \max} = 100\text{mA}$
- $V_{CE\text{sat}} = 200\text{mV}$
- $V_{BE\text{sat}} = 850\text{mV}$

Pengontrol arah dan kecepatan menggunakan ATmega8, dengan spesifikasi:

- $I_{OL} = 20 \text{ mA}$
- $I_{OH} = 20 \text{ mA}$
- $V_{OL} = 0 \text{ V}$
- $V_{OH} = 5 \text{ V}$

4.1.2.1 Perancangan Nilai Resistor untuk Q_1 dan Q_2

Perancangan nilai resistor R_1 dan R_4 sebagai berikut:

$$R_{1\min} = R_{4\min} = \frac{V_A - V_F}{I_{OH}}$$

$$R_{1\min} = R_{4\min} = \frac{5 - 1,2}{20 \cdot 10^{-3}} = \underline{\underline{190\Omega}}$$

Nilai R_1 dan R_4 yang akan digunakan dalam sistem adalah 220Ω .

Dengan nilai R_1 dan $R_4 = 220\Omega$, maka:

$$I_{OH} = \frac{V_A - V_F}{R_{1,3}}$$

$$I_{OH} = \frac{5 - 1,2}{220} = 1,727 \cdot 10^{-2} \text{ A} = 17,27 \text{ mA}$$

R_2 dan R_5 merupakan resistor pembatas arus bagi dioda zener yang dipasang pada gate FET Q_1 dan Q_2 . Perancangan nilai resistor R_2 dan R_5 sebagai berikut:

$$R_{2\min} = R_{5\min} = \frac{V_{CP} - V_{CE\text{sat}} - V_Z - V_{\text{motor}}}{I_{Z \max}}$$

$$R_{2\min} = R_{5\min} = \frac{34 - 0,3 - 10 - 24}{40 \cdot 10^{-3}} = \underline{\underline{-7,5\Omega}}$$

Nilai R_2 dan R_5 yang akan digunakan dalam sistem adalah 0Ω .

Perancangan nilai resistor R_3 dan R_6 sebagai berikut:

$$R_{3\min} = R_{6\min} = \frac{V_{CP} - V_{CEsat}}{I_{C\max}}$$

$$R_{3\min} = R_{6\min} = \frac{34 - 0,3}{100 \cdot 10^{-3}} = \underline{\underline{337\Omega}}$$

Nilai R_3 dan R_6 yang akan digunakan dalam sistem adalah $1M\Omega$. R_3 dan R_6 berfungsi juga sebagai pembatas arus untuk *charge pump*.

Dioda zener yang digunakan pada kaki gate FET adalah ZPD10 dengan V_Z sebesar 10V. Pada ZPD10, arus yang mengalir ketika $V_Z = 10V$ adalah 5mA. Oleh karena itu maka I_C yang mengalir pada 4N25 adalah :

$$I_C = \frac{34 - 0,3}{10^6} + 5 \cdot 10^{-3}$$

$$I_C = 33,7 \cdot 10^{-6} + 5 \cdot 10^{-3}$$

$$I_C \approx 5mA$$

4.1.2.2 Perancangan Nilai Resistor untuk Q_3 dan Q_4

Perancangan nilai resistor R_7 dan R_{12} sebagai berikut:

$$R_{7\min} = R_{12\min} = \frac{V_A - V_{BEsat}}{I_{B\max}}$$

$$R_{7\min} = R_{12\min} = \frac{V_A - V_{BEsat}}{I_{C\max} / \beta_{\min}}$$

$$R_{7\min} = R_{12\min} = \frac{5 - 0,85}{100 \cdot 10^{-3} / 30} = \underline{\underline{1245\Omega}}$$

Nilai R_7 dan R_{12} yang akan digunakan dalam sistem adalah $1,5k\Omega$.

Dengan nilai R_7 dan $R_{12} = 1,5k\Omega$, maka:

$$I_B = \frac{V_A - V_{BEsat}}{R_{7,12}}$$

$$I_B = \frac{5 - 0,85}{1,5 \cdot 10^3} = 2,767 \cdot 10^{-3} = 2,767mA$$

Perancangan nilai resistor R_8 dan R_{13} sebagai berikut:

$$R_{8\min} = R_{13\min} = \frac{24 - V_{CEsat}}{I_C}$$

$$R_{8\min} = R_{13\min} = \frac{24 - 0,2}{10 \cdot 10^{-3}} = \underline{\underline{2380\Omega}}$$

Nilai R_8 dan R_{13} yang akan digunakan dalam sistem adalah $2,7k\Omega$.

Dengan nilai R_8 dan $R_{13} = 2,7k\Omega$, maka:

$$I_C = \frac{24 - V_{CEsat}}{R_{8,13}}$$

$$I_C = \frac{24 - 0,2}{2,7 \cdot 10^3} = 8,815 \cdot 10^{-3} = 8,815mA$$

Perancangan nilai resistor R_9 dan R_{14} sebagai berikut:

$$R_{9min} = R_{14min} = \frac{24 - V_F - R_8 \cdot I_{Fmax}}{I_{Fmax}}$$

$$R_{9min} = R_{14min} = \frac{24 - 1,2 - 2,7 \cdot 10^3 \cdot 60 \cdot 10^{-3}}{60 \cdot 10^{-3}} = \underline{\underline{-2320\Omega}}$$

Nilai R_9 dan R_{14} yang akan digunakan dalam sistem adalah 0Ω

Dengan nilai R_9 dan $R_{14} = 0\Omega$, maka:

$$I_F = \frac{24 - V_F}{(R_{9,14} + R_{8,13})}$$

$$I_F = \frac{24 - 1,2}{(0 + 2,7 \cdot 10^3)} = 8,44 \cdot 10^{-3} = 8,44mA$$

R_{10} dan R_{15} merupakan resistor pembatas arus bagi dioda zener yang dipasang pada gate FET Q3 dan Q4. Perancangan nilai resistor R_{10} dan R_{15} sebagai berikut:

$$R_{10min} = R_{15min} = \frac{24 - V_{CEsat} - V_Z}{I_{Zmax}}$$

$$R_{10min} = R_{15min} = \frac{24 - 0,3 - 10}{40 \cdot 10^{-3}} = \underline{\underline{342,5\Omega}}$$

Nilai R_{10} dan R_{15} yang akan digunakan dalam sistem adalah 470Ω .

Dengan nilai R_{10} dan $R_{15} = 470\Omega$, maka:

$$I_Z = \frac{24 - V_{CEsat} - V_Z}{R_{10,15}}$$

$$I_Z = \frac{24 - 0,3 - 10}{470} = 2,91 \cdot 10^{-2} = 29,1mA$$

Jika tidak dihubungkan dengan blok H-bridge E-MOSFET kanal N, maka tegangan output Q3 dan Q4 dipengaruhi oleh bagi tegangan antara V pada $R_{10,15}$, V_{CEsat} , dan V pada $R_{11,16}$. Perancangan nilai resistor R_{11} dan R_{16} sebagai berikut:

$$R_{11} = R_{16} = \frac{24 - V_{CEsat} - R_{10} \cdot I_C}{I_C}$$

$$R_{11} = R_{16} = \frac{24 - 0,3 - 470 \cdot I_C}{I_C}$$

$$R_{11} = R_{16} = \frac{23,7 - 470 \cdot I_C}{I_C}$$

Agar $V_{out} = 10V$, maka:

$$470 \cdot I_C = 13,7V$$

$$I_C = \frac{13,7}{470} = 29,1mA$$

Sehingga:

$$R_{11} = R_{16} = \frac{10}{29,1 \cdot 10^{-3}}$$

$$R_{11} = R_{16} = \underline{\underline{343,6\Omega}}$$

Dengan adanya dioda zener pada gate FET, maka nilai R_{11} dan R_{16} pada perancangan merupakan nilai minimum. Nilai R_{11} dan R_{16} yang akan digunakan dalam sistem adalah 470Ω .

Dengan nilai R_{11} dan $R_{16} = 470\Omega$, maka:

$$I_C = \frac{24 - V_{CEsat}}{R_{10,15} + R_{11,16}}$$

$$I_C = \frac{24 - 0,3}{470 + 470} = 2,52 \cdot 10^{-2} = 25,2mA$$

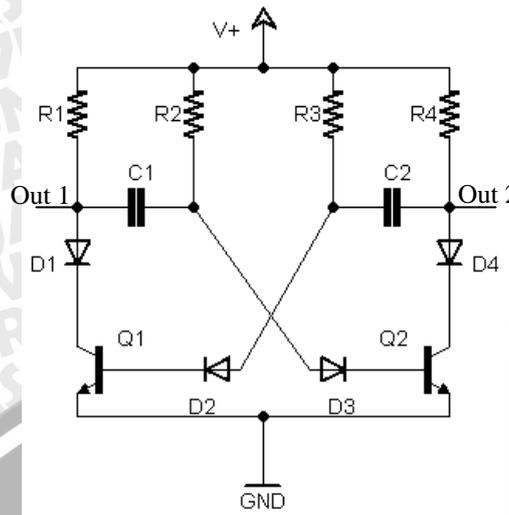
4.1.3 Perancangan Multivibrator

Multivibrator yang digunakan adalah multivibrator jenis *astable*. Sinyal keluaran multivibrator ini nantinya akan digunakan oleh *charge pump* untuk meningkatkan tegangan. Sesuai dengan rumus (2-6),

$$V_{out} = V_{in} + N \left(\left(\frac{C}{C + C_s} \right) \cdot V_{\phi} - V_d - \frac{I_{out}}{(C + C_s) \cdot f_{osc}} \right) - V_d$$

tegangan keluaran *charge pump* akan semakin tinggi jika f_{osc} dan V_{ϕ} yang dihasilkan multivibrator semakin besar. f_{osc} merupakan frekuensi sinyal keluaran multivibrator, sedangkan V_{ϕ} merupakan tegangan *peak-to-peak* keluaran multivibrator. f_{osc} dan V_{ϕ} ini harus lebih besar dari nol.

Rangkaian multivibrator *astable* yang digunakan dalam sistem ditunjukkan dalam Gambar 4.5.



Gambar 4.5. Rangkaian *Multivibrator Astable*

Transistor yang digunakan adalah 2N3904, dengan spesifikasi:

- $\beta_{min} = 30$
- $I_{C\ max} = 100\text{mA}$
- $V_{CE\ saturasi} = 200\text{mV}$
- $V_{CE\ breakdown} = 40\text{V}$
- $V_{BE\ saturasi} = 850\text{mV}$
- $V_{BE\ breakdown\ min} = 5\text{V}$
- $f_{max} = 3,125\text{MHz}$

Dioda yang digunakan adalah 1N4148, dengan spesifikasi:

- $I_{F\ max} = 300\text{mA}$
- $V_{F\ max} = 800\text{mV}$
- $V_{breakdown\ min} = 100\text{V}$

Catu daya yang digunakan adalah 24V berasal dari baterai SLA. Frekuensi keluaran *multivibrator* adalah 1kHz dengan *duty cycle* 50%.

4.1.3.1 Perancangan Nilai Resistor pada Sisi Kolektor

Dengan menggunakan hukum Kirchoff II pada sisi kolektor rangkaian pada saat transistor saturasi:



$$V_+ = I_C \cdot R_C + V_{F \text{ dioda}} + V_{CEsat}$$

$$R_{C \min} = \frac{V_+ - V_{F \text{ dioda}} - V_{CEsat}}{I_{C \max}}$$

$$R_{C \min} = \frac{24 - 800 \cdot 10^{-3} - 200 \cdot 10^{-3}}{100 \cdot 10^{-3}} = \underline{\underline{230\Omega}}$$

Dengan batasan tersebut, maka nilai R_C dapat ditentukan sembarang dengan ketentuan $R_C \geq 230\Omega$. Untuk itu nilai R_C ditetapkan $1k\Omega$. Agar *duty cycle* yang dihasilkan 50%, maka $R_C = R_1 = R_4 = 1k\Omega$.

Dengan nilai $R_C = 1k\Omega$, maka arus kolektor ketika transistor saturasi adalah:

$$I_C = \frac{V_+ - V_{F \text{ dioda}} - V_{CEsat}}{R_C};$$

$$I_C = \frac{24 - 800 \cdot 10^{-3} - 200 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^3}$$

$$I_C = 23 \cdot 10^{-3} = 23mV$$

tegangan keluaran rangkaian saat transistor saturasi adalah:

$$V_{OUT \text{ sat}} = V_{F \text{ dioda}} + V_{CEsat}$$

$$V_{OUT \text{ sat}} = 800 \cdot 10^{-3} + 200 \cdot 10^{-3}$$

$$V_{OUT \text{ sat}} = 1V$$

tegangan keluaran rangkaian saat transistor cut off

$$V_{OUT \text{ CO}} = V_+$$

$$V_{OUT \text{ CO}} = 24V$$

4.1.3.2 Perancangan Nilai Resistor dan Kapasitor pada Sisi Basis

Dengan menggunakan hukum Kirchoff II pada sisi basis rangkaian:

$$V_+ = I_B \cdot R_B + V_{F \text{ dioda}} + V_{BEsat}$$

$$R_B = \frac{V_+ - V_{F \text{ dioda}} - V_{BEsat}}{I_B}$$

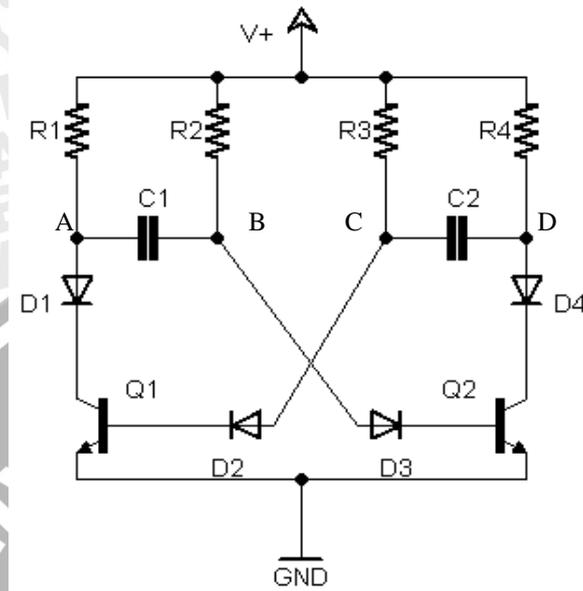
$$R_{B \min} = \frac{V_+ - V_{F \text{ dioda}} - V_{BEsat}}{\left(I_{C \max} / \beta_{\min} \right)}$$

$$R_{B \min} = \frac{24 - 800 \cdot 10^{-3} - 850 \cdot 10^{-3}}{\left(100 \cdot 10^{-3} / 30 \right)}$$

$$R_{B \min} = \frac{22,35}{3,33 \cdot 10^{-3}} = \underline{\underline{6711,71\Omega}}$$

Agar *duty cycle* yang dihasilkan 50%, maka $R_B = R_2 = R_3$.

Rangkaian multivibrator dengan titik-titik yang akan dianalisis untuk penentuan nilai resistor dan kapasitor yang mempengaruhi frekuensi ditunjukkan dalam Gambar 4.6.



Gambar 4.6. Rangkaian *Multivibrator*

Multivibrator akan menghasilkan sinyal persegi dengan cara Q_1 dan Q_2 saturasi dan *cut off* secara bergantian. Misal kondisi *steady* pertama Q_1 saturasi dan Q_2 *cut off*, maka tegangan pada titik A, B, C, dan D adalah:

$$1) V_A = V_{F D1} + V_{CE sat Q1}$$

$$V_A = 0,8 + 0,2$$

$$V_A = 1 V$$

$$2) V_B \text{ akan berubah secara eksponensial dari } ((V_{CE sat Q1} + V_{F D1}) + (V_{BE sat Q2} + V_{F D3}) - V_{catu}) \text{ hingga } (V_{BE sat Q2} + V_{F D3})$$

$$3) V_C = V_{F D2} + V_{BE sat Q1}$$

$$V_C = 0,8 + 0,85$$

$$V_C = 1,65V$$

$$4) V_D = V_{catu}$$

$$V_D = 24V$$

Pada kondisi *steady* kedua Q_1 *cut off* dan Q_2 saturasi. Maka tegangan pada titik A, B, C, D adalah:

$$1) V_A = V_{catu}$$

$$V_A = 24V$$

$$2) V_B = V_{FD3} + V_{BE\ sat\ Q2}$$

$$V_B = 0,8 + 0,85$$

$$V_B = 1,65V$$

$$3) V_C \text{ akan berubah secara eksponensial dari } ((V_{CE\ sat\ Q2} + V_{FD4}) + (V_{BE\ sat\ Q1} + V_{FD2}) -$$

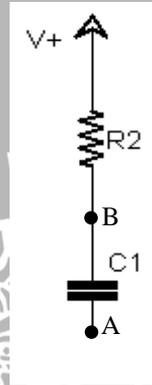
$$V_{catu})) \text{ hingga } (V_{BE\ sat\ Q1} + V_{FD2})$$

$$V_D = V_{FD4} + V_{CE\ sat\ Q2}$$

$$V_D = 0,8 + 0,2$$

$$V_D = 1\ V$$

Frekuensi sinyal keluaran *multivibrator* ditentukan oleh waktu *charge* kapasitor C_1 dan C_2 . Sebagai contohnya waktu *charging* C_1 sejak Q_1 saturasi dan Q_2 *cut off*; Rangkaian yang mempengaruhi *charging* C_1 ditunjukkan dalam Gambar 4.7.



Gambar 4.7. Rangkaian yang Mempengaruhi *Charging* C_1

Berdasar Gambar 4.7. dapat diketahui bahwa $Z_{(s)} = R_2 + \frac{1}{sC_1}$.

Dengan analisis arus $i = i_N + i_F$, i_N dapat dihitung dengan cara sebagai berikut

$$Z_{(s)} = 0$$

$$R_2 + \frac{1}{sC_1} = 0$$

$$\frac{sR_2C_1 + 1}{sC_1} = 0$$

$$sR_2C_1 = -1$$

$$s = -\frac{1}{R_2C_2}$$

sehingga

$$i_N = I \cdot e^{st}$$

$$i_N = I \cdot e^{-\frac{t}{R_2C_1}}$$

Sedangkan i_F dihitung dengan cara:

$$i_F = \frac{V_{catu} - V_A}{Z_{(s=0)}}$$

$$i_F = \frac{24 - 1}{\left(\frac{0 \cdot R_2 C_1 + 1}{0 \cdot C_1} \right)}$$

$$i_F = \frac{23}{\infty} = 0$$

Berarti $i = I \cdot e^{-\frac{t}{R_2 C_1}}$

Pada $t = 0$

$$i = \frac{V_{catu} - V_{Bawal}}{R_2}$$

$$I \cdot e^{-\frac{t}{R_2 C_1}} = \frac{24 - ((V_{CE sat Q_1} + V_{F D_1}) + (V_{BE sat Q_2} + V_{F D_3}) - V_{catu})}{R_2}$$

$$I \cdot e^{-\frac{0}{R_2 C_1}} = \frac{24 - ((0,2 + 0,8) + (0,85 + 0,8) - 24)}{R_2}$$

$$I = \frac{24 + 21,35}{R_2}$$

$$I = \frac{45,35}{R_2}$$

Sehingga $i = \frac{45,35}{R_2} \cdot e^{-\frac{t}{R_2 C_1}}$

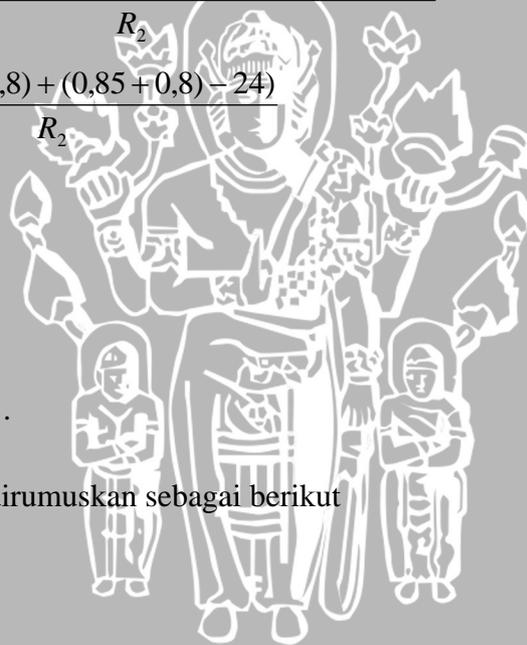
Tegangan pada C_1 dapat dirumuskan sebagai berikut

$$V_{C_1} = \frac{1}{C_1} \int i \cdot dt$$

$$V_{C_1} = \frac{1}{C_1} \int \frac{45,35}{R_2} \cdot e^{-\frac{t}{R_2 C_1}} \cdot dt$$

$$V_{C_1} = \frac{45,35}{R_2 C_1} \cdot (-R_2 C_1) \cdot e^{-\frac{t}{R_2 C_1}} + V_0$$

$$V_{C_1} = V_0 - 45,35 \cdot e^{-\frac{t}{R_2 C_1}}$$



Pada $t = 0$

$$V_{C_1 \text{ awal}} = V_0 - 45,35.e^{-\frac{0}{R_2 C_1}}$$

$$(V_{BE \text{ sat } Q_2} + V_{F D_3}) - V_{\text{catu}} = V_0 - 45,35$$

$$(0,85 + 0,8) - 24 = V_0 - 45,35$$

$$- 22,35 = V_0 - 45,35$$

$$V_0 = 23V$$

Sehingga $V_{C_1} = 23 - 45,35.e^{-\frac{t}{R_2 C_1}}$

Sedangkan,

$$V_B = 23 - 45,35.e^{-\frac{t}{R_2 C_1}} + V_{CE \text{ sat } Q_1} + V_{F D_1}$$

$$V_B = 23 - 45,35.e^{-\frac{t}{R_2 C_1}} + 0,2 + 0,8$$

$$V_B = 24 - 45,35.e^{-\frac{t}{R_2 C_1}}$$

Untuk $V_B = (V_{BE \text{ sat } Q_2} + V_{F D_3})$ waktu yang diperlukan adalah:

$$V_B = 24 - 45,35.e^{-\frac{t}{R_2 C_1}}$$

$$V_{BE \text{ sat } Q_2} + V_{F D_3} = 24 - 45,35.e^{-\frac{t}{R_2 C_1}}$$

$$0,85 + 0,8 = 24 - 45,35.e^{-\frac{t}{R_2 C_1}}$$

$$e^{-\frac{t}{R_2 C_1}} = \frac{24 - 1,65}{45,35}$$

$$e^{-\frac{t}{R_2 C_1}} = \frac{22,35}{45,35} = 0,4928$$

$$-\frac{t}{R_2 C_1} = \ln 0,4928$$

$$t = (-R_2 C_1) \cdot -0,70765$$

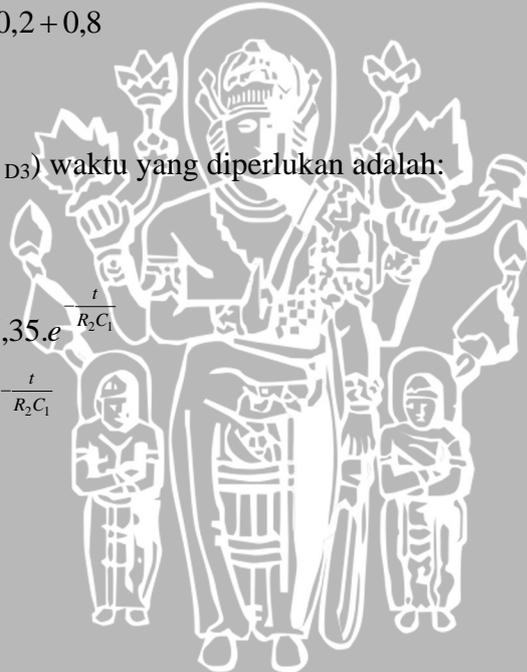
$$t = 0,70765 \cdot R_2 C_1$$

Waktu tersebut adalah waktu setengah periode sinyal keluaran *multivibrator*. Periode sinyal keluaran *multivibrator* untuk *duty cycle* 50% adalah:

$$T = 2 \cdot 0,70765 \cdot R_2 C_1$$

$$T = 1,4153 \cdot R_2 C_1$$

Sehingga frekuensi sinyal keluaran *multivibrator* adalah:



$$f = \frac{1}{T} = \frac{0,7066}{R_2 C_1}$$

Jika dipilih nilai $C_1 = 10\text{nF}$, maka nilai R_2 dengan $f = 1\text{kHz}$ adalah:

$$R_2 = \frac{0,7066}{f \cdot C_1}$$

$$R_2 = \frac{0,7066}{10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-9}}$$

$$R_2 = 70.660 \Omega$$

Nilai resistor yang mendekati 70.660Ω adalah $68\text{k}\Omega$. Nilai R_2 ini telah sesuai dengan batasan yang telah ditetapkan awal, yaitu $R_B \geq 6711,71\Omega$. Dengan demikian ditetapkan nilai R_2 dan $R_3 = 68\text{k}\Omega$ dan nilai C_1 dan $C_2 = 10\text{nF}$.

Dengan nilai $R_B = 68\text{k}\Omega$ dan $C = 10\text{nF}$, maka arus yang mengalir pada kaki basis adalah

$$V_+ = I_B \cdot R_B + V_{F \text{ dioda}} + V_{BE \text{ sat}}$$

$$I_B = \frac{V_+ - V_{F \text{ dioda}} - V_{BE \text{ sat}}}{R_B}$$

$$I_B = \frac{24 - 800 \cdot 10^{-3} - 850 \cdot 10^{-3}}{68 \cdot 10^3}$$

$$I_B = \frac{22,35}{68 \cdot 10^3} = 0,33\text{mA}$$

Sedangkan frekuensi sinyal keluaran multivibrator adalah

$$f = \frac{0,7066}{R_2 C_1}$$

$$f = \frac{0,7066}{68 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-9}}$$

$$f = 1039,18\text{Hz}$$

4.1.4 Perancangan Charge Pump

Charge pump adalah rangkaian yang dapat melipatgandakan tegangan masukan. Tegangan keluaran *charge pump* berfungsi untuk men-drive E-MOSFET kanal N sisi atas.

Berdasar sub bab 4.1.1. tentang perancangan *H-bridge* E-MOSFET kanal N, karena V_{GS} yang diterapkan pada E-MOSFET kanal N sisi atas adalah 10V , tegangan maksimum yang akan diterapkan pada motor adalah 24V , dan V_{DS} E-MOSFET kanal N mendekati 0 ketika dalam kondisi saturasi, maka ketika motor bekerja, pada *charge pump* berlaku:

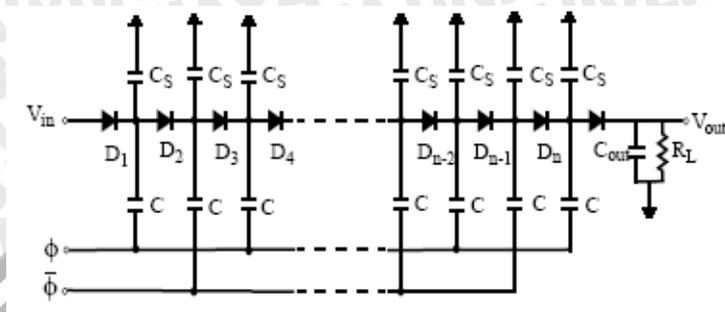


$$V_{CP} = V_{GS \text{ FET sisi atas}} + V_{motor} + V_{DS \text{ FET sisi bawah}} ; V_{DS on} \approx 0V$$

$$V_{CP} = 10 + 24 + 0$$

$$V_{CP} = 34V$$

Charge pump yang digunakan dalam sistem adalah charge pump Dickson yang ditunjukkan dalam Gambar 4.8.



Gambar 4.8. Charge pump Dickson

Sesuai dengan rumus (2-6), yaitu:

$$V_{out} = V_{in} + N \left(\left(\frac{C}{C + C_s} \right) \cdot V_{\phi} - V_d - \frac{I_{out}}{(C + C_s) \cdot f_{osc}} \right) - V_d$$

dengan

$$V_{out} = 34V$$

$$V_{in} = V_{catu} = 24V$$

$$V_{\phi} = V_{out \text{ multivibrator}} = 24 - 1 = 23V$$

$$f_{osc} = 1kHz$$

, maka

$$34 = 24 + N \left(\left(\frac{C}{C + C_s} \right) \cdot 23 - V_d - \frac{I_{out}}{(C + C_s) \cdot 10^3} \right) - V_d$$

Dioda yang digunakan untuk charge pump adalah 1N4148 dengan V_F sebesar 0,8 V.

Tidak ada ketentuan khusus untuk nilai kapasitor. Hanya terdapat ketentuan bahwa $C \gg C_s$, sehingga dipilih nilai $C = 100 \text{ nF}$ dan $C_s = 100 \text{ pF}$. Sedangkan C_{out} digunakan untuk menahan agar tegangan tetap konstan. Semakin besar C_{out} maka kemampuan hantar arus charge pump semakin besar. Dipilih nilai C_{out} sebesar $1\mu\text{F}$.

I_{out} adalah arus yang dibebankan pada rangkaian charge pump. Ketika FET sisi atas dalam keadaan on, maka arus mengalir dari charge pump menuju zener pada gate FET. Berdasar sub bab 4.1.2.1, arus ini bernilai 5mA. Ketika FET dalam keadaan off, maka arus mengalir dari charge pump melalui resistor pull down menuju ground. Berdasar sub bab 4.1.2.1, arus ini bernilai 5mA.

Dengan mensubstitusikan nilai yang didapat, maka

$$34 = 24 + N \left(\left(\frac{10^{-7}}{10^{-7} + 10^{-10}} \right) \cdot 23 - 0,8 - \frac{5 \cdot 10^{-3}}{(10^{-7} + 10^{-10}) \cdot 10^3} \right) - 0,8$$

$$34 = 23,2 + N((0,999) \cdot 23 - 0,8 - 0,3397)$$

$$10,8 = N(21,8373)$$

$$N = \frac{10,8}{21,8373} = 0,495$$

Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa penggunaan *charge pump* minimal 1 *stage* dapat digunakan untuk men-*drive* E-MOSFET kanal N sisi atas. Penambahan *stage* akan menambah tegangan keluaran *charge pump*.

Dengan *charge pump* 1 *stage*, maka tegangan keluaran *charge pump* yang terbeban menjadi:

$$V_{out} = V_{in} + N \left(\left(\frac{C}{C + C_s} \right) \cdot V_{\phi} - V_d - \frac{I_{out}}{(C + C_s) \cdot f_{osc}} \right) - V_d$$

$$V_{out} = 24 + 1 \cdot \left(\left(\frac{10^{-7}}{10^{-7} + 10^{-10}} \right) \cdot 23 - 0,8 - \frac{5 \cdot 10^{-3}}{(10^{-7} + 10^{-10}) \cdot 10^3} \right) - 0,8$$

$$V_{out} = 23,2 + 1 \cdot ((0,999) \cdot 23,8 - 0,8 - 0,3397)$$

$$V_{out} = 44,0373V$$

Untuk menjaga tegangan keluaran 34 V, digunakan zener 10 V pada bagian *gate* FET.

Dengan tegangan keluaran *charge pump* sebesar 44V, maka nilai R_2 dan R_5 pada driver optik, berdasar Gambar 4.4 menjadi:

$$R_{2\min} = R_{5\min} = \frac{V_{CP} - V_{CEsat} - V_Z - V_{motor}}{I_{Z\max}}$$

$$R_{2\min} = R_{5\min} = \frac{44 - 0,3 - 10 - 24}{40 \cdot 10^{-3}} = \underline{\underline{242,5\Omega}}$$

Nilai R_2 dan R_5 yang akan digunakan dalam sistem adalah 270 Ω .

Tegangan keluaran *charge pump* yang tidak terbeban adalah:

$$V_{out} = V_{in} + N \left(\left(\frac{C}{C + C_s} \right) \cdot V_{\phi} - V_d - \frac{I_{out}}{(C + C_s) \cdot f_{osc}} \right) - V_d$$

$$V_{out} = 24 + 1 \cdot \left(\left(\frac{10^{-8}}{10^{-8} + 10^{-11}} \right) \cdot 23,8 - 0,8 - \frac{0}{(10^{-8} + 10^{-11}) \cdot 10^3} \right) - 0,8$$

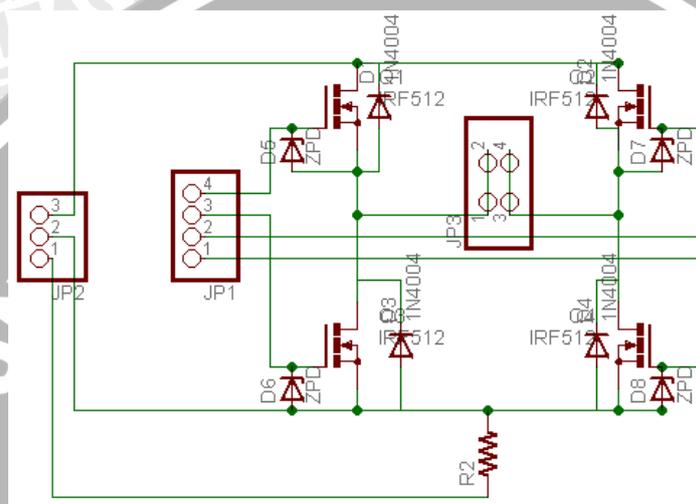
$$V_{out} = 45,377V$$

4.2 Pembuatan Perangkat Keras

Pembuatan perangkat keras dalam skripsi ini meliputi pembuatan *H-bridge* E-MOSFET kanal N, pembuatan *driver* optik, pembuatan *multivibrator*, dan pembuatan *chargepump*.

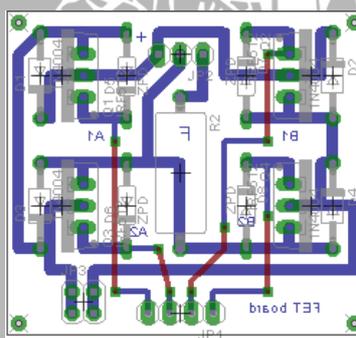
4.1.1 Pembuatan *H-bridge* E-MOSFET Kanal N

Berdasar perancangan *H-bridge* E-MOSFET kanal N dalam sub bab 4.1.1 dapat dibuat rangkaian *H-bridge* E-MOSFET kanal N dengan skematik seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.9.



Gambar 4.9. Skematik *H-bridge* E-MOSFET kanal N

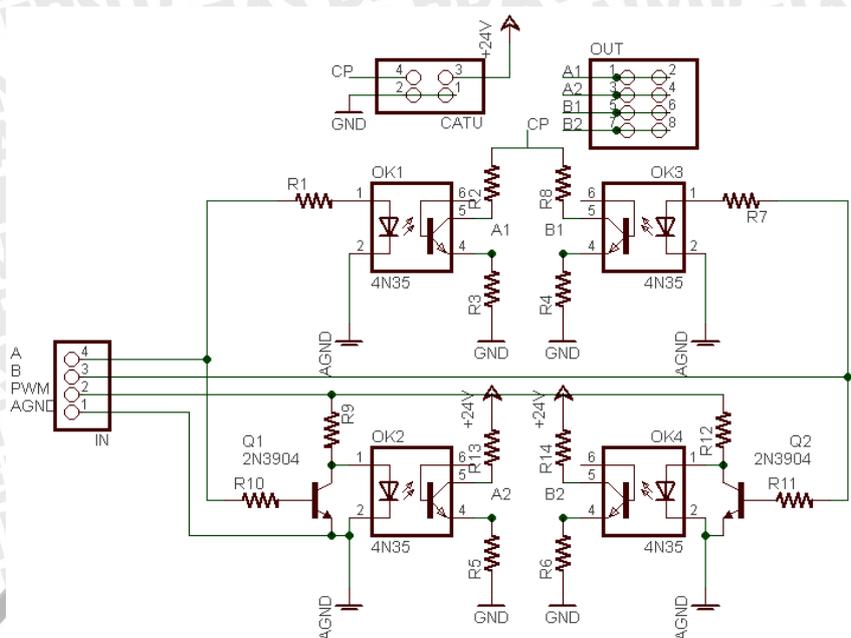
Sedangkan *layout board* *H-bridge* E-MOSFET Kanal N ditunjukkan dalam Gambar 4.10.



Gambar 4.10. *Layout Board* *H-Bridge* E-MOSFET Kanal N

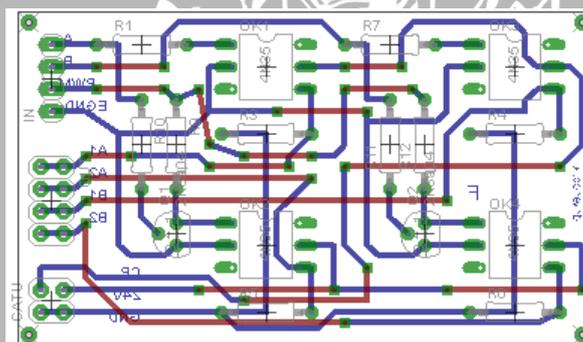
4.1.2 Pembuatan *Driver* Optik

Berdasar perancangan *driver* optik dalam sub bab 4.1.2 dapat dibuat rangkaian *driver* optik dengan skematik seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.11.



Gambar 4.11. Skematik Driver Optik

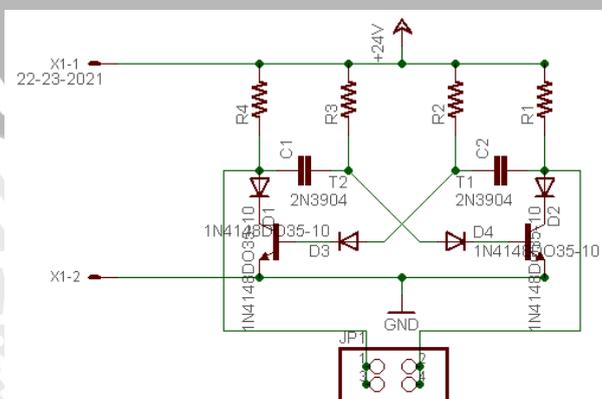
Sedangkan *layout board driver optik* ditunjukkan dalam Gambar 4.12.



Gambar 4.12. *Layout Board Driver Optik*

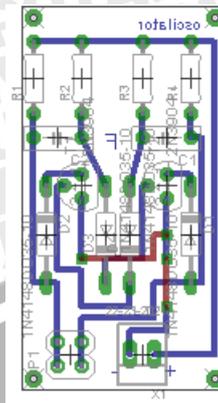
4.1.3 Pembuatan Multivibrator

Berdasar perancangan *multivibrator* dalam sub bab 4.1.3 dapat dibuat rangkaian *multivibrator* dengan skematik seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.13.



Gambar 4.13. Skematik Multivibrator

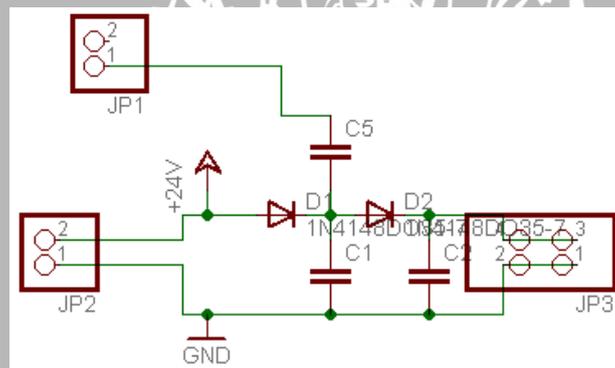
Sedangkan *layout board multivibrator* ditunjukkan dalam Gambar 4.14.



Gambar 4.14. *Layout Board Multivibrator*

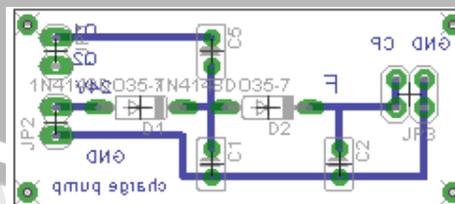
4.1.4 Pembuatan *Charge Pump*

Berdasar perancangan *charge pump* dalam sub bab 4.1.4 dapat dibuat rangkaian *charge pump* dengan skematik seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.15.



Gambar 4.15. Skematik *Charge Pump*

Sedangkan *layout board charge pump* ditunjukkan dalam Gambar 4.16.



Gambar 4.16. *Layout Board Charge Pump*

BAB V

PENGUJIAN DAN ANALISIS

Bab ini membahas pengujian rangkaian yang telah dibuat. Pengujian alat ini bertujuan untuk menentukan apakah alat yang telah dibuat berfungsi dengan baik dan sesuai dengan perancangan. Pengujian ini meliputi pengujian setiap rangkaian maupun pengujian secara keseluruhan. Pengujian setiap rangkaian ini dilakukan untuk mempermudah analisis apabila alat tidak bekerja sesuai dengan perencanaan. Pengujian dan analisis yang dilakukan meliputi:

- 1) Pengujian rangkaian *multivibrator*
- 2) Pengujian rangkaian *charge pump*
- 3) Pengujian rangkaian *driver optik*
- 4) Pengujian rangkaian *H-bridge E-MOSFET* kanal N
- 5) Pengujian alat keseluruhan

5.1 Pengujian Rangkaian *Multivibrator*

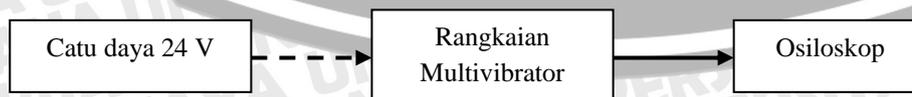
Pengujian rangkaian *multivibrator* bertujuan untuk mengetahui frekuensi serta tegangan keluaran *multivibrator*. Melalui pengujian rangkaian *multivibrator* ini diharapkan frekuensi dan tegangan keluaran *multivibrator* sesuai dengan spesifikasi perancangan, yaitu:

- 1) frekuensi 1039,18Hz
- 2) $V_{out\ cut\ off} = V_{out\ max} = 24V$
- 3) $V_{out\ saturasi} = V_{out\ min} = 1V$

Peralatan yang digunakan dalam pengujian antara lain:

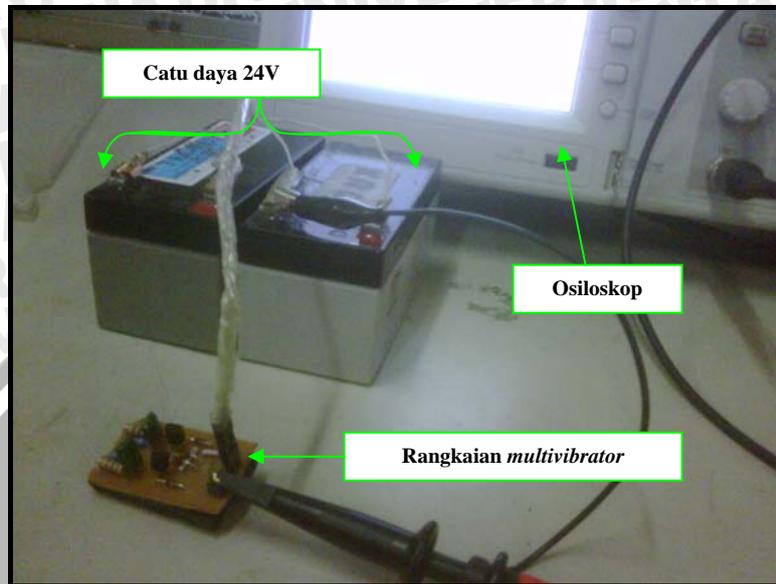
- 1) catu daya 24 V
- 2) rangkaian *multivibrator*
- 3) osiloskop

Pengujian dilakukan dengan menghubungkan peralatan sesuai dengan Gambar 5.1.



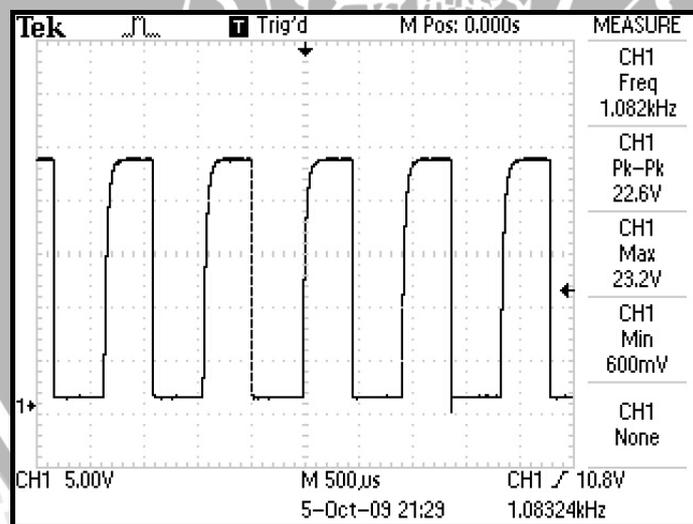
Gambar 5.1. Diagram Blok Pengujian Rangkaian *Multivibrator*

Garis panah putus-putus pada Gambar 5.1 menunjukkan jalur catu daya, sedangkan garis panah langsung pada Gambar 5.1 menunjukkan jalur data yang diamati pada osiloskop. Proses pengujian rangkaian *multivibrator* ditunjukkan dalam Gambar 5.2.



Gambar 5.2. Proses Pengujian Rangkaian *Multivibrator*

Melalui pengamatan pada osiloskop didapatkan hasil pengujian rangkaian *multivibrator* yang ditunjukkan dalam Gambar 5.3.



Gambar 5.3. Hasil Pengujian *Multivibrator*

Berdasarkan Gambar 5.3, frekuensi keluaran rangkaian *multivibrator* adalah 1,082kHz dengan tegangan keluaran maksimum 23,2V, tegangan keluaran minimum 600mV dan tegangan *peak-to-peak* 22,6V. Frekuensi keluaran *multivibrator* adalah f_{osc} sedangkan tegangan *peak-to-peak* adalah V_{ϕ} bagi *charge pump*.

Karena keluaran *multivibrator* menjadi masukan bagi rangkaian *charge pump*, dengan keluaran sesuai hasil pengujian dapat disimpulkan keluaran rangkaian *charge pump* terbeban berdasar rumus 2-6 menjadi:

$$V_{out} = V_{in} + N \left(\left(\frac{C}{C + C_s} \right) \cdot V_{\phi} - V_d - \frac{I_{out}}{(C + C_s) \cdot f_{osc}} \right) - V_d$$

$$V_{out} = 23,2 + 1 \cdot \left(\left(\frac{10^{-8}}{10^{-8} + 10^{-11}} \right) \cdot 22,6 - 0,8 - \frac{34 \cdot 10^{-6}}{(10^{-8} + 10^{-11}) \cdot 1082} \right) - 0,8$$

$$V_{out} = 23,2 + 1 \cdot ((0,999) \cdot 22,6 - 0,8 - 0,314)$$

$$V_{out} = 44,663V$$

Dengan demikian maka keluaran rangkaian *multivibrator* telah sesuai spesifikasi karena akan menghasilkan tegangan keluaran *charge pump* lebih dari 34V.

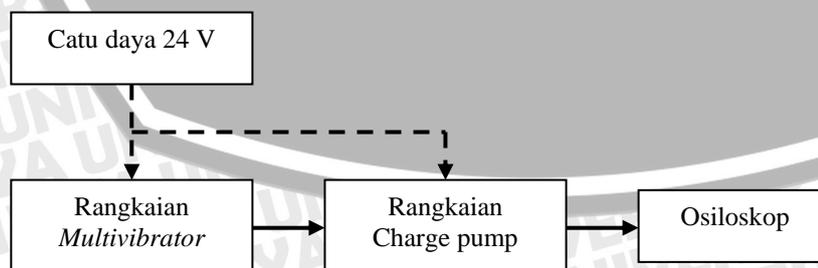
5.2 Pengujian Rangkaian Charge Pump

Pengujian rangkaian *charge pump* bertujuan untuk mengetahui tegangan keluaran *charge pump*. Melalui pengujian rangkaian *charge pump* ini diharapkan tegangan keluaran *charge pump* sesuai dengan spesifikasi perancangan, yaitu 45,377V atau minimum 34V.

Peralatan yang digunakan dalam pengujian rangkaian *charge pump* antara lain:

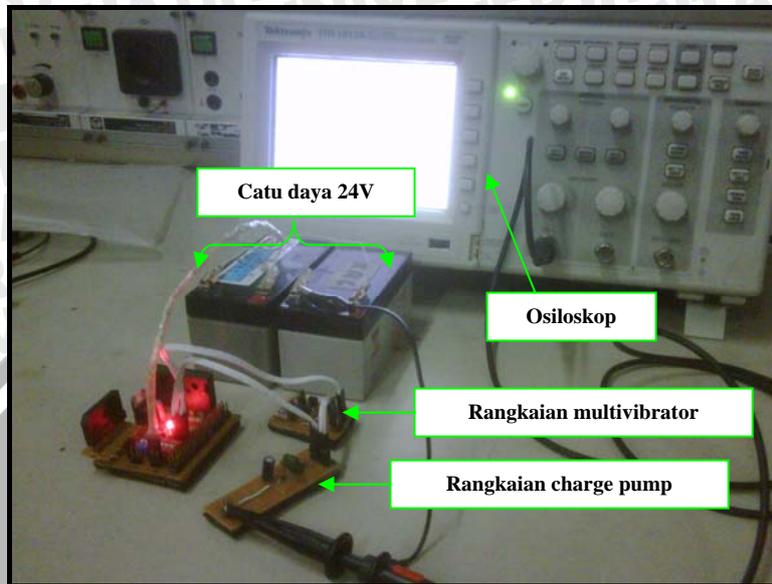
- catu daya 24 V
- rangkaian *multivibrator*
- rangkaian *charge pump*
- osiloskop

Pengujian dilakukan dengan menghubungkan peralatan sesuai dengan Gambar 5.4.



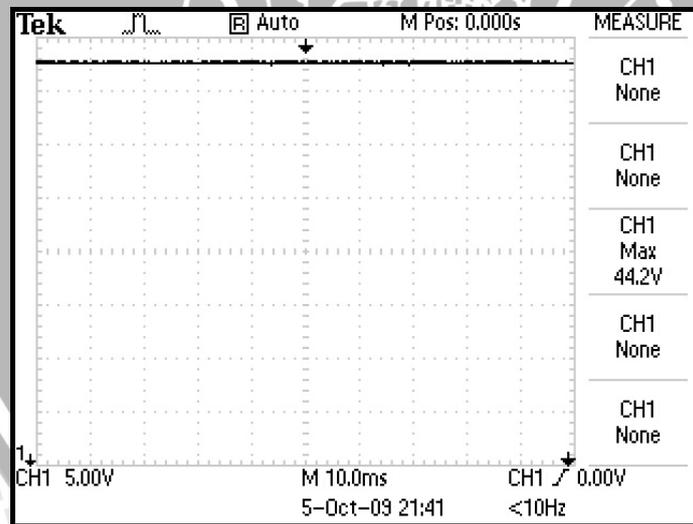
Gambar 5.4. Diagram Blok Pengujian Rangkaian *Charge Pump*

Garis panah putus-putus pada Gambar 5.4 menunjukkan jalur catu daya, sedangkan garis panah langsung pada Gambar 5.4 menunjukkan jalur data. Proses pengujian rangkaian *charge pump* ditunjukkan dalam Gambar 5.5.



Gambar 5.5. Proses Pengujian Rangkaian *Charge Pump*

Melalui pengamatan pada osiloskop didapatkan hasil pengujian rangkaian *charge pump* yang ditunjukkan dalam Gambar 5.6.



Gambar 5.6. Hasil Pengujian *Charge Pump*

Berdasarkan Gambar 5.6, tegangan keluaran maksimal *charge pump* adalah 44,2V. Dengan tegangan keluaran sebesar 44,2V maka keluaran *charge pump* telah sesuai spesifikasi yaitu lebih dari 34V

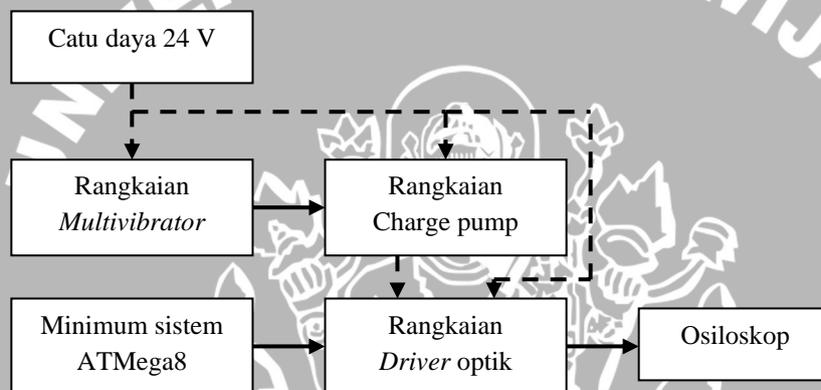
5.3 Pengujian Rangkaian *Driver* Optik

Pengujian rangkaian *driver* optik bertujuan untuk mengetahui respon *driver* optik terhadap sinyal masukan berupa sinyal arah maupun sinyal pwm.

Peralatan yang digunakan dalam pengujian antara lain:

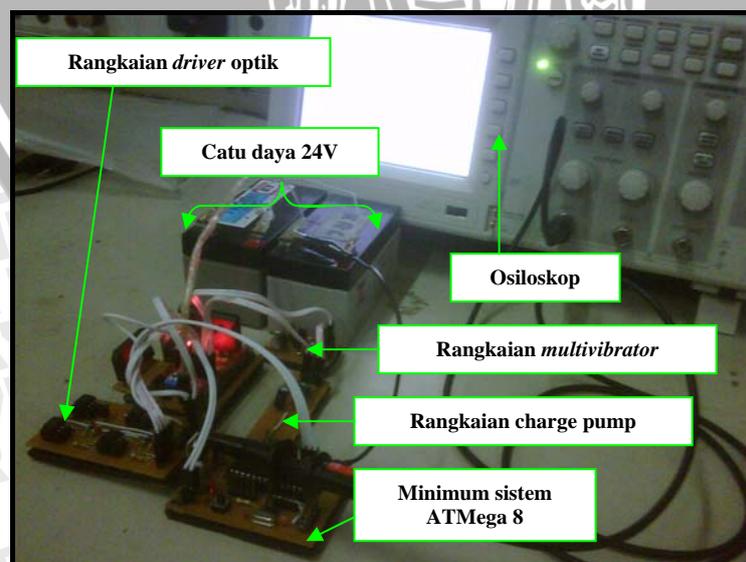
- catu daya 24 V
- rangkaian *charge pump*
- rangkaian *multivibrator*
- rangkaian *driver* optik
- osiloskop
- minimum sistem mikrokontroler ATmega8

Pengujian dilakukan dengan menghubungkan peralatan sesuai dengan Gambar 5.7.



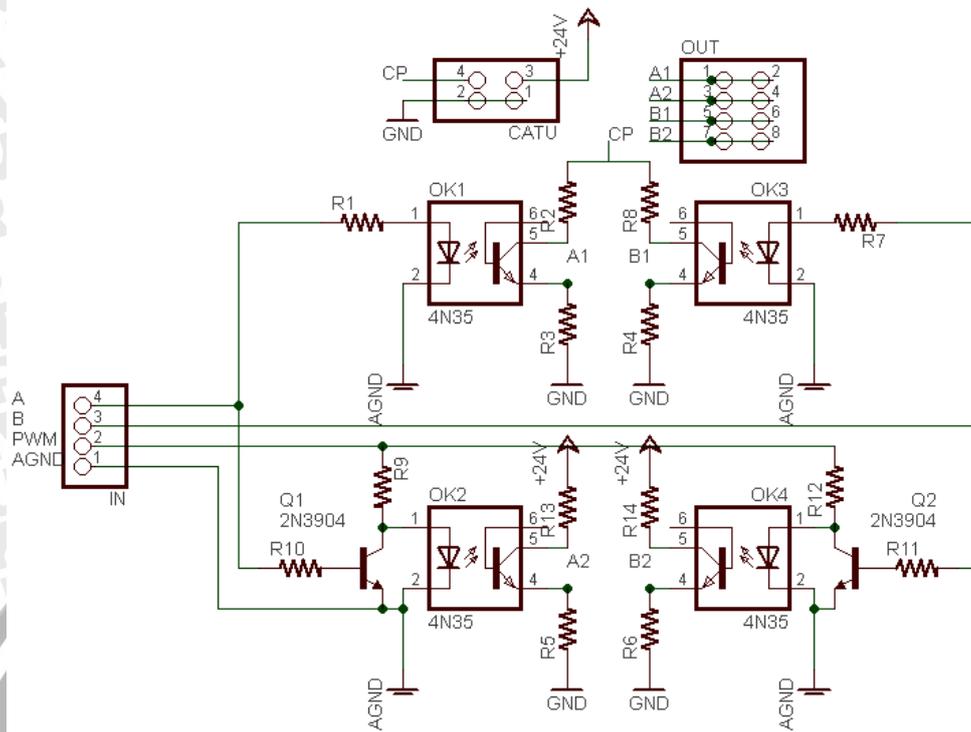
Gambar 5.7. Diagram Blok Pengujian Rangkaian *Driver* Optik

Garis panah putus-putus pada Gambar 5.7 menunjukkan jalur catu daya, sedangkan garis panah langsung pada Gambar 5.7 menunjukkan jalur data. Proses pengujian rangkaian *driver* optik ditunjukkan dalam Gambar 5.8.



Gambar 5.8. Proses Pengujian Rangkaian *Driver* Optik

Skematik rangkaian *driver* optik ditunjukkan dalam Gambar 5.9.



Gambar 5.9. Skematik Rangkaian *Driver* Optik

Tampak pada Gambar 5.9 terdapat 3 sinyal masukan untuk rangkaian *driver* optik, yaitu A dan B yang berfungsi menentukan arah serta PWM yang berfungsi menentukan kecepatan. Terdapat 4 sinyal keluaran dari *driver* optik yang nantinya menjadi masukan bagi rangkaian *H-bridge* E-MOSFET kanal N, yaitu A1, A2, B1, dan B2.

Pengujian *driver* optik terdiri atas 2 bagian, yaitu pengujian dengan sinyal arah dan pengujian dengan sinyal PWM.

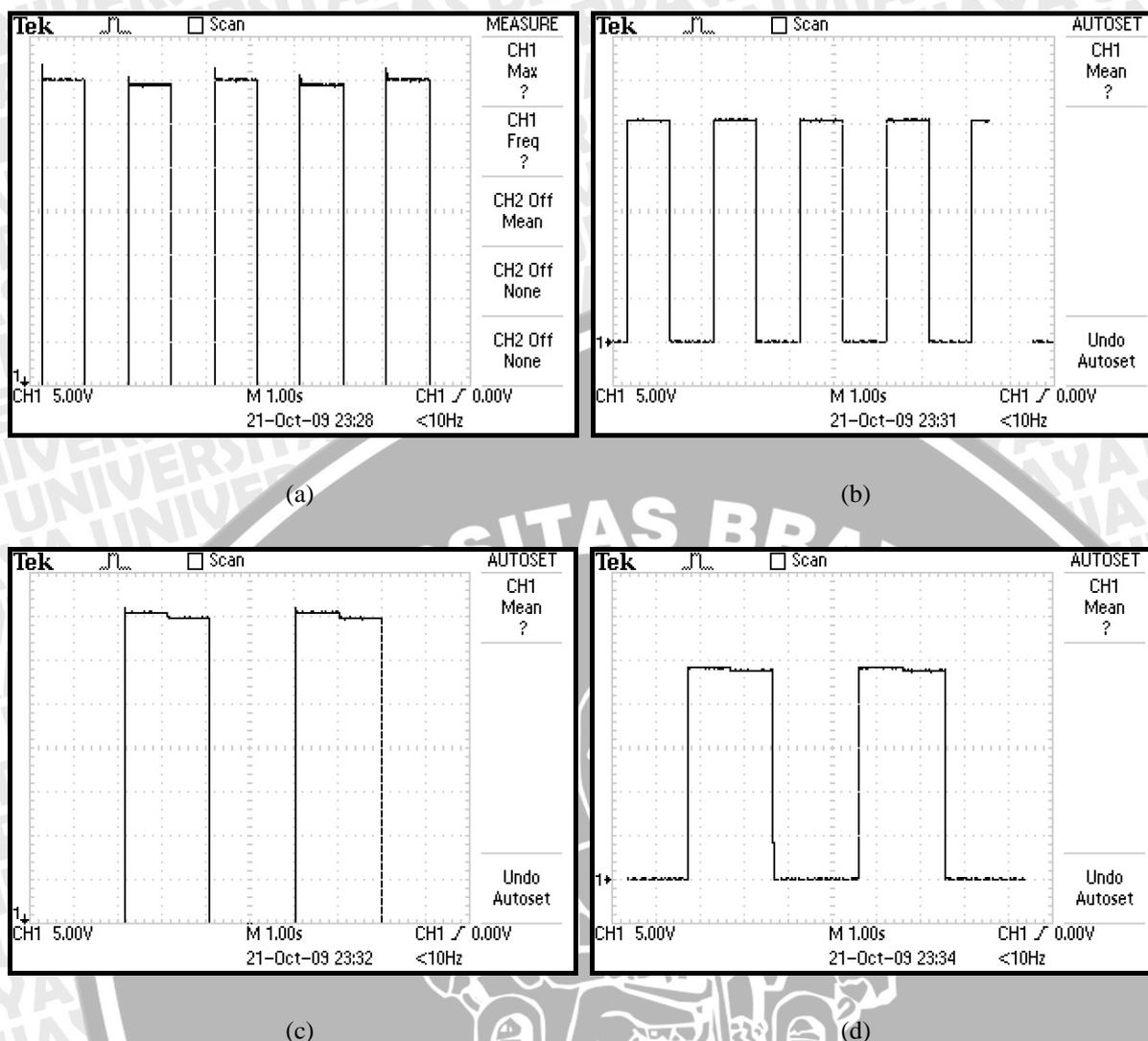
5.3.1 Pengujian *Driver* Optik dengan Sinyal Arah

Pengujian *driver* optik dengan sinyal arah ini bertujuan untuk melihat keluaran *driver* optik dengan masukan sinyal arah yang berubah-ubah.

Sinyal masukan yang diberikan adalah:

- sinyal masukan pada pin A adalah sinyal persegi dengan frekuensi 0,5 Hz
- sinyal masukan pada pin B adalah sinyal persegi dengan frekuensi 0,25 Hz
- sinyal masukan pada pin PWM adalah logika 1

Melalui pengamatan pada osiloskop didapatkan hasil pengujian rangkaian *driver* optik yang ditunjukkan dalam Gambar 5.10.



Gambar 5.10. Hasil Pengujian *Driver* Optik dengan Sinyal Arah.

(a) Keluaran A1. (b) Keluaran A2. (c) Keluaran B1. (d) Keluaran B2.

Keluaran A1, A2, B1, dan B2 adalah keluaran rangkaian *driver* optik sesuai dengan Gambar 5.9.

Berdasarkan Gambar 5.10, keluaran A1 dan A2 memiliki frekuensi 0,5Hz, sedangkan keluaran B1 dan B2 memiliki frekuensi 0,25Hz. Grafik osiloskop untuk A1 dan B1 terpotong karena osiloskop hanya mampu menampilkan tegangan maksimum 40V. Ini berarti tegangan maksimum pada A1 dan B1 lebih dari 40V. Tegangan keluaran A2 dan B2 maksimum adalah 25V dan minimum adalah 0V. Dengan demikian rangkaian *driver* optik dapat meneruskan sinyal pengendalian arah pada *H-bridge* E-MOSFET kanal N.

5.3.2 Pengujian *Driver* Optik dengan Sinyal Kecepatan (PWM)

Pengujian *driver* optik dengan sinyal PWM ini bertujuan untuk melihat keluaran *driver* optik dengan variasi frekuensi dan duty cycle masukan sinyal PWM.

Sinyal masukan yang diberikan adalah:

- sinyal masukan pada pin A adalah logika 0
- sinyal masukan pada pin B adalah logika 0
- sinyal masukan pada pin PWM adalah sinyal persegi dengan frekuensi 1kHz-9kHz dengan kenaikan 2kHz.

Melalui pengamatan pada osiloskop didapatkan hasil pengujian rangkaian *driver* optik yang ditunjukkan dalam Tabel 5.1.

Tabel 5.1. Hasil Pengujian Rangkaian *Driver* Optik

Frekuensi (kHz)	Duty cycle (%)	Tegangan Keluaran (V)							
		A1		A2		B1		B2	
		max	min	max	min	max	min	max	min
1	10	0,4	0	7,8	-0,2	0,4	0	8,6	-0,2
	50	0,4	0	7,8	0	0,4	0	8,6	0
	90	0,4	0	7,8	2,2	0,4	0	8,6	2,2
3	10	0,4	0	7	0,2	0,4	0	8	0,2
	50	0,4	0	7,8	1,2	0,4	0	8,6	1
	80	0,4	0	7,8	2,8	0,4	0	8,6	3
	90	0,4	0	7,8	3,8	0,4	0	8,6	4,2
5	10	0,4	0	7	0,2	0,4	0	8	0,2
	50	0,4	0	7,8	2	0,4	0	8,6	2,2
	60	0,4	0	7,8	3	0,4	0	8,6	3,2
7	10	0,6	-0,2	4,6	0,8	0,6	-0,2	5,4	0,8
	50	0,6	-0,2	8	2,4	0,6	-0,2	8,8	2,6
	60	0,6	-0,2	8	3,4	0,6	-0,2	8,8	3,6
9	10	0,4	0	2,2	0,6	0,4	0	2,4	0,6
	20	0,6	-0,2	4,8	1,2	0,6	-0,2	5,6	1,2
	50	0,6	-0,4	7,6	2,8	0,6	-0,2	8,4	3
	60	0,6	0,2	7,6	3,8	0,6	0,2	8,4	3,8

Keluaran A1, A2, B1, dan B2 adalah keluaran rangkaian *driver* optik sesuai dengan Gambar 5.9.

Karena $V_{GS\ threshold}$ IRFZ44N adalah 3V, dari pengujian rangkaian *driver* optik yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa *driver* optik berfungsi dengan baik untuk meneruskan sinyal PWM dengan ketentuan seperti pada Tabel 5.2.

Tabel 5.2. Hubungan Frekuensi PWM dengan Rentang *Duty Cycle* PWM pada *Driver* Optik

Frekuensi PWM	Duty cycle
1kHz	0%-100%
3kHz	0%-80%
5kHz	0%-60%
7kHz	0%-60%
9kHz	10%-50%

Berdasar Tabel 5.2, semakin tinggi frekuensi PWM menyebabkan rentang persentase *duty cycle* yang memberi dampak signifikan terhadap perubahan kecepatan semakin kecil. Dari sampel frekuensi yang diamati, frekuensi PWM 1kHz memiliki rentang *duty cycle* paling besar.

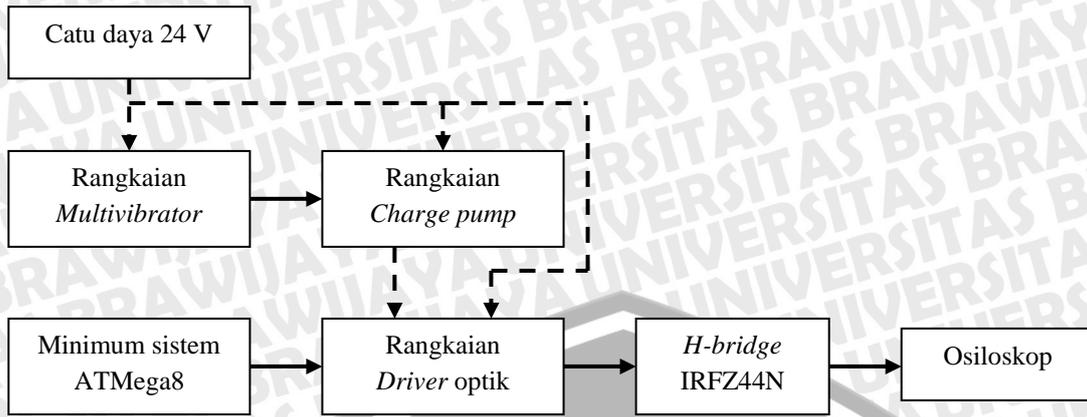
5.4 Pengujian Rangkaian *H-Bridge* E-MOSFET Kanal N

Pengujian rangkaian *H-bridge* E-MOSFET kanal N bertujuan untuk mengetahui respon rangkaian *H-bridge* E-MOSFET kanal N terhadap masukan berupa sinyal arah dan kecepatan.

Peralatan yang digunakan dalam pengujian antara lain:

- catu daya 24 V
- rangkaian *charge pump*
- rangkaian *multivibrator*
- rangkaian *driver* optik
- rangkaian *H-bridge* IRFZ44N
- osiloskop
- minimum sistem mikrokontroler ATmega8

Pengujian dilakukan dengan menghubungkan peralatan sesuai dengan Gambar 5.11.



Gambar 5.11. Diagram Blok Pengujian *H-Bridge* E-MOSFET Kanal N

Garis panah putus-putus pada Gambar 5.11 menunjukkan jalur catu daya, sedangkan garis panah langsung pada Gambar 5.11 menunjukkan jalur data.

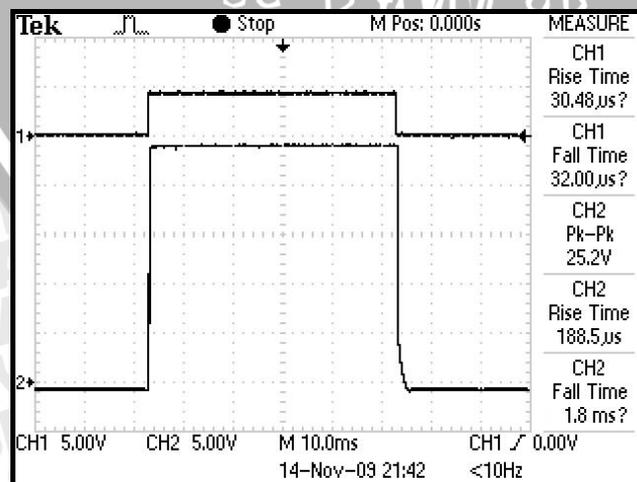
Pengujian *H-bridge* E-MOSFET kanal N terdiri atas dua bagian yaitu pengujian respon *H-bridge* E-MOSFET kanal N terhadap masukan sinyal arah dan pengujian respon *H-bridge* E-MOSFET kanal N terhadap masukan sinyal kecepatan.

5.4.1 Pengujian Respon *H-Bridge* E-MOSFET Kanal N terhadap Masukan Sinyal Arah

Pada pengujian respon *H-bridge* E-MOSFET kanal N terhadap sinyal arah, sinyal masukan yang diberikan adalah:

- Sinyal masukan pada pin A *driver* optik adalah sinyal persegi dengan frekuensi 10Hz.
- Sinyal masukan pada pin B *driver* optik adalah logika 0
- Sinyal masukan pada pin PWM *driver* optik adalah logika 1

Melalui pengamatan pada osiloskop didapatkan hasil pengujian rangkaian *H-bridge* E-MOSFET kanal N yang ditunjukkan dalam Gambar 5.12.



Gambar 5.12. Hasil Pengujian Respon *H-Bridge* E-MOSFET Kanal N terhadap Masukan Sinyal Arah

Grafik pada chanel 1 adalah masukan logika dari mikrokontroler, sedangkan pada chanel 2 adalah keluaran *H-bridge* E-MOSFET kanal N. Berdasarkan Gambar 5.12 didapatkan sinyal keluaran rangkaian *H-bridge* E-MOSFET kanal N memiliki frekuensi 10Hz. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa rangkaian *H-bridge* E-MOSFET kanal N bekerja dengan baik karena dapat meneruskan logika pengontrolan arah.

Dengan *rise time* rangkaian adalah 188,5 μ s dan *fall time* 1,8ms dapat disarankan agar untuk setiap sinyal yang mengakibatkan perubahan arah putar rotor pada motor ditahan minimal selama 1,8ms. Hal ini dilakukan agar E-MOSFET kanal N dapat mencapai tingkat tegangan yang diperintahkan. Dengan demikian maka frekuensi perubahan sinyal pengontrolan arah maksimal adalah $\frac{1}{(1,8 \cdot 10^{-3} + 188,5 \cdot 10^{-6})} \approx 500\text{Hz}$.

Rise time dan *fall time* yang tidak simetris diakibatkan oleh karakteristik IRFZ44N sendiri serta akumulasi *delay* dari rangkaian sebelum pin *gate* pada FET.

5.4.2 Pengujian Respon *H-bridge* E-MOSFET Kanal N terhadap Masukan Sinyal Kecepatan (PWM)

Pada pengujian respon *H-bridge* E-MOSFET kanal N terhadap sinyal kecepatan (PWM), sinyal masukan yang diberikan adalah:

- Sinyal masukan pada pin A *driver* optik adalah logika 1.
- Sinyal masukan pada pin B *driver* optik adalah logika 0.
- Sinyal masukan pada pin PWM *driver* optik adalah sinyal persegi dengan frekuensi 1kHz dengan duty cycle 0%-100% dengan kenaikan 10%.

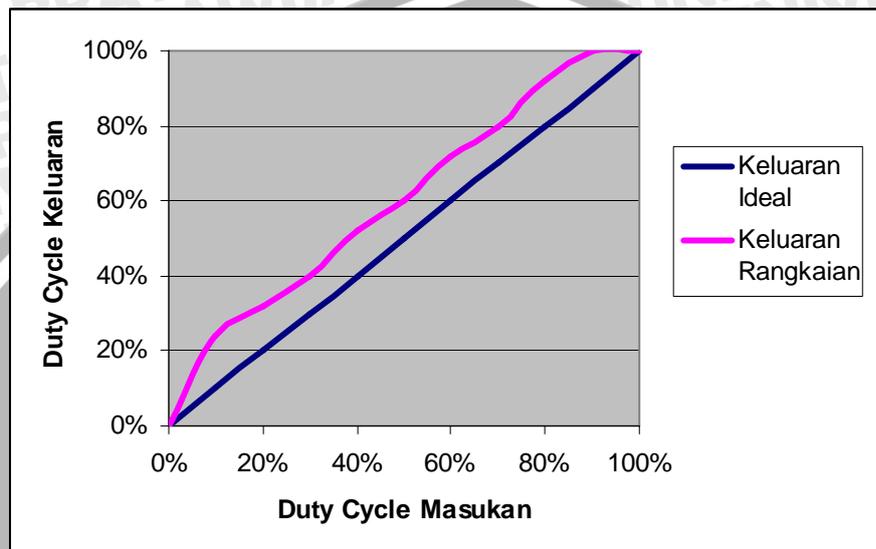
Melalui pengamatan pada osiloskop didapatkan hasil pengujian rangkaian *H-bridge* E-MOSFET kanal N yang ditunjukkan dalam Tabel 5.3.

Tabel 5.3. Hasil Pengujian Rangkaian *H-Bridge* E-MOSFET Kanal N terhadap Masukan Sinyal PWM

Duty Cycle Masukan	Duty Cycle Keluaran
0%	0%
10%	24%
20%	32%
30%	40%
40%	52%
50%	60%
60%	72%
70%	80%
80%	92%
90%	100%
100%	100%

Berdasar Tabel 5.3, pada setiap pengujian terdapat selisih *duty cycle* keluaran rata-rata sebesar 10%. Hal ini disebabkan karena akumulasi *delay* yang terjadi pada seluruh rangkaian, yaitu pada rangkaian *charge pump*, rangkaian *driver* optik, dan rangkaian *H-bridge* E-MOSFET kanal N.

Perbandingan keluaran ideal rangkaian dengan keluaran rangkaian sebenarnya ditunjukkan dalam Gambar 5.13.



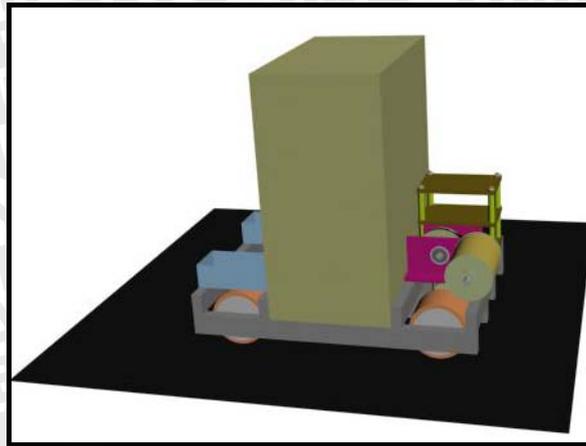
Gambar 5.13. Grafik Perbandingan Keluaran Ideal Rangkaian dengan Keluaran Rangkaian *H-Bridge* E-MOSFET Kanal N sebenarnya

Berdasar Gambar 5.13 tampak bahwa secara umum keluaran rangkaian tetap linier namun dengan pergeseran 10% di atas keluaran ideal rangkaian. Dengan demikian dapat disarankan agar rangkaian meneruskan *duty cycle* yang diinginkan maka *duty cycle* sinyal PWM dari pengontrol diturunkan 10% dari *duty cycle* yang diinginkan.

5.5 Pengujian Alat Keseluruhan

Pengujian alat secara keseluruhan bertujuan untuk mengetahui unjuk kerja sistem secara keseluruhan ketika telah diaplikasikan pada *plan* simulasi. *Plan* simulasi berupa suatu sistem mekanik yang terdiri dari chasis, satu motor DC *brushed* dan beban. *Plan* simulasi didesain sedemikian hingga memiliki bobot yang sama dengan bobot rata-rata robot KRI, yaitu 10kg. Karena hanya dilengkapi 1 buah motor DC *brushed*, *plan* simulasi hanya dapat bergerak maju atau mundur.

Desain *plan* simulasi yang digunakan ditunjukkan dalam Gambar 5.14.



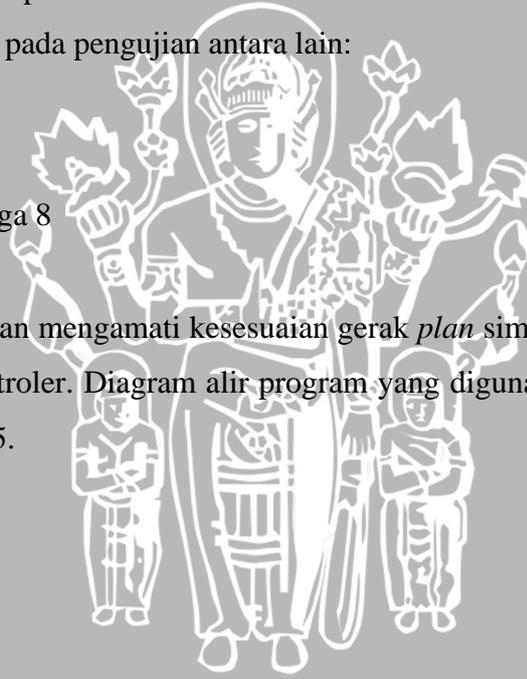
Gambar 5.14. Desain *plan* simulasi

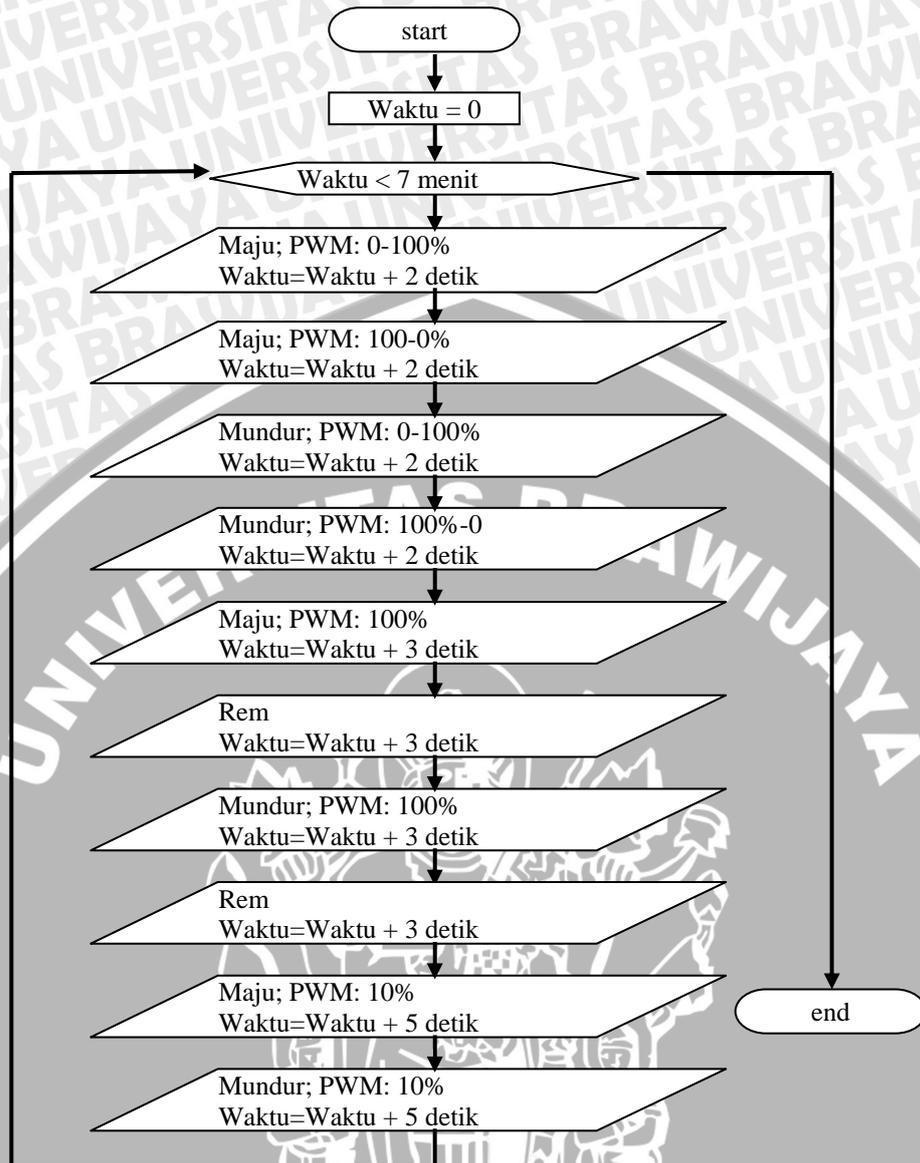
Pengujian alat secara keseluruhan berupa pengujian sinkronisasi gerak dan uji ketahanan sistem yang diterapkan pada *plan* simulasi dan dijalankan dalam waktu 7 menit, sesuai dengan waktu maksimal yang digunakan pada trial robot KRCL.

Peralatan yang digunakan pada pengujian antara lain:

- catu daya 24V
- alat keseluruhan
- minimum sistem ATMega 8
- *stop watch*

Pengujian dilakukan dengan mengamati kesesuaian gerak *plan* simulasi dengan program yang dituliskan pada mikrokontroler. Diagram alir program yang digunakan dalam pengujian ditunjukkan dalam Gambar 5.15.





Gambar 5.15. Diagram Alir Program Pengujian *Driver* Motor DC *Brushed* Menggunakan *H-bridge* E-MOSFET Kanal N untuk Robot KRI dan KRCI

Penjelasan diagram alir dalam Gambar 5.15 di atas adalah sebagai berikut:

- 1) Inisialisasi “Waktu = 0”

Waktu adalah suatu variabel yang menandakan lama pengujian. Diawali dengan nilai 0 dan dibatasi hingga 7 menit, sesuai waktu *trial* maksimum dalam KRCI.

2) “Waktu < 7 menit”

Selama variabel Waktu bernilai kurang dari 7 menit program simulasi akan dijalankan. Ketika variabel Waktu telah mencapai 7 menit program simulasi akan berhenti dengan perintah “Rem” pada motor.

3) Instruksi oleh pengontrol pada *driver* (ditandai dengan lambang jajar genjang pada diagram alir):

- a) Maju: instruksi agar motor menyebabkan pergerakan *plan* simulasi maju
- b) Mundur: instruksi agar motor menyebabkan pergerakan *plan* simulasi mundur
- c) Rem: instruksi agar motor mengerem
- d) PWM: instruksi yang diberikan untuk pengontrolan kecepatan motor
 - i) 0-100%: peningkatan kecepatan motor secara bertahap dari kecepatan minimum (0%) hingga kecepatan maksimum (100%) dengan step 1%
 - ii) 100-0%: penurunan kecepatan motor secara bertahap dari kecepatan maksimum (100%) hingga kecepatan minimum (0%) dengan step 1%
 - iii) 100%: pengesetan kecepatan motor maksimum
 - iv) 10%: pengesetan kecepatan motor 10% dari kecepatan maksimum
- e) Waktu = Waktu + 2 detik: lama waktu instruksi adalah 2 detik
- f) Waktu = Waktu + 3 detik: lama waktu instruksi adalah 3 detik

Dari hasil pengamatan gerak *plan* simulasi dapat disimpulkan bahwa alat secara keseluruhan dapat bekerja dengan baik.

BAB VI

PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan pembahasan tentang *driver* motor DC *brushed* menggunakan komponen E-MOSFET kanal N yang telah dipaparkan, dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

- 1) *Driver H-bridge* E-MOSFET kanal N untuk motor DC *brushed* dapat dirancang menggunakan rangkaian-rangkaian penyusun seperti *multivibrator*, *charge pump*, *driver* optik, dan *H-bridge* E-MOSFET kanal N.
- 2) a) *Rise time* dan *fall time* sinyal keluaran *driver* dengan masukan sinyal pengontrol arah motor masing-masing adalah 188,5 μ s dan 1,8ms, sehingga frekuensi perubahan sinyal arah maksimal adalah 500Hz.
- b) Frekuensi sinyal PWM yang paling efektif diterapkan untuk *driver H-bridge* E-MOSFET kanal N adalah 1kHz karena memiliki jangkauan *duty cycle* masukan paling besar.
- c) *Duty cycle* masukan sebesar 0%-90% pada frekuensi 1kHz menghasilkan *duty cycle* keluaran sebesar 0%-100%.
- d) *Driver H-bridge* E-MOSFET kanal N untuk motor DC *brushed* telah diuji pada *plan* simulasi dengan bobot 10 kg yang bergerak selama 7 menit dengan arah dan kecepatan yang berubah-ubah secara periodik dan berulang setiap 30 detik, serta menggunakan motor DC *brushed* dengan arus maksimal 3,7A pada kondisi terbeban.

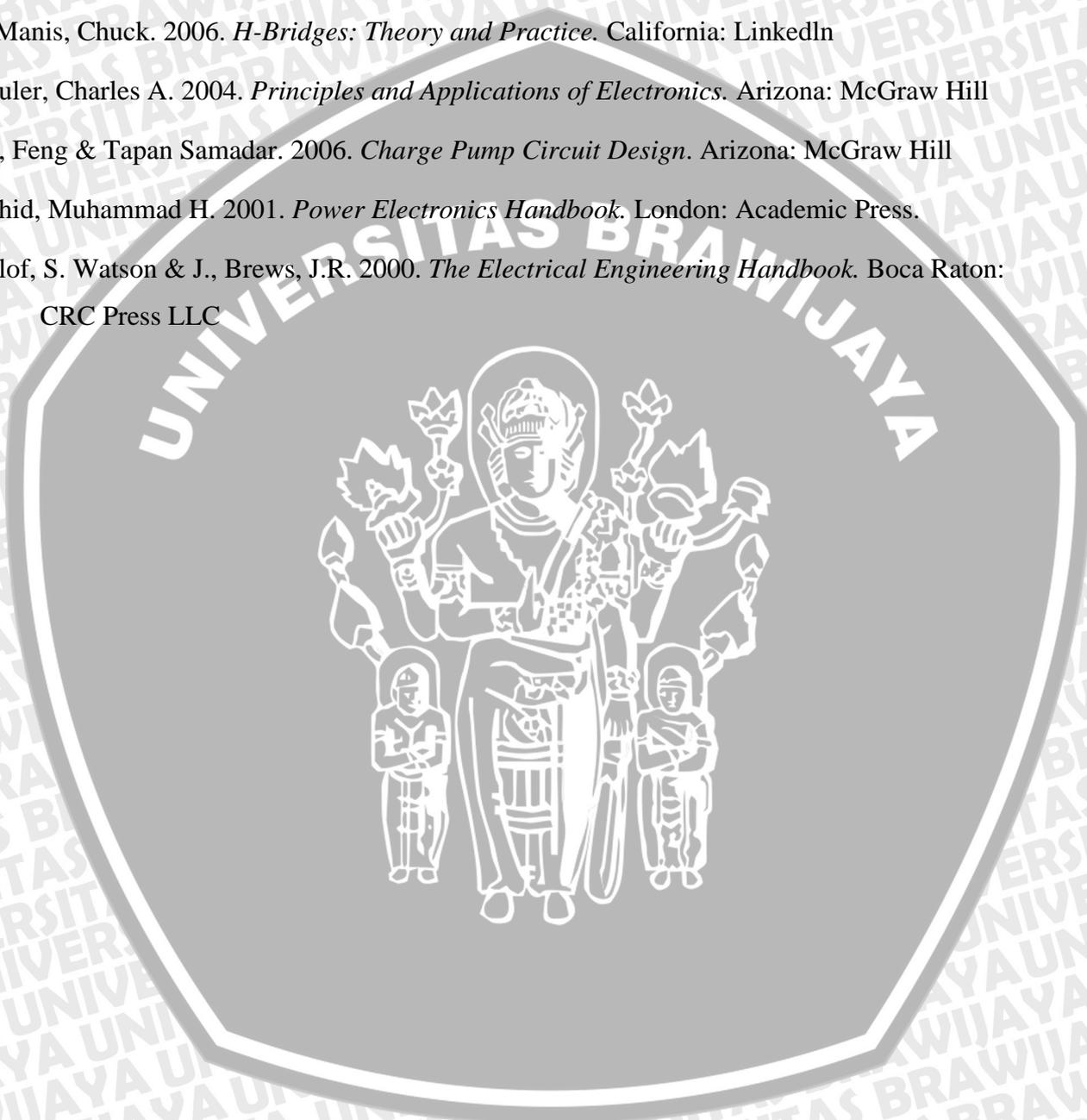
6.2 Saran

Beberapa hal yang direkomendasikan adalah:

- 1) Penggunaan sensor tambahan seperti *rotary encoder* sebagai umpan balik penentuan kecepatan motor maupun *plan* dapat membantu pengontrol dalam menentukan kecepatan motor sehingga dapat meminimalisir dampak peningkatan *duty cycle* PWM.
- 2) Penentuan lebar jalur pada PCB atau ketebalan kabel yang digunakan pada rangkaian, terutama pada jalur yang dilewati arus besar seperti pada jalur arus motor perlu diperhatikan, karena jika jalur terlalu kecil atau kabel yang digunakan terlalu tipis dapat mengakibatkan putusnya jalur akibat panas berlebih.

DAFTAR PUSTAKA

- Condit, Reston. 2004. *AN905: Brushed DC Motor Fundamentals*. Microchip Technology Inc.
- Electus. 2001. *Optocouplers: When & How To Use Them*. Electus Distribution
- McManis, Chuck. 2006. *H-Bridges: Theory and Practice*. California: LinkedIn
- Schuler, Charles A. 2004. *Principles and Applications of Electronics*. Arizona: McGraw Hill
- Pan, Feng & Tapan Samadar. 2006. *Charge Pump Circuit Design*. Arizona: McGraw Hill
- Rashid, Muhammad H. 2001. *Power Electronics Handbook*. London: Academic Press.
- Soclof, S. Watson & J., Brews, J.R. 2000. *The Electrical Engineering Handbook*. Boca Raton: CRC Press LLC



LAMPIRAN

Listing Program Mikrokontroler

```

//*****//
// PROGRAM SKRIPSI //
// NAMA : AMAD FIRDAUS SYAHPUTRA //
// NIM : 0510630010 //
// PERANCANGAN DAN PEMBUATAN DRIVER MOTOR DC BRUSHED //
// MENGGUNAKAN H-BRIDGE E-MOSFET KANAL N UNTUK ROBOT KRI //
// DAN KRCI //
//*****//
#include <mega8.h>
#include <delay.h>

#define A PORTB.2
#define B PORTB.3

float waktu;
int semi;

void main(void)
{
PORTB=0x00;
DDRB=0x0E;

PORTC=0x00;
DDRC=0x00;

PORTD=0x01;
DDRD=0x01;

// Timer/Counter 0 initialization
// Clock source: System Clock
// Clock value: Timer 0 Stopped
TCCR0=0x00;
TCNT0=0x00;

// Timer/Counter 1 initialization
// Clock source: System Clock
// Clock value: 16000.000 kHz
// Mode: Ph. & fr. cor. PWM top=ICR1
// OC1A output: Non-Inv.
// OC1B output: Discon.
// Noise Canceler: Off
// Input Capture on Falling Edge
// Timer 1 Overflow Interrupt: Off
// Input Capture Interrupt: Off

```

```
// Compare A Match Interrupt: Off
// Compare B Match Interrupt: Off
TCCR1A=0x80;
TCCR1B=0x11;
TCNT1H=0x00;
TCNT1L=0x00;
ICR1H=0x1F;
ICR1L=0x40;
OCR1AH=0x00;
OCR1AL=0x00;
OCR1BH=0x00;
OCR1BL=0x00;
```

```
// Timer/Counter 2 initialization
// Clock source: System Clock
// Clock value: Timer 2 Stopped
// Mode: Normal top=FFh
// OC2 output: Disconnected
ASSR=0x00;
TCCR2=0x00;
TCNT2=0x00;
OCR2=0x00;
```

```
MCUCR=0x00;
```

```
// Timer(s)/Counter(s) Interrupt(s) initialization
TIMSK=0x00;
```

```
ACSR=0x80;
SFOR=0x00;
```

```
waktu=0;
while (waktu<420000)
{
  OCR1A=0;
  semi=0;
  while (semi<2000)
  {
    A=1;B=0;
    OCR1A=OCR1A+0x50;
    delay_ms(20);
    waktu=waktu+20;
    semi=semi+20;
  }
  semi=0;
  while (semi<2000)
  {
    A=1;B=0;
    OCR1A=OCR1A-0x50;
    delay_ms(20);
```

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



```

waktu=waktu+20;
semi=semi+20;
}
semi=0;
while (semi<2000)
{
A=0;B=1;
OCR1A=OCR1A+0x50;
delay_ms(20);
waktu=waktu+20;
semi=semi+20;
}
semi=0;
while (semi<2000)
{
A=0;B=1;
OCR1A=OCR1A-0x50;
delay_ms(20);
waktu=waktu+20;
semi=semi+20;
}
semi=0;
while (semi<3000)
{
A=1;B=0;
OCR1A=0x1F40;
delay_ms(300);
waktu=waktu+300;
semi=semi+300;
}
semi=0;
while (semi<3000)
{
A=0;B=0;
OCR1A=0x1F40;
delay_ms(300);
waktu=waktu+300;
semi=semi+300;
}
semi=0;
while (semi<3000)
{
A=0;B=1;
OCR1A=0x1F40;
delay_ms(300);
waktu=waktu+300;
semi=semi+300;
}
semi=0;
while (semi<3000)
{
A=0;B=1;
OCR1A=0x1F40;
delay_ms(300);
waktu=waktu+300;
semi=semi+300;
}
}

```



```
{  
  A=1;B=1;  
  OCR1A=0x1F40;  
  delay_ms(300);  
  waktu=waktu+300;  
  semi=semi+300;  
}  
semi=0;  
while (semi<5000)  
{  
  A=1;B=0;  
  OCR1A=0x0320;  
  delay_ms(300);  
  waktu=waktu+300;  
  semi=semi+300;  
}  
semi=0;  
while (semi<5000)  
{  
  A=0;B=1;  
  OCR1A=0x0320;  
  delay_ms(300);  
  waktu=waktu+300;  
  semi=semi+300;  
}  
};  
A=0;B=0;  
OCR1A=0;  
}
```



Gambar Hasil Pengujian Driver Optik (dengan Sinyal PWM)

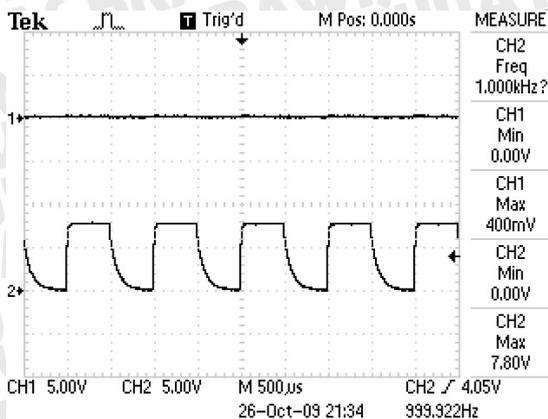
Keterangan:

Channel 1 Grafik 1 menunjukkan output A1,

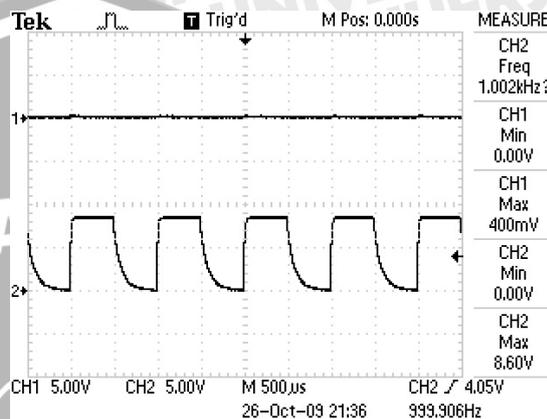
Channel 2 Grafik 1 menunjukkan output A2,

Channel 1 Grafik 2 menunjukkan output B1,

Channel 2 Grafik 2 menunjukkan output B2,

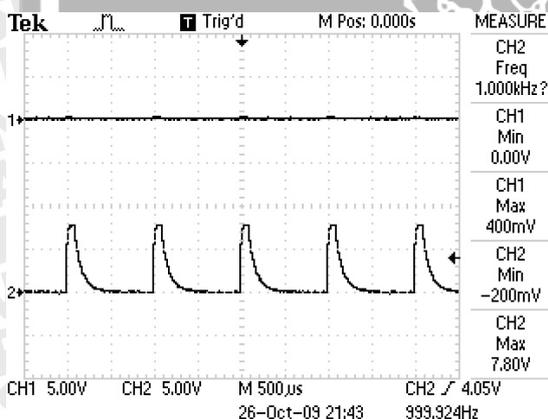


Grafik 1

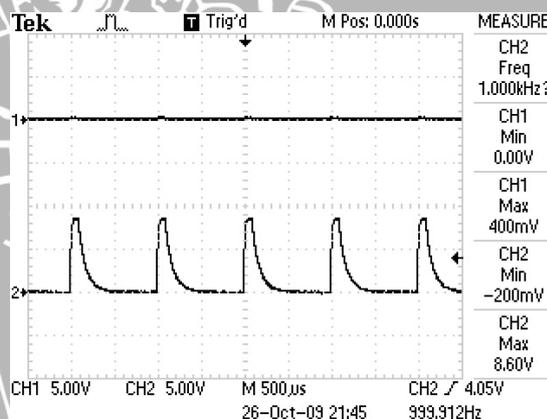


Grafik 2

Hasil pengujian dengan sinyal PWM 1kHz duty cycle 50%

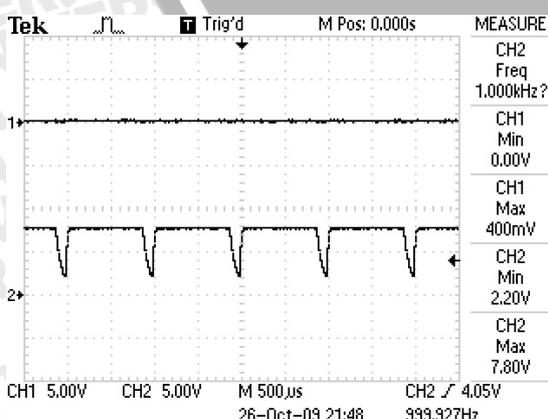


Grafik 1

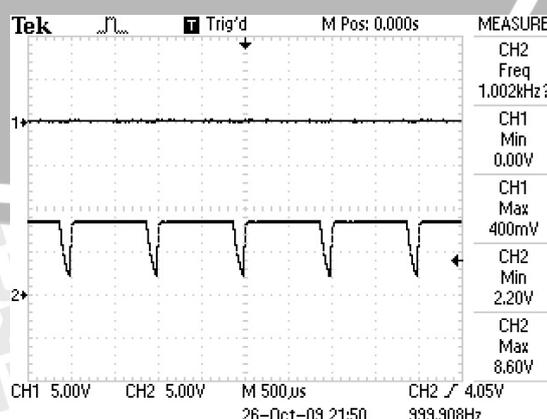


Grafik 2

Hasil pengujian dengan sinyal PWM 1kHz duty cycle 10%



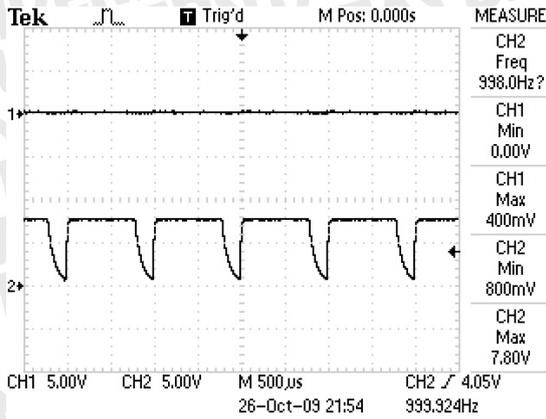
Grafik 1



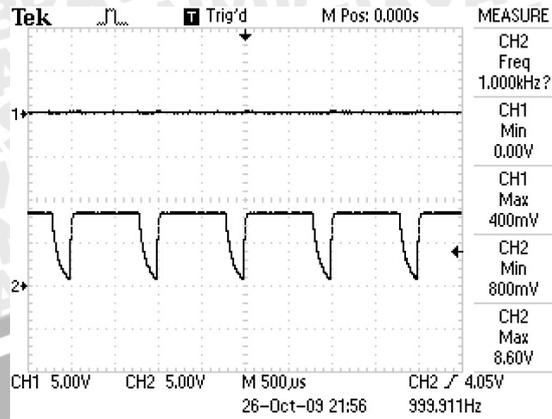
Grafik 2

Hasil pengujian dengan sinyal PWM 1kHz duty cycle 90%



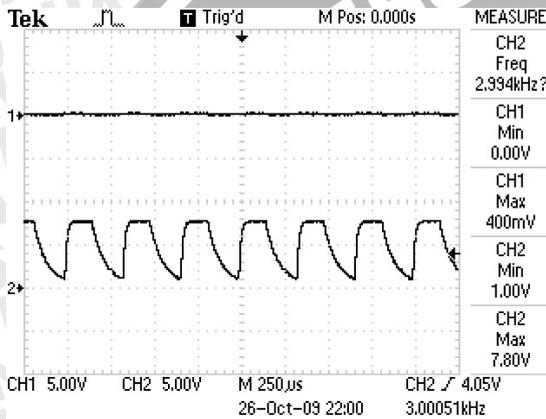


Grafik 1

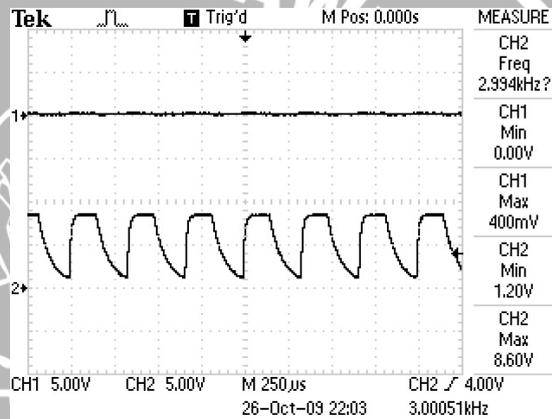


Grafik 2

Hasil pengujian dengan sinyal PWM 1kHz duty cycle 80%

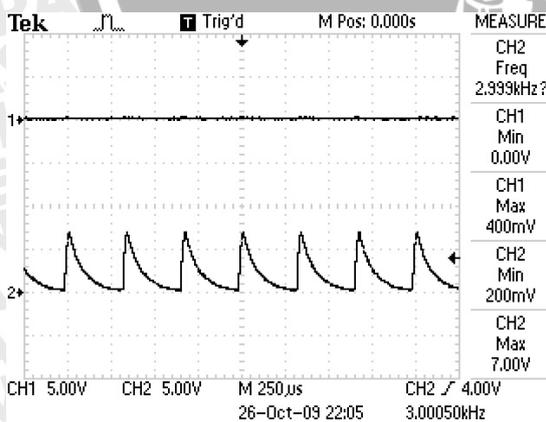


Grafik 1

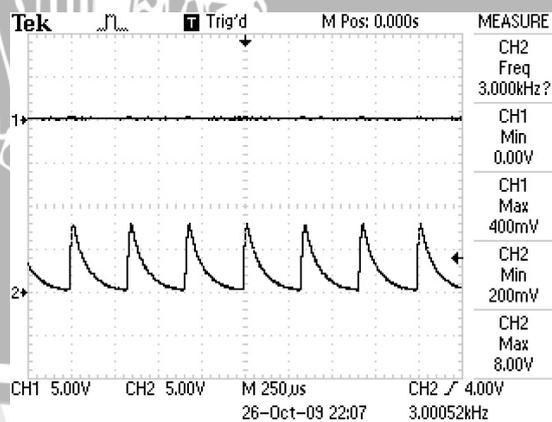


Grafik 2

Hasil pengujian dengan sinyal PWM 3kHz duty cycle 50%



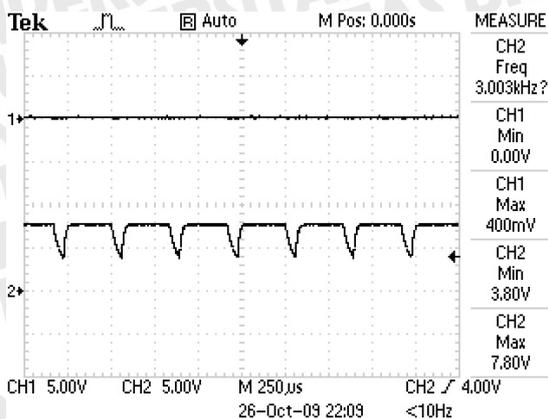
Grafik 1



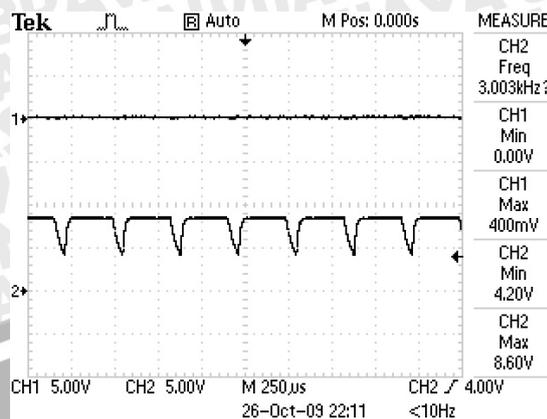
Grafik 2

Hasil pengujian dengan sinyal PWM 3kHz duty cycle 10%



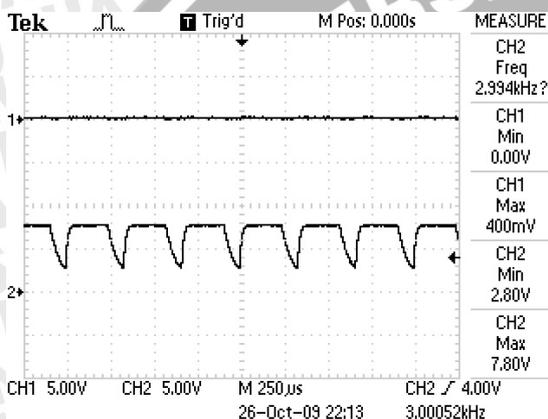


Grafik 1

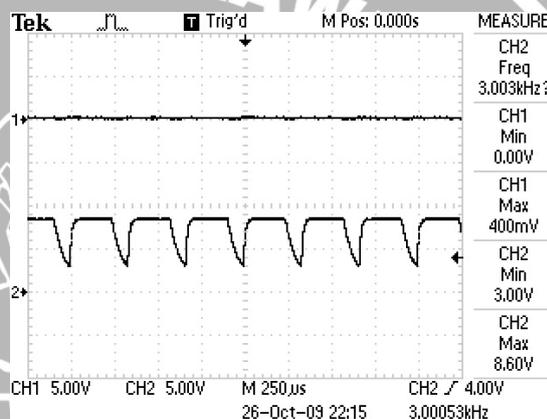


Grafik 2

Hasil pengujian dengan sinyal PWM 3kHz duty cycle 90%

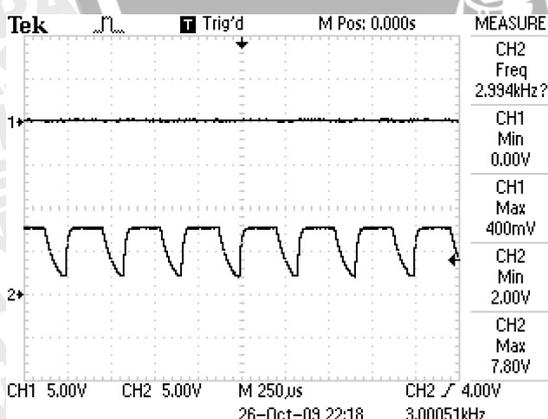


Grafik 1

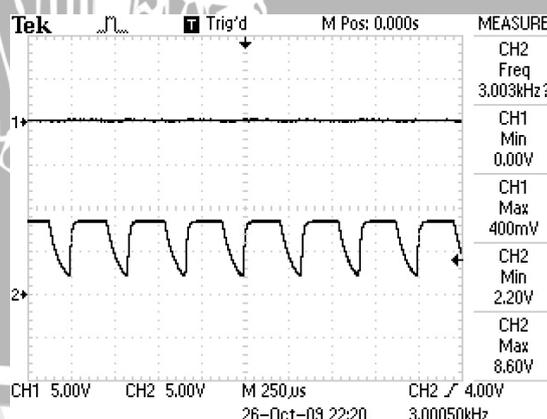


Grafik 2

Hasil pengujian dengan sinyal PWM 3kHz duty cycle 80%



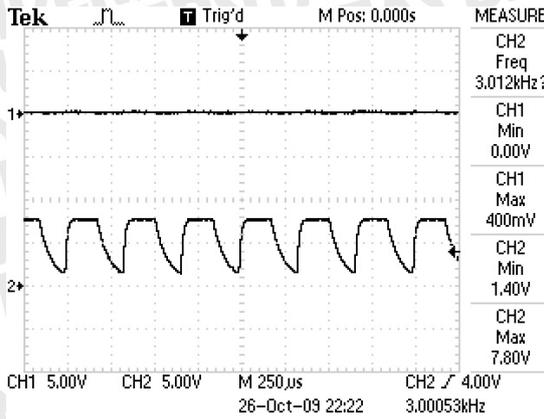
Grafik 1



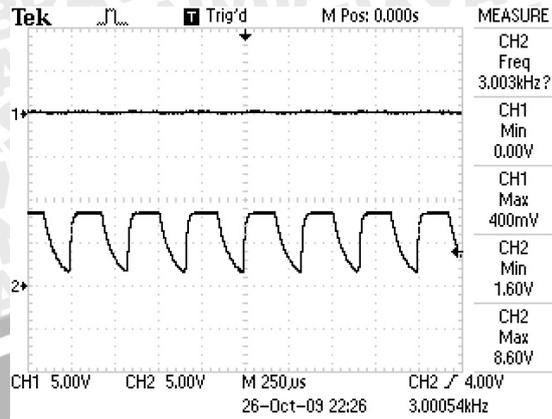
Grafik 2

Hasil pengujian dengan sinyal PWM 3kHz duty cycle 70%



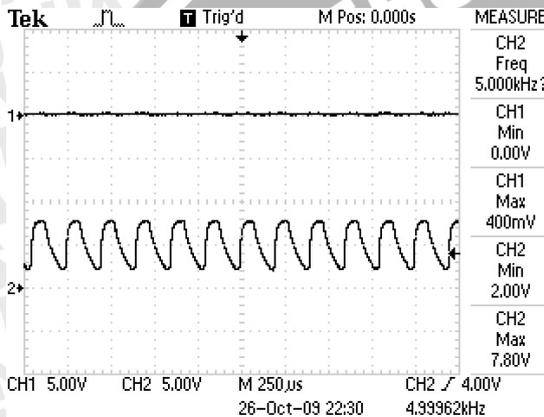


Grafik 1

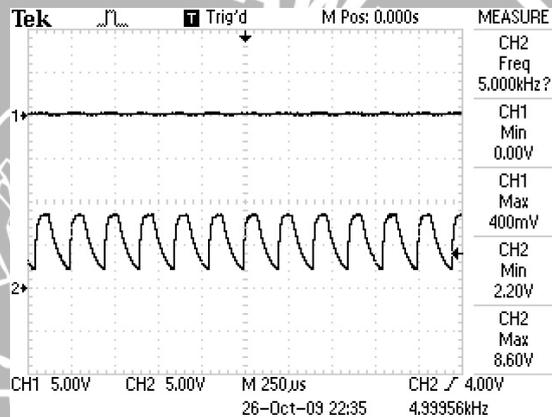


Grafik 2

Hasil pengujian dengan sinyal PWM 3kHz duty cycle 60%

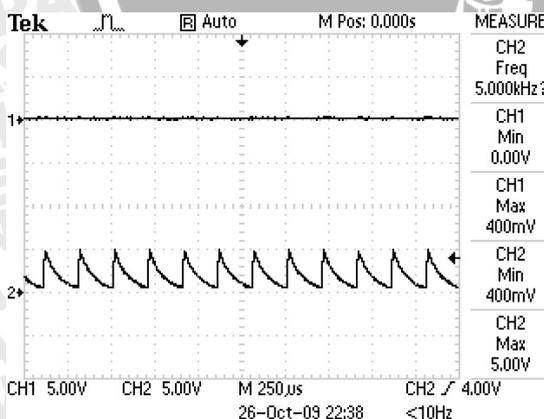


Grafik 1

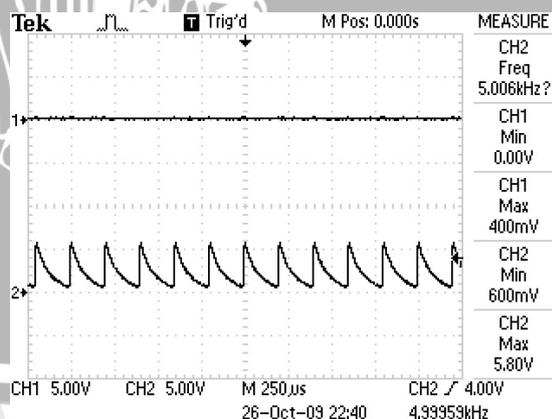


Grafik 2

Hasil pengujian dengan sinyal PWM 5kHz duty cycle 50%



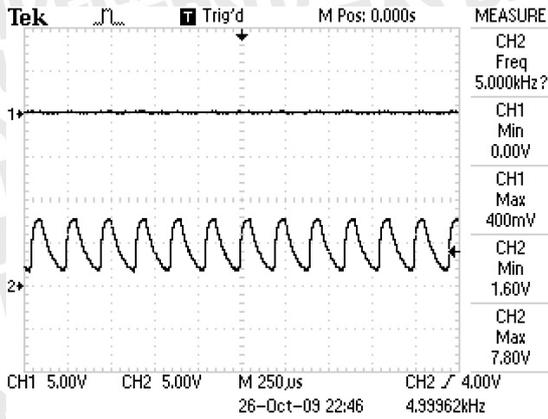
Grafik 1



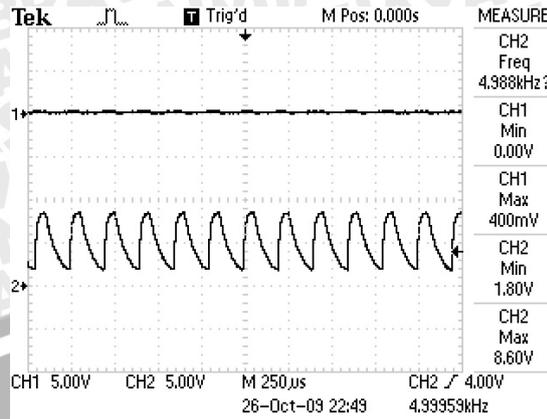
Grafik 2

Hasil pengujian dengan sinyal PWM 5kHz duty cycle 10%



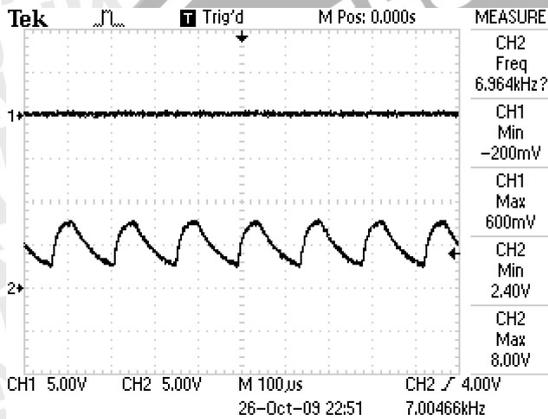


Grafik 1

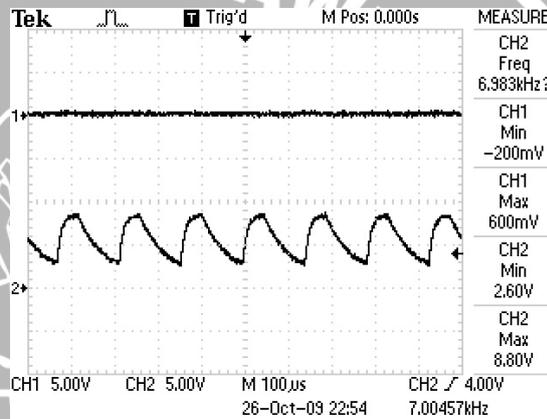


Grafik 2

Hasil pengujian dengan sinyal PWM 5kHz duty cycle 40%

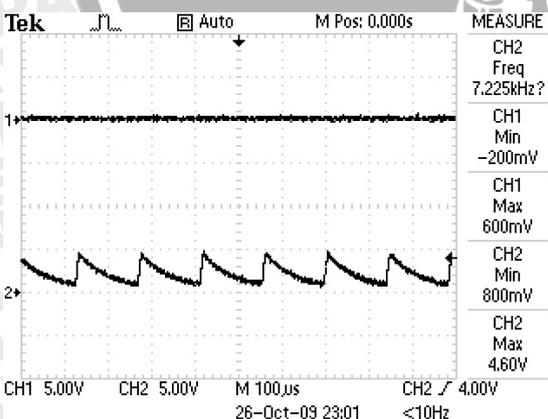


Grafik 1

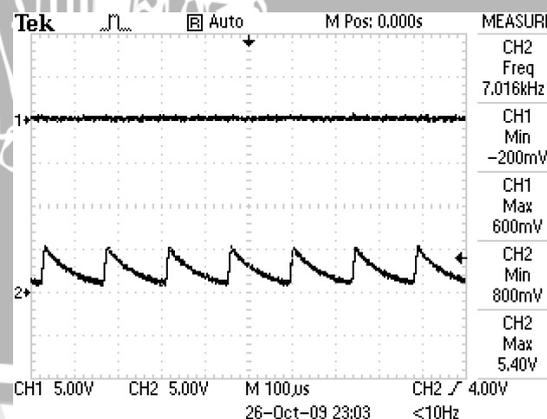


Grafik 2

Hasil pengujian dengan sinyal PWM 7kHz duty cycle 50%



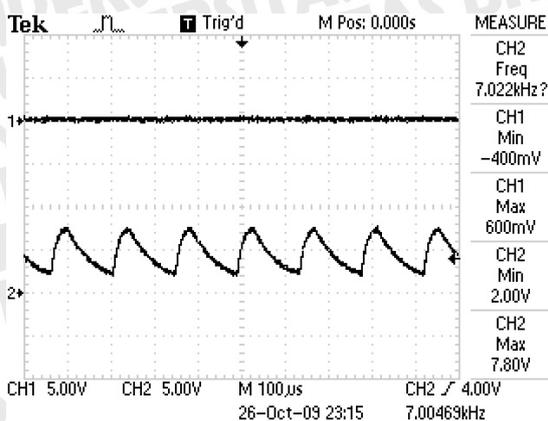
Grafik 1



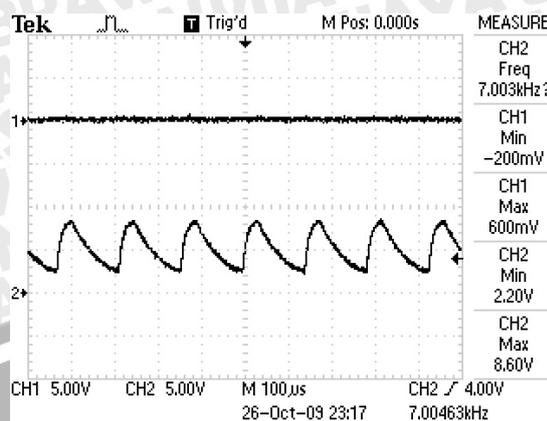
Grafik 2

Hasil pengujian dengan sinyal PWM 7kHz duty cycle 10%



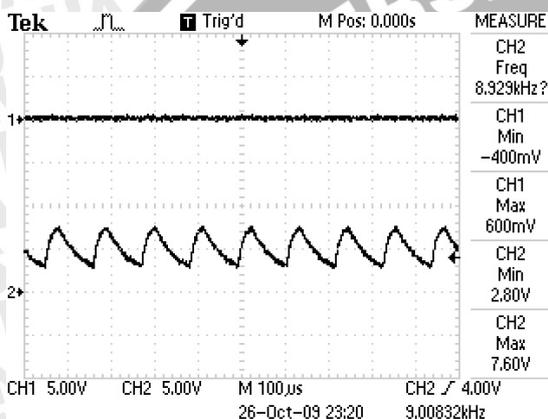


Grafik 1

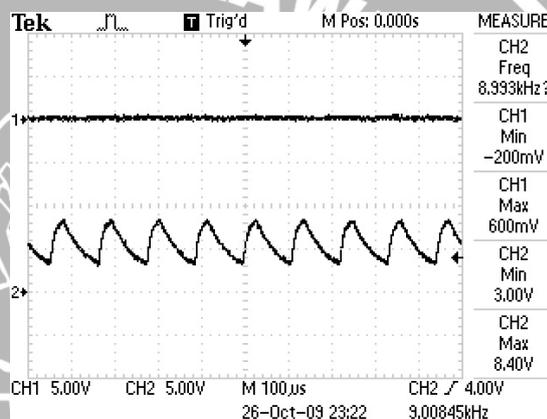


Grafik 2

Hasil pengujian dengan sinyal PWM 7kHz duty cycle 40%

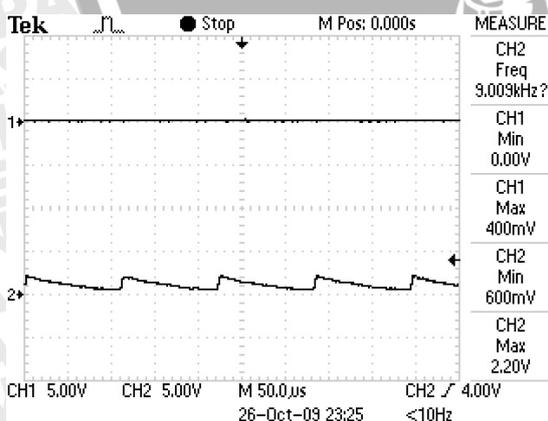


Grafik 1

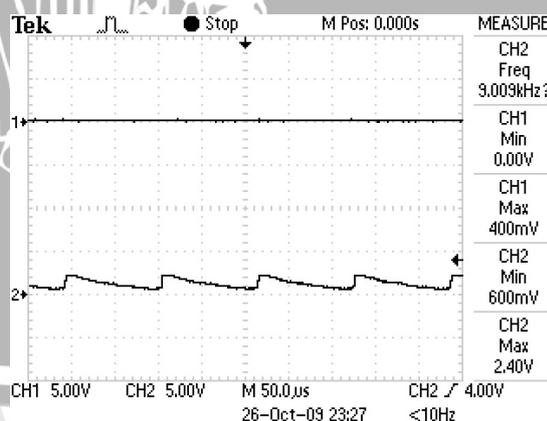


Grafik 2

Hasil pengujian dengan sinyal PWM 9kHz duty cycle 50%



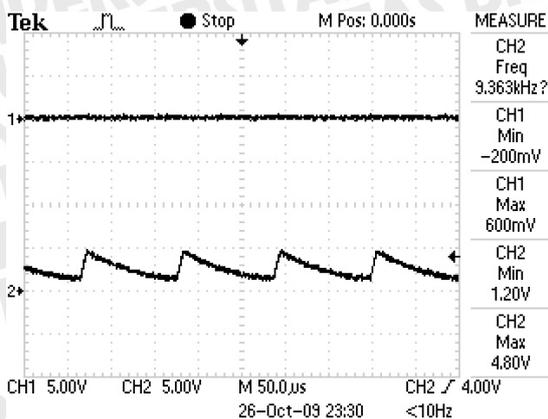
Grafik 1



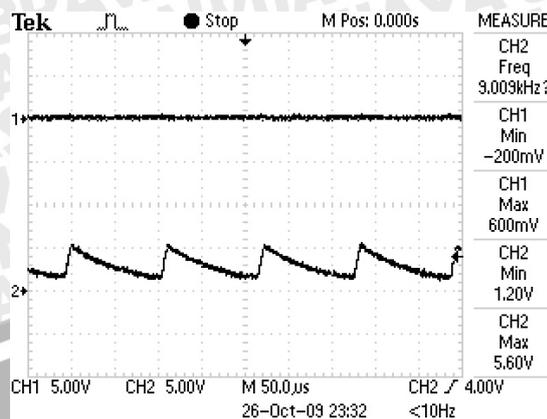
Grafik 2

Hasil pengujian dengan sinyal PWM 9kHz duty cycle 10%



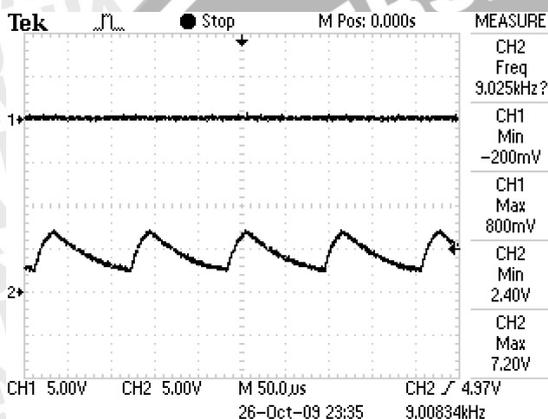


Grafik 1

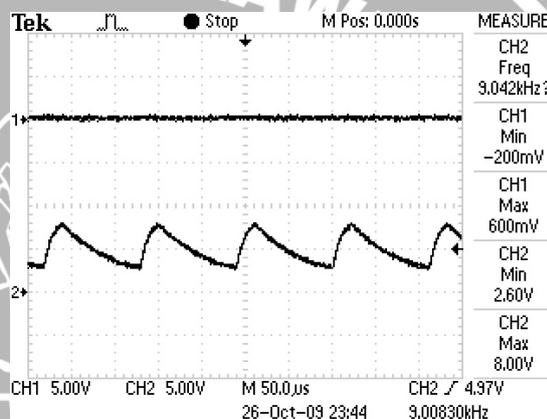


Grafik 2

Hasil pengujian dengan sinyal PWM 9kHz duty cycle 20%

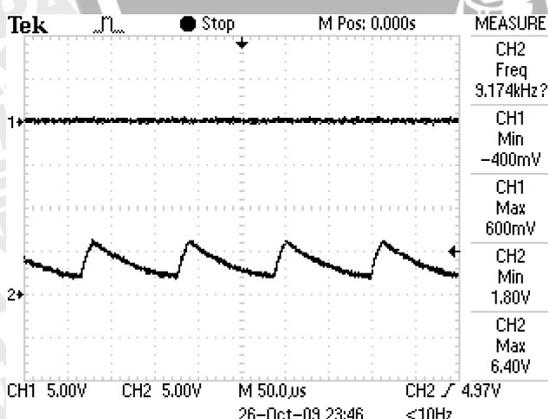


Grafik 1

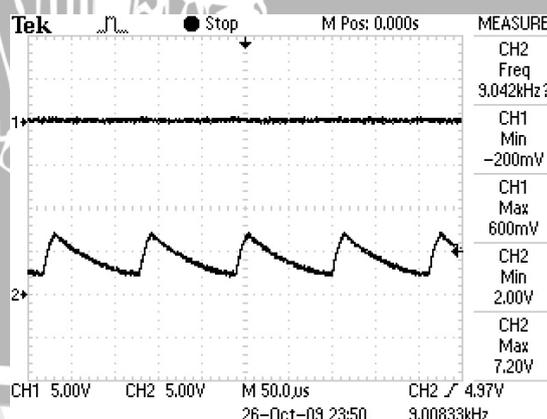


Grafik 2

Hasil pengujian dengan sinyal PWM 9kHz duty cycle 40%



Grafik 1



Grafik 2

Hasil pengujian dengan sinyal PWM 9kHz duty cycle 30%

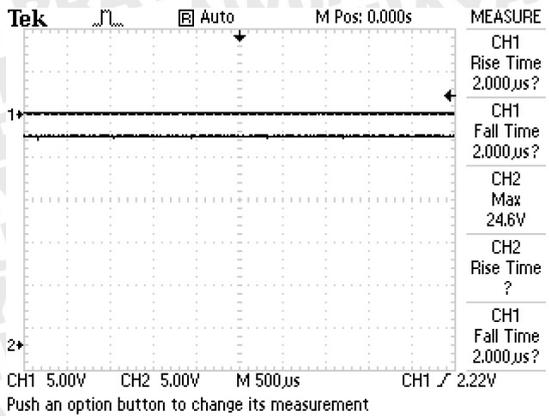


Gambar Hasil Pengujian H-Bridge E-MOSFET Kanal N (dengan Sinyal PWM 1kHz)

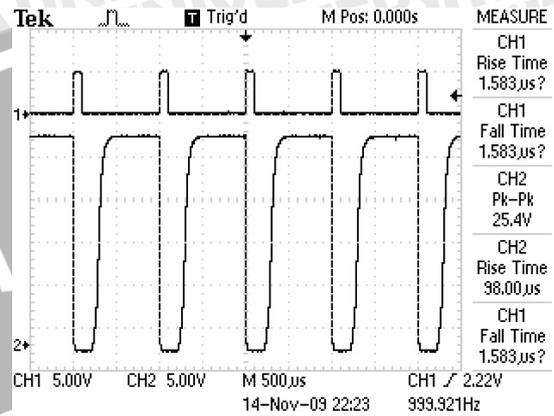
Keterangan:

Chanel 1 : sinyal output PWM mikrokontroler

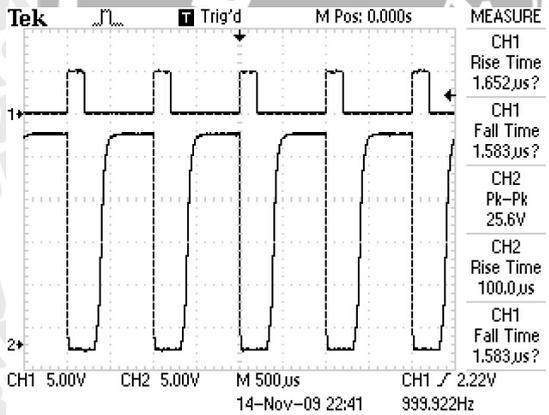
Chanel 2 : sinyal output PWM H-bridge E-MOSFET kanal N



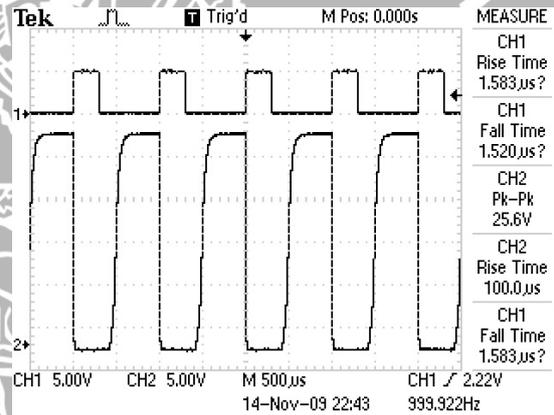
Hasil pengujian dengan duty cycle 0%



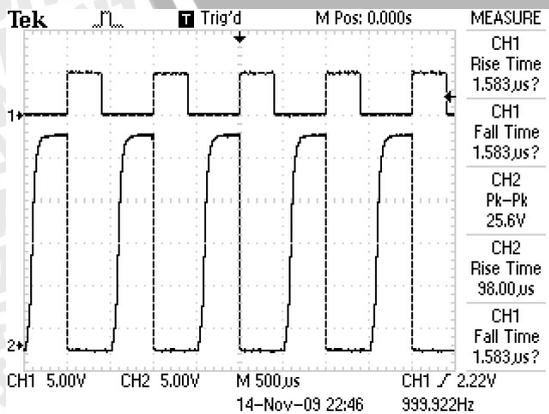
Hasil pengujian dengan duty cycle 10%



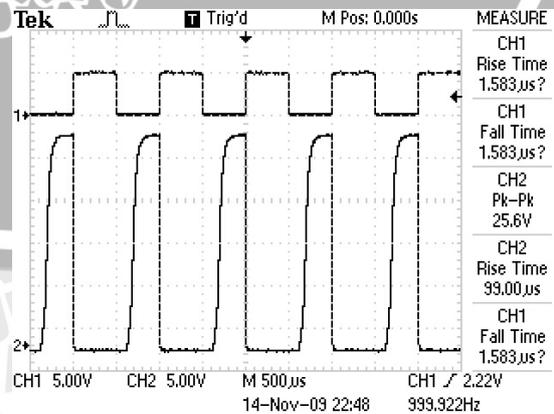
Hasil pengujian dengan duty cycle 20%



Hasil pengujian dengan duty cycle 30%

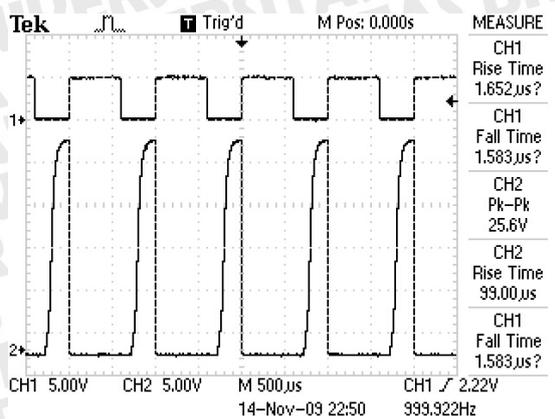


Hasil pengujian dengan duty cycle 40%

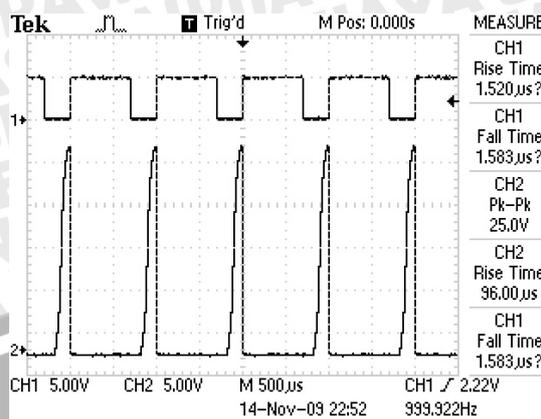


Hasil pengujian dengan duty cycle 50%

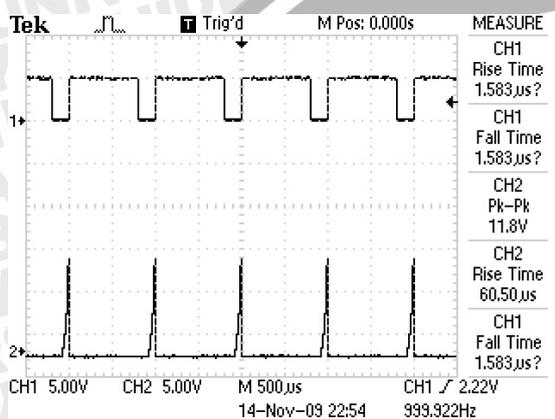




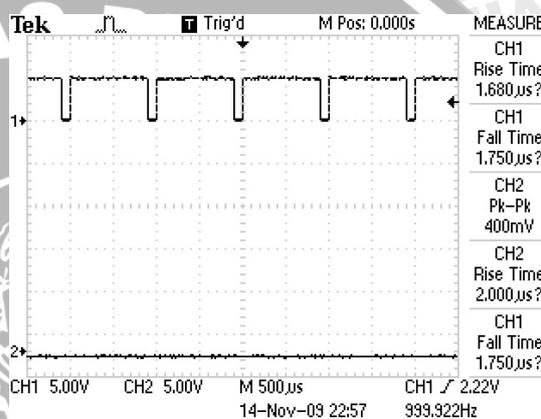
Hasil pengujian dengan duty cycle 60%



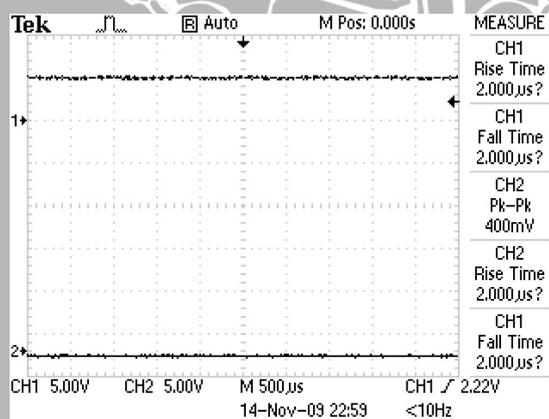
Hasil pengujian dengan duty cycle 70%



Hasil pengujian dengan duty cycle 80%



Hasil pengujian dengan duty cycle 90%



Hasil pengujian dengan duty cycle 100%

Hasil Pengujian Keseluruhan

Waktu	Kondisi plan	Waktu	Kondisi plan
2s	Maju, kecepatan bertambah	2m34s	Maju, kecepatan berkurang
4s	Maju, kecepatan berkurang	2m36s	Mundur, kecepatan bertambah
6s	Mundur, kecepatan bertambah	2m38s	Mundur, kecepatan berkurang
8s	Mundur, kecepatan berkurang	2m41s	Maju, cepat
11s	Maju, cepat	2m44s	Berhenti
14s	Berhenti	2m47s	Mundur, cepat
17s	Mundur, cepat	2m50s	Berhenti
20s	Berhenti	2m55s	Maju, pelan
25s	Maju, pelan	3m	Mundur, pelan
30s	Mundur, pelan	3m2s	Maju, kecepatan bertambah
32s	Maju, kecepatan bertambah	3m4s	Maju, kecepatan berkurang
34s	Maju, kecepatan berkurang	3m6s	Mundur, kecepatan bertambah
36s	Mundur, kecepatan bertambah	3m8s	Mundur, kecepatan berkurang
38s	Mundur, kecepatan berkurang	3m11s	Maju, cepat
41s	Maju, cepat	3m14s	Berhenti
44s	Berhenti	3m17s	Mundur, cepat
47s	Mundur, cepat	3m20s	Berhenti
50s	Berhenti	3m25s	Maju, pelan
55s	Maju, pelan	3m30s	Mundur, pelan
1m	Mundur, pelan	3m32s	Maju, kecepatan bertambah
1m2s	Maju, kecepatan bertambah	3m34s	Maju, kecepatan berkurang
1m4s	Maju, kecepatan berkurang	3m36s	Mundur, kecepatan bertambah
1m6s	Mundur, kecepatan bertambah	3m38s	Mundur, kecepatan berkurang
1m8s	Mundur, kecepatan berkurang	3m41s	Maju, cepat
1m11s	Maju, cepat	3m44s	Berhenti
1m14s	Berhenti	3m47s	Mundur, cepat
1m17s	Mundur, cepat	3m50s	Berhenti
1m20s	Berhenti	3m55s	Maju, pelan
1m25s	Maju, pelan	4m1s	Mundur, pelan
1m30s	Mundur, pelan	4m3s	Maju, kecepatan bertambah
1m32s	Maju, kecepatan bertambah	4m5s	Maju, kecepatan berkurang
1m34s	Maju, kecepatan berkurang	4m7s	Mundur, kecepatan bertambah
1m36s	Mundur, kecepatan bertambah	4m9s	Mundur, kecepatan berkurang
1m38s	Mundur, kecepatan berkurang	4m12s	Maju, cepat
1m41s	Maju, cepat	4m15s	Berhenti
1m44s	Berhenti	4m18s	Mundur, cepat
1m47s	Mundur, cepat	4m21s	Berhenti
1m50s	Berhenti	4m26s	Maju, pelan
1m55s	Maju, pelan	4m31s	Mundur, pelan
2m	Mundur, pelan	4m33s	Maju, kecepatan bertambah
2m2s	Maju, kecepatan bertambah	4m35s	Maju, kecepatan berkurang
2m4s	Maju, kecepatan berkurang	4m37s	Mundur, kecepatan bertambah
2m6s	Mundur, kecepatan bertambah	4m39s	Mundur, kecepatan berkurang
2m8s	Mundur, kecepatan berkurang	4m42s	Maju, cepat
2m11s	Maju, cepat	4m45s	Berhenti
2m13s	Berhenti	4m48s	Mundur, cepat
2m17s	Mundur, cepat	4m51s	Berhenti
2m20s	Berhenti	4m56s	Maju, pelan
2m25s	Maju, pelan	5m1s	Mundur, pelan
2m30s	Mundur, pelan	5m3s	Maju, kecepatan bertambah
2m32s	Maju, kecepatan bertambah	5m5s	Maju, kecepatan berkurang

Waktu **Kondisi plan**

- 5m7s Mundur, kecepatan bertambah
- 5m9s Mundur, kecepatan berkurang
- 5m12s Maju, cepat
- 5m15s Berhenti
- 5m18s Mundur, cepat
- 5m21s Berhenti
- 5m26s Maju, pelan
- 5m31s Mundur, pelan
- 5m33s Maju, kecepatan bertambah
- 5m35s Maju, kecepatan berkurang
- 5m37s Mundur, kecepatan bertambah
- 5m39s Mundur, kecepatan berkurang
- 5m42s Maju, cepat
- 5m45s Berhenti
- 5m48s Mundur, cepat
- 5m51s Berhenti
- 5m56s Maju, pelan
- 6m1s Mundur, pelan
- 6m3s Maju, kecepatan bertambah
- 6m5s Maju, kecepatan berkurang
- 6m7s Mundur, kecepatan bertambah
- 6m9s Mundur, kecepatan berkurang
- 6m12s Maju, cepat
- 6m15s Berhenti
- 6m18s Mundur, cepat
- 6m21s Berhenti
- 6m26s Maju, pelan
- 6m31s Mundur, pelan
- 6m33s Maju, kecepatan bertambah
- 6m35s Maju, kecepatan berkurang
- 6m37s Mundur, kecepatan bertambah
- 6m39s Mundur, kecepatan berkurang
- 6m42s Maju, cepat
- 6m45s Berhenti
- 6m48s Mundur, cepat
- 6m51s Berhenti
- 6m56s Maju, pelan
- 7m1s Mundur, pelan



Datasheet Komponen

