TESIS - TM092501

RANCANG BANGUN PURWARUPA KERETA MELAYANG DENGAN PENGGERAK ELEKTROMAGNET

MUHAMMAD ARIFUDIN LUKMANA
NRP. 2112 205 006

DOSEN PEMBIMBING
HENDRO NURHADI, DIPL.-ING., PH.D
BAMBANG PRAMUJATI, ST., M.SC.ENG., PH.D

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN DESAIN SISTEM MEKANIKAL
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2015

TESIS - TM092501

STRUCTURAL DESIGN OF LEVITATED TRAIN PROTOTYPE WITH ELECTROMAGNETIC ACTUATOR

MUHAMMAD ARIFUDIN LUKMANA
NRP. 2112 205 006

ACADEMIC SUPERVISOR
HENDRO NURHADI, DIPL.-ING., PH.D
BAMBANG PRAMUJATI, ST., M.SC.ENG., PH.D

PROGRAM OF MAGISTER
MECHANICAL SYSTEM DESIGN
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2015

LEMBAR PENGESAHAN

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:
MUHAMMAD ARIFUDIN LUKMANA
NRP. 2112 205 006

Tanggal Ujian: 16 Januari 2015
Periode Wisuda: Maret 2015

Disetujui oleh:

1. **Hendro Nurhadi, Dipl.-Ing., Ph.D** **(Pembimbing I)**
   NIP. 1975 1120 2002 12 1002

2. **Bambang Pramujati, ST., M.Sc.Eng, Ph.D** **(Pembimbing II)**
   NIP. 1969 1203 1994 03 1001

3. **Arif Wabjudi, ST., MT., Ph.D** **(Penguji)**
   NIP. 1973 0322 2001 22 1001

Direktur Program Pascasarjana

Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.
NIP. 1964 0405 1990 02 1001

RANCANG BANGUN PURWARUPA KERETA MELAYANG MAGNETIK DENGAN PENGGERAK ELEKTROMAGNET

Nama Mahasiswa : Muhammad Arifudin Lukmana
NRP : 2112 205 006
Pembimbing : Hendro Nurhadi, Dipl.-Ing., Ph.D.
Co-Pembimbing : Bambang Pramujati, ST., M.Sc.Eng., Ph.D

ABSTRAK

Transportasi memegang peranan yang penting dalam segala aspek kehidupan, terutama dalam bidang ekonomi. Dengan meningkatnya kebutuhan sistem transportasi yang lebih cepat, efisien, nyaman dan ramah lingkungan, maka perlu adanya pengembangan transportasi. Kereta melayang magnetik atau *magnetic levitation (maglev) train* adalah salah satu kandidat terbaik yang memenuhi persyaratan tersebut. *Maglev* mengganti roda kereta api konvensional dengan elektromagnet dan melayang diatas rel. Teknologi ini menggunakan gaya dorong elektro-mekanikal tanpa adanya kontak. Dengan teknologi ini kerugian akibat gesekan antara benda kerja dengan landasannya dapat dihilangkan. Teknologi yang digunakan dalam kereta ini adalah *Electromagnetic Suspension* (*EMS*).

Penelitian dimulai dengan perancangan solenoida-elektromagnet. Peralatan kendali, sensor dan elektromagnet dirakit menjadi sistem melayang magnetik satu unit. Sistem melayang magnetik yang diinginkan adalah sistem yang mampu menarik berat elektromagnet ditambah beban tambahan. Sistem melayang magnetik diuji dengan cara pengambilan data kuat medan magnet dan arus yang melewati elektromagnet. Selanjutnya sistem melayang magnetik yang telah ada digandakan menjadi empat. Sistem melayang magnetik digabung dengan struktur kereta dan rel. Penggabungan tersebut akan menghasilkan purwarupa kereta melayang magnetik.

Parameter elektromagnet yang dihasilkan memiliki panjang 30 mm, jumlah lilitan 800 dan diameter kawat 0,4 mm. Sistem dapat berjalan dengan menggunakan sensor inframerah-photodioda. Kendali *Proportional-Derivative* (*PD controller*) mampu menjaga sistem melayang magnetik berjalan stabil. Parameter *PD controller gains* adalah Kp sebesar 2,467 dan Kd sebesar 0,015. Sistem mampu menarik objek berbobot 85 gram. Objek melayang ±2 milimeter dari elektromagnet.

Kata Kunci: kendali *PD*, *maglev*, purwarupa, *electromagnetic suspension.*

STRUCTURAL DESIGN OF LEVITATED TRAIN PROTOTYPE WITH ELECTROMAGNETIC ACTUATOR

Student Name	: Muhammad Arifudin Lukmana
Student ID Number	: 2112 205 006
Supervisor	: Hendro Nurhadi, Dipl.-Ing., Ph.D.
Co-Supervisor	: Bambang Pramujati, ST., M.Sc.Eng., Ph.D

ABSTRACT

Transportation holds vital role in every life aspect, especially in economic. The public need a new-generation transportation system. The transportation system has rapidity, reliability, safety, convenience and environment-friendly. The magnetic levitation (maglev) train is one of the best candidates to fulfill those requirements. Maglev replace conventional train's wheels with electromagnets. It makes train levitates on the guideway. This technology use electro-mechanical forced to propel without any contact. This technology allow null friction loss between vehicle and it supports. This train use the Electromagnetic Suspension (EMS) technology.

The research is started with electromagnet-solenoid design and the control system. An electromagnet, sensor and control system are assembled to create one unit of maglev system. Maglev system need to pull its weight and additional load. The maglev system is tested by logging its magnetic field and electromagnetic current. The existing maglev system copied into four units.

Maglev systems integrate into train structure and rail. The integration created a prototype of magnetic levitated train.

Electromagnetic design parameters are 30 mm of solenoid length, 800 of coils, 0,4 mm of solenoid wire diameter. The system use infrared-photodiode as sensors. Proportional-Derivative (PD) controller could keep the maglev system stable. PD controller gains are Kp=2,467 and Kd=0,015. The system could pull 85 grams object. The object levitate ±2 milimeters from electromagnet.

Kata Kunci: PD controller, maglev, prototype, electromagnetic suspension.

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum warahmatullah wabarokatuh.

Alhamdulillah, segala puji bagi mahasuci Allah SWT yang telah memberikan segala nikmat, hidayah dan taufik-Nya kepada setiap hambaNya. Merupakan salah satu karunia dan pertolongan Allah pada setiap langkah dalam penyusunan laporan ini sehingga Tesis ini dapat terselesaikan.

Laporan Tesis ini disusun sebagai salah satu syarat kelulusan Program Studi Magister atau Strata-2 (S2) Bidang studi Desain Sistem Mekanikal Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri (FTI) Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Melalui lembaran ini penulis hendak mengucapkan terimakasih kepada pihak-pihak yang senantiasa mendukung dan membantu dalam penyelesaian laporan Tesis ini. Ucapan terima kasih penulis kepada:

1. Ibu dan Bapak yang tercinta, yang telah menjaga, merawat dan mendoakan dengan tulus yang semua itu tidak mampu tergantikan, semoga Allah menjaga keduanya dan membalas dengan banyak kebaikan.

2. Adik-adikku yang selalu meramaikan rumah. Semoga kelancaran dalam hidup dan selalu dalam lindungan-Nya.

3. Bapak Hendro Nurhadi, Ph.D selaku dosen pembimbing Tesis.

4. Bapak Bambang Pramujati, Ph.D selaku Ketua jurusan Teknik Mesin sekaligus pembimbing Tesis.

5. Bapak Arif Wahjudi, Ph.D dan Bapak Dr.Eng. Harus L Guntur selaku dosen Penguji seminar dan Sidang Tesis.

6. Segenap Keluarga Besar Teknik Mesin ITS yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

7. Para penghuni Lab Mekanika Benda Padat, Pak Anwar, Pak Rohman, Musavie, Mantra, Team Sapu Angin dan penghuni Lab Mekatronika D3 Mesin ITS terimakasih karena telah menemani dan membantu penulis sehingga laporan ini selesai.

8. Teman-teman di lingkungan Fakultas Teknologi Industri-ITS, BEM FTI-ITS dan kawan seluruh ITS yang telah memberikan dukungan dan motivasi.

Penulis menyadari laporan ini masih jauh dari kesempurnaan, maka kritik dan saran sangat diperlukan untuk menyempurnakan laporan Tesis ini. Dan akhirnya penulis berharap semoga Tesis ini dapat berguna dan bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Wassalamualaikum warahmatullah

Surabaya, Januari 2015

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN i
ABSTRAK iii
ABSTRACT v
KATA PENGANTAR vii
DAFTAR ISI ix
DAFTAR GAMBAR xiii
DAFTAR TABEL xix
DAFTAR SIMBOL xxi
BAB 1 PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Perumusan Masalah 3
1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian 3
1.4 Batasan Masalah 4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI 5
2.1 Kajian Pustaka 5
2.1.1 *Electromagnetic Suspension* (*EMS*) 5
2.1.2 Pemandu (*Guidance*) 8
2.1.3 Sistem Tenaga Kereta Melayang Magnet 8
2.1.4 Sensor Celah 9
2.1.5 Sistem Kendali Celah 10
2.1.6 Simulasi Numerik Elektromagnet sebagai *Magnetic Levitator* 13
2.1.7 Konstruksi Kereta-Rel 18
2.2 Dasar Teori 19
2.2.1 Fenomena Atom pada Magnet 19
2.2.2 Elektromagnet 20
2.2.3 Sistem Dinamik dan Pengendalian Otomatis 21
2.2.4 Analogi Pemodelan Sistem Elektrikal dan Mekanikal 26
2.2.5 Rangkaian Elektronika Analog 27
2.2.6 Memahami Kerapatan Fluks 33

BAB 3 METODOLOGI 35
3.1 Metodologi Umum Penelitian 35
3.2.1 Diagram Alir Penelitian 35
3.2.2 Langkah-Langkah Penelitian 36
3.2 Metodologi Perancangan Elektromagnet 42
3.2.1 Diagram Alir Perancangan Elektromagnet 42
3.2.2 Langkah-Langkah Perancangan Elektromagnet 43
3.2.3 Studi Awal Simulasi Numerik 46
3.3 Metodologi Pengambilan Data 47
3.4 Peralatan Pendukung 49
3.4.1 Alat Ukur Tegangan, Arus dan hambatan 49
3.4.2 Sensor Arus 49
3.4.3 *Power Supply Unit (PSU)* 50
3.4.4 *Data Logger* 51
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN 53
4.1 Perancangan Elektromagnet 53
4.2 Simulasi Numerik 55
4.2.1 Pemodelan Sistem *Maglev* dalam Bentuk *State-Space* 55
4.2.2 Kestabilan Sistem 56
4.2.3 Simulasi Numerik *Open Loop* tanpa Kendali 57
4.3 Rancang Bangun Sistem Melayang Magnetik dengan Sensor Inframerah-Photodioda 59
4.3.1 Solenoida Elektromagnet 59
4.3.2 Sensor 60
4.3.3 Sistem Kendali 61
4.3.4 Pengujian Sistem Melayang Magnetik 71
4.3.5 Pengambilan Data dan Pembahasan 74
4.4 Rancang Bangun Sistem Melayang Magnetik dengan Sensor *Hall Effect* 78
4.5 Rancang Bangun Kereta Melayang Magnetik 80
4.5.1 Rel 80
4.5.2 Elektromagnet dan Kereta 81
4.5.3 Sistem Kendali 82

4.5.4 Kendala dan Solusi Rancang Bangun Kereta Melayang Magnetik.....82
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....85
5.1 Kesimpulan.....85
5.2 Saran.....85
DAFTAR PUSTAKA.....87

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Perbandingan tumpuan, *guidance* dan pendorong (a) Kereta dengan roda, (b) Sistem *maglev*. (Lee dkk, 2006) 1

Gambar 2.1 *Electromagnetic Suspension* (a) Sistem melayang dan *guidance* terintegrasi. (b) Sistem melayang dan *guidance* terpisah. (Lee dkk, 2006)..... 5

Gambar 2.2 *Shanghai Maglev Train* (*SMT*) menggunakan *EMS* dengan sistem melayang dan *guidance* terpisah. 6

Gambar 2.3 Ilustrasi *Transrapid Levitation System Rail-Train* (Lee dkk, 2006) .. 6

Gambar 2.4 Tiga sumbu gerakan Kereta *Maglev* (http://inventors.about.com)..... 8

Gambar 2.5 Honeywell SS495A *Ratiometric Linear Sensor* 9

Gambar 2.6 Sensor posisi berbasis optik (*photocell)* 10

Gambar 2.7 Skema sistem melayang magnetik (Yaghoubi, 2012) 10

Gambar 2.8 Blok diagram sistem melayang magnetik (Yaghoubi, 2012) 10

Gambar 2.9 Bola baja melayang stabil dengan sensor cahaya (Kim dkk, 2006). 11

Gambar 2.10 Sistem melayang dengan sensor *hall effect* (Lilienkamp dkk, 2004) 11

Gambar 2.11 Sistem *maglev test* yang dibuat oleh Patriawan, 2013. (a) Komponen utama kendali *H-bridge* VNH3SP30 (kiri) dan *microcontroller* arduino uno (kanan) (b) Sistem *maglev test* yang telah terangkai dengan *power supply,* elektromagnet dan komputer. 12

Gambar 2.12 Sistem suspensi magnet-bola (Golnaraghi dan Kuo, 2010)..... 13

Gambar 2.13 Bentuk magnet dan medan magnetik (Huajie dkk, 2003) 16

Gambar 2.14 Diagram *transfer function* sistem (Huajie dkk, 2003)..... 16

Gambar 2.15 Model massa untuk pergerakan vertikal kereta (Guangwei dkk, 2007)..... 16

Gambar 2.16 *Bogie* Transrapid 07 sebagai referensi (Sands, 1992)..... 17

Gambar 2.17 Bogie dari sebuah *High Speed Maglev Train* 1.Support arm, 2.Levitation Magnet, 3.Crossbeam, 4.Air spring & Pendulum arm,

5.Guidance magnet, 6.Support Skid, 7.Torsional longeron, 8.Levitation frame unit, 9.Gap Sensor (Zhisu, 2009)..... 17
Gambar 2.18 Diagram alir menjelaskan bagaimana mengubah sistem melayang sederhana menjadi kereta magnet. Pembalikan seluruh sistem dan perpanjangan dari elektromagnet untuk menyesuaikan rel besi. (Black, 2009)..... 18
Gambar 2.19 Peletakan sensor, elektromagnet dan rel besi. (Black, 2009) 18
Gambar 2.20 Perubahan atom akibat pengaruh magnet (a) Logam tanpa pengaruh magnet (b) Logam dengan pengaruh magnet..... 19
Gambar 2.21 Pengukuran medan magnet pada solenoida dengan inti besi (calctool.org)..... 20
Gambar 2.22 Grafik *step response system.*..... 22
Gambar 2.23 Blok diagram sederhana dari suatu sistem..... 23
Gambar 2.24 Blok diagram dari *linear, continuous-time control system,* disajikan dalam bentuk *state space* (Ogata, 2002)..... 23
Gambar 2.25 Blok diagram kendali *PID* (wikipedia) 25
Gambar 2.26 Hubungan antara arus dan tegangan pada hambatan dan induktor (Sarma, 2001)..... 27
Gambar 2.27 *Light emitting diode* inframerah berdiameter 5 mm..... 28
Gambar 2.28 Lambang photodioda dalam skema rangkaian..... 28
Gambar 2.29 Lambang NPN transistor dalam skema rangkaian 29
Gambar 2.30 Skema rangkaian pembagi tegangan 29
Gambar 2.31 Skema *differential amplifier* 30
Gambar 2.32 Skema *non-inverting amplifier* 31
Gambar 2.33 Garis fluks akibat medan magnet yang muncul dari sebuah magnet permanen (Ulaby dkk, 1994) 32
Gambar 2.34 *Hall generator*..... 34
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian secara umum..... 35
Gambar 3.2 Perbandingan posisi klem elektromagnet (a) Elektromagnet diklem dan beban melayang (b) Elektromagnet dalam posisi terbalik (*inverted*) melayang akibat ditarik oleh gaya elektromagnet sendiri.
36

Gambar 3.3 Perubahan garis fluks medan magnet akibat pengaruh jarak objek melayang. (a) Objek dekat dengan inti elektromagnet (b) Objek jauh dari inti elektromagnet 37
Gambar 3.4 (a) Inframerah yang ditangkap oleh photodioda banyak menyebabkan elektromagnet menyala. (b) Inframerah yang ditangkap oleh photodioda sedikit menyebabkan elektromagnet mati. 38
Gambar 3.5 Skema rancangan kendali digital. 38
Gambar 3.6 Skema rancangan kendali analog. 39
Gambar 3.7 Rancangan rel tampak 2 dimensi. 40
Gambar 3.8 Rancangan rel lurus *maglev* dengan panjang 1 meter 40
Gambar 3.9 Peletakan pasangan elektromagnet ke kereta 41
Gambar 3.10 Rancangan kereta yang telah dipasang pada rel. 41
Gambar 3.11 Diagram alir perancangan elektromagnet. 42
Gambar 3.12 Sistem suspensi magnet-bola (Golnaraghi dan Kuo, 2010) 43
Gambar 3.13 Hubungan antara arus dan tegangan pada hambatan dan induktor (Sarma, 2001) 44
Gambar 3.14 Peletakan sensor *hall effect* pada elektromagnet 47
Gambar 3.15 Grafik tegangan *output* sensor *hall effect* terhadap waktu 48
Gambar 3.16 Grafik arus yang melewati solenoida-elektromagnet terhadap waktu. 48
Gambar 3.17 Multimeter digital Heles UX838 49
Gambar 3.18 Sensor arus ACS712ELC-5A 49
Gambar 3.19 *Power supply unit* skala laboratorium 50
Gambar 3.20 *Power supply unit* ATX c*omputer* 51
Gambar 3.21 Arduino sebagai *datalogger* dengan *SD card shield* 51
Gambar 4.1 *Free body diagram* sistem mekanik dan elektrik *maglev.* 54
Gambar 4.2 *Root locus* dari *open-loop* tanpa kendali sistem *maglev* 57
Gambar 4.3 Blok diagram sistem *maglev open-loop* tanpa kendali 57
Gambar 4.4 Respon objek dengan *initial condition* sebesar 3 mm. 58
Gambar 4.5 Respon objek dengan *initial condition* sebesar 15 mm. 58
Gambar 4.6 Elektromagnet yang digunakan sebagai penggerak 60

Gambar 4.7 Peletakan sensor photodioda dan inframerah pada sistem *maglev* .. 60
Gambar 4.8 Skema rangkaian photodioda sebagai sensor penerima inframerah. 61
Gambar 4.9 Grafik posisi beban terhadap tegangan *output* kendali..... 62
Gambar 4.10 *Gain* dan tegangan konstan keseluruhan dari sistem kendali 63
Gambar 4.11 Alur pemrosesan sinyal pada sistem kendali 64
Gambar 4.12 Rangkaian pembagi tegangan untuk photodioda referensi 64
Gambar 4.13 Skema *differential amplifier* dengan dua *voltage follower*..... 66
Gambar 4.14 Konfigurasi *operational amplifier* sebagai *PD controller*..... 68
Gambar 4.15 Skema *non-inverting amplifier* dengan *gain* sebesar 9,51..... 69
Gambar 4.16 Skema rangkaian transistor yang terhubung dengan elektromagnet 70
Gambar 4.17 Skema rangkaian *magnetic levitation* dengan sensor inframerah-photodioda..... 70
Gambar 4.18 Sistem kendali yang dibuat pada *matrix board.*..... 71
Gambar 4.20 Peralatan pengujian sistem melayang magnetik 72
Gambar 4.21 Skema pengkabelan antara sistem kendali, sensor, *power supply* dan elektromagnet. 73
Gambar 4.22 Pengukuran massa solenoid besar yang digunakan sebagai beban (85 gram)..... 73
Gambar 4.23 Grafik tegangan sensor *hall effect* dengan beban 85 gram terpasang dan saat beban dilepas. 75
Gambar 4.24 Grafik kuat medan magnet dalam satuan Gauss. 76
Gambar 4.25 Grafik arus yang melewati elektromagnet dengan beban 85 gram dan saat beban dilepas..... 77
Gambar 4.26 Peletakan sensor *hall effect* pada ujung inti elektromagnet. 78
Gambar 4.27 Ilustrasi penggunaan magnet permanen untuk mendapatkan rel dengan sifat magnet. 79
Gambar 4.28 Ilustrasi perancangan rel magnet dengan menggunakan metode elektromagnet. 80
Gambar 4.29 Rel yang telah dibuat. 81
Gambar 4.30 Elektromagnet dan *frame* kereta memiliki massa 177 gram..... 81
Gambar 4.31 Sistem kendali kereta melayang magnet (a) Tampak atas (b) Tampak samping. 82

Gambar 4.32 Kereta berhasil melayang dengan elektromagnet bertegangan 24 volt. 83
Gambar 4.33 Ilustrasi pemasangan elektromagnet tetap pada *frame* kereta..... 84

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan Teknologi Kereta Maglev (*HSST System International Inc.*) 7

Tabel 2.2 Perbandingan Sistem maglev dalam hal tipe magnet dan *controllability* (Chen dkk, 2000) 12

Tabel 2.3 Parameter simulasi oleh D.B Wibowo dan S. Sutomo 15

Tabel 2.4 Analogi pemodelan sistem elektrikal dan mekanikal 25

Tabel 2.5 Berbagai persamaan elektrik-mekanik dan kaitannya (http://lpsa.swarthmore.edu) 26

Tabel 2.6 *Inverting Op-amp Transfer Function* 32

Tabel 3.1 Perbandingan Dimensi (Transrapid Intl. GmbH dan HSST Intl. Inc.) 40

Tabel 3.2 Tabel Pengambilan Data *Maglev* 48

Tabel 3.3 Spesifikasi Power Supply Model ATX-350W 51

Tabel 4.1 Perhitungan perkiraan massa tiap komponen kereta *maglev* 53

Tabel 4.2 Perhitungan simulasi dengan 4 Pasang Elektromagnet 55

Tabel 4.3 Spesifikasi berbagai penggerak elektromagnet (Percobaan) 59

Tabel 4.4 Tabel pengukuran *output* pembagi tegangan sensor photodioda 61

Tabel 4.5 Data input sensor dan output yang diinginkan dari rangkaian kendali 62

Tabel 4.6 Hasil pengukuran *output* tegangan photodioda referensi 65

Tabel 4.7 Tabel pengukuran data *maglev* 74

Tabel 4.8 Statistik data kuat medan magnet dari Gambar 4.24. 76

Tabel 4.9 Statistik data arus dari Gambar 4.25 77

DAFTAR SIMBOL

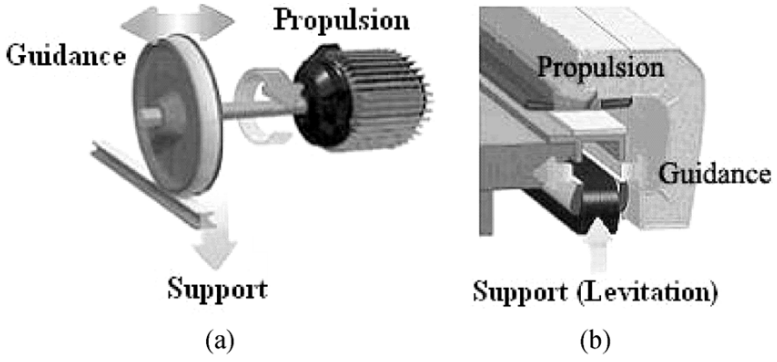
δ_0	= jarak celah	meter
μ_0	= Permeabilitas Vakum	$4\pi.10^{-7}$ Wb/A.m
B	= Kuat medan magnet	Tesla
e	= Tegangan	volt
F	= Gaya	N
g	= Koefisien gravitasi	9,81 Kg m/s^2
i	= Arus	Ampere
K	= μ_0 .N	
	Koefisien gaya magnet yang menarik bola	Wb/A
Kp	= Proportional gain	-
Ki	= Integral gain	-
Kd	= Derivative gain	-
ℓ	= Panjang solenoida	meter
L	= Induktansi	Henry
M	= Massa	Kg
N	= Jumlah lilitan	putaran
R	= Hambatan	Ohm
V	= Tegangan	volt
y	= Posisi bola	meter
Z	= Impedansi	Ohm

BAB 1
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Transportasi memegang peranan yang penting dalam segala aspek kehidupan terutama dalam bidang ekonomi. Transportasi merupakan tulang punggung perekonomian nasional hingga pedesaan. Dengan sistem transportasi yang baik, maka tingkat kesejahteraan dapat merata ke seluruh daerah.

Meningkatnya kebutuhan sistem transportasi yang lebih cepat, efisien, nyaman dan ramah lingkungan, maka perlu adanya pengembangan transportasi. Transportasi generasi baru yang cepat, handal dan aman selain itu juga nyaman, ramah lingkungan, perawatan mudah, dan mendukung transportasi massal. Kereta melayang magnetik atau *magnetic levitation (maglev) train* adalah salah satu kandidat terbaik yang memenuhi persyaratan tersebut. Kereta api konvensional melaju menggunakan gesekan antara roda dan rel, sedangkan *Maglev* mengganti roda dengan elektromagnet dan melayang diatas rel, menghasilkan gaya dorong secara elektro-mekanikal tanpa adanya kontak. Kemajuan teknologi magnet yang memungkinkan benda ditumpu dengan gaya magnet. Dengan teknologi ini kerugian akibat gesekan antara benda kerja dengan landasannya dapat dihilangkan. Perbandingan kereta konvensional dengan kereta *maglev* terlihat pada Gambar 1.1 dibawah ini.



Gambar 1.1 Perbandingan tumpuan, *guidance* dan pendorong (a) Kereta dengan roda, (b) Sistem *maglev.* (Lee dkk, 2006)

Pengembangan kereta *maglev* dimulai pada tahun 1934 saat Hermann Kemper dari Jerman mematenkannya. Setelah beberapa decade kemudian perkembangan kereta *maglev* semakin cepat dimulai pada periode 1960an, tahap pematangan tahun 1970-1980an dan uji coba pada 1990an. Dan pada tahun 2003 kereta *maglev* berhasil digunakan sebagai transportasi publik di Shanghai, China.

Kereta *maglev* menawarkan beberapa keunggulan dibandingkan dengan kereta konvensional dengan roda dan rel:

1. Tidak menggunakan roda dan tidak ada keausan pada rel sehingga mengurangi biaya perawatan.
2. Distribusi beban yang merata mengurangi biaya kontruksi rel kereta *maglev*.
3. Tidak bisa anjlok (*derailed)* karena kereta *maglev* terikat terhadap relnya (Nakashima, 1994).
4. Tingkat kebisingan dan getaran berkurang secara drastis.
5. Sistem tanpa kontak mencegah slip dan *sliding* saat operasi.
6. Radius belok minimum rel lebih kecil.
7. Percepatan dan pengereman kereta dapat dilakukan dengan lebih cepat.
8. Memungkinkan untuk menghilangkan roda gigi, kopling, poros, bantalan dan sistem mekanik lainnya.
9. Lebih tahan terhadap kondisi cuaca.
10. Tidak adanya gesekan antara roda dengan landasan menyebabkan laju kereta *maglev* dapat mencapai 300 km/jam.

Namun dalam beberapa segi, kereta *maglev* memiliki kekurangan, yakni:

1. Motor linier tidak hanya menghasilkan dorongan, tetapi juga pengereman sehingga membuat sistem lebih kompleks.
2. Semakin berat beban maka semakin banyak tenaga listrik yang dibutuhkan untuk melayang, sehingga tidak cocok untuk barang berat.
3. Kereta terikat dengan relnya sehingga perubahan jalur dan percabangan rel lebih sulit.
4. Medan magnet yang dihasilkan sangat besar, sehingga perlu pelindung anti magnet.

Selain itu dari segi ekonomi, investasi yang dibutuhkan untuk membangun sistem kereta *maglev* sangat mahal.

Secara umum sistem *levitation* kereta *maglev* dapat diklasifikasikan menjadi tiga (Lee dkk, 2006), yaitu:

1. *Electromagnetic Suspension* (*EMS*), gaya magnet untuk melayang didapatkan dari gaya tarik magnet antara rel dan elektromagnet. Sistem *EMS* ditemukan oleh Jerman (Transrapid) dan kereta *maglev* Shanghai menggunakan sistem ini.
2. *Electrodynamic Suspension* (*EDS*), jika *EMS* menggunakan gaya tarik magnet, *EDS* menggunakan gaya tolak-menolak untuk melayang. Sistem ini digunakan oleh kereta *maglev* Jepang (MLX).
3. *Hybrid Electromagnetic Suspension* (*HEMS*), dengan tujuan untuk mengurangi konsumsi tenaga listrik pada sistem *EMS*, magnet permanen (PM) digunakan bersamaan dengan elektromagnet.

1.2 Perumusan Masalah

Dari latar belakang yang telah disampaikan, dalam penelitian ini permasalahan yang muncul adalah:

1 Rancang bangun purwarupa sistem kereta melayang.

2 Pengaturan kontinyu jarak celah celah (*gap*) antara rel dan elektromagnet kereta.

1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Terciptanya purwarupa kereta magnet.
2. Suspensi magnet dapat menjaga celah antara rel dan elektromagnet.

Sedangkan manfaat dari penelitian ini adalah meningkatkan kemampuan perguruan tinggi Indonesia untuk menguasai ilmu dan pengaplikasian teknologi magnet dalam berbagai bidang teknik. Teknologi ini dapat digunakan sebagai peralatan lainnya, misal *table motion* pemesinan dan bantalan magnetik. Penggunaan teknologi magnet meningkatkan ketepatan dan ketelitian suatu

peralatan karena tidak adanya gesekan. Gaya gesek merupakan penyebab peralatan tidak tepat dan teliti dalam menentukan posisi.

1.4 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini batasan masalah yang perlu diperhatikan adalah:

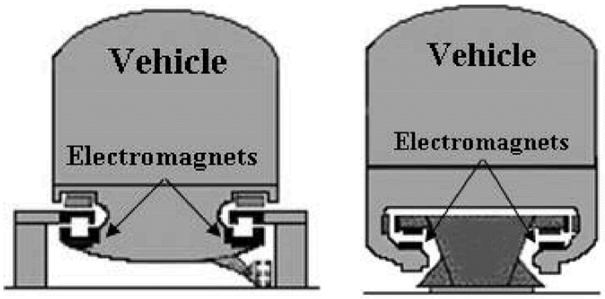
1. Sistem suspensi yang digunakan adalah *Electromagnetic Suspension* (*EMS*).
2. Kereta melayang tidak dilengkapi dengan sistem pendorong dan pengereman.
3. Tidak membahas pergerakan ke arah samping.
4. Panas yang ditimbulkan elektromagnet diasumsikan *steady* dan temperatur dibawah 70°C.
5. Perancangan elektromagnet hanya mengatur nilai penampang, panjang kawat, jumlah lilitan, massa, hambatan dan arus.
6. Distribusi beban terletak pada titik berat dari struktur kereta.
7. Seluruh elektromagnetik yang yang digunakan pada kereta adalah identik.
8. Tidak mengembangkan sinkronisasi antar penggerak (sistem kendali *standalone*)
9. Sistem pembangkit daya tidak diletakkan di atas kereta.
10. Jalur rel lurus dan datar sepanjang 1 meter.
11. Material kereta yang digunakan adalah non-*ferrous* (kecuali inti elektromagnet dan rel).
12. Tidak membahas *material properties* dari kawat tembaga, inti elektromagnet dan rel.
13. Penelitian tidak menggunakan RCL *(Resistive-Capacitive-Inductive)* meter.

BAB 2
KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Kajian Pustaka

2.1.1 *Electromagnetic Suspension* (*EMS*)

Gaya untuk melayang didapatkan dari gaya tarik magnet antara rel dan elektromagnet. Metode ini dinilai kurang stabil karena karakteristik magnet yang tidak stabil pula (Riches, 1988). Ketepatan jarak celah antara rel dan kereta sangat diperlukan untuk menjaga keseragaman celah. *EMS* umumnya melayang dengan celah kecil sekitar ± 10 mm. Semakin besar celah mempermudah sistem *EMS* dalam menjaga celah saat melaju pada kecepatan tinggi. Namun secara teknis, *EMS* lebih mudah dibandingkan dengan *Electrodynamic Suspension* (*EDS*). *EMS* mampu melayang dengan sendirinya saat diam atau kecepatan rendah sedangkan *EDS* tidak bisa melakukan hal tersebut. *EDS* membutuhkan kecepatan tertentu untuk melayang. Pada kecepatan rendah, *EDS* menggunakan roda untuk berjalan hingga melayang pada kecepatan tertentu.



(a) (b)

Gambar 2.1 *Electromagnetic Suspension* (a) Sistem melayang dan *guidance* terintegrasi. (b) Sistem melayang dan *guidance* terpisah. (Lee dkk, 2006)

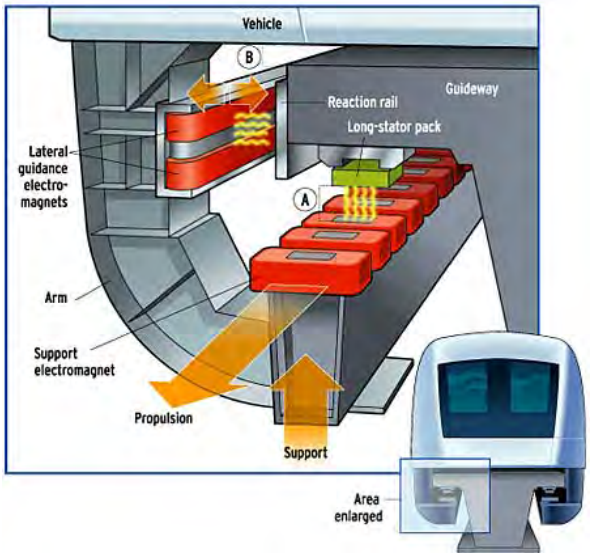
Pada sistem *EMS*, terdapat dua tipe teknologi:

1) Sistem melayang dan *guidance* menjadi satu sistem yang terintegrasi seperti UTM Korea dan *HSST* Jepang (Gambar 2.1a) dan
2) Sistem melayang dan *guidance* terpisah seperti Transrapid Jerman (Gambar 2.1b).

Teknologi terakhir lebih disukai karena memungkinkan kereta melaju dengan kecepatan tinggi. Hal tersebut bisa terjadi karena sistem melayang dan sistem *guidance* tidak berhubungan, namun mengakibatkan jumlah *controller* meningkat. Teknologi melayang dan *guidance* yang terintegrasi lebih cocok beroperasi pada kecepatan rendah. Konsumsi tenaga kereta sistem tersebut juga lebih kecil karena jumlah elektromagnet dan *controller* lebih sedikit. Namun ketika berjalan pada kecepatan tinggi, gangguan antara gaya melayang dan *guidance* semakin besar dan sulit dikendalikan secara simultan (Kusagawa, 2004).

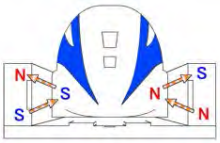
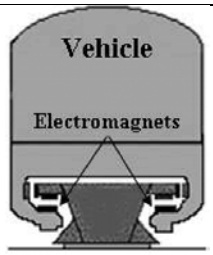
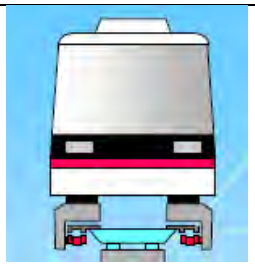
Hingga tahun 2014, kereta *Maglev* yang telah digunakan sebagai transportasi publik adalah *Shanghai Maglev Train SMT* (Gambar 2.2). *SMT* menggunakan sistem *EMS* dengan sistem melayang dan *guidance* terpisah. Gambar 2.3 adalah ilustrasi sistem *EMS* pada *SMT*.

Gambar 2.2 *Shanghai Maglev Train* (*SMT*) menggunakan *EMS* dengan sistem melayang dan *guidance* terpisah.



Gambar 2.3 Ilustrasi *Transrapid Levitation System Rail-Train* (Lee dkk, 2006)

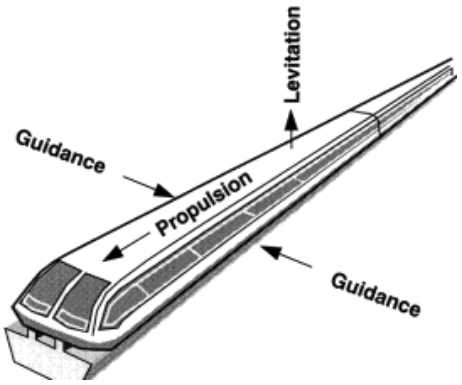
Tabel 2.1 Perbandingan Teknologi Kereta Maglev (*HSST System International Inc.*)

Name	**JR MLX 01**	**TRANSRAPID**	**HSST-100L**
Country	**Japan**	**Germany**	**Japan**
Levitation	Electro Dynamic	Electro Magnetic	Electro Magnetic
	(Repulsive)	(Attractive)	(Attractive)
Propulsion	LSM (Linear Synchronous Motor)	LSM (Linear Synchronous Motor)	LIM (Linear Induction Motor)
	(Long Stator)	(Long Stator)	(Short Stator)
			
Speed Range	500 km/h	500 km/h	100 km/h

Tabel 2.1 menunjukkan perbandingan kereta *maglev* (*existing)* yang dikembangkan hingga tahun 2015. JR MLX 01 adalah kereta *maglev* yang menggunakan teknologi *EDS*. JR MLX 01 memanfaatkan sifat tolak menolak magnet untuk membuat kereta melayang. Baik JR MLX 01 maupun Transrapid mampu mencapai kecepatan 500 km/jam. Sedangkan HSST-100L dari Jepang hanya mampu berada pada kecepatan 100 km/jam. Hal ini disebabkan karena HSST-100L beroperasi pada jalur perkotaan jarak dekat. Keterbatasan kecepatan disebabkan sistem melayang dan *guidance* menjadi satu. Untuk mengetahui lebih detail bagaimana cara kerja HSST-100L, informasi lebih lengkap dapat dilihat pada Lampiran 2.

2.1.2 Pemandu (*Guidance*)

Kereta maglev membutuhkan gaya untuk mencegah pergerakan lateral dan tetap menjaga kereta pada jalurnya. *Guidance* bekerja dengan penggerak elektromagnetik, tarik-menarik ataupun tolak-menolak.



Gambar 2.4 Tiga sumbu gerakan Kereta *Maglev* (http://inventors.about.com)

Gambar 2.4 di atas menjelaskan bahwa kereta *maglev* memiliki tiga sumbu gerakan, *levitation, guidance* dan *propulsion*. Gaya melayang atau *levitation* mengangkat kereta keatas, penggerak gaya *levitation* adalah elektromagnet. Gaya *propulsion* didapatkan dari motor linier disepanjang rel. Dan sistem *guidance* menjaga badan kereta agar tidak bersentuhan dengan rel. Pengerak sistem *guidance* ini adalah elektromagnet yang saling tarik menarik dengan rel. Bentuk elektromagnet *guidance* tampak pada Gambar 2.3.

2.1.3 Sistem Tenaga Kereta Melayang Magnet

Kereta *maglev* memiliki baterai pada badan kereta, namun suplai tenaga listik eksternal tetap dibutuhkan. Energi listrik digunakan untuk melayang, pendorong, peralatan elektrik pada kereta, isi ulang baterai dan lain lain. Kereta magnet mengambil energi di sepanjang jalurnya dengan menggunakan generator linier atau kontak mekanik berdasarkan kecepatan operasional. (Lee dkk, 2006)

Untuk kecepatan operasional menengah kebawah (<100 km/jam) sebagian besar kereta *maglev* menggunakan kontak mekanik seperti *pantograph*. Sedangkan untuk kecepatan tinggi, kereta *maglev* tidak dapat menerima tenaga melalui kontak

mekanik. Kereta Transrapid Jerman (sistem *EMS*) menggunakan generator linier yang menyatu dengan *levitation electromagnets*.

2.1.4 Sensor Celah

Beberapa jenis sensor dapat digunakan untuk membaca celah antara rel dengan kereta, yaitu:

1. Sensor *Hall Effect*

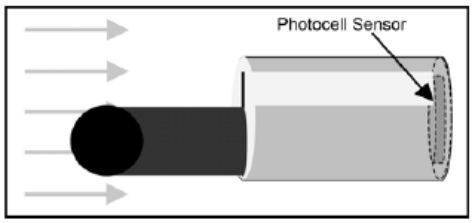
   Dalam beberapa penelitian, sistem pembacaan celah antara elektromagnet dan rel menggunakan sensor *hall effect.* Pada proyek *levitasi* dengan *feedback system* (Lilienkamp dkk, 2004), *Electromagnetic Levitation Theses* (Williams, 2005) dan *small-scale maglev train* (Black dkk, 2009) menggunakan sensor *hall effect* untuk membangun sistem *levitation* ini. Ketiga penelitian tersebut menggunakan sensor *hall effect* tipe SS495A seperti pada Gambar 2.5 di bawah ini.

Gambar 2.5 Honeywell SS495A *Ratiometric Linear Sensor*

   Sensor ini membaca besar medan magnet dan mengubahnya menjadi tegangan. Jangkauan magnetik yang mampu dibaca adalah -670 hingga +670 Gauss (-67 mT s/d +67 mT) dan output tegangan antara 0,4 hingga 4,6 volt (dengan tegangan suplai 5v).

2. Sensor Optik

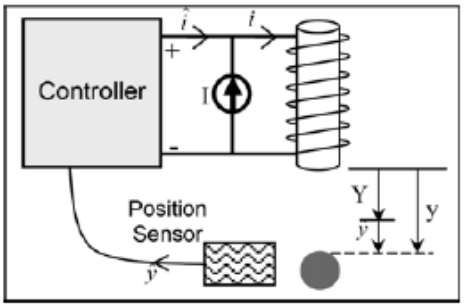
   Pada beberapa *test bed EMS* menggunakan sensor optik dengan basis *photocell*. Sebuah pelindung cahaya diletakkan untuk membuat penampang vertikal di sepanjang *photocell* dalam upaya meningkatkan pembacaan sensor. Konfigurasi sensor posisi jenis ini seperti Gambar 2.6 di bawah.



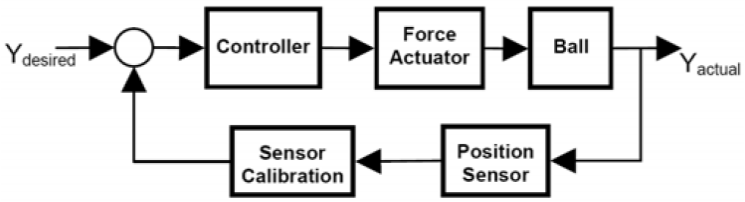
Gambar 2.6 Sensor posisi berbasis optik (*photocell)*

2.1.5 Sistem Kendali Celah

Dalam perancangan kendali untuk sistem *maglev,* setiap komponen dimodelkan dalam persamaan dinamik. Sub-sistem sensor dimodelkan dengan mengukur output tegangannya sebagai pembacaan sensor cahaya. Gambar 2.7 menunjukkan pemasangan sistem kendali dasar dari sistem melayang. Medan magnet menghasilkan gaya tarik terhadap setiap objek magnetik yang diletakkan di bawahnya. Sebuah sensor posisi mendeteksi perubahan posisi vertikal dari objek dan mengirimkannya menuju *controller*. Kemudian *controller* mengatur arus yang melewati penggerak elektromagnet berdasarkan posisi objek untuk mendapatkan posisi melayang yang stabil.



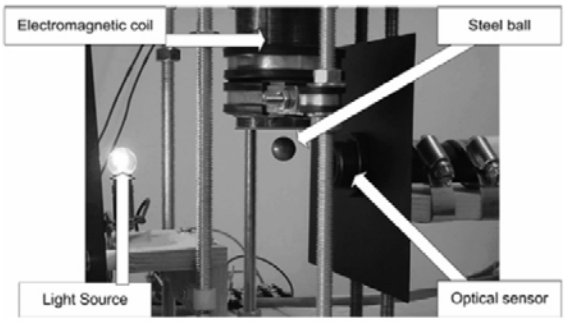
Gambar 2.7 Skema sistem melayang magnetik (Yaghoubi, 2012)



Gambar 2.8 Blok diagram sistem melayang magnetik (Yaghoubi, 2012)

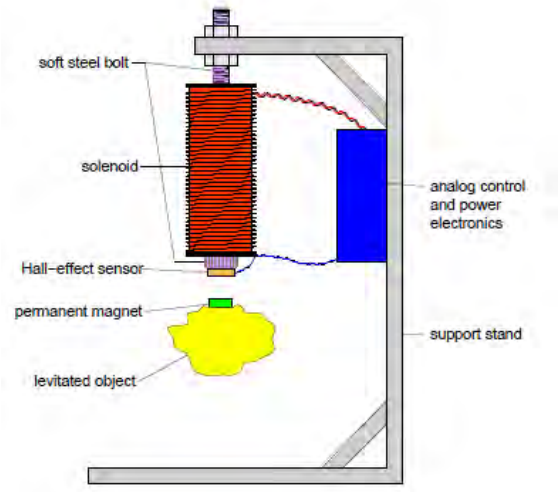
Gambar 2.8 adalah blok diagram *closed-loop system maglev. Controller* pada sistem tersebut didesain dengan *settling time* ≤ 1,0 s dan persentase *overshoot*

≤ 50%. *Controller* linier ini mampu menahan bola besi pada posisi stabilnya seperti pada Gambar 2.9 di bawah.



Gambar 2.9 Bola baja melayang stabil dengan sensor cahaya (Kim dkk, 2006)

Bentuk lain dari sistem melayang magnetik adalah dengan menggunakan sensor *hall effect* (Lilienkamp dkk, 2004). Lilienkamp dkk menggunakan sistem kendali berbasis analog dan magnet permanen yang ditempel pada objek melayang. Skema peralatan yang disusun oleh Lilienkanmp dkk ditunjukkan oleh Gambar 2.10.

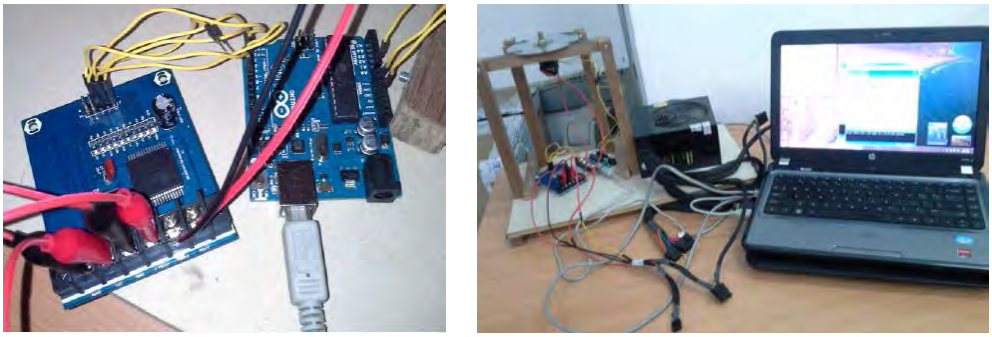


Gambar 2.10 Sistem melayang dengan sensor *hall effect* (Lilienkamp dkk, 2004)

Penelitian lain tentang sistem melayang magnetik dengan menggunakan sensor *hall effect* (Patriawan, 2013) telah berhasil mengangkat magnet permanen berbahan dasar *ferrous.* Penelitian oleh Patriawan, 2013 dalam Gambar 2.11 menggunakan *microcontroller* arduino dan *H-Bridge* (*driver motor*) VNH3SP30

sebagai komponen utama sistem kendali. Tegangan *power supply* yang digunakan adalah 5 volt untuk rangkaian dan 12 volt untuk elektromagnet. Daya *power supply* yang digunakan adalah 400 Watt diambil dari *power supply* komputer *desktop*. Penelitian tersebut menyebutkan bahwa sistem *maglev* dapat stabil dengan kendali *PD*. Nilai *gain* Kp dan Kd adalas sebesar 1,25 dan 0,5.

Peralatan tersebut menggunakan elektromagnet *DC* sebagai penggerak. Apabila menggunakan tipe elektromagnetik yang lain perbandingannya bisa dilihat pada Tabel 2.2 di bawah.



(a) (b)

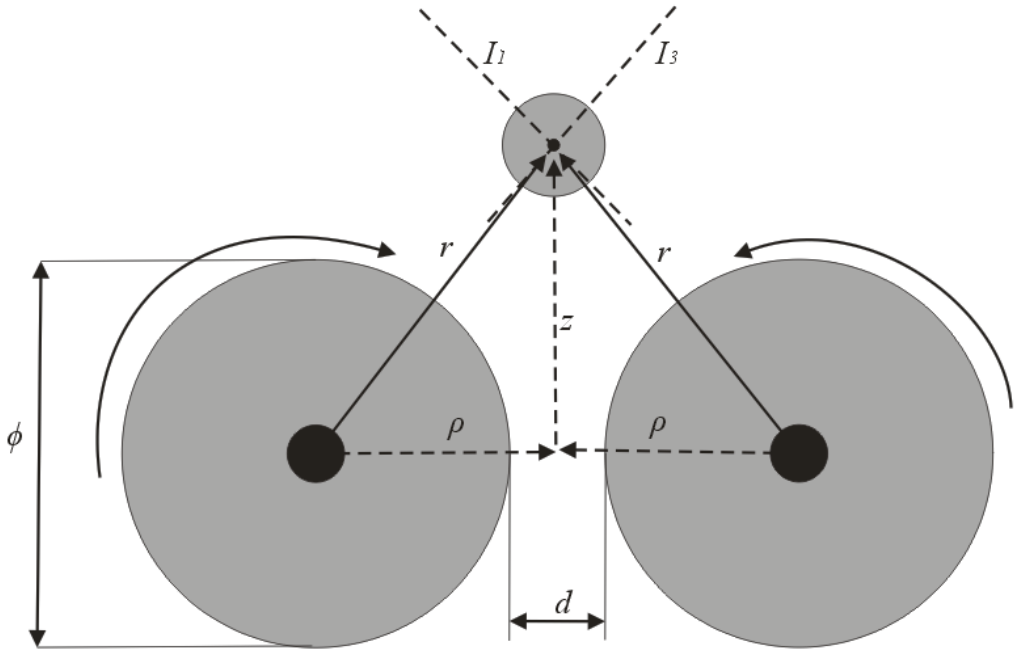
Gambar 2.11 Sistem *maglev test* yang dibuat oleh Patriawan, 2013. (a) Komponen utama kendali *H-bridge* VNH3SP30 (kiri) dan *microcontroller* arduino uno (kanan) (b) Sistem *maglev test* yang telah terangkai dengan *power supply,* elektromagnet dan komputer.

Tabel 2.2 Perbandingan Sistem maglev dalam hal tipe magnet dan *controllability* (Chen dkk, 2000)

Comparison of maglev systems

Maglev system	Index	Type of magnets	Battery on carrier	Controllability
Attractive	A1	DC electromagnet	large size	good
	A2	Hybrid magnet	medium size	fair
	A3	AC electromagnet	no	good
Repulsive	R1	DC electromagnet	medium	good
	R2	Permanent magnet	no	poor

Tabel 2.2 menunjukkan bahwa untuk sistem *maglev* dengan cara kerja tarik-menarik (*attractive*) elektromagnet DC dan AC memiliki *controllability* yang baik. Namun pada elektromagnet DC membutuhkan ukuran baterai yang besar di badan kereta sedangkan elektromagnet AC tanpa baterai di badan kereta.

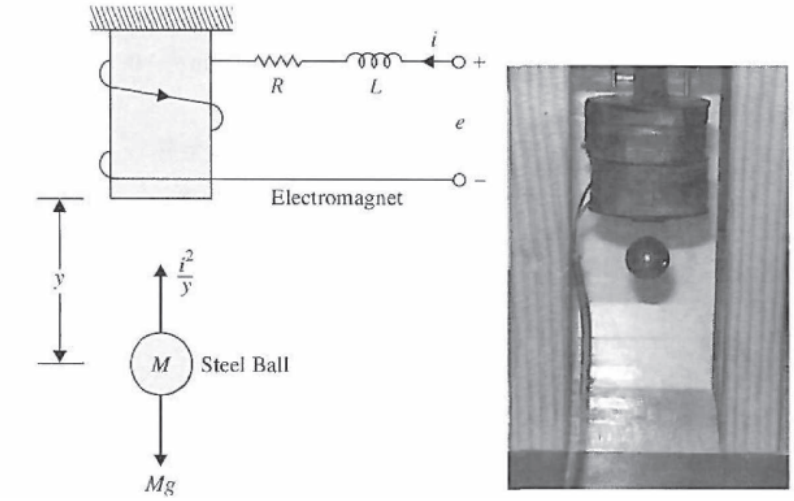


Gambar 2.12 Pemodelan vektor pada sistem levitasi magnet permanen di atas dua roll tembaga yang berputar (Bangga dkk, 2009)

Gambar 2.12 menunjukkan penelitian tentang dua tembaga silindris yang berputar dapat menyebabkan objek dapat melayang. Cara kerja peralatan tersebut mirip seperti levitron. Jika levitron melayang akibat magnet dan putaran objek, pada peralatan ini objek justru melayang akibat dua tembaga silindris yang diputar.

2.1.6 Simulasi Numerik Elektromagnet sebagai *Magnetic Levitator*

Beberapa penelitian mengenai pemodelan *magnetic levitation* telah dilakukan. Salah satu penelitian pemodelan *maglev* tersebut dibahas pada buku teks *Automatic Control Systems* oleh F. Golnaraghi dan B.C Kuo. Sistem *maglev* tersebut tampak pada Gambar 2.13 di bawah ini.



Gambar 2.13 Sistem suspensi magnet-bola (Golnaraghi dan Kuo, 2010)

Dimana:

e(t)	= tegangan input	L	= induktansi lilitan
y(t)	= posisi bola	M	= massa bola
i(L)	= arus lilitan	g	= percepatan gravitasi
R	= hambatan lilitan		

Didefinisikan *state variable* $x_1(t)$ = y*(t)*; $x_2(t)$ = dy*(t)*/dt; dan $x_3(t)$ = i*(t)*. Persamaan *state* dari sistem adalah

$$\frac{dx_1(t)}{dt} = x_2(t) \qquad 2.1$$

$$M.\frac{dx_2(t)}{dt} = M.g - \frac{x_3^2(t)}{x_1(t)} \qquad 2.2$$

$$\frac{dx_3(t)}{dt} = -\frac{R}{L}x_3(t) + \frac{1}{L}e(t) \qquad 2.3$$

Menghitung gaya tarik elektromagnet melalui persamaan Lorentz (Persamaan Lorentz akan dibahas pada sub-bab 2.2.2), subtitusi Persamaan B = (μ0. N.i)/ ℓ, dengan F = ℓ .i *x B* menghasilkan Persamaan 2.4.

$$F = \ell \,.\, i \times (\mu_0 \,.\, N.i) / \ell \qquad 2.4$$

Perkalian vektor dianggap bernilai satu (cos 0 = 1) sehingga

$$F = i^2 \,\mu_0 \,.\, N \qquad 2.5$$

Notasi F adalah gaya magnet, i adalah arus, μ_0 adalah permeabilitas vakum, N adalah jumlah lilitan. Jika K adalah koefisien yang menghubungkan antara gaya magnet yang menarik bola dengan rumus K = μ_0 . N, Maka

$$F = K\, i^2 \qquad 2.6$$

Asumsi gaya tarik magnet berbanding terbalik dengan jarak celah antara magnet dan bola baja, maka persamaan gaya tarik magnet menjadi

$$F = \frac{K\, i^2}{y} \qquad 2.7$$

Dengan meninjau ulang Persamaan Persamaan 2.2 maka persamaan dinamik mekanik pada sistem *maglev* adalah

$$M.\frac{d^2y(t)}{dt^2} = M.g - K\frac{\boldsymbol{i^2}(t)}{\boldsymbol{y}\,(t)} \qquad 2.8$$

Linierisasi sistem di sekitar jarak setimbang (*equilibrium*) $y_0(t)$ = konstan, maka $\frac{d^2y_0(t)}{dt^2} = 0$, Nilai nominal dari i(t) diketahui dari subtitusi.

$$i_0(t) = \sqrt{\frac{Mgy_0}{K}} \qquad 2.9$$

Subtitusi x_3=i(t) dan operasi aljabar terhadap Persamaan 2.3 menghasilkan persamaan 2.10

$$e(t) = R.i(t) + L\frac{di(t)}{dt} \qquad 2.10$$

Bentuk akhir persamaan *state* dituliskan dengan matriks koefisien A dan B *state space* sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{g}{y_0} & 0 & -\frac{K}{My_0{}^2i} \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \text{ dan } B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} \qquad 2.11$$

Peneltian lain mengenai pemodelan *maglev* dari D.B. Wibowo dan S. Sutomo (2011) dengan bentuk *state-space* sebagai berikut

$$A = \begin{matrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{-2i_0{}^2k}{m\ x_0{}^3} & -\frac{k_{FV}}{m} & \frac{2i_0k}{m(x_0)^2} \\ 0 & 0 & \frac{i}{T_a} \end{matrix}$$

$$B = \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ \frac{k_ik_{DA}}{T_a} \end{matrix} \qquad 2.12$$

$$C = \begin{matrix} k_xk_{AD} & 0 & 0 \end{matrix}$$
$$D = \begin{matrix} 0 \end{matrix}$$

Dengan parameter-parameter simulasinya tertulis dalam Tabel 2.3 berikut

Tabel 2.3 Parameter simulasi oleh D.B Wibowo dan S. Sutomo

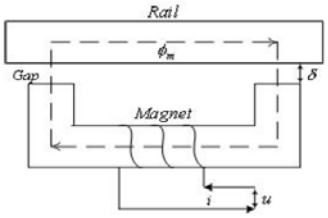
Massa bola	m	18,4 x 10^{-3} kg
Posisi bola	x	0,0032 m
Percepatan gravitasi	g	9,81 m/s^2
Coil offset	x_0	0,0083 m
Konstanta magnet	k	9,5814x10^{-6} Nm^2/A^2
Damping constant	k_{FV}	0,02 N.s/m
Power amplifire gain	k_i	0,2967 A/V
Power amplifier time constant	T_a	8,9021x10^{-5} s
D/A converter gain	k_{DA}	5 V
D/A converter offset	μ_0	0
A/D converter gain	k_{AD}	0,2 V
A/D converter offset	U_{MU0}	0
Posisi sensor gain	k_x	612,3 V/m
Posisi sensor offset	y_0	0
Arus	i	0,7 A

Ketiga adalah penelitian oleh Huajie dkk, 2003 yang berjudul "*The Levitation Control Simulation of maglev Bogie Based on Virtual Prototyping Platform and Matlab*". Pemodelan tersebut menggunakan *virtual prototype* menggunakan ADAMS. Sedangkan bentuk magnet yang digunakan seperti pada Gambar 2.14 dan blok diagramnya seperti pada Gambar 2.15.

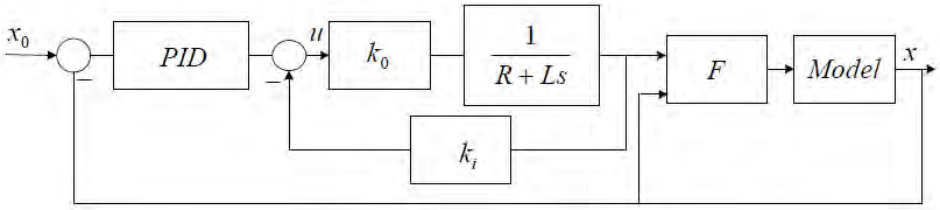
Voltage-balance formulation

$$u = R \cdot I + \frac{\mu_0 AN^2}{2\delta_0} \cdot \dot{I} \qquad 2.13$$

μ_0 = permeabilitas ruang hampa; A=luasan magnet; N= Jumlah lilitan; R=Hambatan elektromagnet; δ_0 jarak celah; I = arus

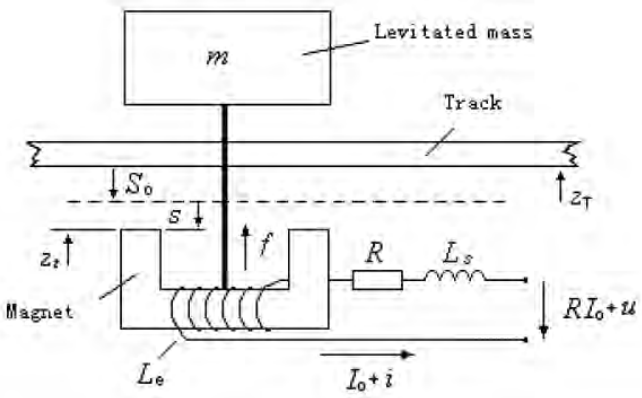


Gambar 2.14 Bentuk magnet dan medan magnetik (Huajie dkk, 2003)



Gambar 2.15 Diagram *transfer function* sistem (Huajie dkk, 2003)

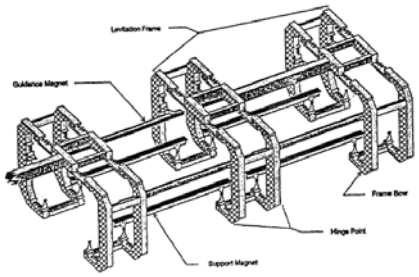
Blok diagram pada Gambar 2.15 terdiri dari *preceding controller* dan *current loop. Current loop* adalah umpan balik arus dan *preceding controller* menggunakan metode kendali *PID*.



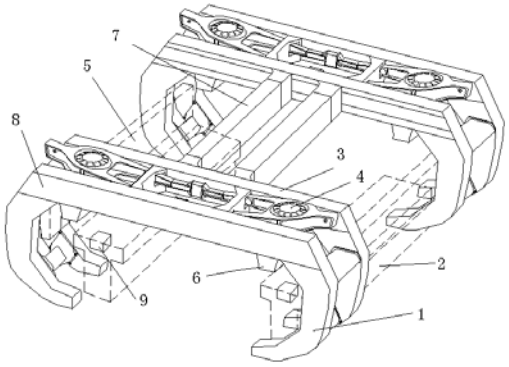
Gambar 2.16 Model massa untuk pergerakan vertikal kereta (Guangwei dkk, 2007)

2.1.7 Konstruksi Kereta-Rel

Konstruksi *bogie* atau bagian bawah kereta melayang *EMS* memiliki bentuk seperti pada Gambar 2.17 dan Gambar 2.18. Sebuah kereta *maglev* membutuhkan elektromagnet, rel besi, sensor, sistem tenaga untuk elektromagnet dan *advanced feedback system* untuk beroperasi.

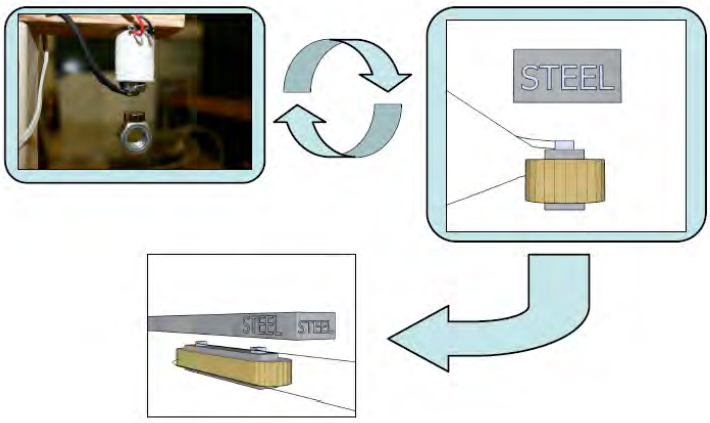


Gambar 2.17 *Bogie* Transrapid 07 sebagai referensi (Sands, 1992)

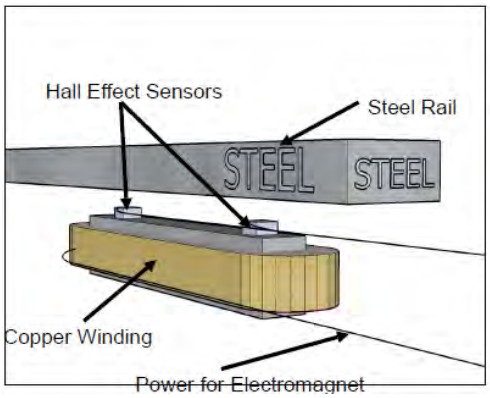


Gambar 2.18 Bogie dari sebuah *High Speed Maglev Train* 1.Support arm, 2.Levitation Magnet, 3.Crossbeam, 4.Air spring & Pendulum arm, 5.Guidance magnet, 6.Support Skid, 7.Torsional longeron, 8.Levitation frame unit, 9.Gap Sensor (Zhisu, 2009)

Dari penelitian sebelumnya (Black dkk, 2009) dapat teridentifikasi langkah-langkah untuk membuat kereta melayang magnetik. Langkah pertama adalah menciptakan sebuah sistem melayang magnetik sederhana. Gaya tarik elektromagnet yang cukup kuat dapat menarik beban yang lebih berat dari berat elektromagnet penariknya. Posisi beban dan elektromagnet dapat ditukar. Membalik posisi elektromagnet sesuai posisi sebenarnya pada kereta *maglev*. Langkah-langkah pembuatan kereta *maglev* oleh Black dkk tampak pada Gambar 2.19 dan Gambar 2.20.



Gambar 2.19 Diagram alir menjelaskan bagaimana mengubah sistem melayang sederhana menjadi kereta magnet. Pembalikan seluruh sistem dan perpanjangan dari elektromagnet untuk menyesuaikan rel besi. (Black, 2009)



Gambar 2.20 Peletakan sensor, elektromagnet dan rel besi. (Black, 2009)

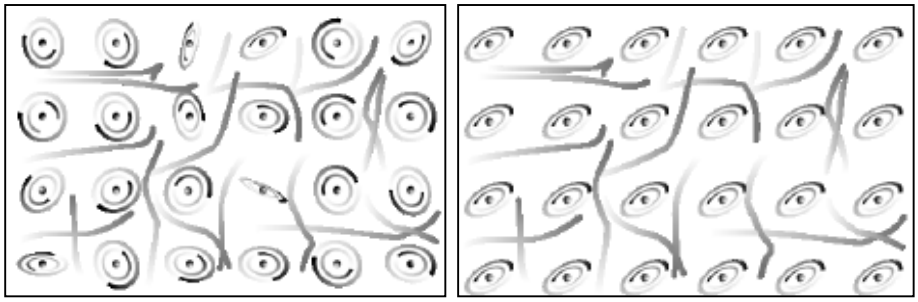
Gambar 2.20 adalah konstruksi *maglev* yang rancang oleh Black. Elektromagnet dibentuk dengan satu inti memanjang dan diameter lilitan dibuat melebar. Sensor *hall effect* diletakkan pada celah antara inti elektromagnet dan rel baja.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Fenomena Atom pada Magnet

Sifat material logam berbeda dengan material non-logam karena bagian terluar sebagian besar elektron bebas pada logam bergerak dan memposisikan dirinya pada atom tertentu. Logam yang terpengaruh oleh magnet adalah yang

mampu meluruskan rotasi elektronnya sehingga setiap sumbu atom paralel. Mengingat gaya magnet adalah gaya yang disebabkan muatan yang bergerak. Gambar 2.21 menunjukkan perbedaan logam tanpa pengaruh magnet dan logam dengan pengaruh magnet.



(a) (b)

Gambar 2.21 Perubahan atom akibat pengaruh magnet (a) Logam tanpa pengaruh magnet (b) Logam dengan pengaruh magnet

2.2.2 Elektromagnet

Motor action adalah sebuah peralatan yang mengubah energi elektrik menjadi mekanik. Sedangkan *generator action* adalah peralatan yang mengubah energi mekanik menjadi elektrik. Proses konversi energi elektro-mekanikal dapat diekspresikan sebagai berikut:

$$\text{Energi elektrik} \xrightarrow{\text{Motor}} \text{Energi mekanik}$$

$$\text{Energi elektrik} \xleftarrow{\text{Generator}} \text{Energi mekanik}$$

Elektromagnet sebagai penggerak dapat disebut sebagai *motor action*. Berikut ini adalah sifat-sifat yang dimiliki sebuah elektromagnet. (Nurhadi dkk, 2013)

- Kuat Medan Elektromagnet pada Solenoida (Kraus dkk, 1973)

Solenoida adalah kawat panjang yang dililitkan pada inti yang berbentuk silinder (Gambar 2.22). Besar induksi magnet pada ujung solenoida dapat ditentukan dengan persamaan:

$$B = (\mu_0 . N.i)/ \ell \qquad 2.14$$

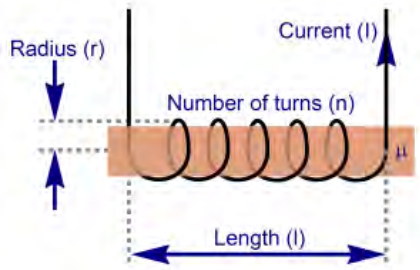
B = Kuat medan magnet (Tesla)

μ_0 = permeabilitas vakum ($4\pi . 10^{-7}$ Wb/Am)

I = Kuat arus listrik yang mengalir melalui kawat (A)

N = Banyak lilitan

ℓ = Panjang solenoida (m)



Gambar 2.22 Pengukuran medan magnet pada solenoida dengan inti besi (calctool.org)

- Interaksi

Sebuah konduktor yang didekatkan pada medan magnet akan mengalami gaya mekanis. Persamaan gaya Lorentz menyatakan gaya F sebagai:

$$F = \ell . i \, x \, B \qquad 2.15$$

F = Gaya magnetik (N)

ℓ = panjang solenoida (meter)

2.2.3 Sistem Dinamik dan Pengendalian Otomatis

Sistem adalah suatu kesatuan komponen yang terhubung dan berinteraksi dimana respon keadaan satu komponen berpengaruh terhadap keadaan komponen lainnya. Dalam lingkup sistem sendiri terdapat beberapa komponen yang dapat mempengaruhi keadaan dari suatu sistem tersebut, yaitu kondisi awal (*initial condition)*, input eksternal (dapat berupa gangguan), serta output. (Nurhadi dkk, 2011).

Initial condition dari sistem adalah suatu penjelasan mengenai kondisi tertentu dari sistem pada waktu tertentu yang dapat mempengaruhi kondisi sistem

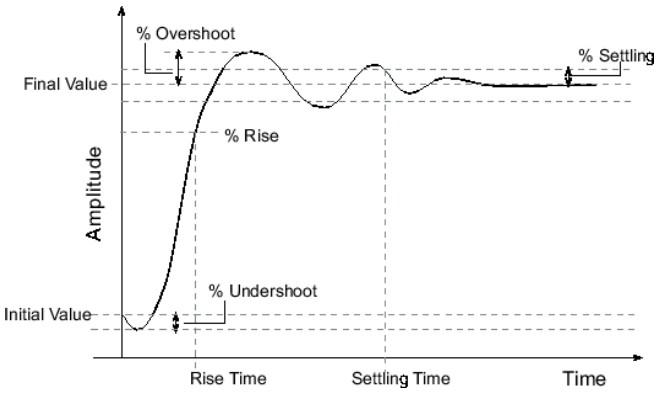
selanjutnya. Input dari sistem sendiri adalah masukan yang diberikan terhadap sistem pada baik yang sengaja maupun yang tidak. Sedangkan Output dari sistem merupakan respon yang ditunjukkan oleh sistem akibat pengaruh dua komponen sebelumnya.

Dalam persamaan matematika. Sistem dinamik direpresentasikan dengan persamaan diferensial yang diturunkan terhadap waktu. Hal ini menunjukkan bahwa sistem dinamik merupakan sistem yang bergantung terhadap waktu dan hal ini pula yang membedakan sistem dinamik dengan sistem statis, dimana dengan persamaan aljabar biasa dan tidak berubah terhadap berubahnya waktu.

Dalam konsep sistem dinamik terdapat istilah *transient response*, yaitu respon output yang terjadi pada saat transisi dari kondisi awal hingga kondisi akhir. Pada *transient response* sendiri juga dikenal beberapa istilah yang nantinya dijadikan acuan dalam konsep pengendalian, diantaranya adalah:

- *Peak time* yaitu waktu yang dibutuhkan untuk mencapai puncak pertama dari suatu respon,
- *Rise time* yaitu waktu yang dibutuhkan untuk mencapai 90% dari nilai yang diinginkan,
- *Settling time* yaitu waktu yang dibutuhkan untuk mencapai *steady state* dengan toleransi tertentu, dan yang terakhir adalah
- Persentase *overshoot* yaitu perbandingan antara selisih nilai pada saat puncak dan kondisi akhir dengan kondisi akhir itu sendiri.

Disamping *transient response*, dikenal juga *steady state response*, yaitu respon pada saat sistem mencapai nilai akhir. Istilah yang digunakan dalam konsep pengendalian di *steady state response* ini adalah *steady state error* yang merupakan kesalahan nilai akhir yang tidak sesuai dengan yang diinginkan. Beberapa istilah di atas diilustrasikan seperti Gambar 2.23.



Gambar 2.23 Grafik *step response system.*

Seperti yang telah dijelaskan di atas bahwa sistem dinamik dalam persamaan matematikanya direpresentasikan dengan persamaan diferensial, contoh persamaan diferensial dari sistem dinamik adalah sebagai berikut:

$$\frac{d^2y}{d^2t} + a_1\frac{dy}{dt} + a_0y = f(t) \quad 2.16$$

$$y(0) = y_0 \quad 2.17$$

$$\frac{dy}{dt}(0) = \dot{y}_0 \quad 2.18$$

Persamaan di atas dapat diubah menjadi persamaan berikut

$$y + a_1\dot{y} + a_0y = f(t) \quad 2.19$$

$$\dot{y}(0) = \dot{y}_0 \quad 2.20$$

Persamaan di atas dapat diubah kedalam bentuk lain dengan memasukkan operator diferensial yaitu:$y = \frac{d}{dt}$; $Dy = \frac{dy}{dt}$; $D^2y = \frac{d^2y}{dt^2}$ sehingga Persamaan 2.16 menjadi seperti berikut:

$$D^2y + a_1Dy + a_0y = f(t)$$

$$(D^2 + a_1D + a_0)y = f(t) \quad 2.21$$

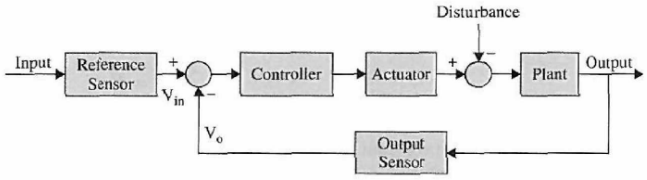
Transfer function adalah persamaan yang merepresentasikan hubungan antara input dengan outputnya. Untuk mendapatkan persamaan *transfer function*, perlu mentransformasikan persamaan diferensial di atas menjadi persamaan Laplace, sehingga Persamaan 2.21 menjadi persamaan seperti berikut:

$$(s^2 + a_1s + a_0)\,Y(s) = F(s)$$

$$\frac{Y(s)}{F(s)} = \frac{1}{(s^2+a_1s+a_0)} \quad 2.22$$

Persamaan 2.22 merupakan persamaan *transfer function* dari sebuah sistem dinamik.

Untuk menggambarkan suatu sistem, terkadang diperlukan juga sebuah blok diagram. Blok diagram merupakan diagram yang menggambarkan sistem secara keseluruhan yang didalamnya terdapat komponen seperti input, gangguan (*disturbance*), output maupun kendali (*controller*) serta hubungan diantara komponen-komponen tersebut. Contoh sederhana dari sebuah blok diagram dapat dilihat pada Gambar 2.24 berikut:



Gambar 2.24 Blok diagram sederhana dari suatu sistem

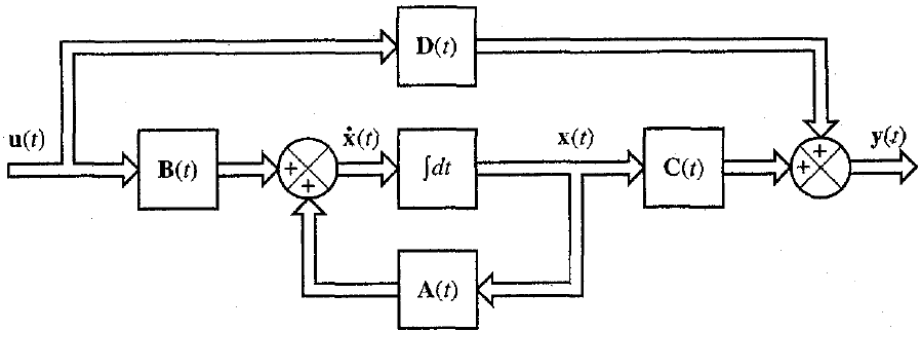
Pemodelan *State Space*

Bentuk *state-space* standar adalah sebagai berikut:

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{Ax} + \boldsymbol{Bu} \qquad 2.23$$

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{Cx} + \boldsymbol{Du} \qquad 2.24$$

Dimana x adalah vektor dari *state* variabel (nx1), $\dot{x}$ adalah turunan waktu dari vektor *state* (nx1), u adalah input atau vektor *control* (px1), y adalah vektor output, A adalah matriks sistem (nxn), B adalah matriks input (nxp), C adalah matriks output (qxn), D adalah matriks *feedforward* (qxp).



Gambar 2.25 Blok diagram dari *linear, continuous-time control system,* disajikan dalam bentuk *state space* (Ogata, 2002)

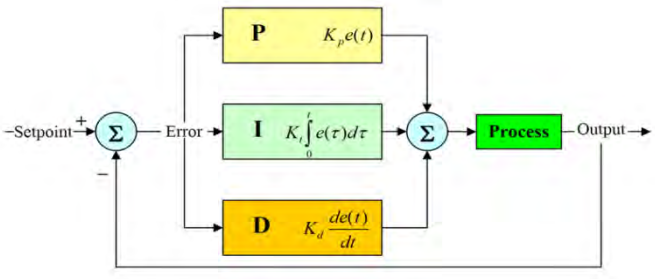
Persamaan 2.24 dibutuhkan karena seringkali *state* variabel yang tidak langsung diamati. Matriks output, C, digunakan untuk memperjelas *state* variabel mana yang digunakan oleh *controller*. Seringkali juga tidak ada *feedforward* langsung sehingga D adalah matriks kosong. Blok diagram *state space* disajikan dalam Gambar 2.25.

Kendali *Proportional-Integral-Derivative*

Penggunaan kendali *PID* pada sistem pengendalian proses sangatlah populer. Hal ini dikarenakan kontroler *PID* mempunyai struktur yang relatif lebih sederhana dan performansinya cukup baik. Blok diagram kendali *PID* seperti yang terlihat pada Gambar 2.26.

PID merupakan pengendali linier klasik yang sering digunakan di dunia industri dan aplikasi sistem kontrol lainnya. *PID* adalah komponen umpan balik dengan metode yang menggunakan tiga pengendali yaitu proporsional, integral dan derivative. Pengendali proporsional dapat mengurangi *error* sistem tiap satuan waktu, pengendali *integral* dapat mengeliminasi error statis dan meningkatkan ketelitian sertia pengendari *derivative* dapat menekan vibrasi output dan meningkatkan kestabilan (Nurhadi dkk, 2010).

Gambar 2.26 menunjukkan letak kendali *PID* pada sebuah blok diagram. Karakteristik *PID controller* sangat dipengaruhi oleh kontribusi besar dari ketiga parameter *P*, *I* dan *D*. Pengaturan konstanta Kp, Ki, dan Kd akan mengakibatkan penonjolan sifat dari masing-masing elemen. Satu atau dua dari ketiga konstanta tersebut dapat diatur lebih tinggi dibanding yang lain. Konstanta yang lebih tinggi akan memberikan kontribusi pengaruh pada respon sistem secara keseluruhan.



Gambar 2.26 Blok diagram kendali *PID* (wikipedia)

Gambar 2.26 menunjukkan letak kendali *PID* pada sebuah blok diagram. Karakteristik *PID controller* sangat dipengaruhi oleh kontribusi besar dari ketiga parameter *P*, *I* dan *D*. Pengaturan konstanta Kp, Ki, dan Kd akan mengakibatkan penonjolan sifat dari masing-masing elemen. Satu atau dua dari ketiga konstanta tersebut dapat diatur lebih tinggi dibanding yang lain. Konstanta yang lebih tinggi akan memberikan kontribusi pengaruh pada respon sistem secara keseluruhan.

Parameter Kp, Ki, dan Kd harus diatur kembali untuk mendapatkan performansi yang lebih baik lagi. Dalam mengendalikan *controller PID* diperlukan ketelitian dan keuletan untuk menemukan nilai yang optimal.

2.2.4 Analogi Pemodelan Sistem Elektrikal dan Mekanikal

Sistem elektrikal dan mekanikal memiliki persamaan berbeda namun hubungan analoginya setara. Kedua sistem memiliki hubungan analogi seperti pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Analogi pemodelan sistem elektrikal dan mekanikal

Key Concept: Analogous Quantities

Electrical Quantity	Mechanical Analog I (Force-Current)	Mechanical Analog II (Force Voltage)
Voltage, e	Velocity, v	Force, f
Current, i	Force, f	Velocity, v
Resistance, R	Lubricity, 1/B (Inverse friction)	Friction, B
Capacitance, C	Mass, M	Compliance, 1/K (Inverse spring constant)
Inductance, L	Compliance, 1/K (Inverse spring constant)	Mass, M
Transformer, N1:N2	Lever, L1:L2	Lever, L1:L2

Untuk memperjelas analogi dari Tabel 2.4 di atas, lihat komponen yang berada pada baris yang sama. Nilai dari analogi mekanikal memiliki karakteristik/sifat yang sama dengan kolom lainnya. Sebagai contoh bentuk Hukum Ohm e=i.R, pada *Mechanical Analog I* memiliki sifat yang sama dengan v=f/B. Karakteristik *voltage* (e) dengan *velocity* (v) adalah sama. *Current* (i) memiliki karakteristik yang sama dengan *force* (f). Terakhir *resistance* (R) berkarakter sama dengan *lubricity* atau *inverse friction* (1/B). Variabel-variabel

dari masing-masing kolom tidak dapat saling tukar, hanya memiliki sifat yang sama. Contoh-contoh lebih lengkap tersaji pada Tabel 2.5 dibawah ini.

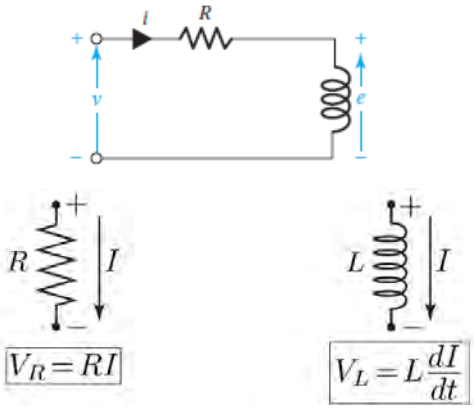
Tabel 2.5 Berbagai persamaan elektrik-mekanik dan kaitannya (http://lpsa.swarthmore.edu)

Electrical Equation	Mechanical Analog I (Force-Current)	Mechanical Analog II (Force Voltage)
$e = iR$	$v = \frac{f}{B}$	$f = vB$
$e = L\frac{di}{dt}$ $i = \frac{1}{L}\int e \cdot dt$	$v = \frac{1}{K}\frac{df}{dt}$ $f = K\int v \cdot dt = K \cdot x$	$f = M\frac{dv}{dt} = M \cdot a$ $v = \frac{1}{M}\int f \cdot dt$
$e = \frac{1}{C}\int i \cdot dt$ $i = C\frac{de}{dt}$	$v = \frac{1}{M}\int f \cdot dt$ $f = M\frac{dv}{dt} = M \cdot a$	$f = K\int v \cdot dt = K \cdot x$ $v = \frac{1}{K}\frac{df}{dt}$
$power = e \cdot i$	$power = v \cdot f$	$power = f \cdot v$
Transformer $\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{i_2}{i_1}$	Lever $\frac{v_1}{v_2} = \frac{L_1}{L_2} = \frac{f_2}{f_1}$	Lever $\frac{f_1}{f_2} = \frac{L_2}{L_1} = \frac{v_2}{v_1}$
capacitor energy $\frac{1}{2}C \cdot e^2$	mass energy $\frac{1}{2}M \cdot v^2$	spring energy $\frac{1}{2}K \cdot x^2 = \frac{1}{2}K \cdot \left(\frac{f}{K}\right)^2 = \frac{1}{2}\frac{f}{K}^2$
inductor energy $\frac{1}{2}L \cdot i^2$	spring energy $\frac{1}{2}K \cdot x^2 = \frac{1}{2}K \cdot \left(\frac{f}{K}\right)^2 = \frac{1}{2}\frac{f}{K}^2$	mass energy $\frac{1}{2}M \cdot v^2$

2.2.5 Rangkaian Elektronika Analog

- Rangkaian RL (*Resistive-Inductive*)

Setiap peralatan elektronik memiliki tiga komponen yakni *R-L-C (Resistance-Inductance-Capacitance)*. Rangkaian *RLC* terdiri dari hambatan (R), induktansi atau lilitan (L) dan kemampuan simpan energi listrik atau kapasitansi (C). Jika nilai C dianggap jauh lebih kecil dibandingan R dan L, maka perhitungan hanya menggunakan rangkaian RL yang disajikan pada Gambar 2.27.



Gambar 2.27 Hubungan antara arus dan tegangan pada hambatan dan induktor (Sarma, 2001)

Perhitungan tegangan pada hambatan (V_R) menggunakan rumus

$$V_R = R.i \qquad 2.25$$

Dan untuk menghitung tegangan (V_L) menggunakan rumus

$$V_L = L\ di/dt \qquad 2.26$$

- *Light Emitting Diode (LED)* Inframerah

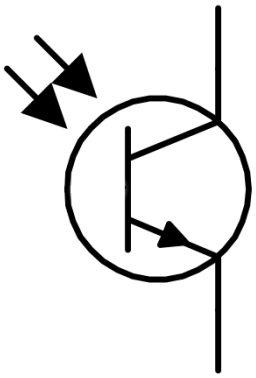
  LED adalah semikonduktor yang dapat memancarkan cahaya. Pemberian tegangan yang tepat pada LED menyebabkan elektron menyatu dengan lubang elektron (*electron hole*) dan melepaskan energi dalam bentuk *photon.* LED tersedia untuk gelombang cahaya tampak, ultraviolet, infrared. Gambar 2.28 menunjukkan LED Inframerah berdiameter 5 mm yang tersedia di pasaran.

  Inframerah adalah energi tak tampak, radiasi elektromagnetik dengan panjang gelombang lebih besar dibandingkan cahaya tampak. Bentang gelombang inframerah dimulai dari 700 nm (430 THz) hingga 1 mm (300 GHz).

Gambar 2.28 *Light emitting diode* inframerah berdiameter 5 mm.

- Photodioda

  Photodioda adalah komponen semikonduktor yang mengubah cahaya menjadi arus. Arus dibangkitkan ketika *photon* diserap oleh photodioda. Arus dalam jumlah kecil tetap diproduksi oleh photodioda ketika tidak ada cahaya. Photodioda kadang dilengkapi dengan *filter optic*, lensa dan bisa memiliki luasan yang bervariasi. Meningkatnya luas area photodioda diikuti dengan respon yang lebih lambat. Gambar 2.29 adalah lambang photodioda yang digunakan dalam *schematic circuit.*

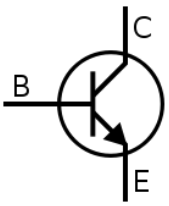


Gambar 2.29 Lambang photodioda dalam skema rangkaian

- *Bipolar Junction Transistor (BJT) type* NPN

Transistor adalah semikonduktor yang digunakan untuk memperkuat sinyal dan saklar elektronik. Komponen ini dibentuk dari bahan semikonduktor dengan sedikitnya 3 *pin* untuk terhubung dengan rangkaian elektronik. Tegangan atau arus yang terhubung pada sepasang transistor *pin* akan mempengaruhi arus pada pasangan *pin* lainnya. Karena *output power* dapat lebih tinggi daripada *input*, transistor dapat memperkuat sinyal.

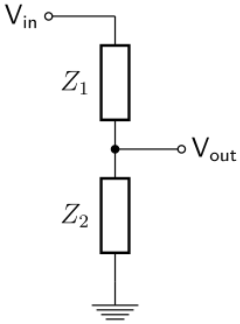
Tipe BJT adalah transistor yang memiliki 3 *pin* yaitu *emitter*, *base* dan *collector*. Sebuah NPN transistor adalah kombinasi dari dua dioda. Diantara dua dioda tersebut terdapat semikonduktor tipe p yang ditumpuk dengan semikonduktor tipe n dari kedua arah. Apabila *base* transistor diberi tegangan atau arus, maka *pin emitter* dan *collector* akan terhubung. Gambar 2.30 adalah lambang NPN transistor pada *schematic circuit.*



Gambar 2.30 Lambang NPN transistor dalam skema rangkaian

- Rangkaian Pembagi Tegangan (*Voltage Divider Circuit*)

  Rangkaian pembagi tegangan adalah rangkaian pasif yang digunakan untuk menurunkan tegangan input dengan cara mengatur nilai *impedance.* Hubungan antara nilai *impedance* dan tegangan tertulis pada Persamaan 2.27 di bawah. Gambar 2.31 adalah skema rangkaian pembagi tegangan. Hal yang perlu diperhatikan adalah tegangan yang dihilangkan dalam rangkaian ini akan dibuang menjadi energi panas pada kedua hambatan. Maka perlu pertimbangan dalam pemilihan daya hambatan.



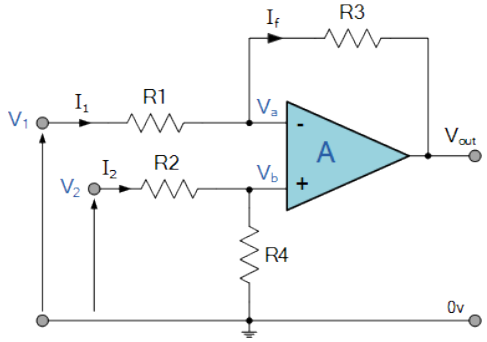
Gambar 2.31 Skema rangkaian pembagi tegangan

$$V_{out} = \frac{Z_1}{Z_1+Z_2} V_{in} \qquad 2.27$$

- *Differential Amplifier*

  Differential amplifier merupakan salah satu aplikasi dari *negative feedback operational amplifier. Operational amplifier* jenis ini adalah penguat sinyal tegangan elektronik yang mampu memperbesar sinyal hingga ribuan kali dari tegangan inputnya. *Differential amplifier* mengurangi antara tegangan input 1 dengan tegangan input 2, menyebabkan tegangan output selalu bernilai

minimum nol. Umumnya rangkaian ini dipakai setelah rangkaian *Wheatstone bridge sensor*. *Differential amplifier* sebaiknya didahului oleh *voltage follower* untuk memberikan *buffer* pada kedua *input* agar sinyal lebih stabil. Skema rangkaian *differential amplifier* ditunjukkan oleh Gambar 2.32. Tegangan *output differential amplifier* bergantung pada keempat hambatan (R_1, R_2, R_3 dan R_4), tegangan V_1 sebagai pengurang dan V_2 sebagai penambahnya sesuai pada Persamaan 2.28 di bawah ini.

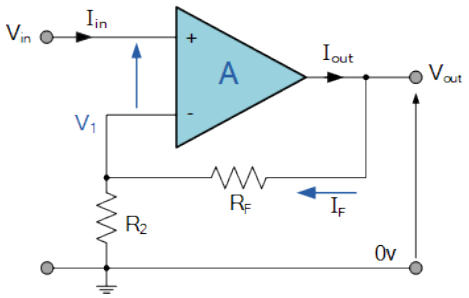


Gambar 2.32 Skema *differential amplifier*

$$V_{out} = -V_1\left(\frac{R_3}{R_1}\right) + V_2\left(\frac{R_4}{R_2+R_4}\right)\left(\frac{R_1+R_3}{R_1}\right) \qquad 2.28$$

- *Non-inverting Amplifier*

  Non-inverting amplifier merupakan *feedback operational amplifier*. *Amplifier* jenis ini memperbesar sinyal tegangan dengan faktor pengali lebih dari satu. Skema *non-inverting amplifier* ditunjukkan oleh Gambar 2.33 di bawah ini.



Gambar 2.33 Skema *non-inverting amplifier*

$$V_{out} = V_{in}\left(1 + \frac{R_F}{R_2}\right) \qquad 2.29$$

Persamaan 2.29 menunjukkan bahwa *non-inverting amplifier* memiliki nilai pengali yang bergantung pada hambatan R_2 dan R_1. Namun nilai pengali ini tidak bisa digunakan sebagai pengecil tegangan karena rasio minimum adalah 1. Impedansi pada input bernilai sangat besar, hal ini disebabkan karena tegangan langsung masuk pada *port non-inverting,* namun *impedance* pada *output* sangat kecil.

- *Transfer Function* dari *Operational Amplifier*

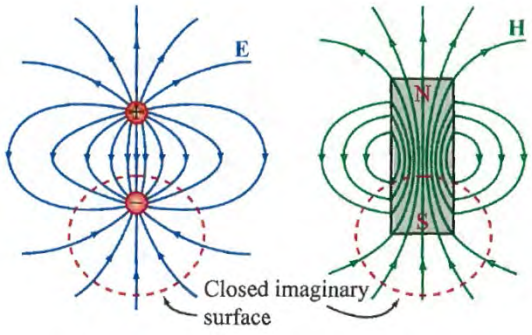
Operational amplifier (*op-amp*) memiliki beberapa *transfer function* tergantung dari elemen input dan elemen *feedback*. Sebuah *op-amp* akan menjadi sebuah *integrator* apabila elemen *input*-nya adalah kapasitor dan elemen *feedback*-nya hambatan / *resistor*. *Op-amp* menjadi sebuah *PD* (*Proportional-Derivative*) *controller* apabila elemen inputnya adalah rangkaian parallel hambatan-kapasitor dan elemen *feedback*-nya berupa hambatan. Informasi selengkapnya bisa dilihat pada Tabel 2.6 di bawah ini.

Tabel 2.6 *Inverting Op-amp Transfer Function*

	Input Element	Feedback Element	Transfer Function	Comments
(a)	R_1, $Z_1 = R_1$	R_2, $Z_2 = R_2$	$-\frac{R_2}{R_1}$	Inverting gain, e.g., if $R_1 = R_2$, $e_o = -e_i$
(b)	R_1, $Z_1 = R_1$	C_2, $Y_2 = sC_2$	$\left(\frac{-1}{R_1C_2}\right)\frac{1}{s}$	Pole at the origin, i.e., an integrator
(c)	C_1, $Y_1 = sC_1$	R_2, $Z_2 = R_2$	$(-R_2C_1)s$	Zero at the origin, i.e., a differentiator
(d)	R_1, $Z_1 = R_1$	R_2 C_2, $Y_2 = \frac{1}{R_2} + sC_2$	$-\frac{\frac{1}{R_1C_2}}{s+\frac{1}{R_2C_2}}$	Pole at $\frac{-1}{R_2C_2}$ with a dc gain of $-R_2/R_1$
e)	R_1, $Z_1 = R_1$	R_2 C_2, $Z_2 = R_2 + \frac{1}{sC_2}$	$\frac{-R_2}{R_1}\left(\frac{s+1/R_2C_2}{s}\right)$	Pole at the origin and a zero at $-1/R_2C_2$, i.e., a PI controller
f)	R_1 C_1, $Y_1 = \frac{1}{R_1} + sC_1$	R_2, $Z_2 = R_2$	$-R_2C_1\left(s+\frac{1}{R_1C_1}\right)$	Zero at $s = \frac{-1}{R_1C_1}$, i.e., a PD controller
g)	R_1 C_1, $Y_1 = \frac{1}{R_1} + sC_1$	R_2 C_2, $Y_2 = \frac{1}{R_2} + sC_2$	$\frac{\frac{-C_1}{C_2}\left(s+\frac{1}{R_1C_1}\right)}{s+\frac{1}{R_2C_2}}$	Poles at $s = \frac{-1}{R_2C_2}$ and a zero at $s = \frac{-1}{R_1C_1}$, i.e., a lead or lag controller

2.2.6 Memahami Kerapatan Fluks

Medan magnet disekitar magnet permanen atau konduktor elektronik dapat divisualisasikan sebagai pengumpulan garis fluks magnet. Tidak seperti cahaya, dimana bergerak menjauh dari sumbernya, sedangkan garis fluks magnet akan kembali ke sumbernya. Seluruh sumber magnet memiliki dua kutub. Garis fluks seperti keluar dari kutub "utara" dan kembali ke kutub "selatan". Seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.34 berikut.



Gambar 2.34 Garis fluks akibat medan magnet yang muncul dari sebuah magnet permanen (Ulaby dkk, 1994)

Satu garis fluks dalam pengukuran CGS disebut Maxwell (M_x), namun satuan *Weber* (W_b), dimana 10^8 garis lebih sering digunakan.

Kerapatan fluks juga disebut induksi magnetik adalah nilai dari garis fluks yang melewati area yang diamati. Umumnya simbol "B" digunakan dalam notasi sains. Dalam sistem CGS satu Gauss (G) adalah satu garis fluks melewati luasan 1 cm^2. Satuan lainnya adalah Tesla (T). Satu Tesla adalah 10.000 garis per cm^2. Hubungan antara Tesla dan gauss sebagai berikut.

1 Tesla = 10.000 Gauss

1 Gauss = 0,0001 Tesla

Kekuatan medan magnet adalah sebuah ukuran dari gaya yang diproduksi oleh arus listrik atau magnet permanen. Notasi kemampuan untuk menginduksi sebuah medan magnet adalah "B". Satuan Henry (H) dalam sistem CGS adalah Oersted (Oe), namun satuan Ampere/meter (A/m) lebih sering digunakan. Konversi satuannya sebagai berikut:

1 Oersted = 79,6 Ampere/Meter

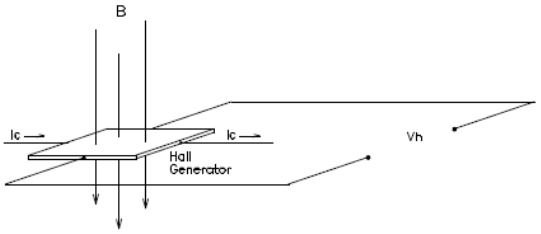
1 Ampere/Meter = 0,01256 Oersted

Perlu diketahui bahwa kekuatan medan magnet dan kerapatan fluks magnet tidaklah sama. Keadaan dimana keduanya sama adalah ketika di udara bebas. Hanya pada kondisi tersebut persamaan ini berlaku.

$$1\ G = 1\ Oe = 0{,}0001\ T = 79{,}6\ A/m$$

Pengukuran kerapatan fluks

Peralatan yang umumnya digunakan untuk mengukur kerapatan fluks adalah *Hall generator* (Gambar 2.35). *Hall generator* adalah potongan tipis material semikonduktor. Saat tidak ada medan magnet maka tidak ada beda tegangan *output* sensor. Ketika garis fluks melewati material, maka tercipta beda tegangan yang dikenal dengan *Hall voltage* (Vh). *Hall generator* ideal memiliki hubungan linier antara jumlah garis fluks yang melewati material dengan *Hall voltage*.



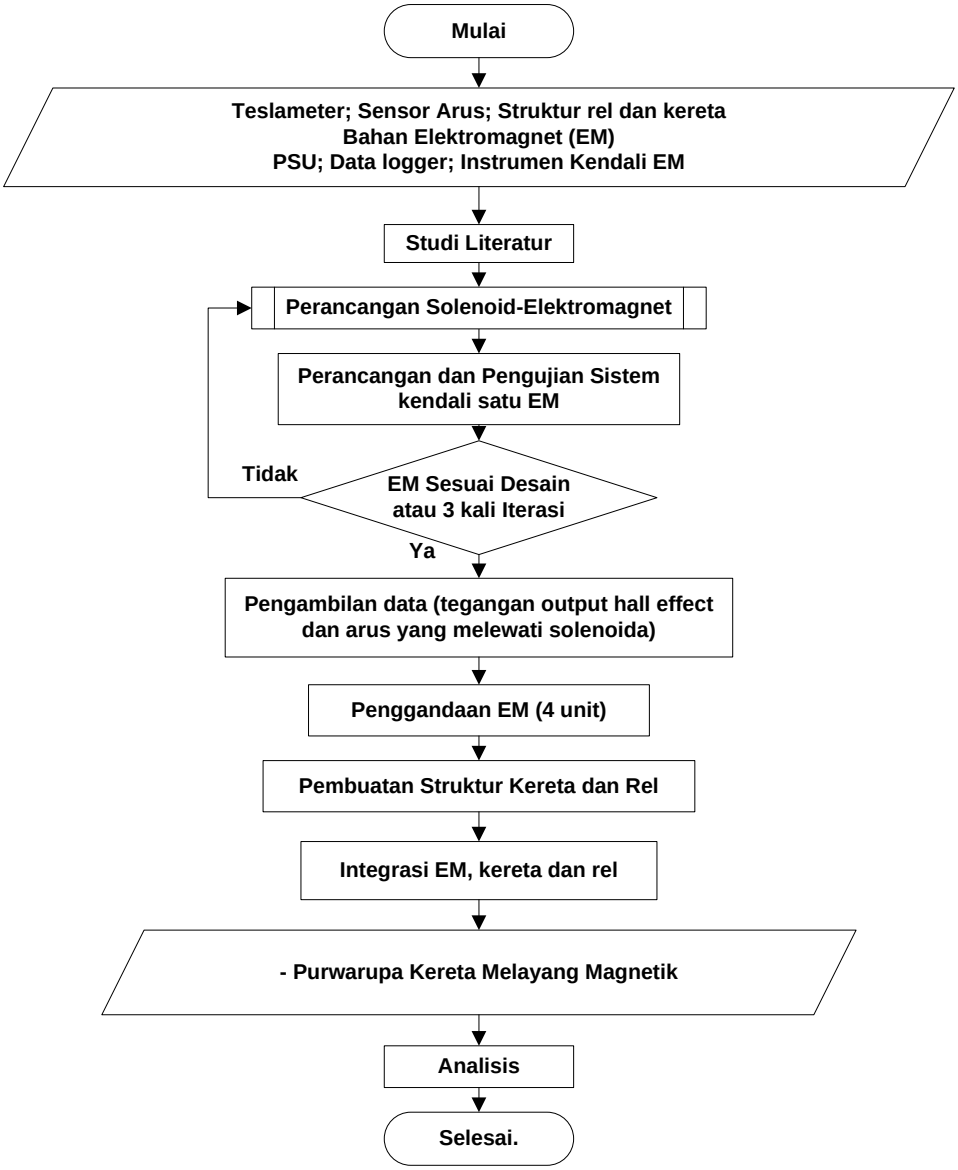
Gambar 2.35 *Hall generator*

BAB 3
METODOLOGI

3.1 Metodologi Umum Penelitian

3.2.1 Diagram Alir Penelitian

Berikut ini adalah diagram alir penelitian secara umum, tampak pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian secara umum

3.2.2 Langkah-Langkah Penelitian

Diagram alir penelitian secara garis besar telah dijelaskan pada Gambar 3.1. Untuk penjelasan lebih lengkap langkah-langkah penelitian adalah sebagai berikut:

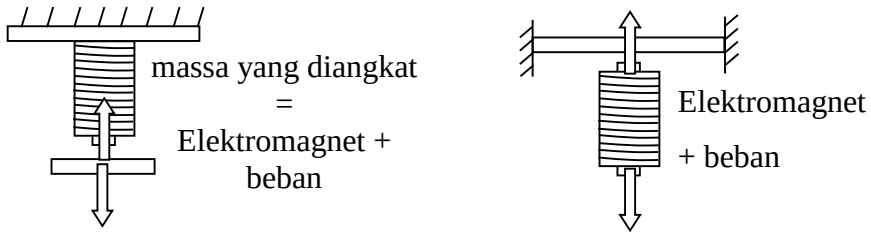
1. Studi literatur

   Pada tahap ini seluruh referensi yang ada dipelajari untuk mendapatkan gambaran sistem *maglev* yang telah diteliti. Bagian pertama adalah mempelajari mengenai teknologi kereta magnet tipe *Electromagnetic Suspension* (*EMS*). Sumber yang dipelajari berasal dari buku teks tentang elektromagnet dan penelitian terdahulu mengenai kereta magnet baik rancang bangun maupun simulasi numerik.

2. Perancangan Solenoida-Elektromagnet.

   Bobot dari elektromagnet adalah hal yang perlu diperhatikan dalam perancangan ini. Elektromagnet yang sesuai memiliki gaya tarik yang mampu mengangkat bobotnya sendiri dan beban yang akan diangkat. Apabila gaya angkat elektromagnet tidak mampu mengangkat bobotnya sendiri, maka elektromagnet tersebut perlu didesain ulang.

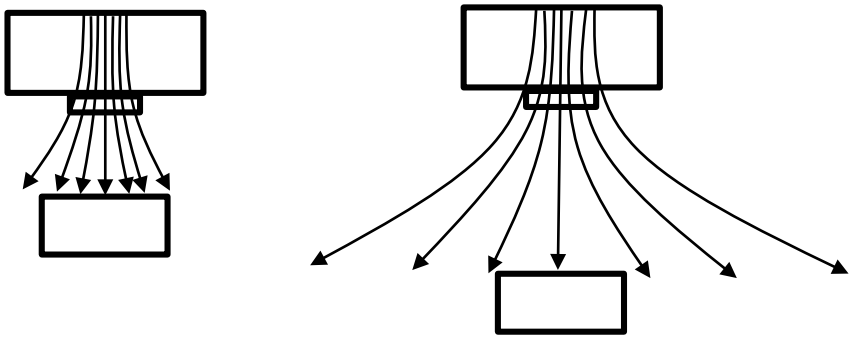
   Desain terpenuhi jika EM mampu mengangkat beratnya sendiri ditambah berat struktur kereta. Gambar 3.2a menunjukkan kekuatan tarik elektromagnet terhadap sebuah logam. Satu kutub elektromagnet memiliki kekuatan untuk mengangkat berat elektromagnet ditambah berat beban. Sedangkan pada Gambar 3.2b adalah elektromagnet yang sama namun dengan posisi terbalik (*inverted*). Informasi lebih lengkap mengenai perancangan solenoida-elektromagnet akan dibahas pada bab 3.2.



Gambar 3.2 Perbandingan posisi klem elektromagnet (a) Elektromagnet diklem dan beban melayang (b) Elektromagnet dalam posisi terbalik (*inverted*) melayang akibat ditarik oleh gaya elektromagnet sendiri.

3. Perancangan dan Pengujian Sistem Kendali Satu Elektromagnet

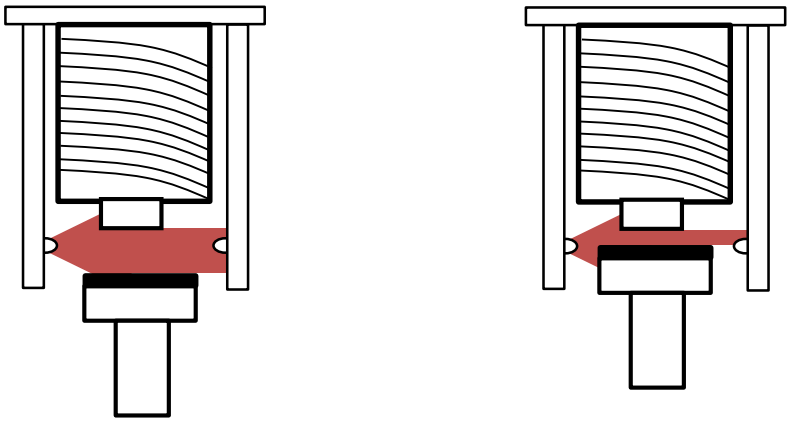
Penelitian dilanjutkan dengan pengujian elektromagnet dan sistem kendalinya. Ada beberapa pilihan sensor sebagai umpan balik sistem kendali, yaitu: sensor *hall effect* atau inframerah-photodioda. Sensor *hall effect* memanfaatkan perubahan jumlah garis fluks medan magnet untuk mengenali jarak celah. Semakin jauh objek melayang dari elektromagnet, jumlah garis fluks yang melewati sensor *hall effect* semakin berkurang. Ilustrasi perubahan jumlah garis fluks dapat dilihat pada Gambar 3.3. Pada Gambar 3.3b dua garis medan magnet tidak melewati sensor *hall effect* sehingga *output* tegangan sensor berubah jika dibandingkan dengan Gambar 3.3a.



(a) (b)

Gambar 3.3 Perubahan garis fluks medan magnet akibat pengaruh jarak objek melayang. (a) Objek dekat dengan inti elektromagnet (b) Objek jauh dari inti elektromagnet

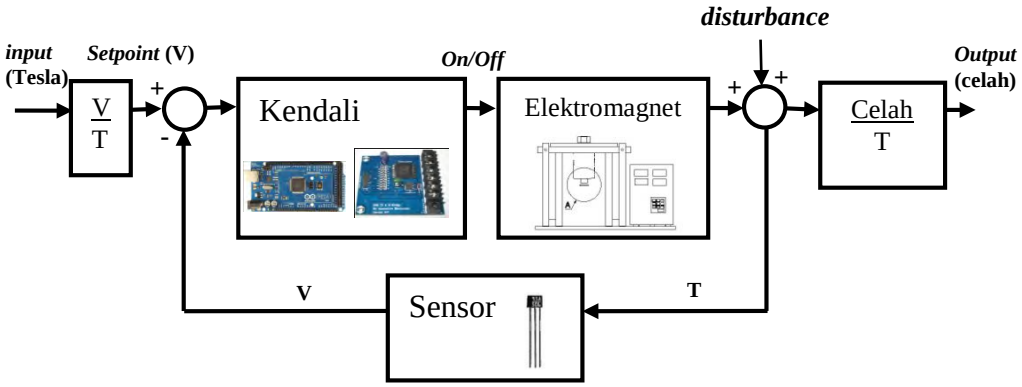
Sensor inframerah-photodioda mengenali perubahan jumlah inframerah yang diterima photodioda akibat tertutupnya sejumlah inframerah oleh objek benda melayang. Pada Gambar 3.4a jumlah inframerah yang diterima oleh photodioda cukup banyak mengaktifkan elektromagnet dan menarik objek. Objek melayang mendekati elektromagnet sehingga menutup inframerah yang melewati photodioda (Gambar 3.4b). Berkurangnya inframerah yang diterima oleh photodioda menyebabkan elektromagnet menjadi non-aktif. Objek melayang akan jatuh karena gravitasi sekaligus membuka inframerah yang sebelumnya tertutup. Elektromagnet menyala dan objek melayang tertarik kembali. Siklus ini berlangsung terus menerus dalam waktu singkat sehingga objek tampak melayang.



(a) (b)

Gambar 3.4 (a) Inframerah yang ditangkap oleh photodioda banyak menyebabkan elektromagnet menyala. (b) Inframerah yang ditangkap oleh photodioda sedikit menyebabkan elektromagnet mati.

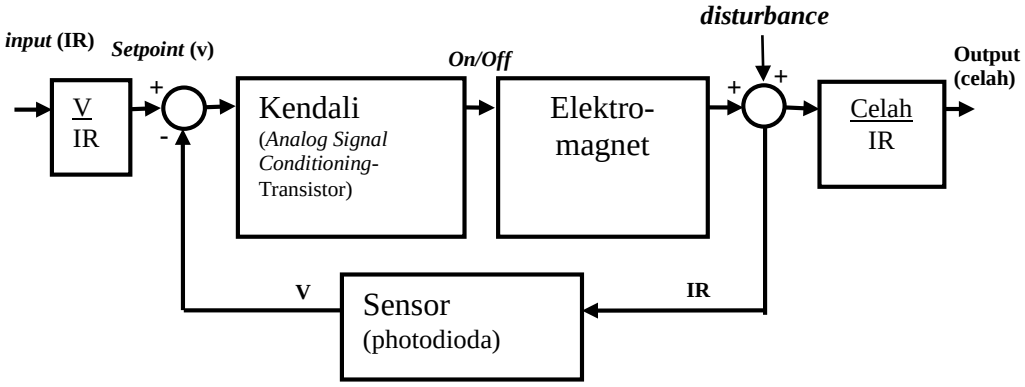
Sistem kendali yang akan dibuat dapat berupa analog maupun digital. Sistem kendali analog menggunakan *operational amplifier*, hambatan, kapasitor, transistor dan dioda sebagai komponen penyusun. Sedangkan sistem digital menggunakan *microcontroller* dan *motor driver* sebagai komponen penyusun.



Gambar 3.5 Skema rancangan kendali digital.

Pada Gambar 3.5 menunjukkan blok diagram sistem *maglev* dengan menggunakan sensor *hall effect*. *Input* celah yang diinginkan identik dengan nilai kuat medan magnet tertentu (Tesla). Blok kendali mengubah *input*

analog sensor menjadi digital dan mengolahnya dengan algoritma kendali. Perintah untuk menyala-mati keluar dari blok kendali menuju sistem *maglev* dan mengatur objek melayang. Sensor *hall effect* berperan sebagai umpan balik pada sistem. Sensor membaca nilai Tesla dan memberikan *input* menuju kendali.



Gambar 3.6 Skema rancangan kendali analog.

Gambar 3.6 adalah blok diagram sistem analog dengan sensor inframerah-photodioda. *Analog signal conditioning* (*ASC*) digunakan sebagai sistem kendali analog. ASC terdiri dari beberapa *operational amplifier*, hambatan, dioda, kapasitor dan transistor. *Output* dari sistem kendali adalah perintah untuk menyalakan atau mematikan sistem *maglev* tergantung dari bacaan sensor inframerah-photodioda.

4. Pengambilan data

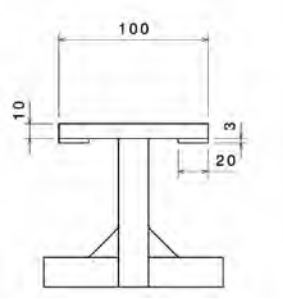
   Pengambilan data berupa *output* tegangan *hall effect/*photodioda dan arus *output* elektromagnet (dengan *datalogger*). Data yang diambil kemudian ditampilkan dalam grafik dan tabel. Penjelasan selengkapnya mengenai metode pengambilan data ada pada sub-bab 3.3.

5. Penggandaan Elektromagnet dan *Controller*

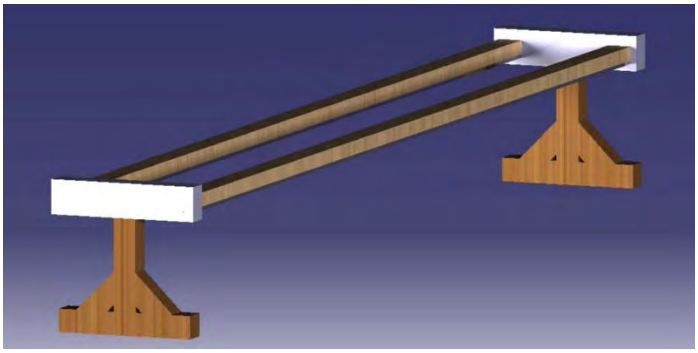
   Pada tahap ini elektromagnet dan *controller* diperbanyak hingga 4 unit. Seluruh elektromagnet dan *controller* yang digandakan identik dari segi dimensi, bahan, lilitan, polaritas, rangkaian *microcontroller*, *driver* dan sensor.

6. Pembuatan Struktur Kereta dan Rel

Dalam perancangan ini, ukuran kereta tidak lebih dari 30 x 15 x 10 cm. Rancangan rel tampak pada Gambar 3.7 dan Gambar 3.8. Bentuk ini memiliki skala 1:31 jika dibandingkan dengan ukuran asli Transrapid. Perbandingan purwarupa dengan kereta *maglev* yang telah ada selengkapnya tertulis pada Tabel 3.1 di bawah.



Gambar 3.7 Rancangan rel tampak 2 dimensi.



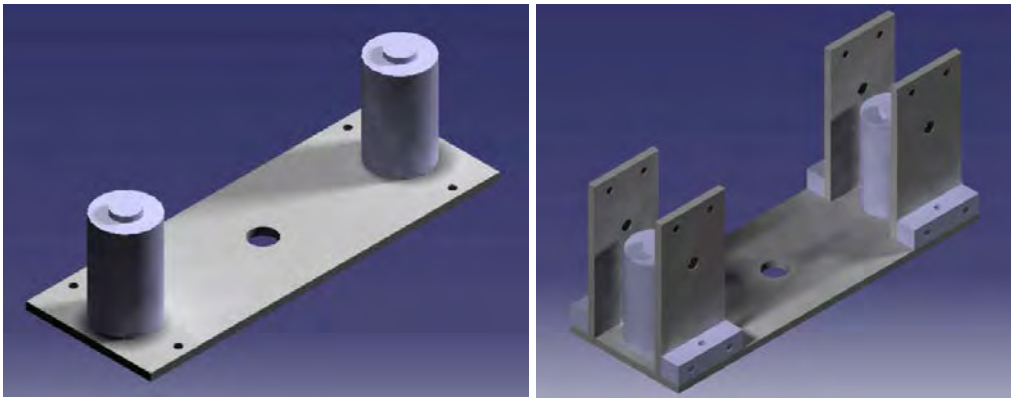
Gambar 3.8 Rancangan rel lurus *maglev* dengan panjang 1 meter.

Tabel 3.1 Perbandingan Dimensi (Transrapid Intl. GmbH dan HSST Intl. Inc.)

	Transrapid (SMT)	**HSST 100L**	**HSST 100S**	**Tesis**
Panjang (m)	24,8	13,5	8,5	0,3
Lebar (m)	3,7	2,6	2,6	0,12
Rasio (P:L)	6,7	5,19	3,27	2,5
Skala	1:1	1:1	1:1	1:31 (terhadap Transrapid)
Tinggi (m)	4,2	3,4	3,4	-
Radius Belok Minimum (m)	1000 (@200km/j)	50	25	-
Massa Kosong	53 ton	17 ton	10 ton	3 kg
Massa Beban Maks.	12 ton	28 ton	15 ton	1 kg

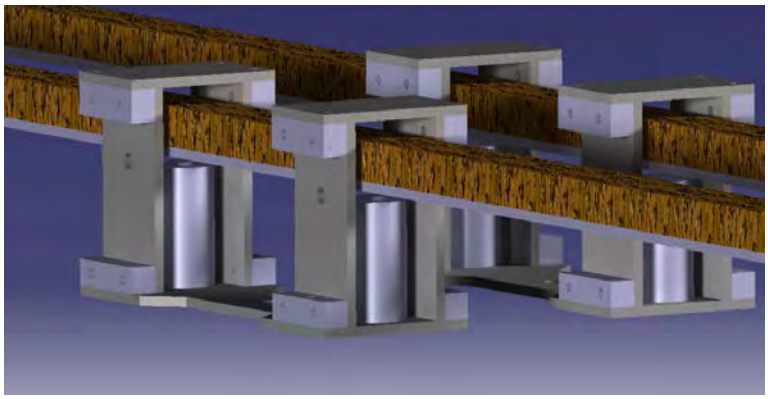
7. Integrasi elektromagnet, kereta dan rel

Cara pemasangan unit-unit elektromagnet ke kereta adalah dengan menambahkan plat *acrylic* setebal 3 mm dengan lubang di kedua sisi. Plat akrilik dan elektromagnet dilekatkan dengan lem. Ilustrasi pemasangan sebuah elektromagnet ke struktur kereta tampak pada Gambar 3.9 di bawah ini.



Gambar 3.9 Peletakan pasangan elektromagnet ke kereta

Penggabungan kereta dan rel akan tampak seperti Gambar 3.10. Sebagai catatan, pada gambar tersebut belum tampak kabel, papan sirkuit, *power supply* dan beban.

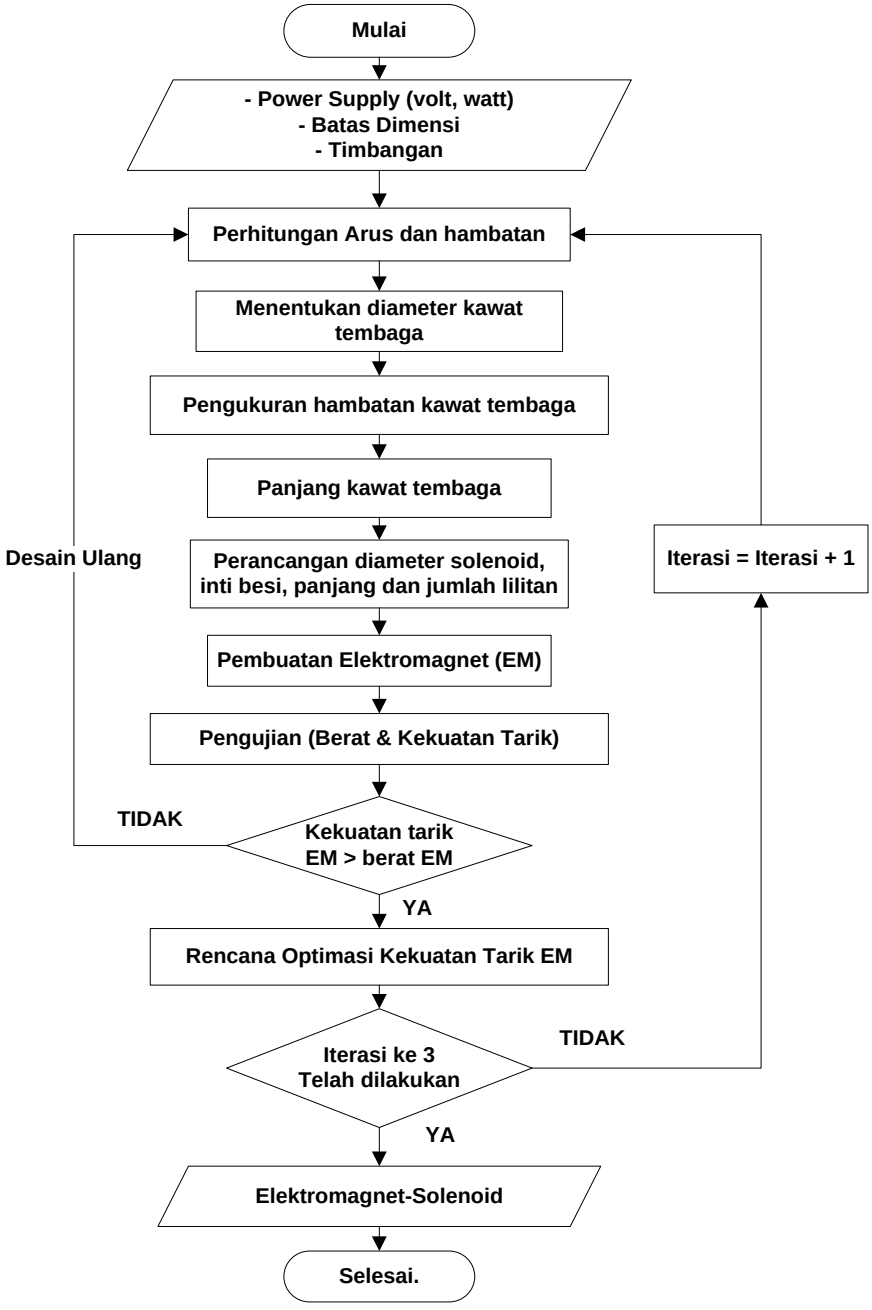


Gambar 3.10 Rancangan kereta yang telah dipasang pada rel.

3.2 Metodologi Perancangan Elektromagnet

3.2.1 Diagram Alir Perancangan Elektromagnet

Berikut adalah diagram alir perancangan elektromagnet yang tersaji pada Gambar 3.11.

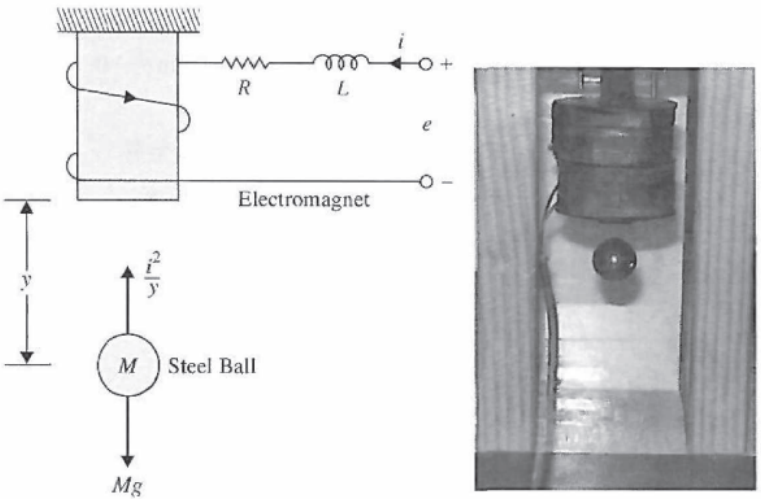


Gambar 3.11 Diagram alir perancangan elektromagnet.

3.2.2 Langkah-Langkah Perancangan Elektromagnet

1. Perhitungan Arus dan hambatan

Penelitian ini menggunakan model dinamik *maglev* yang dibahas pada buku teks *Automatic Control Systems* oleh F. Golnaraghi - B.C Kuo. Sistem *maglev* tersebut tampak pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12 Sistem suspensi magnet-bola (Golnaraghi dan Kuo, 2010)

Dimana:

e(t)	= tegangan *input*	L	= induktansi lilitan
y(t)	= posisi bola	M	= massa bola
i(L)	= arus lilitan	g	= percepatan gravitasi
R	= hambatan lilitan		

Free body diagram peralatan *maglev* (Gambar 4.1) merupakan representasi dari Persamaan 2.8 dan Persamaan 2.10.

$$\mathrm{M}.\frac{\mathrm{d}^2\mathrm{y(t)}}{\mathrm{dt}^2} = \mathrm{M}.\mathrm{g} - \mathrm{K}\frac{\mathrm{i}^2\mathrm{(t)}}{\mathrm{y\,(t)}} \qquad 2.8$$

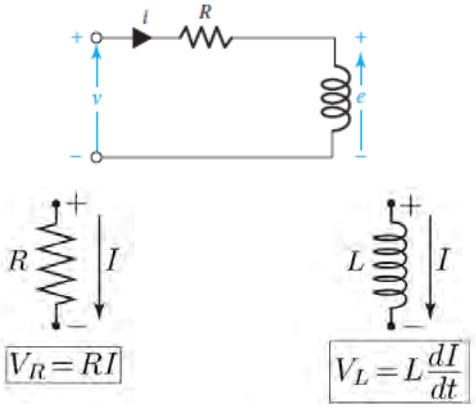
$$e(t) = R.i(t) + L\frac{di(t)}{dt} \qquad 2.10$$

Apabila *free body diagram* pada Gambar 4.1 adalah statis pada titik y_0, maka persamaan 2.8 diatas menjadi

$$i_0(t) = \sqrt{\frac{Mgy_0}{K}} \qquad 2.9$$

Nilai koefisien hubungan antara gaya magnet (K) adalah perkalian permeabilitas vakum (μ_0) dengan jumlah lilitan (N). Dari Persamaan 2.9 arus yang dibutuhkan sebuah elektromagnet untuk mengangkat objek dengan massa tertentu dapat diketahui.

Rangkaian elektromagnet merupakan sebuah rangkaian *RLC (Resistance-Inductance-Capacitance)* yang disusun seri. Rangkaian *RLC* terdiri dari hambatan R, induktansi L dan Kapasitansi C. Diasumsikan nilai C jauh lebih kecil dibandingan R dan L sehingga perhitungan hanya menggunakan rangkaian RL yang disajikan pada Gambar 3.13 sebagai berikut.



Gambar 3.13 Hubungan antara arus dan tegangan pada hambatan dan induktor (Sarma, 2001)

Menghitung tegangan pada hambatan (V_R) menggunakan rumus

$$V_R = R.i \qquad 2.25$$

untuk menghitung tegangan (V_L) menggunakan rumus

$$V_L = L\ di/dt \qquad 2.26$$

Jumlah V_R dan V_L adalah 12 volt karena rangkaian RL ini disusun seri. Impedansi didapatkan dengan mensubtitusikan Persamaan 2.16 dan Persamaan 2.17 ke Persamaan 2.10 menghasilkan Persamaan berikut

$$Z = \frac{V_R + V_L}{i} - \frac{L}{i}\frac{di}{dt} \qquad 3.1$$

Karena keterbatasan penelitian, nilai $\frac{L}{i}\frac{di}{dt}$ tidak dapat diketahui. Nilai $\frac{L}{i}\frac{di}{dt}$ tersebut mempengaruhi arus dan impedansi rangkaian. Dari pengamatan penelitian, arus yang mengalir menurun sebesar 33% akibat rangkaian

induktansi dibandingkan dengan rangkaian tanpa induktansi. Nilai arus ditambah 33% untuk menyeimbangkan perhitungan hambatan. Nilai hambatan R menjadi

$$R = \frac{(V_R + V_L)}{1{,}33.i} \qquad 3.2$$

2. Menentukan diameter kawat tembaga

   Dalam menentukan diameter kawat tembaga tidak ada patokan mengenai ukuran yang tepat. Diameter yang tersedia di pasaran bervariasi mulai dari yang terkecil 0,03 mm. Semakin besar diameter kawat, hambatan akan semakin kecil. Pilihan diameter yang tersedia berkisar antara 0,35 hingga 0,5 mm. *Range* diameter tersebut dipilih karena diperkirakan bobot elektromagnet akan semakin ringan. Jika diameter kawat terlalu kecil dapat menimbulkan panas yang berlebihan (*overheating*). Jika diameter kawat terlalu besar, bobot elektromagnet akan terlalu berat.

3. Pengukuran hambatan kawat tembaga

   Hambatan pada kawat tembaga diukur menggunakan ohmmeter. Pengukuran hambatan bertujuan untuk mendapatkan panjang kawat tembaga yang sesuai dengan perhitungan hambatan pada tahap sebelumnya. Cara pengukuran hambatan adalah dengan menghubungkan kedua ujung kawat tembaga dengan kedua jarum ohm meter. Semakin panjang kawat, hambatan akan semakin besar.

4. Panjang kawat tembaga

   Panjang kawat tembaga telah ditentukan dari pengukuran hambatan. Selanjutnya kawat tembaga direncanakan untuk dibentuk menjadi solenoida.

5. Perancangan diameter solenoida, inti besi, panjang dan jumlah lilitan

   Penentuan inti besi dan panjang solenoida tidak memiliki standar dan referensi. Pertimbangan dalam penentuan inti besi adalah bahan dan diameter. Bahan inti besi tidak menjadi fokus utama penelitian. Bahan inti besi yang akan digunakan berbahan dasar *ferrous*. Pertimbangan dalam penentuan diameter inti besi adalah semakin besar ukuran, massa solenoida akan semakin besar.

Jumlah lilitan pada solenoida dipengaruhi oleh panjang kawat tembaga, diameter kawat tembaga, diameter inti besi dan panjang solenoida. Panjang kawat tembaga dan panjang solenoida berbanding lurus dengan jumlah lilitan. Sedangkan diameter inti besi dan diameter kawat tembaga berbanding terbalik terhadap jumlah lilitan.

6. Pembuatan Elektromagnet

   Setelah inti besi dililit dengan kawat tembaga, solenoida dan inti besi menjadi magnet atau bisa disebut elektromagnet. Elektromagnet dapat dibuat dengan menggunakan alat bantu maupun manual.

7. Pengujian

   Elektromagnet ditimbang untuk mengetahui massanya. Elektromagnet disatukan dengan sistem kendali untuk mengetahui gaya tarik maksimal. Apabila gaya tarik elektromagnet lebih kecil dibandingkan beratnya, perlu pengulangan desain elektromagnet dari awal. Pengulangan desain atau iterasi akan dilaksanakan sebanyak 3 kali mengingat banyaknya faktor yang mempengaruhi massa dan kekuatan tarik sebuah elektromagnet.

3.2.3 Studi Awal Simulasi Numerik

Untuk studi awal numerik, penelitian ini menggunakan model dinamik *maglev* yang dibahas pada buku teks *Automatic Control Systems* oleh F. Golnaraghi - B.C Kuo. Persamaan dinamik yang digunakan adalah

$$\mathrm{M}.\frac{\mathrm{d}^2\mathrm{y(t)}}{\mathrm{dt}^2} = \mathrm{M}.\,\mathrm{g} - \mathrm{K}\frac{\mathrm{i}^2\mathrm{(t)}}{\mathrm{y\,(t)}} \qquad 2.8$$

$$e(t) = R.\,i(t) + L\frac{di(t)}{dt} \qquad 2.10$$

Bentuk akhir persamaan *state* dituliskan dengan matriks koefisien A dan B *state space* sebagai berikut:

$$\mathrm{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{\mathrm{g}}{\mathrm{y_0}} & 0 & -\frac{\mathrm{K}}{\mathrm{My_0{}^2 i}} \\ 0 & 0 & -\frac{\mathrm{R}}{\mathrm{L}} \end{bmatrix} \text{ dan } \mathrm{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{\mathrm{L}} \end{bmatrix} \qquad 2.11$$

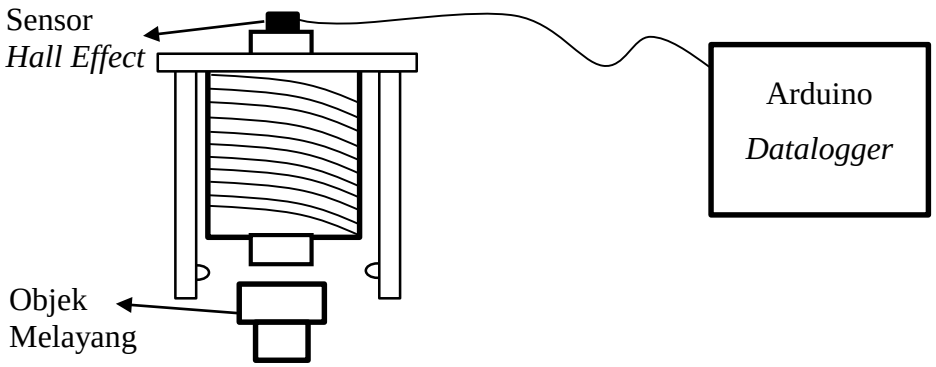
3.3 Metodologi Pengambilan Data

3.3.1 Pengambilan Data untuk Sistem dengan Sensor Inframerah-Photodioda dan Rangkaian Analog.

Peralatan:

- Modul Arduino (datalogger shield, microsd, sensor *hall effect*, sensor arus)
- Multitester
- Peralatan uji *Maglev* berbasis inframerah

Sensor *hall effect* yang telah terhubung pada arduino diletakkan pada ujung atas elektromagnet. Lihat Gambar 3.14 untuk pemasangan sensor dengan Arduino Datalogger.



Gambar 3.14 Peletakan sensor *hall effect* pada elektromagnet

Langkah-langkah:

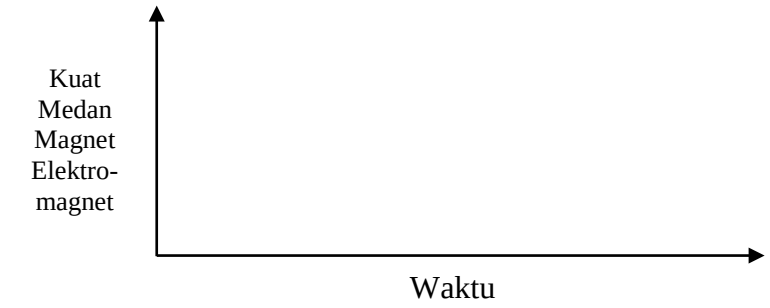
1. Seluruh peralatan terpasang dan dapat bekerja dengan baik.
2. Peralatan *maglev* dinyalakan selama 5 menit dengan beban terpasang. (Beban tidak jatuh apabila peralatan beroperasi *steady* tanpa gangguan).
3. Pencatatan *datalogger* dimulai dengan meng-*upload sketch* arduino IDE yang telah ditentukan.
4. Waktu pengambilan data pertama dicatat pada Tabel 3.2 baris waktu kolom beban terpasang.
5. Tegangan pada *output* sensor photodioda dan photodioda referensi diukur dengan menggunakan multimeter dan dicatatkan pada Tabel 3.2 kolom beban terpasang.

6. Arus yang melewati solenoid diukur dengan menggunakan multimeter, arus yang terbaca dicatat pada Tabel 3.2 kolom beban terpasang baris arus.
7. Beban dilepaskan kemudian langkah 5, 6 dan 7 diulangi untuk kolom beban tidak terpasang.

Tabel 3.2 Tabel Pengambilan Data *Maglev*

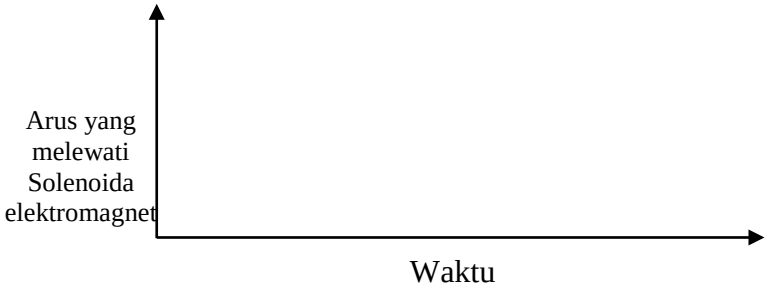
Data	Kondisi Beban	
	Tidak Terpasang	Terpasang
Sensor Photodioda		
Photodioda Referensi		
Arus		

8. Setelah Tabel 3.2 terisi seluruhnya, hasil pengukuran nilai tegangan sensor *hall effect* dari modul arduino digambarkan dalam Gambar 3.15 berikut. Selanjutnya data tegangan tersebut diubah menjadi kuat medan magnet elektromagnet.



Gambar 3.15 Grafik tegangan *output* sensor *hall effect* terhadap waktu

9. Selanjutnya pengukuran arus yang melewati solenoida elektromagnet dari modul arduino digambarkan pada Gambar 3.16 berikut.



Gambar 3.16 Grafik arus yang melewati solenoida-elektromagnet terhadap waktu.

3.4 Peralatan Pendukung

3.4.1 Alat Ukur Tegangan, Arus dan hambatan

Peralatan multimeter sebagai pengukur arus, tegangan dan hambatan diperlukan dalam penelitian ini. Multimeter yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar 3.17. Multimeter tersebut mampu mengukur arus maksimum 10 Ampere.

Gambar 3.17 Multimeter digital Heles UX838

3.4.2 Sensor Arus

Sensor ini digunakan saat mengukur kemampuan maksimum elektromagnet. Dengan memberikan tegangan yang tepat dan arus yang sesuai maka akan didapatkan kekuatan magnet maksimum. Untuk pengukuran akurat diperlukan sensor ini lengkap dengan instrumennya. Sensor arus ACS712ELC-5A tampak pada Gambar 3.18 lengkap dengan spesifikasinya.

Gambar 3.18 Sensor arus ACS712ELC-5A

Spesifikasi:

Tipe IC: ACS712ELCTR-5A, *Hall Effect-Based Linear Current Sensor* (IC)

Tegangan suplai (V_{cc}): 5V

Temperatur operasional: -40°C hingga 85°C

Jarak Optimal, I_p, (A): ± 5 A

Sensitivitas: 185 mV/A

3.4.3 *Power Supply Unit (PSU)*

Purwarupa kereta melayang membutuhkan daya untuk beroperasi. Power *supply skala* laboratorium sangat membantu dalam pengujian awal karena tegangan *output*-nya dapat diatur secara manual. Contoh produk PSU seperti yang tampak pada Gambar 3.19 dibawah ini dengan spesifikasinya.

Sedangkan untuk operasional purwarupa ini menggunakan PSU yang lazimnya terpasang pada *personal computer (PC)*. Tegangan yang digunakan adalah 12Volt dan 5 Volt untuk papan sirkuit elektronik. Peralatan PSU untuk PC ini tampak pada Gambar 3.20 lengkap dengan spesifikasinya pada Tabel 3.3.

Gambar 3.19 *Power supply unit* skala laboratorium

Spesifikasi

Type: YH-305D

Tegangan *Input*: 110V/220V AC

Tegangan *Output*: 0-30V *(Adjustable)*

Temperatur kerja: 40°C - 70°C

Gambar 3.20 *Power supply unit* ATX *computer*

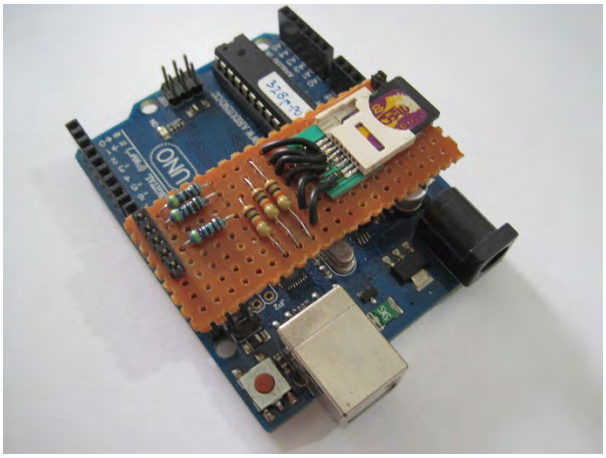
Spesifikasi:

Tabel 3.3 Spesifikasi Power Supply Model ATX-350W

AC *INPUT*	*Voltage* 230 V		*Current* 4 A		*Frequency* 50 Hz		
DC *OUTPUT* MAX	*Orange*	*Red*	*Yellow*	*White*	*Blue*	*Purple*	*Grey*
	+ 3,3 V	+ 5 V	+ 12 V	- 5 V	-12 V	5 Vsb	P/G
	28 A	25 A	12 A	0,5 A	0,5 A	2 A	OK

3.4.4 *Data Logger*

Pengambilan data berupa tegangan diambil dengan *data logger*. Bacaan sensor-sensor *hall effect* dapat tersimpan dalam *data logger* dan untuk selanjutnya akan diolah. sebagai *data logger* tampak pada Gambar 3.21 di bawah ini lengkap dengan fitur *clock* untuk mencatat waktu pengukuran. Jumlah data yang dapat diambil oleh peralatan ini sebanyak 20 data per detik.



Gambar 3.21 Arduino sebagai *datalogger* dengan *SD card shield*

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

BAB 4
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Perancangan Elektromagnet

Kereta magnet direncanakan dapat mengangkat badan kereta. *Power supply* dan peralatan instrumentasi tidak diletakkan pada kereta. Jumlah elektromagnet yang digunakan adalah 4 unit. Jika asumsi setiap elektromagnet memiliki massa 65 gram dan *frame* kereta pada tiap sisi sebesar 50 gram, maka massa total kereta adalah 360 gram. Perhitungan massa tiap komponen dijelaskan pada Tabel 4.1 di bawah ini.

Tabel 4.1 Perhitungan perkiraan massa tiap komponen kereta *maglev*

Nama komponen	**Massa/ unit**	**Jumlah unit**	**Massa sub-total**
Elektromagnet	65 gram	4	260 gram
Frame kereta	50 gram	2	100 gram
Massa Total			360 gram

Jika keempat elektromagnet diharapkan mampu mengangkat 360 gram, maka tiap elektromagnet mampu mengangkat beban 85 gram, berikut perhitungannya:

M = Massa total/ Jumlah elektromagnet

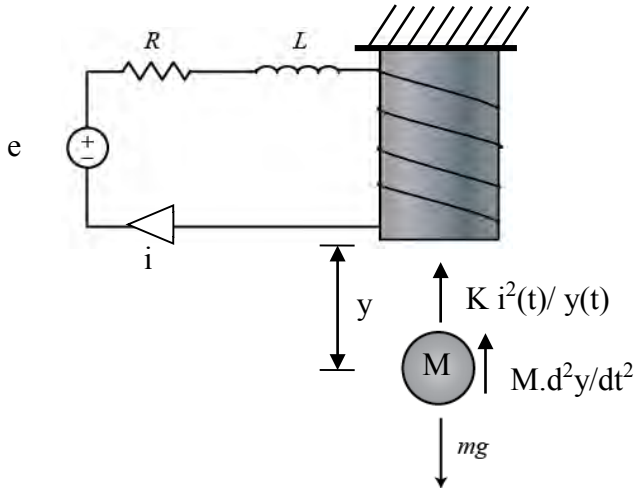
M = 360 gram / 4

M = 85 gram

Free body diagram peralatan *maglev* (Gambar 4.1) merupakan representasi dari Persamaan 2.8 dan Persamaan 2.10. Kedua persamaan tersebut diambil dari buku teks *Automatic Control Systems* oleh F. Golnaraghi dan B.C Kuo.

$$M.\frac{d^2y(t)}{dt^2} = M.g - K\frac{i^2(t)}{y(t)} \qquad 2.8$$

$$e(t) = R.i(t) + L\frac{di(t)}{dt} \qquad 2.10$$



Gambar 4.1 *Free body diagram* sistem mekanik dan elektrik *maglev.*

Apabila *free body diagram* pada Gambar 4.1 adalah statis pada jarak *equilibrium* (y_0), maka persamaan 2.8 di atas menjadi

$$i_0(t) = \sqrt{\frac{Mgy_0}{K}} \qquad 2.9$$

Persamaan 2.9 digunakan untuk mengetahui besar arus (i) yang dibutuhkan untuk mengangkat beban massa (M) pada jarak *equilibrium* (y) dengan koefisien yang menghubungkan antara gaya magnet yang menarik bola ($K = \mu_0 . N$). Data-data lainnya adalah sebagai berikut:

M = 85 gram

y = 3 mm (0,003 m)

$K = \mu_0 . N = 1{,}257 \times 10^{-6}$. 800 lilitan = 0,00101

Besar arus yang dibutuhkan tiap elektromagnet agar dapat mengangkat beban 85 gram adalah sebesar 1,574 Ampere. Efisiensi peralatan ini diasumsikan sebesar 42%. Penurunan efisiensi diperhitungkan dari transfer energi elektronik-mekanik, material dan manufaktur). Sehingga nilai arus yang dibutuhkan sebesar 1,57 A / 42% = 3,747 Ampere.

Mengacu pada sub-bab 2.2.3 (Rangkaian RL), untuk menciptakan arus sebesar 3,747 Ampere pada tegangan 24 volt, dibutuhkan nilai hambatan R dan induktansi L tertentu. Mengambil Persamaan 3.2 hambatan R dapat diketahui

$$R = \frac{(V_R + V_L)}{1{,}33.i} \qquad 3.2$$

$V_R+V_L = 24$ karena rangkaian ini tersusun seri dan sumber tegangan 24 volt. Nilai hambatan R yang didapatkan adalah sebesar 4,815 ohm.

Hambatan 4,815 ohm sebagai acuan pemilihan diameter dan panjang kawat tembaga. Semakin besar diameter kawat maka hambatan akan semakin kecil. Berbanding terbalik dengan panjang kawat. Semakin panjang kawat, hambatan akan semakin besar. Nilai hambatan 4,815 ohm merupakan nilai maksimum saat melakukan pengukuran hambatan murni solenoida dengan menggunakan ohm-meter. Data-data perhitungan diatas dapat dirangkum dalam Tabel 4.2 berikut.

Tabel 4.2 Perhitungan simulasi dengan 4 Pasang Elektromagnet

Data	**Nilai**		**Data**	**Nilai**
Jumlah Pasang EM	4		μ_0	1,26E-06
Massa Elektromagnet (Kg)	0,065		K	0,00101
Massa EM total (Kg)	0,260		i (Ampere)	3,747
Berat Kereta (Kg)	360		Tegangan (V)	24
Beban angkat per EM (Kg)	0,085		Induktansi L	0,01
y (m)	0,003		Hambatan R	4,815
Lilitan	800			

4.2 Simulasi Numerik

Simulasi numerik menggunakan Persamaan 2.8 dan Persamaan 2.10 untuk melihat respon sistem. Kedua persamaan tersebut ditulis kembali dalam bentuk *state-space*.

$$M.\frac{d^2y(t)}{dt^2} = M.g - K\frac{\boldsymbol{i^2}(t)}{\boldsymbol{y}(t)} \qquad 2.8$$

$$e(t) = R.i(t) + L\frac{di(t)}{dt} \qquad 2.10$$

4.2.1 Pemodelan Sistem *Maglev* dalam Bentuk *State-Space*

Data-data pada Tabel 4.2 dimasukkan ke dalam software numerik dengan bentuk persamaan *state-space* sebagai berikut.

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{Ax} + \boldsymbol{Bu} \qquad 2.23$$

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{Cx} + \boldsymbol{Du} \qquad 2.24$$

Dimana

$$x = \begin{bmatrix} \Delta y \\ \Delta \dot{y} \\ \Delta i \end{bmatrix} \qquad 4.1$$

Persamaan 4.5 di atas adalah *state variable* yang digunakan untuk sistem, u adalah *input* tegangan (Δi) dan y (*output*) adalah Δy.

Matriks A dan B adalah sistem *maglev* yang telah dibahas sebelumnya pada halaman 15. Isi dari matriks A dan B terlihat pada Persamaan 2.11 berikut.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{g}{y_0} & 0 & -\frac{K}{M y_0{}^2 i} \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \text{dan } B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} \qquad 2.11$$

Variabel hambatan, induktansi, massa, gravitasi dan koefisien magnet diambil dari Tabel 4.2. Variabel-variabel tersebut dituliskan kedalam matriks A dan B. Matriks A adalah sistem dinamik *maglev*, sedangkan matriks B adalah *input control* berupa arus (Δi) dan matriks C merupakan *output* sistem yang diamati, yaitu jarak celah sehingga bernilai [1 0 0].

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 3270 & 0 & -68{,}7005 \\ 0 & 0 & -248 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 100 \end{bmatrix} \quad C = [1 \quad 0 \quad 0] \qquad 4.2$$

4.2.2 Kestabilan Sistem

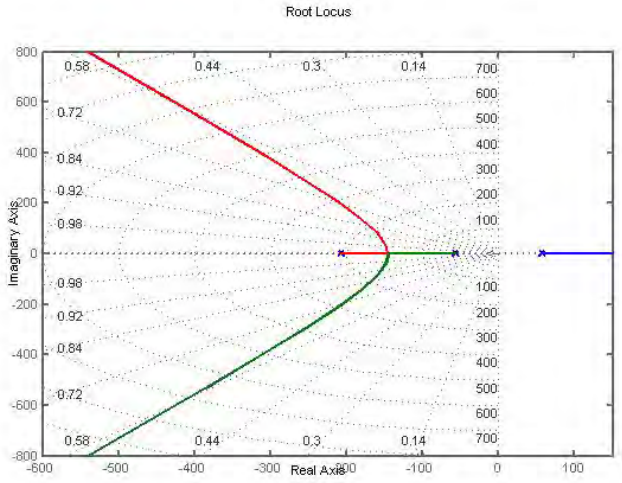
Tahap pertama adalah mengetahui apakah sistem *open-loop* stabil atau tidak (tanpa adanya pengendalian). Metode yang digunakan adalah analisis letak *eigenvalue* dari sistem matriks A (sama dengan *poles* pada *transfer function*). Nilai *eigenvalue* dari matriks A adalah nilai s dari persamaan det (sI-A) = 0. Nilai *eigenvalue* dari matriks A adalah

$$Eig(A) = \begin{bmatrix} 57{,}1839 \\ -57{,}1839 \\ -248 \end{bmatrix} \qquad 4.3$$

Dari nilai *eigenvalue* di atas, sistem *open-loop* tanpa pengendalian termasuk sistem yang tidak stabil. Nilai positif 57,1839 menandakan *pole* berada pada *right-half plane.*

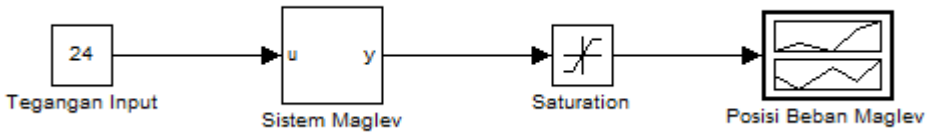
Pemberian *gain* pada sistem juga tidak akan membuat sistem menjadi stabil. Gambar 4.2 menunjukkan bahwa *pole* yang terletak pada *right-half plane* akan tetap

berada pada daerah *right-half plane* jika diberi *gain*. Maka sistem ini perlu *feedback* agar menjadi *closed-loop system* dan stabil.



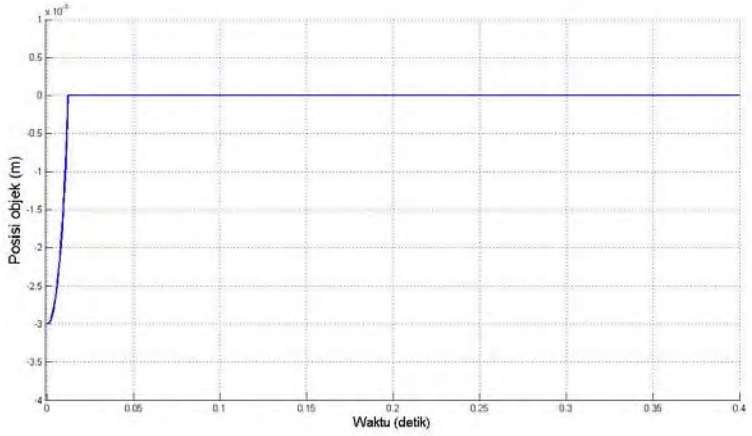
Gambar 4.2 *Root locus* dari *open-loop* tanpa kendali sistem *maglev*

4.2.3 Simulasi Numerik *Open Loop* tanpa Kendali

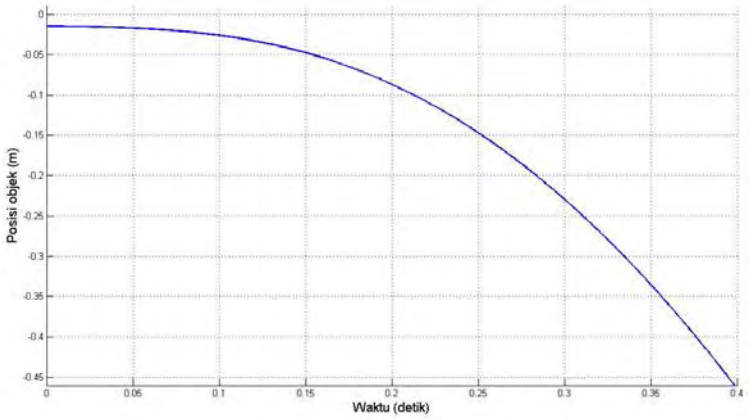


Gambar 4.3 Blok diagram sistem *maglev open-loop* tanpa kendali

Gambar 4.3 adalah blok diagram yang akan disimulasikan. Tegangan *input* menuju sistem *maglev* sebesar 24 volt. Kemudian beban diamati pada *plot graph box* di ujung kanan. *Sub-sistem* dari *maglev* dapat dilihat pada Lampiran 7.



Gambar 4.4 Respon objek dengan *initial condition* sebesar 3 mm.



Gambar 4.5 Respon objek dengan *initial condition* sebesar 15 mm.

Gambar 4.4 dan Gambar 4.5 di atas merupakan hasil simulasi blok diagram pada Gambar 4.3 dengan data *input* dari Tabel 4.2. Gambar 4.4 menunjukkan objek yang diletakkan 3 mm dari elektromagnet akan menempel. Gambar 4.5 menunjukkan objek yang diletakkan pada jarak 15 mm dari elektromagnet jatuh. Objek jatuh disebabkan karena kekuatan elektromagnet tidak cukup kuat untuk menarik objek dengan jarak 15 mm.

Salah satu upaya untuk menstabilkan sistem ini adalah dengan menggunakan kendali atau *controller* dalam *closed-loop system.* Dari penelitian sebelumnya (Patriawan, 2013) menyimpulkan bahwa peralatan *maglev* dalam penelitian tersebut stabil dengan menggunakan kendali *PD* (*Proportional-Derivative)*.

Selanjutnya penelitian ini menggunakan *Proportional-Derivative* sebagai kendali sistem *maglev.*

4.3 Rancang Bangun Sistem Melayang Magnetik dengan Sensor Inframerah-Photodioda

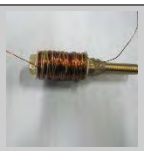
Perancangan sistem melayang magnetik dimulai dari perancangan solenoida elektromagnet dilanjutkan dengan sensor inframerah-photodioda dan sistem kendali. Ketiga komponen tersebut dirakit menjadi satu dan diuji.

4.3.1 Solenoida Elektromagnet

Pada

Tabel 4.3 berikut menampilkan penggerak elektromagnet dengan berbagai variasi diameter kawat, jumlah lilitan (N) dan panjang solenoida. Parameter tegangan (v) telah ditentukan terlebih dahulu yaitu sebesar 12 volt. Nilai hambatan (R) dan arus maksimum merupakan parameter yang tidak dikendalikan selama proses perancangan elektromagnet. Proses penelitian telah mencoba memvariasikan diameter kawat, jumlah lilitan dan panjang solenoida sebanyak 3 kali. Hasil optimal didapatkan pada percobaan ketiga.

Tabel 4.3 Spesifikasi berbagai penggerak elektromagnet (Percobaan)

Data	**E**	**E.1**	**E.2**	**E.3**
V	12	12	12	12
Dia. Kawat	0,3 mm	0,8 mm	0,5 mm	0,4 mm
R (Ohm)	27	1,7	3,8	4,8
N	-	550	824	800
V/R	0,444	7,059	3,157	2,61
Arus maks	0,333			
Massa	156 gr (casing)	135 gr	94 gr	65 gr
Panjang solenoid	34 mm	41,4 mm	39,5 mm	30 mm
Gambar				

Keterangan: E: *Electromagnet actuator* (*existing*); E.1: Elektromagnet 1; E.2: Elektromagnet 2; E.3: Elektromagnet 3.

Material tembaga memberi pengaruh dalam mengalirkan arus pada elektromagnet, karena itu untuk mendapatkan arus yang kuat memerlukan material

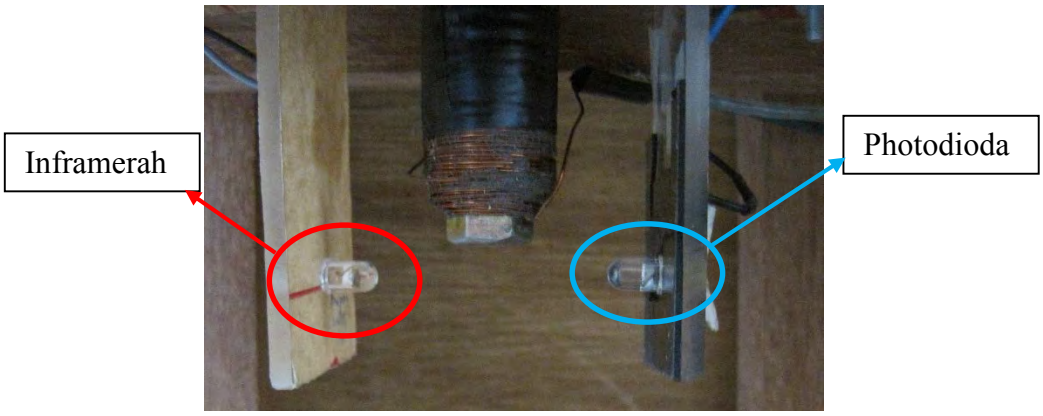
dengan konduktivitas yang baik. Inti elektromagnet menggunakan baut dengan material dasar baja dan lilitan menggunakan tembaga.

Besarnya diameter kawat yang digunakan pada sebagai solenoida akan mempengaruhi besar arus yang melewati elektromagnet. Apabila arus yang diberikan terlalu besar maka solenoida dengan diameter kawat yang kecil membuang energi dalam bentuk panas lebih banyak. Jumlah lilitan mempengaruhi medan magnet yang dihasilkan, apabila lilitan lebih sedikit maka medan magnet yang dihasilkan lebih kecil dengan arus yang sama. Gambar 4.6 menunjukkan elektromagnet yang digunakan pada kereta.

Gambar 4.6 Elektromagnet yang digunakan sebagai penggerak

4.3.2 Sensor

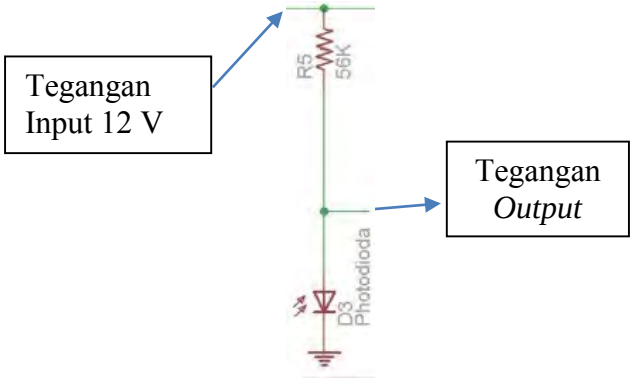
Pada penelitian tesis ini, photodioda digunakan sebagai sensor posisi antara elektromagnet dan rel. Photodioda adalah dioda yang mengubah cahaya atau inframerah menjadi arus listrik.



Gambar 4.7 Peletakan sensor photodioda dan inframerah pada sistem *maglev*

Jumlah inframerah yang ditangkap mempengaruhi *output* arus dan tegangan photodioda. Semakin banyak inframerah yang ditangkap oleh photodioda, maka

arus *output* photodioda semakin besar. Berbanding terbalik dengan hambatan pada photodioda, peningkatan arus menyebabkan hambatan menurun. Perubahan hambatan selanjutnya menyebabkan perubahan *output* tegangan rangkaian pembagi tegangan. Nilai hambatan R5 sebesar 56 KΩ. Pengukuran dengan menggunakan *voltage*-meter mendapatkan data pada Tabel 4.4. Rangkaian pembagi tegangan sensor ini ditampilkan pada Gambar 4.8 di bawah.



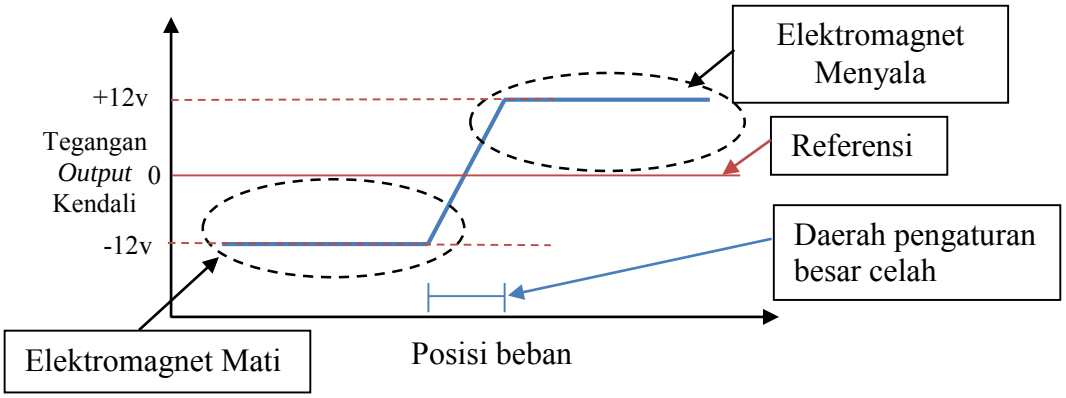
Gambar 4.8 Skema rangkaian photodioda sebagai sensor penerima inframerah.

Tabel 4.4 Tabel pengukuran *output* pembagi tegangan sensor photodioda

Kondisi	Tegangan *output*
Celah Tertutup	7,46 volt
Celah Terbuka	5,99 volt

4.3.3 Sistem Kendali

Output yang diinginkan dari sistem kendali adalah sinyal digital. Digital yang dimaksud adalah sistem mengeluarkan dua kondisi yaitu menyala atau mati. Komponen yang berperan mengubah sinyal analog menjadi digital adalah *differential amplifier* dan *non-inverting amplifier*. Komponen pengubah sinyal analog menjadi digital dapat dilakukan oleh *comparator*. Namun *comparator* memiliki kekurangan dalam hal pengendalian dengan kendali *PD*. *Comparator* tidak dapat menghasilkan tegangan yang diharapkan.



Gambar 4.9 Grafik posisi beban terhadap tegangan *output* kendali

Gambar 4.9 adalah grafik tegangan *output* kendali yang diinginkan. Elektromagnet akan menyala apabila jarak celah besar melebihi daerah operasional dan elektromagnet mati apabila jarak celah terlalu kecil. Besar jarak celah dapat diatur selama berada pada daerah pengaturannya. Cara mengatur besar celah adalah dengan mengubah tegangan referensi menjadi lebih tinggi atau lebih rendah.

Perancangan rangkaian kendali membutuhkan data input dan output yang diinginkan. Data input didapatkan dengan cara pengukuran pada sensor photodioda, sedangkan besarnya output disesuaikan kebutuhan. Tabel 4.5 adalah data yang digunakan dalam perancangan rangkaian kendali.

Tabel 4.5 Data input sensor dan output yang diinginkan dari rangkaian kendali

Kondisi	Input	Output yang diinginkan
Celah terbuka	5,99 volt	12 volt
Celah tertutup	7,46 volt	-12 volt

Persamaan 4.4 berikut adalah persamaan untuk mendapatkan besaran *gain* dan besaran konstanta pada rangkaian kendali analog. *Gain* memperbesar sinyal input, sedangkan Konstanta adalah nilai penjumlah sinyal.

$$Output = Gain * Input + \text{Tegangan konstan} \qquad 4.4$$

Kondisi celah terbuka

$$12 \text{ volt} = Gain * 5{,}99 \text{ volt} + \text{Tegangan konstan} \qquad 4.5$$

Kondisi celah tertutup

-12 volt = *Gain* * 7,46 volt + Tegangan konstan 4.6

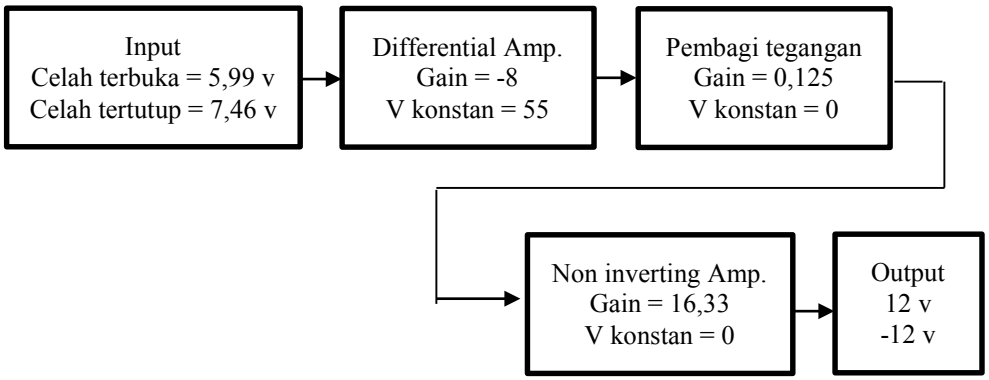
Proses eliminasi dan subtitusi dari Persamaan 4.5 dan 4.6 menghasilkan

Gain = -16,33 4.7

Tegangan konstan = 109,8 4.8

Gain keseluruhan dari sistem kendali adalah -16,33 dan tambahan 109,8 volt tegangan konstan. Untuk mendapatkan *gain* dan tegangan konstan tersebut, penelitian ini menggunakan pasangan *differential amplifier* dan *non-inverting amplifier*. Penggunaan kedua *op-amp* tersebut sudah cukup untuk memproses sinyal dari sensor hingga mengeluarkan sinyal *output* 12 dan -12 volt.

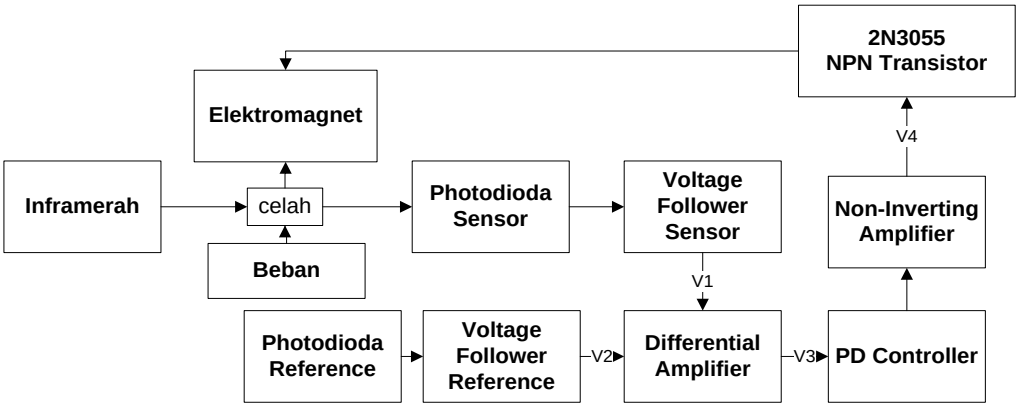
Rancangan *analog signal conditioning* tampak pada Gambar 4.10 bawah. Pada gambar tersebut terdapat rangkaian pembagi tegangan. Rangkaian pembagi tegangan menjadi satu dengan kendali *PD*. Pembagi tegangan wajib ada pada rangkaian kendali ini. Perancangan kendali *PD* pada sebuah *operational amplifier* dapat dilihat pada Tabel 2.6



Gambar 4.10 *Gain* dan tegangan konstan keseluruhan dari sistem kendali

Sistem ini menggunakan rangkaian beberapa *operational amplifier*, pembagi tegangan dan photodioda referensi. Berikut ini adalah rangkaian elektronika sebagai *signal processing* dari inframerah-photodioda hingga menuju elektromagnet.

Gambar 4.11 menjelaskan bahwa terdapat satu photodioda lain yang digunakan sebagai referensi. Terdapat tiga komponen utama dalam sistem kendali yaitu: *differential amplifier*, *voltage divider* dan *non-inverting amplifier*. Ketiga komponen ini mengolah sinyal dari photodioda sebelum menuju transistor NPN 2N3055.

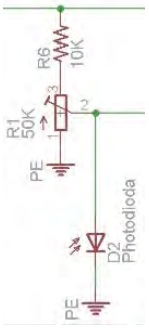


Gambar 4.11 Alur pemrosesan sinyal pada sistem kendali

Perhitungan *Signal Conditioning*

1. Photodioda Referensi

Manfaat dari adanya photodioda referensi ini adalah sistem kendali mampu meminimalkan pengaruh cahaya lain yang tidak diharapkan dalam penelitian ini, contohnya adalah lampu dan cahaya matahari. Cahaya matahari menyebabkan bacaan sensor photodioda bergeser. Photodioda referensi memperbaiki perubahan tersebut dengan cara menggeser nilai referensi photodioda kendali.



Gambar 4.12 Rangkaian pembagi tegangan untuk photodioda referensi

Gambar 4.12 menujukkan photodioda referensi memiliki potensiometer untuk mengatur tegangan *output* referensi. Nilai hambatan potensiometer R1 sebesar 50 KΩ dan hambatan R6 sebesar 10 KΩ. Perubahan nilai tegangan referensi dapat digunakan sebagai pengatur besar celah. *Output* tegangan dari rangkaian ini ditampilkan pada Tabel 4.6 di bawah. Tegangan yang digunakan dalam perhitungan rangkaian kendali adalah 5,99 volt.

Tabel 4.6 Hasil pengukuran *output* tegangan photodioda referensi

Kondisi	Tegangan *output*
Hambatan 60 KΩ (Potensiometer maksimum)	5,72 V (celah terbuka) 5,70 V (celah tertutup)
Hambatan 10 KΩ (Potensiometer minimum)	6,08 V (celah terbuka) 5,99 V (celah tertutup)

2. *Voltage Follower* dan *Differential amplifier*

Differential amplifier adalah *operational amplifier* yang menjumlahkan kedua tegangan *input*-nya. Umumnya *differential amplifier* didahului dengan *op-amp* jenis *voltage follower*. *Voltage follower* tidak memanipulasi nilai *input* tegangannya sehingga nilai *input* dan *output*-nya sama. Fungsi dari *voltage follower* adalah sebagai *buffer* agar pemrosesan selanjutnya pada *differential amplifier* menjadi lebih stabil.

Dari Tabel 4.6 dapat diketahui bahwa hubungan antara jarak celah dengan tegangan *output* sensor adalah terbalik atau memiliki *trend* negatif. Untuk mendapatkan hasil *output* kendali sesuai dengan Gambar 4.9, maka *differential amplifier* diperlukan untuk mengubah hubungan tersebut menjadi setara atau tren positif. Dari Persamaan 2.19, tren grafik *output differential amplifier* akan menjadi positif apabila nilai V_1 dihubungkan dengan *output* tegangan sensor photodioda dan V_2 dihubungkan dengan *output* photodioda referensi.

$$V_{out} = -V_1\left(\frac{R_3}{R_1}\right) + V_2\left(\frac{R_4}{R_2+R_4}\right)\left(\frac{R_1+R_3}{R_1}\right) \qquad 2.28$$

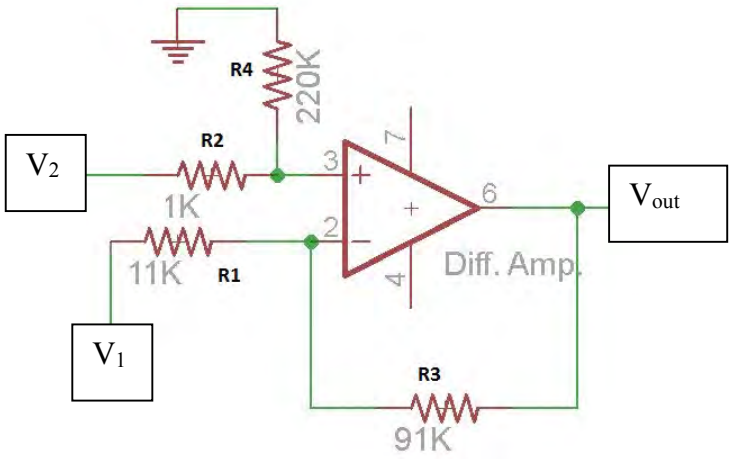
Dari perhitungan *gain* dan tegangan konstan pada halaman 63, nilai *gain* yang dibutuhkan sebesar -16,33 dan tegangan konstan sebesar 109,8. Perbesaran atau

gain untuk sensor yang diinginkan pada tahap ini sebesar -8. Nilai *gain* tersebut didapatkan dengan mengganti hambatan, R_1 = 11 KΩ, R_2 = 1 KΩ, R_3 = 91 KΩ. dan R_4 = 220 KΩ, *Gain* sinyal tegangan setelah subtitusi nilai hambatan ditampilkan pada persamaan berikut

$$V_{out} = -V_1\left(\frac{91K\ \Omega}{11K\ \Omega}\right) + V_2\left(\frac{220\ K\Omega}{1\ K\Omega+220\ K\Omega}\right)\left(\frac{11K\ \Omega+91K\ \Omega}{11K\ \Omega}\right) \qquad 4.9$$

Nilai V_2 sebesar 5,99 volt tidak berubah karena tegangan ini dihasilkan oleh photodioda referensi. Subtitusi nilai 5,99 volt ke variabel V_2 pada persamaan 4.9 menghasilkan Persamaan 4.10. Untuk skema rangkaian elektronik tampak pada Gambar 4.13.

$$V_{out} = -V_1(-8{,}273) + 5{,}99(9{,}273)$$
$$V_{out} = -8{,}273\ V_1 + 55{,}3 \text{ volt} \qquad 4.10$$



Gambar 4.13 Skema *differential amplifier* dengan dua *voltage follower*

Nilai *gain* yang diperoleh adalah -8,273 dan tegangan konstan yang didapat sebesar 55,3. Perlu perhitungan ulang untuk mengetahui *output* dari *differential amplifier* ini

Kondisi celah terbuka

Output = -8,273 * 5,99 volt + 55,3 4.11

Output = 5,738 volt

Kondisi celah tertutup

Output = -8,273 * 7,46 volt + 55,3 4.12

Output = -6,422 volt

Dari perhitungan di atas dapat diketahui bahwa rangkaian *differential amplifier* tidak mampu mencapai output 12 volt pada kondisi celah terbuka dan -12 volt pada kondisi celah tertutup. Solusi permasalahan ini adalah memperbesar *gain* pada rangkaian *operational amplifier* selanjutnya. *Median* dari kedua nilai *output* tersebut sudah mendekati nol, maka perbesaran pada *gain* selanjutnya akan mencapai +12 dan -12 volt.

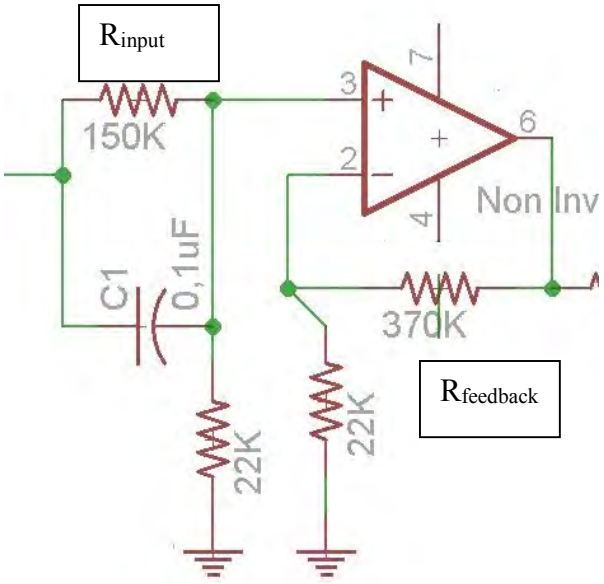
3. Kendali *Proportional-Derivative*

Kendali *Proportional-Derivative* (*PD controller*) mengikuti konfigurasi sebuah *non-inverting operational amplifier* dengan elemen *input* berupa rangkaian parallel hambatan-kapasitor dan elemen *feedback* berupa hambatan (informasi mengenai rangkaian elektronik dari kendali PD dapat dilihat pada Tabel 2.6).

Elemen *input* adalah hambatan 150 KΩ dan kapasitor 0,1 μF yang disusun parallel. Elemen *feedback* menggunakan hambatan sebesar 370 KΩ. Nilai *gain Proportional* (Kp) adalah perbandingan hambatan feedback dengan hambatan *input*. *Gain Derivative* (Kd) dihitung menggunakan hambatan *feedback* dikalikan dengan kapasitor *input*. Rangkaian kendali *PD* pada *non-inverting amplifier* dapat dilihat pada Gambar 4.14.

$$Kp = \frac{R_{feedback}}{R_{input}} = \frac{370\ K\Omega}{150\ K\Omega} = 2{,}467 \quad 4.13$$

$$Kd = R_{feedback} * C = 150.000\ \Omega * 10^{-7} F = 0{,}015 \quad 4.14$$



Gambar 4.14 Konfigurasi *operational amplifier* sebagai *PD controller*

Dari Gambar 4.14 dapat diamati bahwa *input* menuju *non-inverting amplifier* terdapat rangkaian pembagi tegangan. Perhitungan *gain* rangkaian ini adalah sebesar 0,128. Rangkaian pembagi tegangan ini berfungsi untuk menstabilkan dan memperkecil tegangan sebelum masuk menuju *op-amp.*

$$Gain_{pembagi\ tegangan} = 22\ K\Omega/(22\ K\Omega + 150\ K\Omega) = \ 0{,}128. \qquad 4.15$$

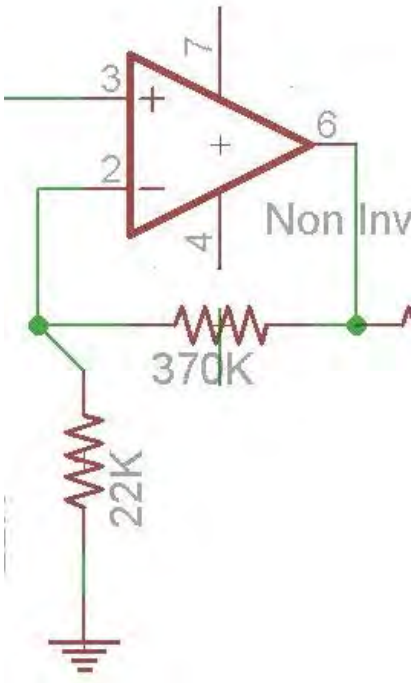
4. *Non Inverting Amplifier*

Pembahasan ini masih dalam satu komponen terhadap pembahasan kendali *PD*. Sinyal *input* diperbesar oleh *non-inverting amplifier* dengan *gain* sebesar 16,864. Penggunaan resistor 370 KΩ dan 22 KΩ pada *non inverting amplifier* menghasilkan *gain* sebesar:

$$V_{out} = V_{in}\left(\frac{1+370K\ \Omega}{22K\ \Omega}\right) \qquad 4.16$$

$$Gain_{non-inverting\ amp.} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 16{,}864 \qquad 4.17$$

Skema rangkaian *non-inverting amplifier* ditunjukkan oleh Gambar 4.15 sebagai berikut:



Gambar 4.15 Skema *non-inverting amplifier* dengan *gain* sebesar 9,51

Perhitungan sinyal *output* dari *non-inverting amplifier*

Kondisi celah terbuka

Output = 0,125 * 16,864 * 5,738 volt + 0 4.18

Output = 12,064 volt

Kondisi celah tertutup

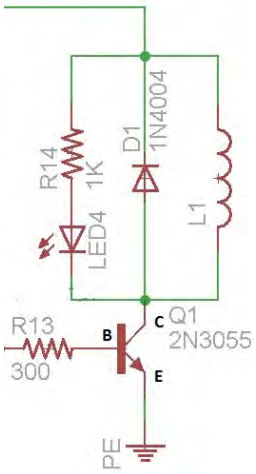
Output = 0,125 * 16,864 * -6,422 volt + 0 4.19

Output = -13,5 volt

Tegangan *output* dari *non-inverting amplifier* pada kondisi celah terbuka telah mencapai 12,064 volt. Tegangan output pada kondisi celah tertutup sebesar -13,5 volt. Kedua nilai tersebut telah memenuhi syarat *output* kendali sebesar 12 dan -12 volt. Tegangan akhir kedua kondisi tersebut tidak akan lebih besar dari 12 volt atau lebih kecil dari -12 volt karena peralatan *operational amplifier* hanya mengeluarkan sinyal sesuai *power supply* yang digunakan. Maka perancangan rangkaian kendali ini telah sesuai dengan keinginan

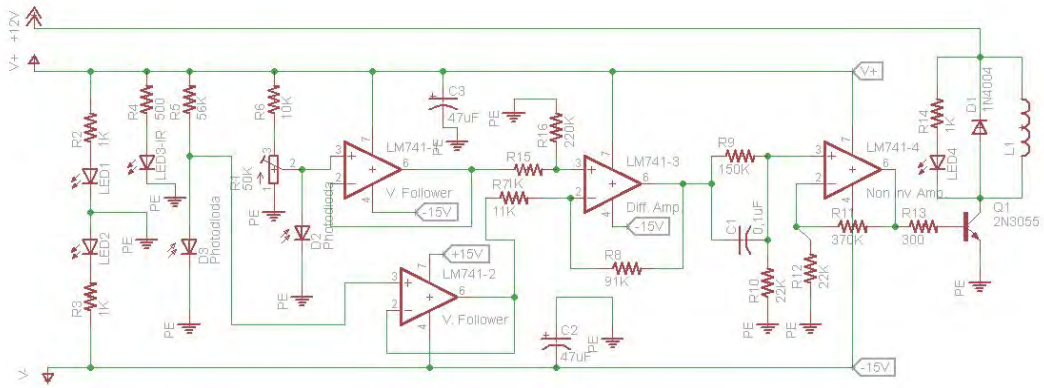
5. Transistor NPN 2N3055

Transistor ini berfungsi sebagai saklar elektronik. Tegangan atau arus pada *pin base* menyebabkan *pin collector* dan *emitter* terhubung. Terhubungnya *collector* dan *emitter* menyebabkan elektromagnet menyala (elektromagnet disimbolkan dengan L1 pada Gambar 4.16). Hambatan 300 Ω digunakan untuk memperkecil arus yang masuk menuju *base* transistor. Arus yang menuju *base* transistor tidak lebih dari 40 mA.



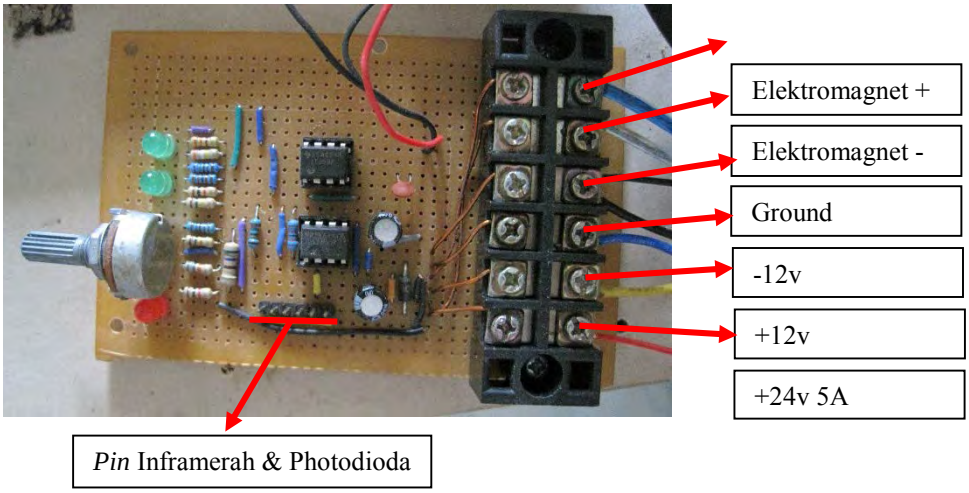
Gambar 4.16 Skema rangkaian transistor yang terhubung dengan elektromagnet

Rangkaian keseluruhan ditampilkan pada Gambar 4.17. Rangkaian tersebut memiliki beberapa LED sebagai indikator, kapasitor 47 µF sebagai filter dan dioda penyearah. Hambatan variabel 50K berfungsi untuk mengatur tegangan photodioda referensi.



Gambar 4.17 Skema rangkaian *magnetic levitation* dengan sensor inframerah-photodioda.

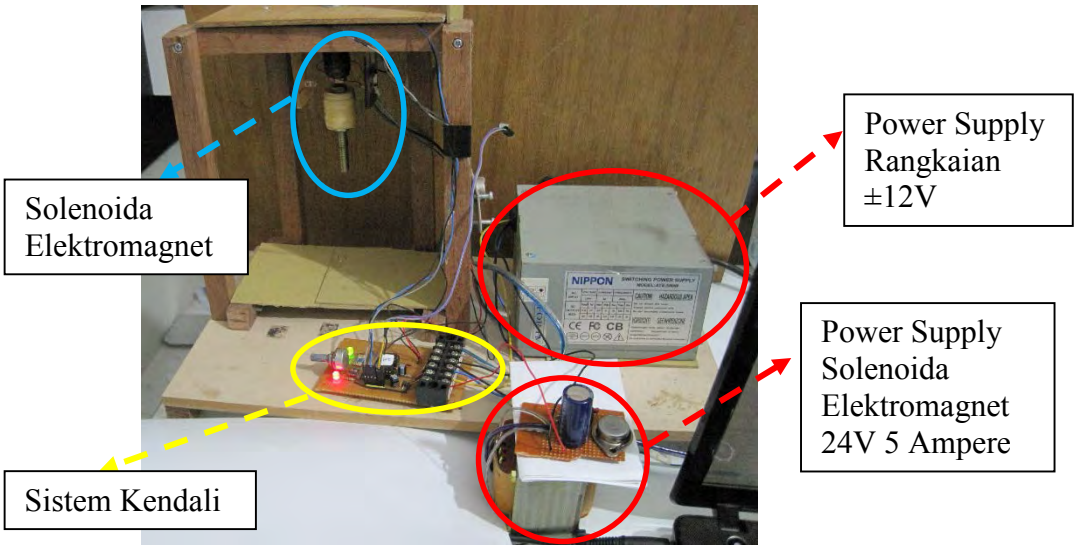
Gambar 4.18 menunjukkan rangkaian elektronika dari skema dari Gambar 4.17. Rangkaian ini menggunakan *matrix board* berukuran 7x15 cm sebagai papan sirkuit. LED hijau adalah indikator yang menunjukkan terpasangnya *power supply* +12V dan -12V, sedangkan LED merah adalah indikator jika elektromagnet aktif. Daftar komponen dan detil rangkaian dapat dilihat pada Lampiran 4.



Gambar 4.18 Sistem kendali yang dibuat pada *matrix board.*

4.3.4 Pengujian Sistem Melayang Magnetik

Penggabungan sensor, elektromagnet, sistem kendali dan *power supply* menghasilkan sebuah sistem melayang magnetik yang ditunjukkan oleh Gambar 4.19.

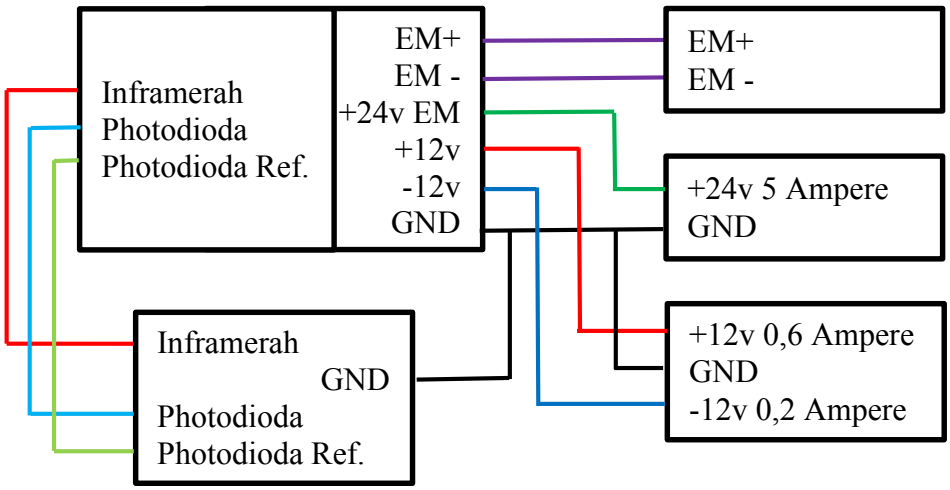


Gambar 4.19 Peralatan pengujian sistem melayang magnetik

Pada perencanaan, tegangan 12 volt akan digunakan pada elektromagnet. Pada peralatan yang ada, tegangan 12 volt tidak mampu menyalurkan arus sebesar 3,63 Ampere seperti yang diharapkan. Tegangan 12 volt hanya mampu menyalurkan arus 1,32 Ampere. Penyebab terbatasnya arus yang mampu dilewatkan pada elektromagnet adalah bahan solenoid dan inti elektromagnet. Elektromagnet tidak menggunakan bahan yang terbaik melainkan menggunakan bahan yang mudah didapatkan di pasaran. Kualitas bahan yang tidak berkualitas menyebabkan arus dan gaya tarik elektromagnet tidak sesuai perhitungan.

Solusi untuk menaikkan arus adalah dengan menaikkan tegangan. Percobaan dengan menggunakan 24 volt menunjukkan hasil yang baik. Sistem melayang magnetik mampu mengangkat beban yang lebih berat. Beban arus yang mampu disalurkan transistor sebesar 1,54 Ampere pada tegangan 24 volt. Apabila ingin mendapatkan hasil yang lebih besar, tegangan dapat dinaikkan hingga 60 volt. Tegangan maksimum yang mampu disalurkan oleh transistor 2N3055 adalah 60 volt dan arus maksimum 4 Ampere.

Wiring diagram sistem melayang magnetik ditunjukkan oleh Gambar 4.20. Kedua *power supply*, sensor inframerah-photodioda, elektromagnet dan sistem kendali saling terhubung. *Pin ground* (GND) kedua *power supply* terhubung.



Gambar 4.20 Skema pengkabelan antara sistem kendali, sensor, *power supply* dan elektromagnet.

Sistem melayang magnetik mampu menarik beban bermassa 85 gram. Beban yang diangkat tersebut lebih berat dari spesifikasi elektromagnet yang bermassa 65 gram. Gambar 4.22 menunjukkan beban yang diangkat.

Gambar 4.21 Pengukuran massa solenoid besar yang digunakan sebagai beban (85 gram)

Peralatan ini merupakan pengembangan dari penelitian sebelumnya oleh Patriawan pada 2013. Pada penelitian sebelumnya Patriawan menggunakan sensor

hall effect pada peralatannya dan mampu mengangkat beban 25 gram. Pada penelitian ini elektromagnet mampu mengangkat beban 85 gram.

4.3.5 Pengambilan Data dan Pembahasan

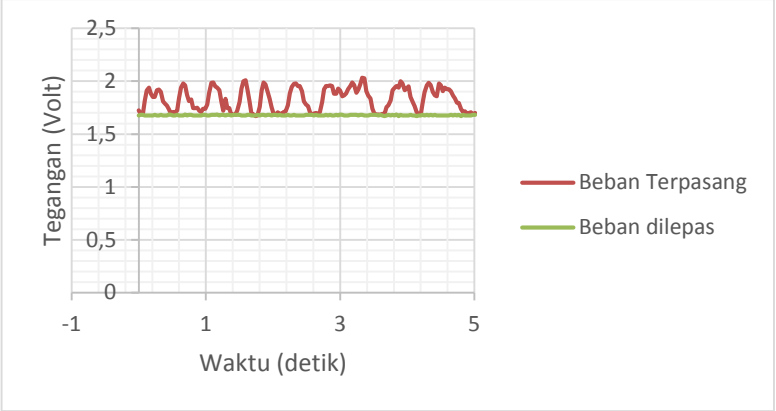
Pengambilan data sesuai dengan Bab 3.3 didapatkan hasil seperti pada Tabel 4.7. Tegangan *output* sensor, photodioda diukur menggunakan voltmeter. Arus elektromagnet diukur menggunakan amperemeter. Percobaan diulangi dengan mengambil contoh beberapa beban yang memiliki massa 68 gram dan 23 gram.

Tabel 4.7 Tabel pengukuran data *maglev*

Data	Beban Tidak Terpasang	Beban 85 gram	Beban 68 gram	Beban 23 gram
Tegangan Sensor Photodioda	6,63	6,87-6,89	6,87-6,89	6,87-6,89
Tegangan Photodioda Referensi	6,08	6,01-6,03	6,01-6,03	6,01-6,03
Arus elektromagnet	1,54	0,91	0,85	0,77

Tabel 4.7 menunjukkan bahwa semakin besar massa beban, maka semakin besar arus yang dibutuhkan elektromagnet untuk menarik beban tersebut. Tegangan sensor photodioda dan photodioda referensi tidak berpengaruh terhadap massa beban dan arus elektromagnet. Faktor lain yang mempengaruhi adalah jarak celah antara beban dan elektromagnet. Tiap jenis beban membutuhkan pengaturan jarak celah secara manual. Apabila jarak celah tidak diatur sebelumnya, beban tidak dapat terangkat atau beban tidak stabil. Pengaturan jarak celah ini mempengaruhi sensor dan arus elektromagnet yang tersalurkan.

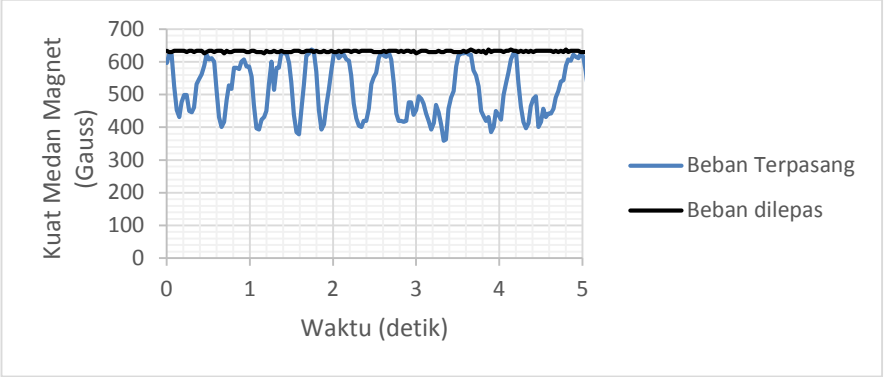
Sensor *Hall Effect*



Gambar 4.22 Grafik tegangan sensor *hall effect* dengan beban 85 gram terpasang dan saat beban dilepas.

Gambar 4.22 di atas adalah grafik pembacaan sensor *hall effect* yang diletakkan diatas elektromagnet. Jenis sensor *hall effect* yang digunakan adalah UGN 3503. UGN 3503 mengenali perubahan medan magnet dengan menaikkan atau menurunkan tegangan *output*. Sensor UGN 3503 akan menghasilkan tegangan *output* sebesar 2,5 volt saat tidak mendeteksi medan magnet. Tegangan *output* meningkat saat garis medan magnet melalui permukaan depan sensor. Tegangan *output* menurun saat garis medan magnet melalui permukaan belakang sensor. Grafik di atas menunjukkan garis medan magnet melewati permukaan belakang sensor UGN 3503.

Grafik berwarna merah adalah hasil bacaan sensor saat beban terpasang dan grafik hijau menunjukkan bacaan sensor saat elektromagnet tidak mengangkat beban. Grafik merah berfluktuasi antara 1,681 hingga 2,084 volt, sedangkan grafik hijau memiliki nilai 1,676 volt. Fungsi transfer sensor UGN 3503 adalah 1,3 mV/Gauss. Elektromagnet mampu mengeluarkan medan magnet sebesar 633,8462 Gauss. Grafik merah berfluktuasi disebabkan karena sensor inframerah-photodioda memerintahkan elektromagnet untuk menyala dan mati dalam waktu singkat.



Gambar 4.23 Grafik kuat medan magnet dalam satuan Gauss.

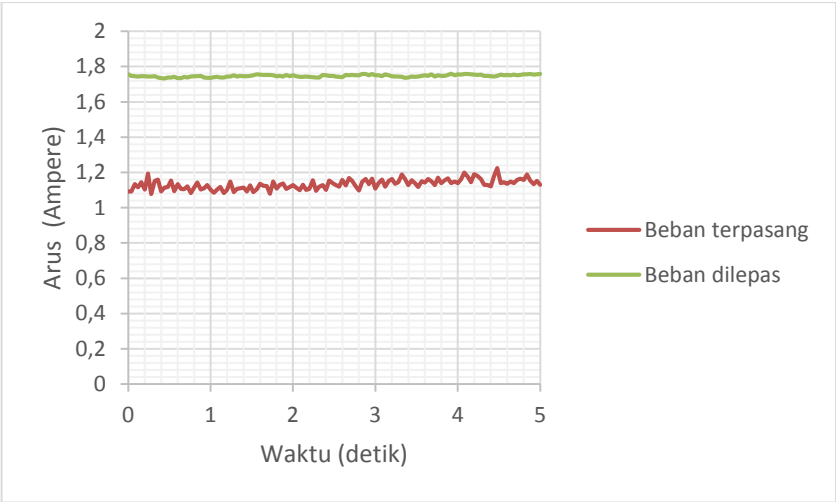
Gambar 4.23 menunjukkan kuat medan magnet yang dibangkitkan oleh elektromagnet selama 5 detik alat beroperasi. Grafik tersebut didapatkan dengan cara mengalikan tegangan sensor *output hall effect* dengan nilai 769,23 Gauss/Volt.

Tabel 4.8 Statistik data kuat medan magnet dari Gambar 4.24.

Kondisi	Mean	Standar Deviasi	Median	Maksimum	Minimum
beban terpasang	524,5882	71,43771861	530,6149	637,6917	385,3842
beban dilepas	548,0278	2,397136728	633,8455	637,6917	626,1532

Dari Tabel 4.8 menunjukkan statistik dari Gambar 4.24. Data statistik tersebut menunjukkan nilai maksimum yang sama dari kondisi beban terpasang maupun dilepas. Hal tersebut menunjukkan bahwa peralatan menyesuaikan kuat medan magnet terhadap posisi beban.

Sensor Arus



Gambar 4.24 Grafik arus yang melewati elektromagnet dengan beban 85 gram dan saat beban dilepas

Gambar 4.24 adalah bacaan sensor arus yang melewati elektromagnet. Grafik hijau menunjukkan arus pada kondisi beban dilepas. Arus maksimal yang terbaca sebesar 1,75 Ampere. Terbukanya celah menyebabkan tidak adanya pembatasan arus pada elektromagnet. Elektromagnet diperintah menarik objek sekuat mungkin hingga celah tertutup. Kondisi beban dilepas menyebabkan celah terbuka dan membuat arus yang mengalir mencapai 1,75 Ampere. Grafik merah menunjukkan arus saat beban terpasang. Grafik merah berfluktuasi antara 1,224 dan 1,09 Ampere. Grafik merah berfluktuasi karena pengaruh sensor inframerah-photodioda yang memerintahkan elektromagnet aktif dan non aktif dalam waktu singkat.

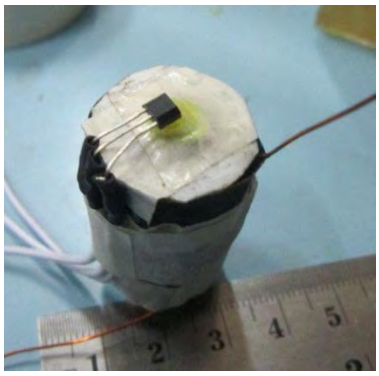
Tabel 4.9 Statistik data arus dari Gambar 4.24

Kondisi	Mean	Standar Deviasi	Median	Maksimum	Minimum
Beban terpasang	1,135529	0,025883505	1,1338	1,224	1,058
Beban dilepas	1,756233	0,005815603	1,7561	1,775	1,733

Dari Tabel 4.9 dapat diketahui bahwa peralatan berjalan baik saat beban terpasang. Standar deviasi sebesar 0,025883505 menunjukkan peralatan kokoh (*robust*) karena nilai standar deviasi tersebut kecil.

4.4 Rancang Bangun Sistem Melayang Magnetik dengan Sensor *Hall Effect*

Sensor *hall effect* dapat digunakan sebagai sensor sistem melayang magnetik. Perubahan jarak celah dikenali sebagai perubahan jumlah garis medan magnet. Cara kerja sensor ini telah dibahas sebelumnya pada Gambar 3.3. Sensor *hall effect* diletakkan pada ujung inti elektromagnet yang menjadi celah antara elektromagnet dan beban. Gambar 4.25 menunjukkan letak sensor ini pada elektromagnet.



Gambar 4.25 Peletakan sensor *hall effect* pada ujung inti elektromagnet.

Dalam kajian pustaka diketahui bahwa sistem ini memiliki beberapa persyaratan untuk dapat bekerja. Persyaratan-persyaratan tersebut adalah:

- Elektromagnet dan beban yang diangkat memiliki sifat magnet.
- Kutub yang berhadapan antara elektromagnet dan beban yang diangkat berlawanan.
- Jarak celah antara elektromagnet dan beban yang diangkat tidak lebih kecil dari 3 mm.

Beberapa batasan tersebut menjadikan purwarupa kereta magnet berbasis sensor *hall effect* menjadi lebih sulit. Beberapa kendala dalam rancang bangun purwarupa ini adalah:

- Beban yang diangkat bersifat magnet.

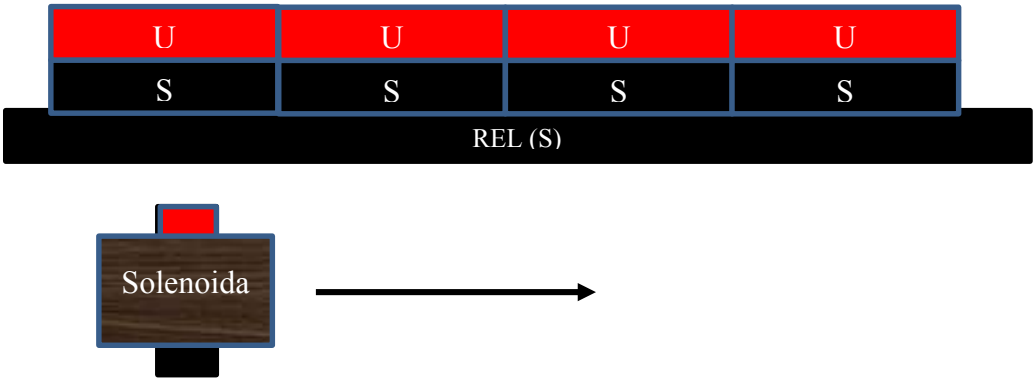
  Beban yang diangkat wajib bersifat magnet, ditandai dengan memiliki dua kutub magnet. Apabila beban yang digunakan adalah besi biasa yang tidak memiliki sifat magnet, maka sistem tidak dapat bekerja. Pemakaian

beban yang tidak bersifat magnet menghasilkan bacaan sensor *hall effect* tidak berubah walaupun beban menjauh atau mendekati elektromagnet.

- Rancang bangun rel lebih rumit.

  Perancangan rel yang memiliki sifat magnet membutuhkan dimensi yang sangat besar. Rel magnet diperoleh dengan cara menempelkan magnet permanen dengan kutub seragam disepanjang rel, atau dengan cara melilitkan kawat tembaga pada rel secara membujur.

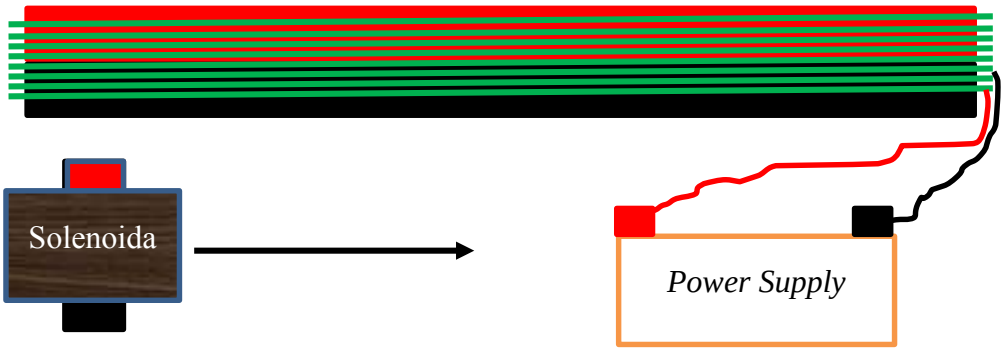
  Rel magnet yang diperoleh dengan menempelkan magnet permanen cukup sulit dalam proses pengerjaannya. Sifat tarik-menarik dan tolak-menolak magnet adalah kendala tersebut. Rel yang diinginkan memiliki satu kutub saja disepanjang rel sehingga magnet ditempel pada posisi seragam. Penempelan dalam posisi seragam sulit dilaksanakan karena sifat alami manget yang saling tolak-menolak. Cara tidak dianjurkan dalam penelitian ini karena batasan masalah tidak menggunakan magnet permanen. Ilustrasi penempelan magnet permanen pada rel ditunjukkan pada Gambar 4.26 di bawah ini.



Gambar 4.26 Ilustrasi penggunaan magnet permanen untuk mendapatkan rel dengan sifat magnet.

Cara kedua adalah dengan dengan rel elektromagnet yaitu melilit rel membujur dengan kawat tembaga. Kendala yang ditemui adalah jumlah

power supply meningkat dan perancangan elektromagnet rel yang cukup rumit. Ilustrasi metode ini ditunjukkan pada Gambar 4.27.



Gambar 4.27 Ilustrasi perancangan rel magnet dengan menggunakan metode elektromagnet.

- Penggunaan daya besar.

  Jarak celah yang dibentuk tidak lebih kecil dari 3 milimeter menyebabkan gaya tarik magnet semakin kecil. Sesuai dengan Persamaan 2.7 yang menjelaskan bahwa semakin jauh jarak celah, gaya tarik magnet semakin kecil. Untuk meningkatkan kekuatan magnet dibutuhkan peningkatan arus dan/atau jumlah lilitan pada elektromagnet.

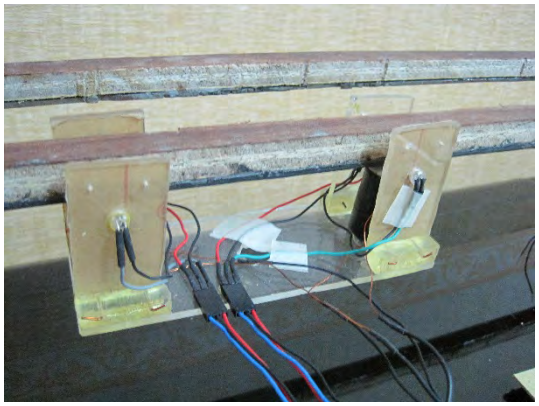
Beberapa batasan tersebut menyebabkan rancang bangun kereta melayang magnetik dengan sensor *hall effect* tidak dapat berjalan lancar. Penggunaan sensor inframerah-photodioda pada kereta melayang magnetik lebih *feasible.* Sensor Inframerah-photodioda mampu membuat celah antara beban yang diangkat dengan elektromagnet kurang dari 3 mm. Semakin kecil jarak celah, gaya tarik elektromagnet meningkat secara kuadratik. Bab selanjutnya akan membahas mengenai rancang bangun kereta dengan sensor inframerah-photodioda.

4.5 Rancang Bangun Kereta Melayang Magnetik

4.5.1 Rel

Pembuatan rel menggunakan bahan kayu dan pada bagian bawah tertempel batang besi. Rel sepanjang satu meter ini digunakan sebagai landasan *frame* kereta.

Saat elektromagnet aktif, batang besi dan elektromagnet di kereta akan saling tarik menarik. Jika gaya tarik antara elektromagnet dan rel dapat diatur dengan baik maka kereta melayang magnetik ini akan bekerja.



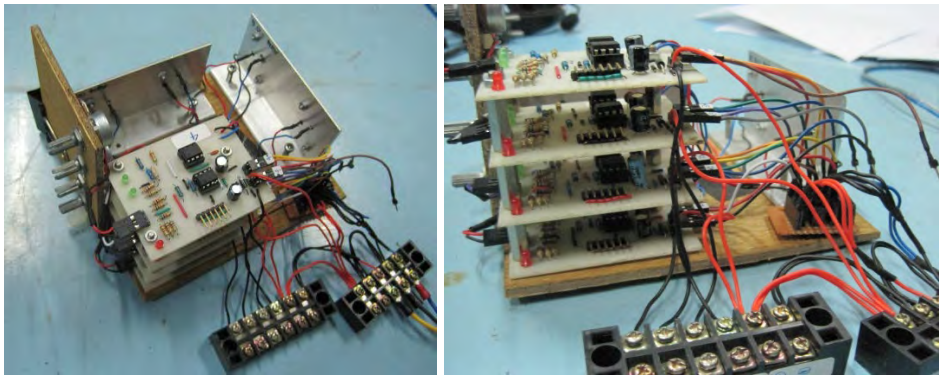
Gambar 4.28 Rel yang telah dibuat.

4.5.2 Elektromagnet dan Kereta

Gambar 4.29 Elektromagnet dan *frame* kereta memiliki massa 177 gram

Gambar 4.29 merupakan separuh badan dari kereta magnet. Dua elektromagnet direkatkan pada *frame* kereta yang terbuat dari bahan *acrylic*. Massa separuh badan ini adalah 177 gram. Apabila satu elektromagnet mampu mengangkat beban 85 gram, maka dua elektromagnet mampu mengangkat beban 170 gram. Selisih massa sebesar 7 gram dapat ditambahkan dengan cara memperkecil jarak celah antara elektromagnet dan rel.

4.5.3 Sistem Kendali



(a) (b)

Gambar 4.30 Sistem kendali kereta melayang magnet (a) Tampak atas (b) Tampak samping.

Sistem kendali pada Gambar 4.30 dibentuk dari empat sistem kendali untuk masing-masing elektromagnet. *Power supply* ±12 volt dihubungkan secara parallel.

4.5.4 Kendala dan Solusi Rancang Bangun Kereta Melayang Magnetik

Proses rancang bangun kereta magnetik memiliki beberapa kendala. Kendala-kendala tersebut adalah:

- Jarak celah pada keempat elektromagnetik telah terpasang pada *frame* kereta tidak dapat diatur dengan mudah.
- Kemampuan angkat elektromagnet mendekati batas maksimumnya, setidaknya beban yang mampu diangkat satu elektromagnet adalah 1,5 kali dari beban yang diangkat.
- Rel, elektromagnet dan *frame* kereta tidak simetris.

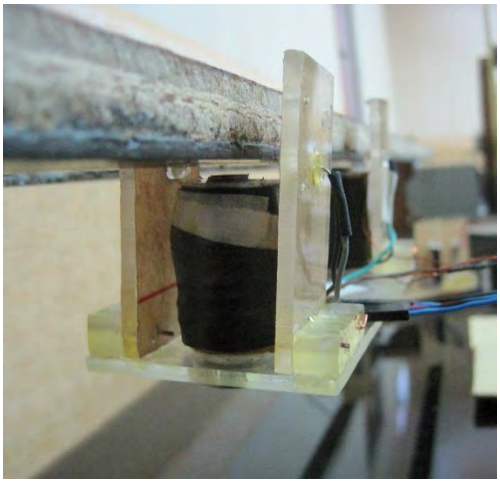
Solusi dari beberapa kendala tersebut adalah:

- Meningkatkan arus yang melewati elektromagnet.

  Salah satu cara meningkatkan arus adalah dengan meningkatkan tegangan. Penggunaan tegangan 12 volt tidak cukup kuat untuk mengangkat beban 1,5 kali beban yaitu sekitar 140 gram. Tegangan 12 volt dapat menghasilkan arus 1,32 Ampere. Konsekuensi dari solusi ini adalah

meningkatkan konsumsi energi dan panas. Pendinginan dapat dibantu dengan pemasangan *heat sink* pasif.

Gambar 4.31 menunjukkan percobaan dua elektromagnet pada separuh badan kereta diberi tegangan 24 volt. Tegangan 24 volt menghasilkan arus sebesar 1,75 Ampere. Separuh badan kereta tersebut berhasil melayang. Badan kereta tidak menyentuh tanah atau menempel di rel. Separuh badan kereta melayang karena kedua elektromagnet menarik badan kereta ke rel. Kedua elektromanget berhasil menarik separuh badan kereta yang memiliki bobot 177 gram. Tetapi pemberian tegangan 24 volt mengakibatkan temperatur elektromagnet meningkat dengan cepat.



Gambar 4.31 Kereta berhasil melayang dengan elektromagnet bertegangan 24 volt.

- Menggunakan elektromagnet tetap (*fixed electromagnet*).

  Elektromagnet tetap adalah elektromagnet yang dialiri arus listrik yang konstan dan memiliki sifat magnet yang tidak berubah-ubah. Elektromagnet tetap dapat diatur agar memiliki jarak celah berbeda dengan elektromagnetik lainnya karena tidak dipengaruhi oleh sensor.

  Elektromagnet tetap diletakkan diantara kedua elektromagnet terkendali untuk membantu mengangkat beban yang lebih besar. Kutub magnet elektromagnet terkendali diatur berlawanan dengan elektromagnet tetap. Apabila ketiga elektromagnet pada posisi yang sama menyebabkan

rel terinduksi kutub utara/selatan seluruhnya, menyebabkan ada gaya tolak-menolak antara rel dan elektromagnet. Ilustrasi penambahan elektromagnet tetap ditunjukkan oleh Gambar 4.32.

Gambar 4.32 Ilustrasi pemasangan elektromagnet tetap pada *frame* kereta.

BAB 5
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilaksanakan, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Sistem melayang magnetik (*maglev*) merupakan sistem yang tidak stabil jika dijalankan secara *open-loop,* sehingga sistem *maglev* membutuhkan sensor dan pengendalian dalam pengoperasiannya.
2. Parameter perancangan elektromagnet didapatkan dengan ukuran diameter kawat 0,4 mm, panjang solenoida 30 mm dan jumlah lilitan sebanyak 800 kali.
3. Sensor yang digunakan dalam pembuatan kereta magnetik adalah inframerah-photodioda.
4. Sensor *hall effect* tidak dapat digunakan dalam perancangan kereta magnetik karena memiliki beberapa keterbatasan.
5. Sistem melayang magnetik berjalan stabil dengan menggunakan *PD controller*.
6. Parameter *gain PD controller* adalah Kp sebesar 2,467 Dan Kd sebesar 0,015.
7. Jarak celah dapat diubah selama *maglev* beroperasi dengan cara mengubah *setpoint* sensor.
8. Sistem melayang magnetik mampu menarik beban berbobot 85 gram dengan menggunakan penggerak elektromagnetik bertegangan 24 volt.

5.2 Saran

Beberapa saran yang dapat diberikan setelah melaksanakan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pengembangan kereta magnet selanjutnya dengan menggunakan *magnetic guidance* dan *linear motor*.

2. Pembuatan rel dan kereta dapat lebih rapi dan simetris dengan menggunakan bantuan mesin.

DAFTAR PUSTAKA

Black, N., James, B., Koo, G., Kumar, V. dan Rhea, P(2009),"Small-Scale Maglev Train" *ECE4007 Senior Design Project*. Georgia Institute of Technology.

Bangga, G.S.T.A, Nurhadi, H., (2009). "Study Karakteristik Levitasi Manget pada Dua Roll Tembaga yang Berputar dengan Model Kereta Maglev sebagai Pengembangan Industri Transportasi Masa Depan. *Seminar Nasional Fisika dan Terapannya*, Surabaya.

Chen, M. Y., Wu, K. N. dan Fu, L.C (2000), "Design, Implementation and Self-tuning Adaptive Control of Maglev Guiding System" *Pergamon Mechatronics Journal* Vol.10 215-237

Crowell, B. (2006). *Electricity and Magnetism*, 2.3 Edition. Light and Matter, California.

Golnaraghi, F. dan B. C. Kuo (2010), *Automatic Control System*, 9th Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York.

Guangwei, S., Meisinger, R. dan Gang, S. (2007), "Modeling and Simulation of Shanghai MAGLEV Train Transrapid with Random Track Irregularities" ISSN 1616-0762 *Sonderdruck Schriftenreihe der Georg-Simon-Ohm Fachhochschule* Nurnberg Nr. 39.

Huajie, H., Jie, L., Wensen, C. (2003), " The Levitation Control Simulation of Maglev Bogie Based on Virtual Prototyping Platform and Matlab". *National University of Defense Technology*, Hunan

Internet Swarthmore College Home (2013) Linear Physical System Analysis, Electrical Mechanical Analogs, Pennsylvania. http://www.lpsa.swarthmore.edu

Internet University of Michigan (2013) Control Tutorial for Matlab & Simulink, Michigan. http://ctms.engin.umich.edu

Kusagawa S., Baba J., Shutoh K., dan Masada E. (2004), "Multipurpose design optimization of EMS-type magnetically levitated vehicle based on genetic algorithm", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.14, no. 2, pp.1922-1925,

Kraus, J. D dan Carver K. R. (1973). *Electromagnetics*, Second Edition-International Student Edition, McGraw Hill Kogakusha. Tokyo.

Kim, W. J., Ji, K., dan Ambike, A. (2006). "Real-time operating environment for networked control systems". *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Vol. 3, No. 3 pp. 287-296.

Lee, H. W., Kim, K. C. dan Lee J. (2006), "Review of Maglev Train Technologies" IEEE Transaction on Magnetic Vol. 42 No.7

Lilienkamp, K. A. dan Lundberg, K. (2004), " Low-cost Magnetic Levitation Project Kits for Teaching Feedback System Design". *American Control Conference*.

Nakashima, H. (1994) "The superconducting magnet for the Maglev transport system" *IEEE Trans. Magn.*, vol. 30, no. 4, pp. 1572–1578, Jul.

Nurhadi, H., Kuo, W.M., Tarng, Y.S., (2010), "Study on Controller Designs for High-Pricisely Linear Piezoelectric Ceramic Motor (LPCM)", *5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, hal. 1276-1281.

Nurhadi, H., (2011), "Stability Control Studies for Hydraulic Servo Systems" *Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM)*, Malang.

Nurhadi, H., Priyadi, A., Muqorrobin, R., (2013), "Perbandingan Sistem Kendali Motor DC pada Sepeda Motor Listrik secara Numerik dan Eksperimen", Seminar Nasional Metrologi dan Instrumentasi 2013, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya.

Patriawan, D. A. (2013) "Rancang Bangun dan Pengembangan Sistem Kendali pada Model Magnetik Levitasi". Tesis MT., Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.

Ogata, K. (2002) *Modern Control Engineering*, 4th Edition. Prentice Hall, New Jersey.

Riches, E. (1988) "Will Maglev lift off?" *IEEE Review*, pp. 427-430.

Sands, B. D. (1992), "The Transrapid Magnetic Levitation System: A Technical and Commercial Assessment" *Working Paper UCTC* No. 183. Univ. of California Transportation Center.

Sarma, M. S. (2001), *Introduction to Electrical Engineering*, Oxford University Press, Oxford.

Ulaby F. T., Michielssen, E dan Ravaioli, U.(1994), *Fundamentals of Applied Electromagnetics*, 6/e. Prentice Hall, New York.

Williams, L. (2005), "Electromagnetic Levitation Thesis" *University of Cape Town Theses*. Cape Town

Wibowo, D. B. dan Sutomo, S. (2011), "Pemodelan dan Simulasi Sistem *Control Magnetic levitation Ball*". *ROTASI Jurnal Teknik Mesin* Vol. 13 No.2.

Yaghoubi, H. (2012), "Practical Applications of Magnetic Levitation Technology". *Iran Maglev Technology Final Report*, Tehran.

Zhisu, Zhao (2009),"Structural and Kinematic Analysis of EMS Maglev Trains" *National University of Defense Technology* China

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1
Perbandingan Teknologi Kereta Maglev…….. 93

Lampiran 2
Spesifikasi *HSST Electromagnetic Levitation Linear Motor Car*…….. 95

Lampiran 3
Spesifikasi Transrapid *Maglev*…… 101

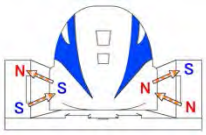
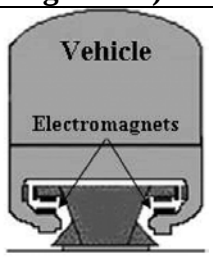
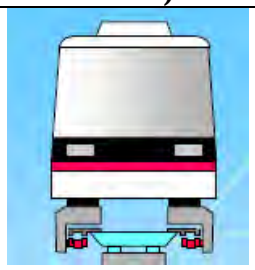
Lampiran 4
Rangkaian Sistem Maglev dengan Sensor Inframerah-Photodioda …… 103

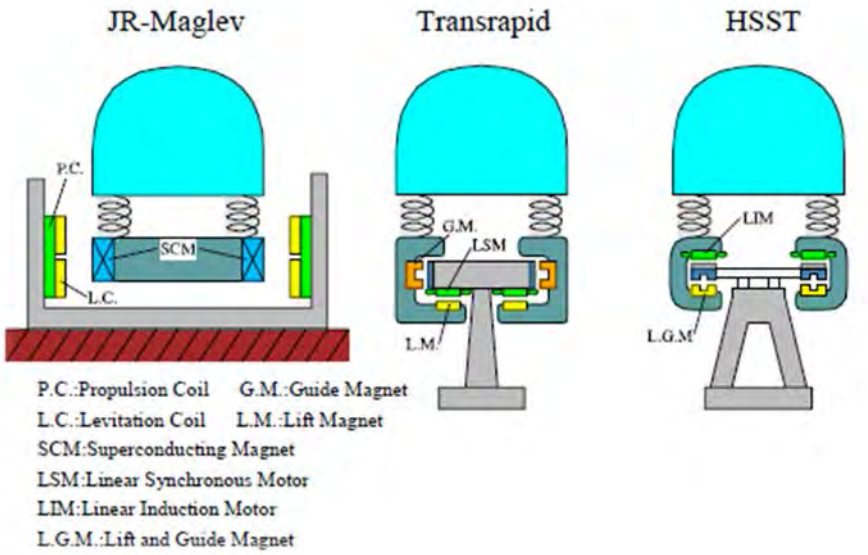
Lampiran 5
Arduino Datalogger Shield dan Program…… 109

Lampiran 6
Power Supply 24 volt 5A & ± 12 volt 1 A…… 111

Lampiran 7
Blok Diagram sistem *maglev* 119

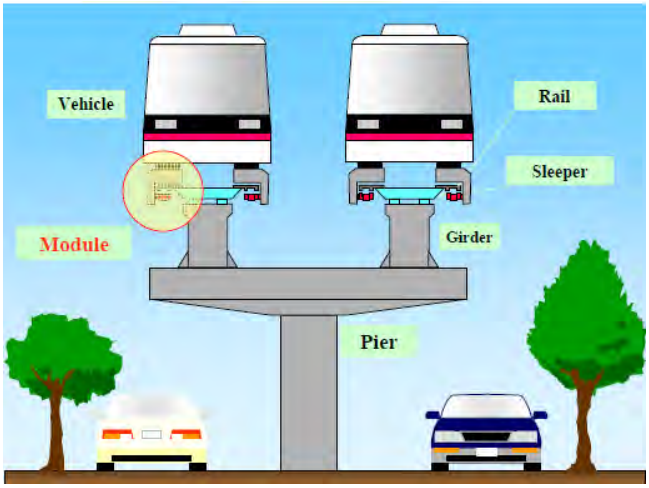
LAMPIRAN 1
Perbandingan Teknologi Kereta Maglev

Name	**JR MLX 01**	**TRANSRAPID**	**HSST-100L**
Country	**Japan**	**Germany**	**Japan**
Levitation	**Electro Dynamic**	**Electro Magnetic**	**Electro Magnetic**
	(Repulsive)	**(Attractive)**	**(Attractive)**
Propulsion	**LSM**	**LSM**	**LIM (Linear Induction Motor)**
	(Long Stator)	**(Long Stator)**	**(Short Stator)**
			
Speed Range	**500 km/h**	**500 km/h**	**100 km/h**



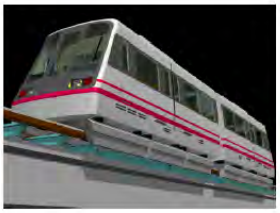
LAMPIRAN 2

Spesifikasi HSST Electromagnetic Levitation Linear Motor Car



HSST-100S Vehicle

- Size (L x W x H) 8.5×2.6×3.4m
- Weight (Empty-Full) 11t/car – 15t/car
- Passenger Capacity 67 people/car
- Max. Speed 100km/h
- Max. Gradient 7%
- Min. Curve Radius 25m

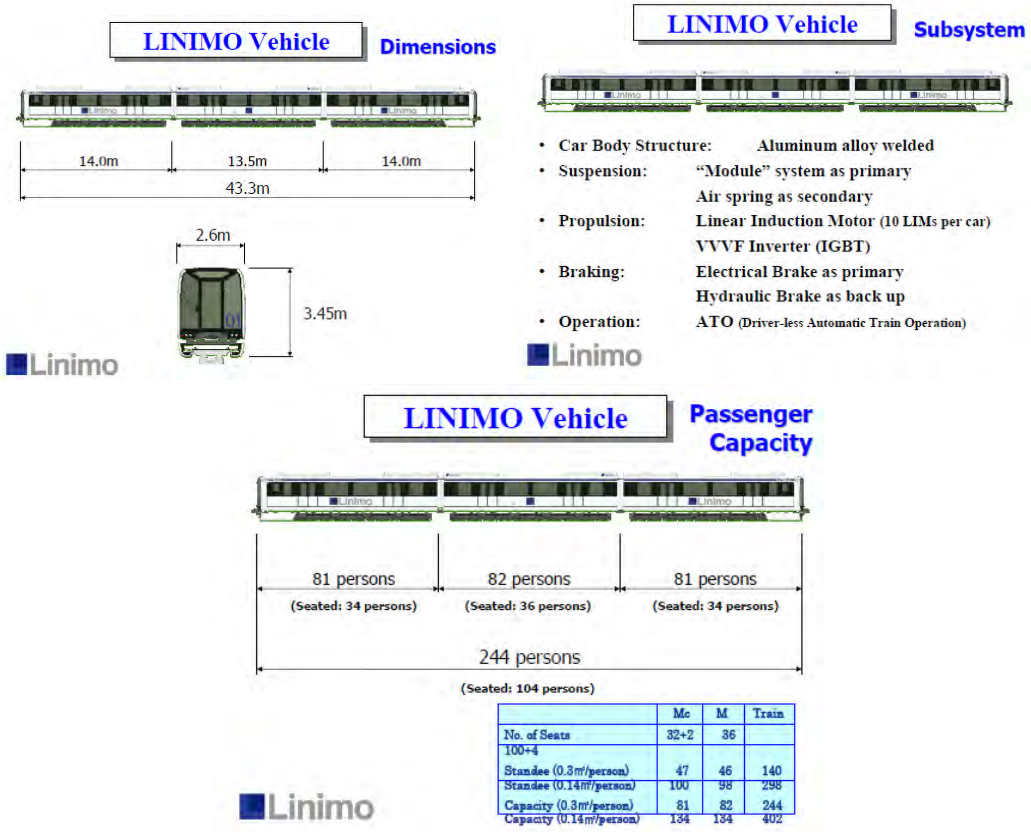


HSST-100L Vehicle

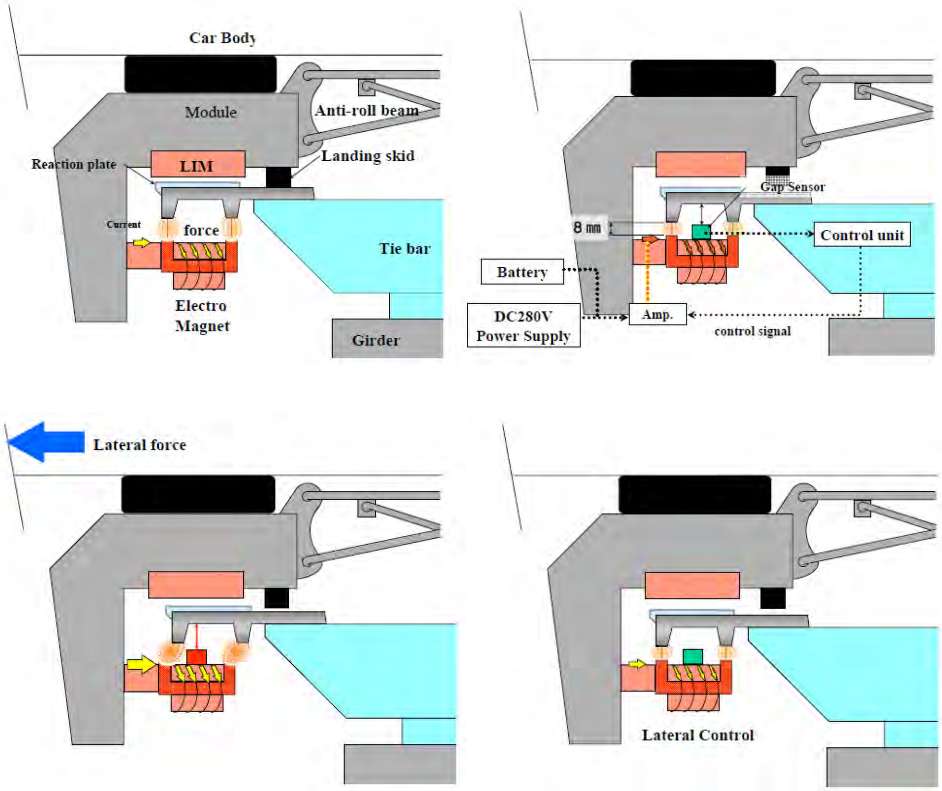
- Size (L x W x H) 14.4 x 2.6 x 3.2m
- Weight (Empty-Full) 17t/car – 25t/car
- Passenger Capacity 110 people/car
- Max. Speed 100km/h
- Max. Gradient 7%
- Min. Curve Radius 50m

Standard Specifications

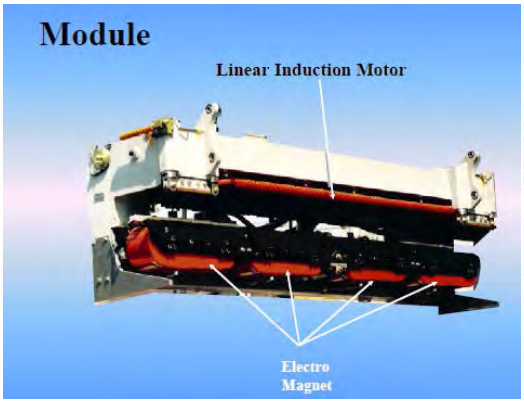
Type of HSST	HSST-100L	HSST-100S
Guideway		
Max. Gradient	7%	7%
Min. Horizontal Curve Radius	50m	25m
Min.Vertical Curve Radius	1500 m	700 m
Max. Superelevation	8 degree	8 degrre
Vehicle Performance		
Max. Speed	100km/h	100km/h
Max. Initial Acceleration	4.0km/h/s	4.5km/h/s
Max. Deceleration/Service Brake	4.0km/h/s	4.5km/h/s
/Emergency Brake	4.5km/h/s	5.3km/h/s
Vehicle Dimensions		
Length (End Car)	14.4m	8.5m
Length (Mid Car)	13.5m	8.3m
Width	2.6m	2.6m
Height	3.4m	3.4m
Empty Weight/car	17,000kg	10,000kg
Max. Loaded Weight/car	28,000kg	15,000kg
Passenger Capacity		
Density of Standing Passenger:	0.3 m^2/person//0.14 m^2/person	
4cars train	302//488	194//290
6cars train	466//746	302//450



Konsep Levitasi



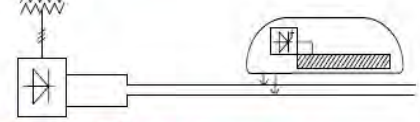
HSST – Concept of Propulsion



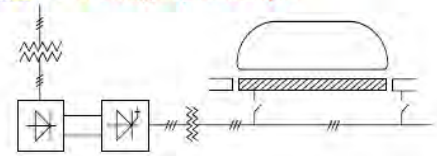
Module (side view)

Propulsion System

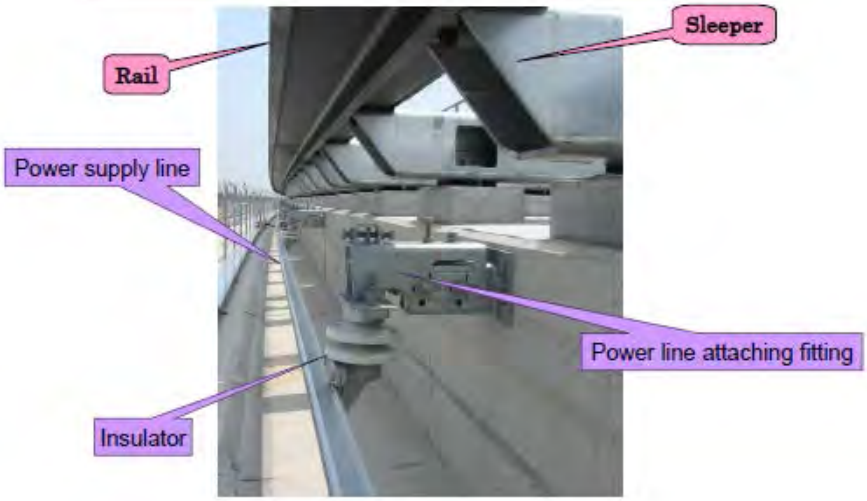
Short-stator Drive >> HSST



Long-stator Drive >> JR-Maglev, Transrapid



Power Supply Line

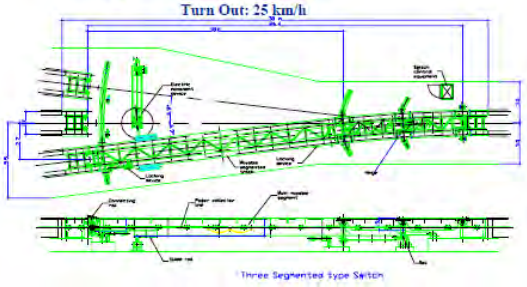


Segmented type 3-way Switch

Cyclic operational time : 17 sec

Vehicle Speed : Straight : No Limit

Turn Out: 25 km/h



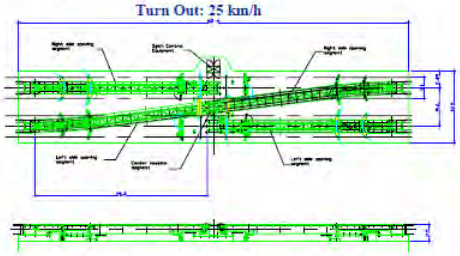
Three Segmented type Switch

Scissors type Switch

Switching time ; max.15 sec

Vehicle Speed : Straight : No Limit

Turn Out: 25 km/h



Crossover/scissors type switch

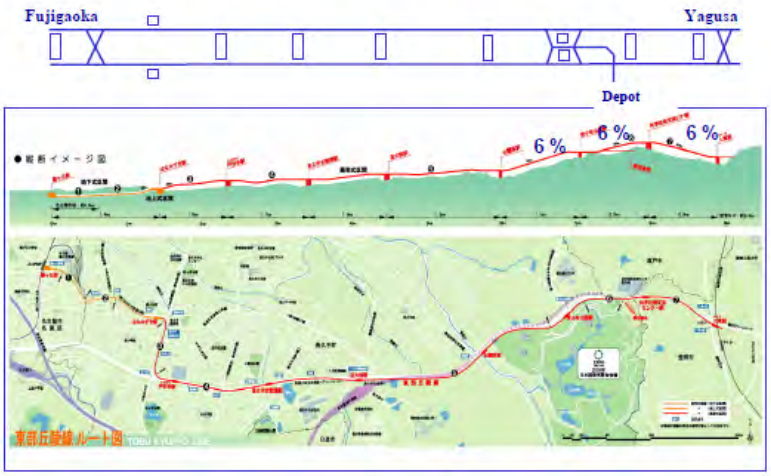
Advantages of HSST

- Safe and Comfortable----------No Risk of Derailment
- Environmentally Friendly ----------Noise and Vibration Free
- Steep Grade Capability ---------- 7 %
- All Weather Operation ---------- Run in Snow Fall
- Low Construction Cost ---------Light Car and Uniform Load
- Low Maintenance Cost ---------Maintenance Free Guideway & Less Rotating Parts

7% Gradient

Run in Snowfall

Linimo Route Outline



Linimo Route Plan

Route Length:	8.9km (Double track)
	(From Fujigaoka to Yakusa)
Tunnel Section:	1.4km
Elevated Section:	7.5km
Number of Station:	9
Demand:	30,000 passengers/day
Peak Demand:	3,500 passenger/hour/way

Linimo System Outline

Trip Time (One way):	Approximately 15 min.
Maximum Operating Speed:	100 km/h
Number of Trains:	8+1 trains (3 car train)
Train Capacity:	402 persons/train (0.14㎡/person)
	244 persons/train (0.3 ㎡/person)
Headway:	6 min. in peak time
	10 min. in off peak time
Operation:	Driverless with ATO
Trolley rail voltage:	1,500 VDC

LINIMO Vehicle

LINIMO Vehicle

Interior

Control Console

Linimo

Elevated Guideway

Hanamizuki-doori ~ Irigaike-koen

Irigaike-koen ~ Nagakute-kosenjo

Linimo

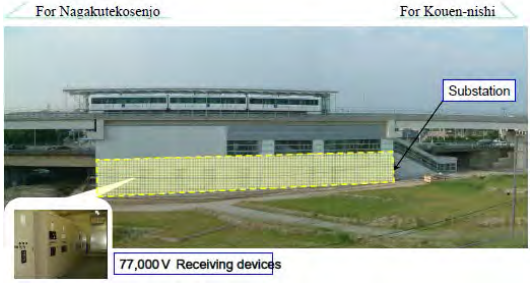
Tunnel Section

Scissors Switch

Fujigaoka Station

Linimo

Substation at Geidai-dori Station



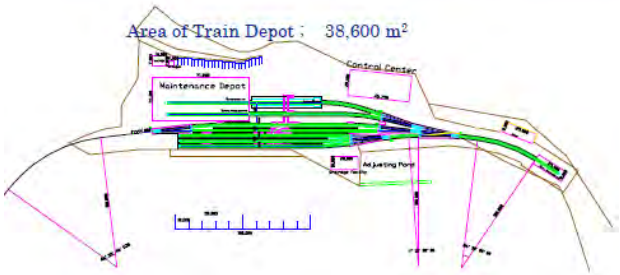
Linimo

Linimo

Linimo

Linimo

Linimo -- Train Depot

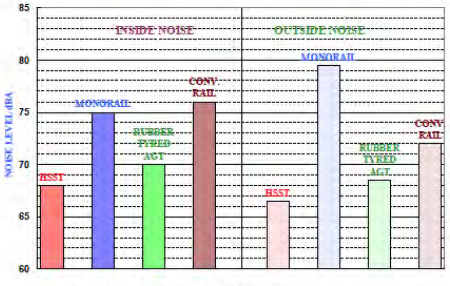


Plan View of Train Depot

Linimo Operational Experience

Total Passengers (2005/3/6 ~ 2005/8/31) : 16.5 million persons

COMPARISON OF NOISE LEVEL

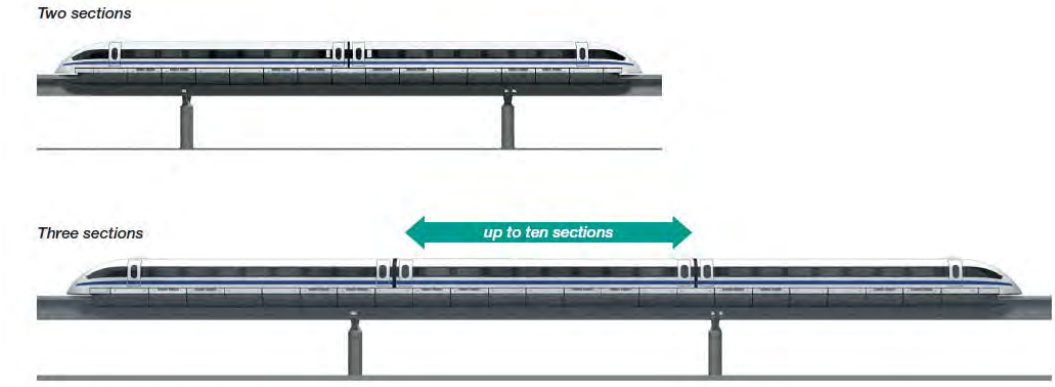


Note: Max. Noise Level [Lmax,s] measured at 10m from Guideway Center

LAMPIRAN 3
Spesifikasi Transrapid Maglev

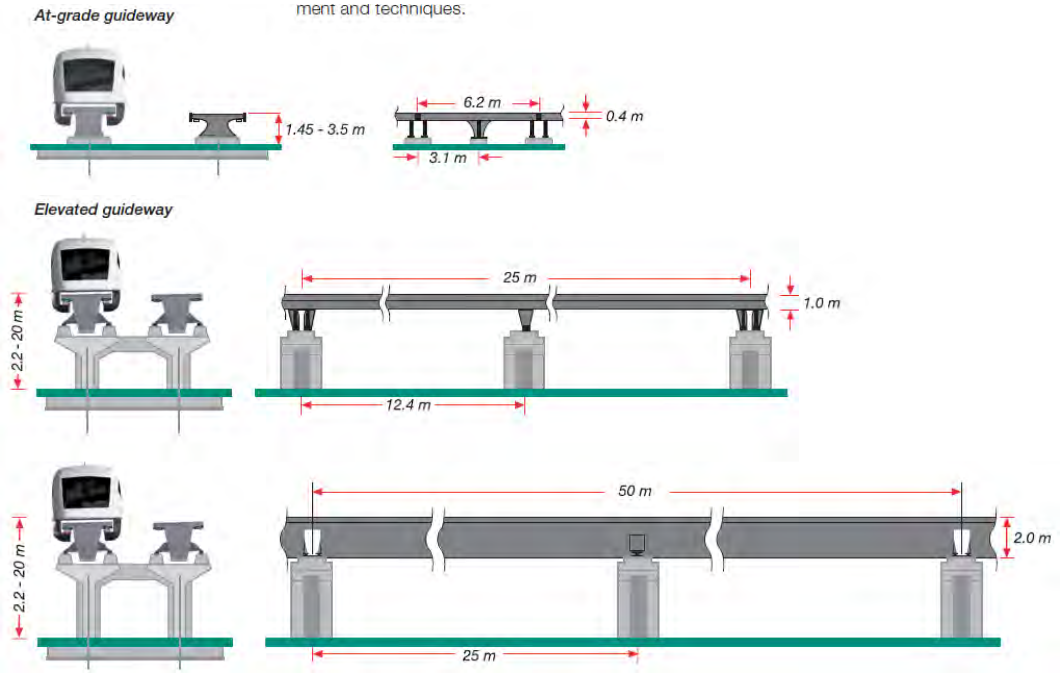
Overview

Length	End Section	25,5 / 27,0 m
	Middle Section	24,8 m
Width		3,7 m
Height		4,2 m
Maximum Operational Speed		500 km/h
Empty weight, passenger vehicle	Per section	Approx. 53 t
Empty weight, cargo vehicle	Per section	Approx. 48 t
Useful payload, cargo vehicle	Per section	Approx. 15 t
Seats, passenger vehicle	End section	Max. 92
	Middle section	Max. 126



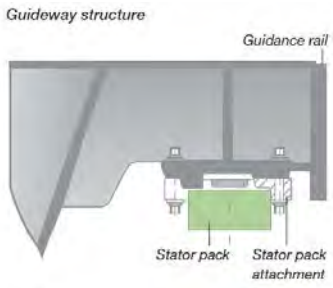
In conventional railroad systems, the function of the track is limited to supporting the loads from the vehicle and guiding it along the route. By comparison, the Transrapid's guideway has the propulsion system integrated into it and together with the vehicle, they form an integrated system. To achieve the best possible ride comfort, the requirements of the guideway in terms of fabrication, equipment, availability, and service life are especially high. Whether at-grade or elevated, whether concrete or steel construction, the Transrapid guideway meets all of these requirements. The precision of the functional surfaces is ensured by integrating the entire process – from initial layout of the route to manufacture of the guideway components to final installation and commissioning on site – using the most modern, computerized equipment and techniques. Single and double track guideways (length of guideway beams from 6 m to 62 m / 20 ft - 203.4 ft) can be built in steel, concrete, and hybrid construction. The guideway can be installed at-grade or elevated depending on the local situation. The track center-to-center distance of the double track guideway is 4.4 m up to 300 km/h or 5.1 m up to 500 km/h (14.4 ft up to 185 mph or 16.7 ft up to 310 mph). The clearance envelopes are 10.1 m and 11.4 m (33.1 ft and 37.4 ft), respectively; the track gauge is 2.8 m (9.2 ft).

ment and techniques.



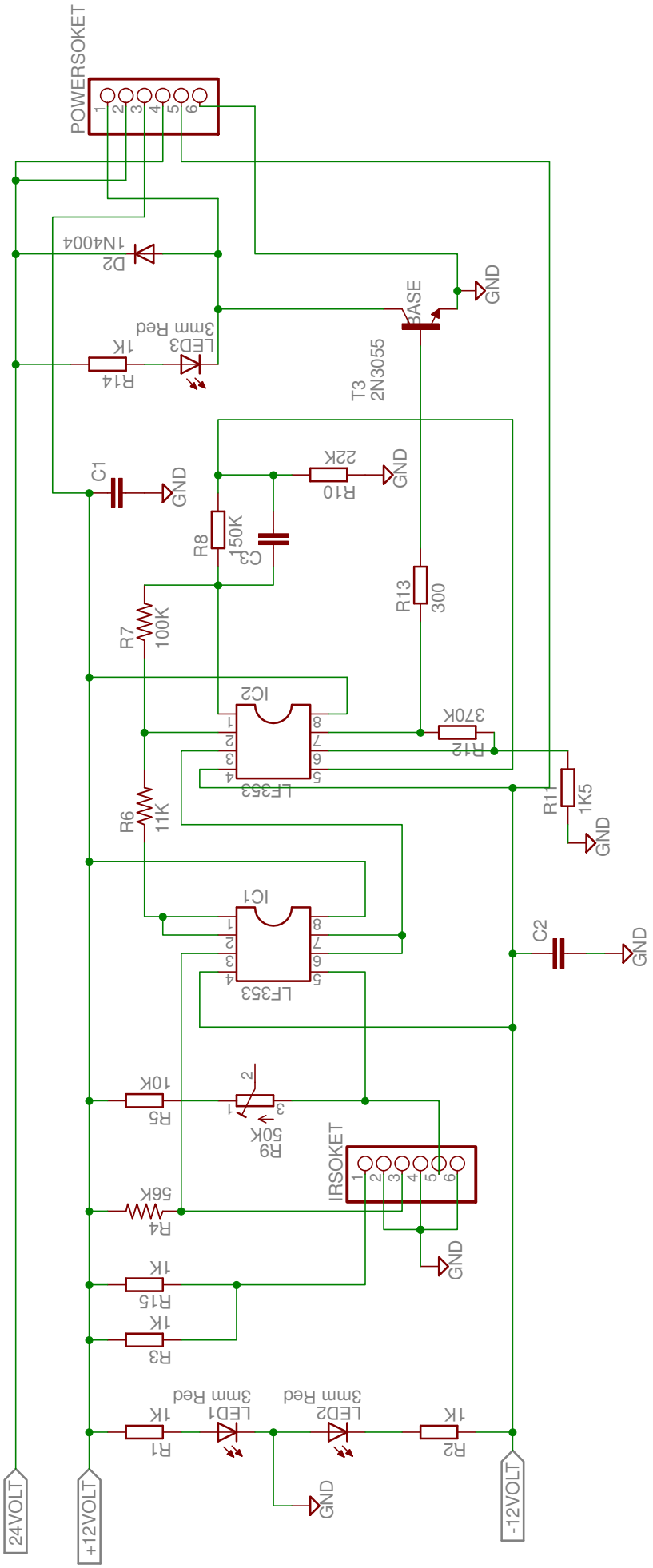
Elevated Guideway

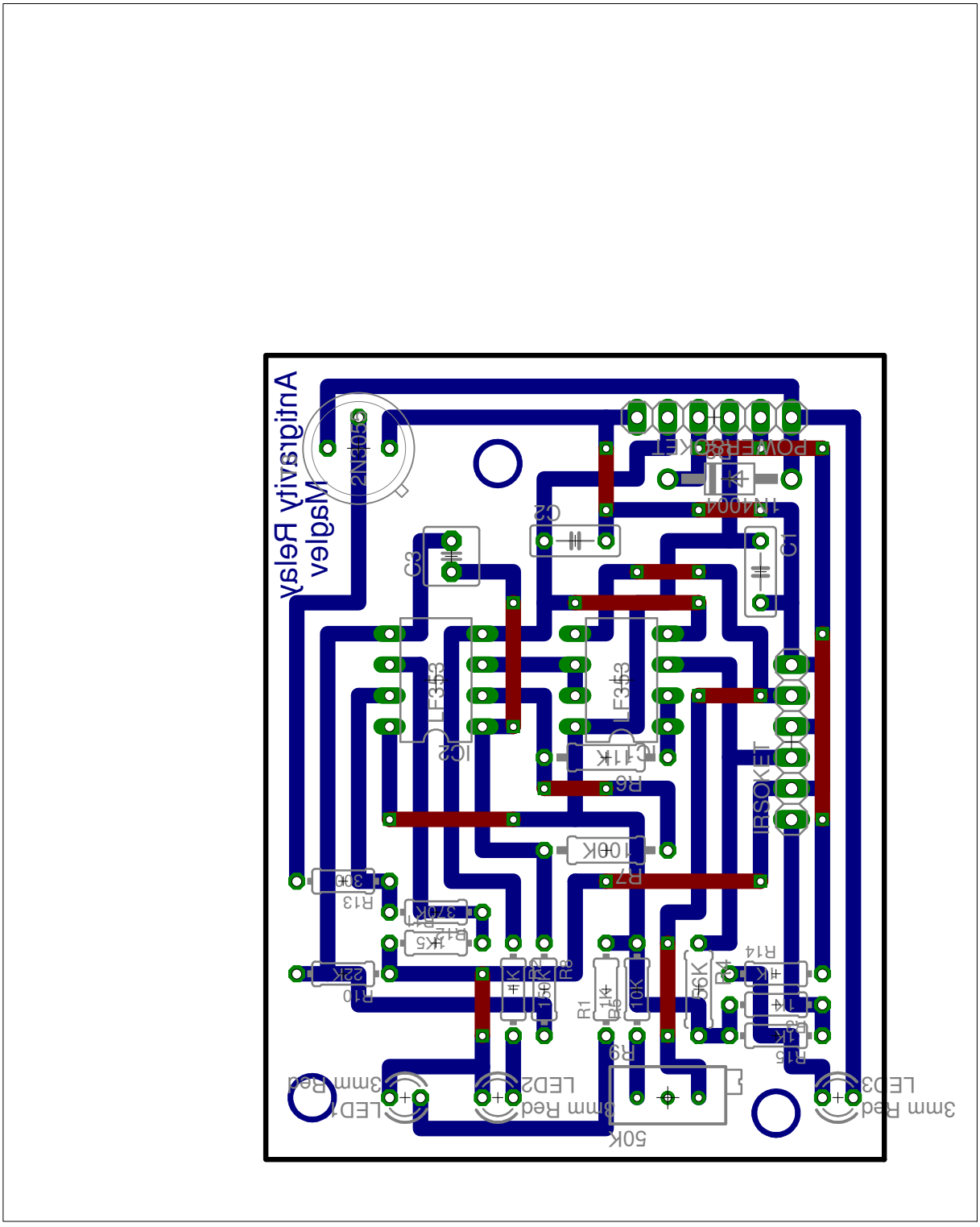
Elevated guideway is especially appropriate in areas which should not be separated for environmental or agricultural reasons and/or where existing traffic routes should not be effected by the new line. Variable column heights of up to 20 m (65 ft) and standard beam spans of up to 31 m (102 ft) allow flexible adaptation of the guideway to the topography.

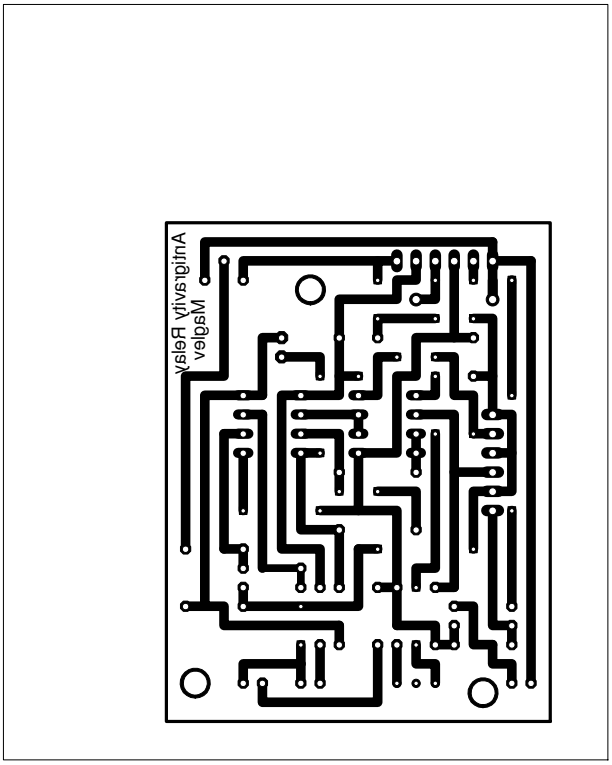


At-Grade Guideway

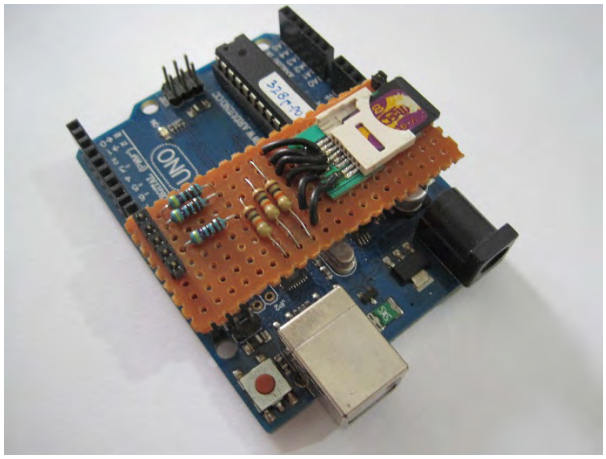
The guideway is installed at-grade mainly where it can be collocated with existing traffic routes (roads, railroads) as well as in cuttings, tunnels, and on primary civil structures such as bridges and stations. Specific features are the standard beam span of 6 m - 12 m (20 ft - 40 ft) and gradients of 1.45 m to 3.5 m (4.8 ft - 11.5 ft).

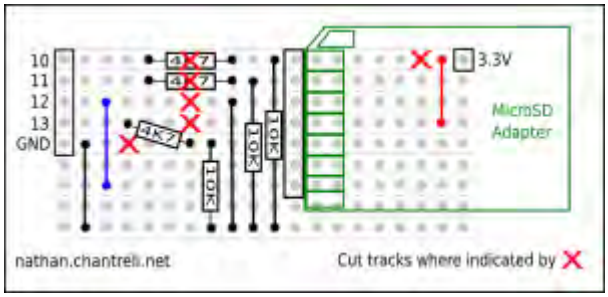

POWERSOKET
1
2
3
4
5
6
D2
1N4004
GND
BASE
T3
2N3055
LED3
3mm Red
R14
1K
C1
GND
R10
22K
GND
R8
150K
C3
R13
300
R7
100K
IC2
LF353
370K
R12
R11
1K5
GND
R6
11K
IC1
LF353
C2
GND
10K
R5
R9
50K
IRSOKET
1
2
3
4
5
6
56K
R4
GND
1K
R15
1K
R3
LED1
3mm Red
LED2
3mm Red
1K
R1
1K
R2
GND
24VOLT
+12VOLT
-12VOLT


Antigravity Relay
Maglev
2N2905
1N4004
POWER
IRSOCKET
C1
C2
C3
IC2
IC3
R1
R2
R3
R4
R5
R6
R7
R8
R9
R10
R11
R12
R13
R14
R15
1K
2K
3K3
4K5
10K
50K
100K
330
370K
3mm Red
LED1
LED2
LED3


Antigravity Relay
Magalev

LAMPIRAN 5
Arduino Datalogger Shield dan Program

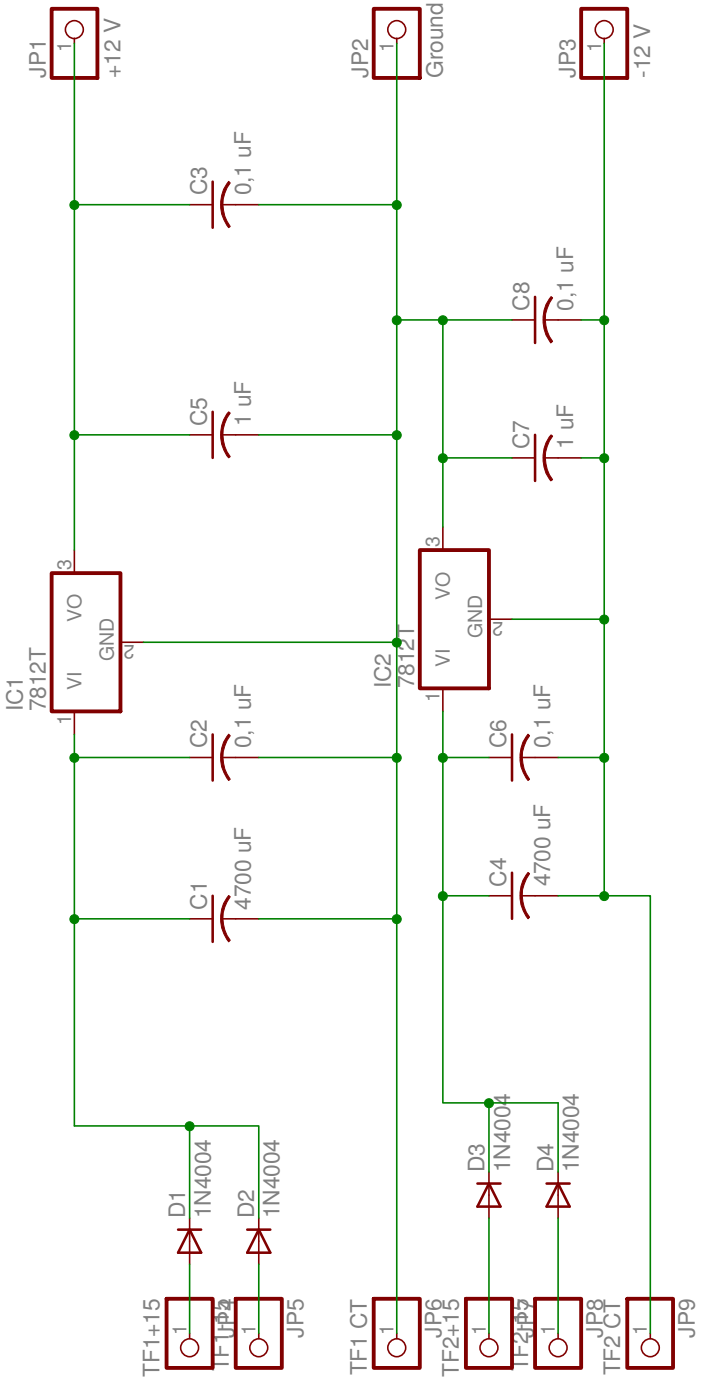


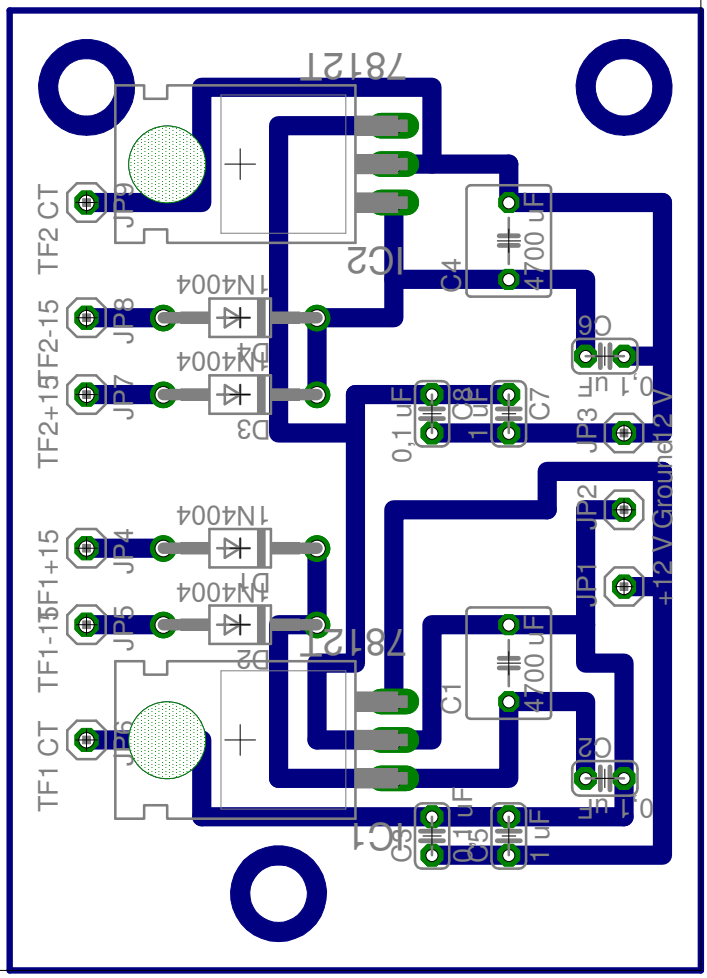


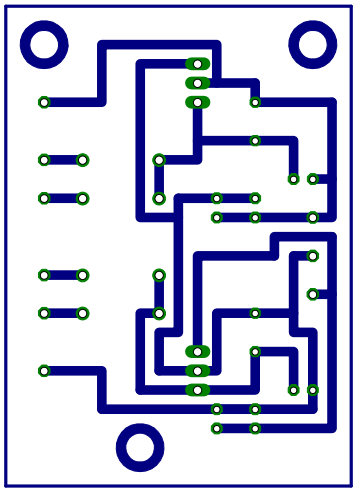
Parts List:
Stripboard, minimum of 20 holes by 9 strips
MicroSD adapter
3 x 4K7 resistors
3 x 10K resistors
5 pin straight header
1 pin straight header
7 pin right angle header
4 short pieces of wire for links

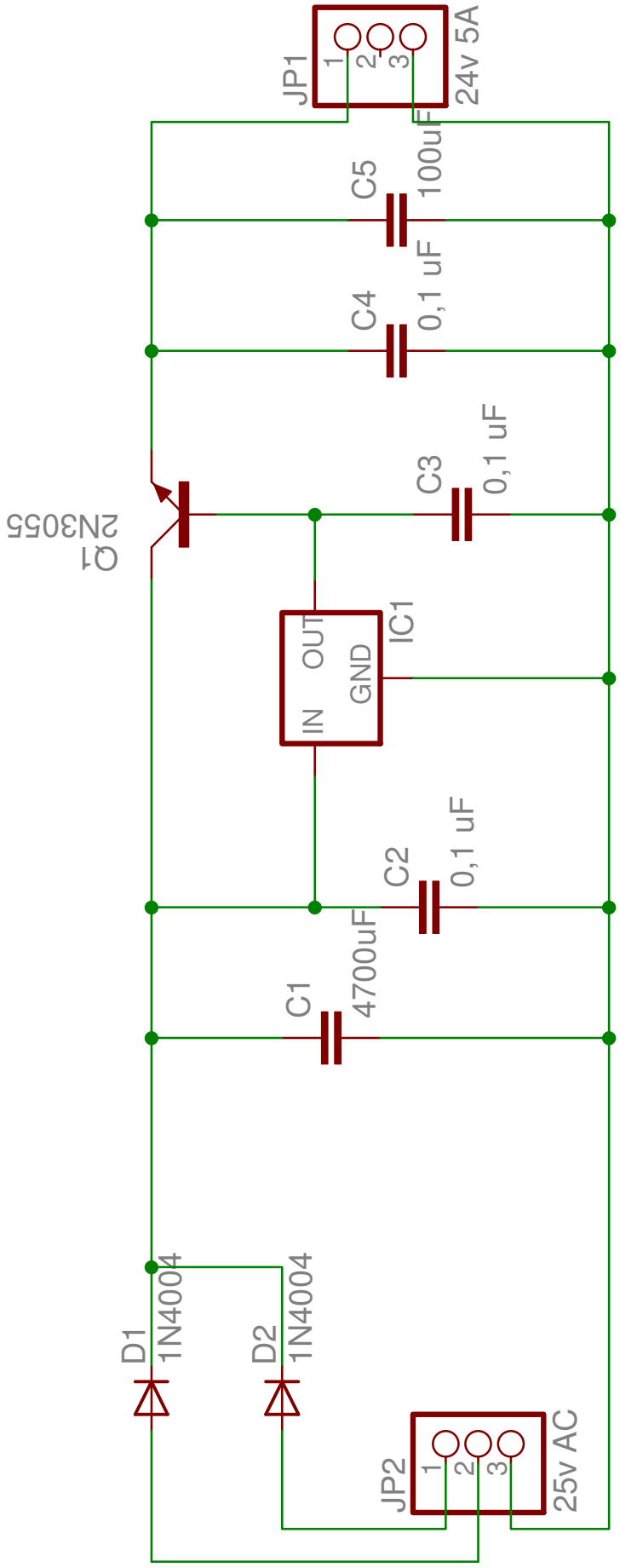
//KODE Arduino Datalogger

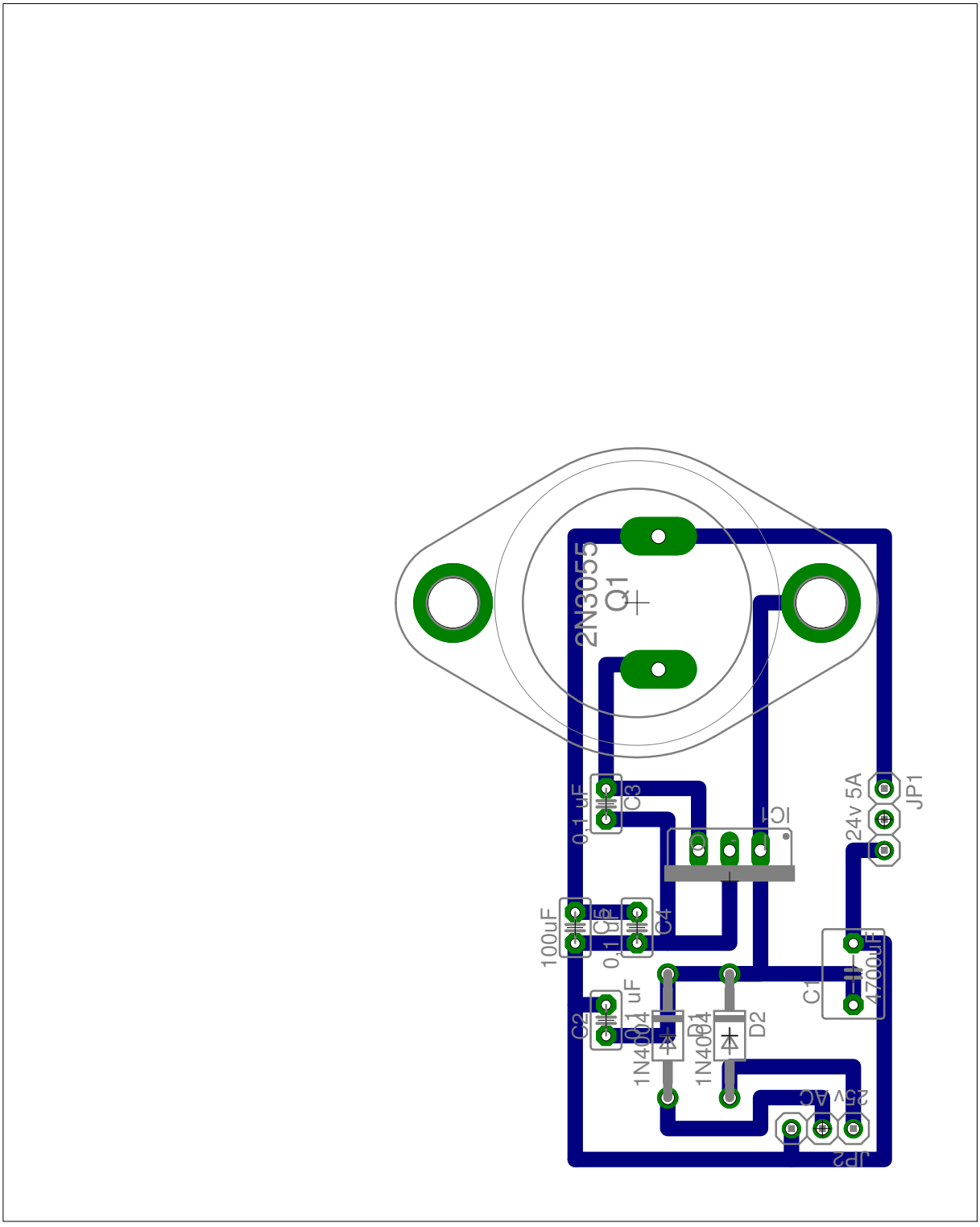
```
#include <Wire.h>
#include <SD.h>
#include "RTClib.h"

RTC_Millis rtc;
const int chipSelect = 10;

void setup()
{
 Serial.begin(9600);
 while (!Serial)
 {
  delay(1000);
 }
 delay(4000);
 rtc.begin(DateTime(__DATE__, __TIME__));

 Serial.print("Initializing SD Card...");
 pinMode(10, OUTPUT);

 // see if the card is present and can be
initialized:
 if (!SD.begin(chipSelect)) {
  Serial.println("Card failed, or not present");
  // don't do anything more:
  return;
 }
 Serial.println("Card initialized.");
 File dataFile = SD.open("datalog.txt",
FILE_WRITE);
 if (dataFile) {
  dataFile.println(' ');
  dataFile.println('Datalogger Start');

dataFile.print('Tahun,Bulan,Hari,Jam,Menit,Deti
k,Data');
  dataFile.close();
 }
}

void loop()
{
 DateTime now = rtc.now();
 String dataString = "";

 int analogPin = 0; // membaca sinyal analog
pada port A0
 int sensor = analogRead(analogPin);
 dataString += String(sensor);

 File dataFile = SD.open("datalog.txt",
FILE_WRITE);
 if (dataFile) {
  dataFile.print(now.year(), DEC);
  dataFile.print(',');
  dataFile.print(now.month(), DEC);
  dataFile.print(',');
  dataFile.print(now.day(), DEC);
  dataFile.print(',');
  dataFile.print(now.hour(), DEC);
  dataFile.print(',');
  dataFile.print(now.minute(), DEC);
  dataFile.print(',');
  dataFile.print(now.second(), DEC);
  dataFile.print(',');
  dataFile.println(dataString); //menulis data
pada SDCard
  dataFile.close();
  Serial.print(now.minute(), DEC); //menulis
menit pada serial monitor
  Serial.print(' ');
  Serial.print(now.second(), DEC);
  Serial.println(dataString); //menulis data pada
serial monitor
 }
 else {
  Serial.println("error opening datalog.txt");
 }
 delay(5); // untuk mendapatkan tepat 20
data/detik
}
```

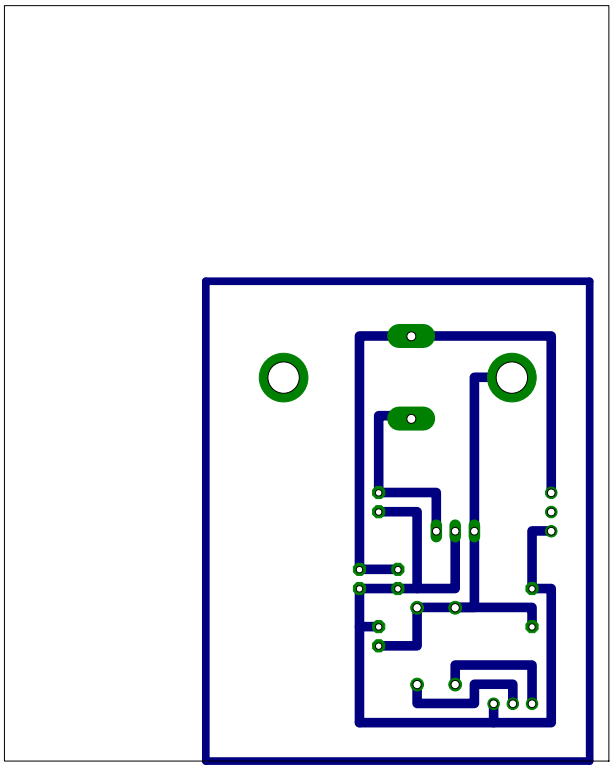

JP1
+12 V
JP2
Ground
JP3
-12 V
C3
0,1 uF
C8
0,1 uF
C5
1 uF
C7
1 uF
IC1
7812T
VI
VO
GND
IC2
7812T
C2
0,1 uF
C6
0,1 uF
C1
4700 uF
C4
4700 uF
D1
1N4004
D2
1N4004
D3
1N4004
D4
1N4004
TF1+15
TF1 CT
TF2+15
TF2 CT
JP5
JP6
JP8
JP9


7812T
IC2
TF2 CT
JP8
TF2-15
JP8
TF2+15
JP7
1N4004
D4
1N4004
D3
C4
4700 uF
C9
0,1 uF
C8
1 uF
C7
JP3
+12 V
Ground
JP2
JP1
1N4004
D1
1N4004
D2
7812T
IC1
TF1+15
JP4
TF1-15
JP5
TF1 CT
JP6
C1
4700 uF
C6
0,1 uF
C5
1 uF
C2
1 uF



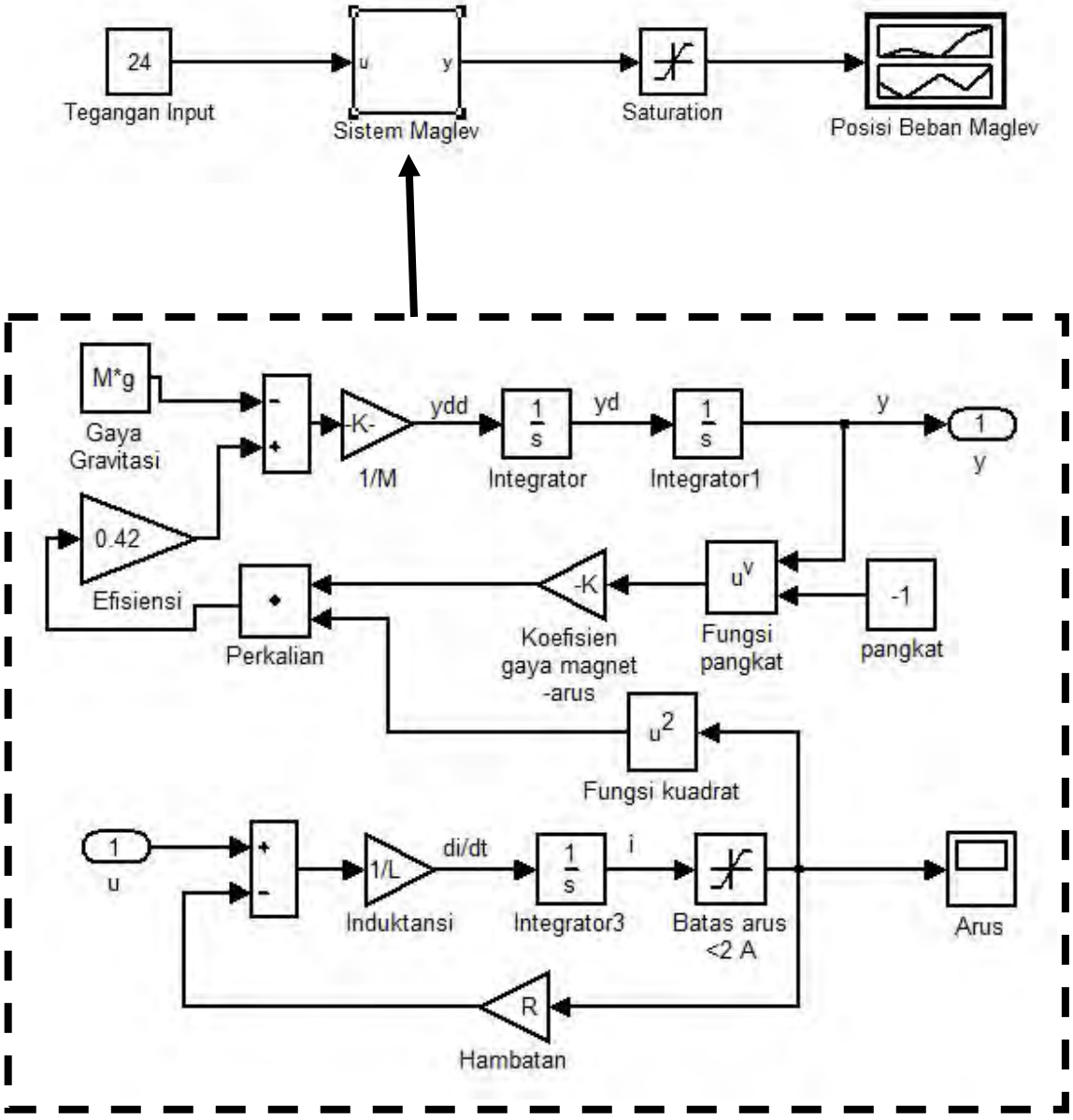

JP1
1
2
3
24v 5A
C5
100uF
C4
0,1 uF
C3
0,1 uF
Q1
2N3055
IC1
OUT
GND
IN
C2
0,1 uF
C1
4700uF
D1
1N4004
D2
1N4004
JP2
1
2
3
25v AC


2N3055
Q1
0.1 uF
C3
C5
C4
100uF
C2
0.1 uF
1N4004
D1
1N4004
D2
C1
4700uF
24v 5A
JP1
24v AC
JP2



LAMPIRAN 7

Blok diagram sistem *maglev*



BIODATA PENULIS

Penulis memiliki nama lengkap Muhammad Arifudin Lukmana lahir pada 20 Oktober 1988 di kota Semarang. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara dan berdomisili di Kabupaten Gresik. Penulis menempuh pendidikan formal di SDN Randuagung 3 Gresik, SMPN 1 Gresik, SMAN 1 Gresik dan melanjutkan kuliah di Institut Teknologi Sepuluh Nopember mengambil jurusan Teknik Mesin bidang studi Desain. Setelah lulus Sarjana pada tahun 2012, penulis melanjutkan ke jenjang Magister di Institut dan jurusan yang sama.

Penulis tertarik pada penelitian di bidang mekatronika, dinamika kendaraan, *computer aided design* dan *finite element method.* Penulis terlibat pada bidang-bidang penelitian di atas baik berupa diskusi perkuliahan maupun penelitian Institut. Apabila anda ingin berdiskusi, memberikan saran atau kritik mengenai tesis atau bidang penelitian di atas, anda dapat menghubungi penulis melalui *e-mail*.

e-mail: arifudin@me.its.ac.id atau arifudin17@yahoo.co.id