

SKRIPSI

**IMPLEMENTASI SISTEM KENDALI MOTOR DC PADA
PROTOTIPE KENDARAAN LISTRIK MODEL *GOKART***

Disusun dan diajukan oleh

**M. A. ASKAR ANNADWI
D041 18 1027**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**IMPLEMENTASI SISTEM KENDALI MOTOR DC PADA
PROTOTYPE KENDARAAN LISTRIK MODEL *GOKART***

Disusun dan diajukan oleh

**M. A. Askar Annadwi
D041181027**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada tanggal 26 Juli 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,

Prof. Dr.-Ing. Ir. Faizal Arya Samman, IPU., ACPE
NIP 197506052002121004

Ida Rachmaniar Sahali, ST., MT
NIP. 198206302012122001

Ketua Program Studi,



Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T., IPM
NIP. 196910261994122001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : M. A. Askar Annadwi

NIM : D041 18 1027

Program Studi : Teknik Elektro

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

IMPLEMENTASI SISTEM KENDALI MOTOR DC PADA PROTOTIPE KENDARAAN LISTRIK MODEL *GOKART*

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilalihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak mana pun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala risiko.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 23 Agustus 2023

Yang Menyatakan



M. A. Askar Annadwi

ABSTRAK

M. A. ASKAR ANNADWI. *Implementasi Sistem Kendali Motor DC pada Prototipe Kendaraan Listrik Model Gokart (dibimbing oleh Faizal Arya Samman dan Ida Sahali).*

Kendaraan listrik merupakan mode transportasi darat yang diharapkan menjadi kendaraan yang bebas dari emisi gas. Penelitian ini bertujuan merancang sebuah sistem kendali motor DC yang diimplementasi pada prototipe kendaraan listrik. Motor *driver* yang diintegrasikan dengan mikrokontroler (*microcontroller*) digunakan sebagai sistem kendali motor DC. Metode yang digunakan untuk mengatur kecepatan motor adalah metode PWM (*Pulse Width Modulation*) yang dirumuskan menjadi sebuah metode kontrol yang dapat mempertahankan tegangan keluaran terlepas dari penurunan tegangan dari baterai selama penggunaan. Sistem kendali motor DC telah dibuat dan diimplementasi pada prototipe kendaraan listrik. Sistem kendalian ini dilengkapi dengan sensor pengukur kecepatan, sensor pengukur arus, dan sensor tegangan yang mengukur tegangan baterai. Sistem telah diuji dan diperoleh *output* yang sesuai dengan *input* yang diberikan sebagaimana program yang telah dibuat dalam bahasa C. Eksperimen dilakukan dengan dua kondisi, yaitu kondisi tanpa beban dan kondisi berbeban. Pada kondisi tanpa beban, dilakukan uji maksimal 50% dari tegangan maksimal dan didapatkan arus kontinu sebesar 3,24A kecepatan sebesar 546,7 rpm di tegangan 18V. Pada pengujian dengan beban, daya rata-rata mencapai 587,19 W dengan arus 17,23A dan kecepatan kendaraan mencapai 150,56 RPM (8,51 km/jam) di tegangan 15V. Pengujian belum dilakukan untuk kondisi maksimal di tegangan 36V dan daya 1000W karena terbatasnya ruang uji dan alat ukur yang ada.

Kata Kunci—Kendaraan Listrik, Gokart, metode PWM, Motor DC, Arduino, Sistem Kendali

ABSTRACT

M. A. ASKAR ANNADWI. *Implementation of a DC Motor Control System in a Gokart Model Electric Vehicle Prototype* (Supervised by Faizal Arya Samman dan Ida Sahali).

Electric vehicles are a mode of land transportation that is expected to be vehicles that are free of gas emissions. This study aims to design a DC motor control system that is implemented in an electric vehicle prototype. The motor driver integrated with the microcontroller is used as a DC motor control system. The method used to regulate the motor speed is the PWM (Pulse Width Modulation) method which is formulated to be a control method that can maintain the output voltage regardless of the voltage drop from the battery during use. A DC motor control system has been created and implemented in an electric vehicle prototype. This control system is equipped with a speed-measuring sensor, a current-measuring sensor, and a voltage sensor that measures the battery voltage. The system has been tested and obtained output that corresponds to the input given as a program that has been made in C language. Experiments were carried out with two conditions, namely no-load conditions and loaded conditions. In no-load conditions, a maximum test of 50% of the maximum voltage was carried out and a continuous current of 3.24A was obtained, a speed of 546.7 rpm, at a voltage of 18V. In testing with a load, the average power reaches 587.19 W with a current of 17.23A and the vehicle speed reaches 150.56 RPM (8.51 km/hour) at 15V voltage. Tests have not been carried out for maximum conditions at a voltage of 36V and a power of 1000W due to the limited test space and measuring instruments available.

Keywords—Electric Vehicle, Gokart, PWM Method, DC Motor, Arduino, control system

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT.....	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	vii
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR LAMPIRAN.....	x
KATA PENGANTAR.....	xi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Manfaat Penelitian.....	2
1.5 Batasan Masalah.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Motor <i>Direct Current</i> (DC).....	4
2.1.1 Konstruksi Motor DC.....	4
2.1.2 Prinsip Kerja Motor DC.....	5
2.1.3 Torka.....	6
2.1.4 Aksi Generator pada Motor.....	6
2.1.5 Motor DC Magnet Permanen.....	7
2.1.6 Diagram Ekuivalen dari Motor DC Magnet Permanen.....	8
2.2 Arduino Nano.....	9
2.3 Sensor Hall.....	10
2.4 Sensor Arus ACS712.....	11
2.5 Sensor Tegangan.....	11
2.6 Pedal Gas Elektrik.....	12
2.7 <i>H-Bridge Converter</i>	12
2.8 PWM (<i>Pulse Widht Modulation</i>).....	14
2.9 Kecepatan Linier dan Kecepatan Rotasi.....	16

BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	18
3.1 Rancangan Penelitian.....	18
3.1.1 Perancangan Perangkat Keras.....	18
3.1.2 Perancangan Perangkat Lunak.....	22
3.1.3 Metode Kontrol <i>Output</i>	23
3.1.4 Pengukuran Kecepatan Kendaraan.....	25
3.2 Waktu dan Lokasi Penelitian.....	25
3.3 Alat dan Bahan.....	25
3.4 Jenis Pengambilan Data.....	27
3.5 Variasi Pengujian.....	27
3.6 Prosedur Pengujian.....	27
3.6.1 Pengujian tanpa beban.....	27
3.6.2 Pengujian dengan beban.....	28
3.7 Tahapan Penelitian.....	28
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	31
4.1 Pengujian Tanpa Beban.....	32
4.2 Pengujian dengan beban.....	36
4.2.1 Uji Simpangan.....	38
4.3 Metode Kontrol <i>Output</i>	39
BAB V PENUTUP.....	42
5.1 Kesimpulan.....	42
5.2 Saran.....	43
DAFTAR PUSTAKA.....	45
LAMPIRAN.....	47

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Dasar mesin DC	4
Gambar 2. Konduktor yang dialiri arus dalam sebuah medan magnet	5
Gambar 3. Motor DC magnet permanen.....	7
Gambar 4. Hubungan antara kecepatan rotasi motor dan tegangan <i>armature</i>	8
Gambar 5. Hubungan antara torka motor dan arus <i>armature</i>	9
Gambar 6. Arduino nano.....	10
Gambar 7. Pinout arduino nano	10
Gambar 8. Modul sensor hall.....	11
Gambar 9. Sensor arus ACS712.....	11
Gambar 10. Sensor tegangan.....	12
Gambar 11. Pedal gas elektrik	12
Gambar 12. Standar rangkaian <i>H-Bridge</i> untuk kontrol motor DC.....	13
Gambar 13. Mengaktifkan saklar secara selektif untuk mengendalikan arah motor	14
Gambar 14. Ilustrasi gelombang PWM.....	15
Gambar 15. Ilustrasi <i>duty cycle</i> di level persentase berbeda.....	15
Gambar 16. Blok diagram perangkat keras sistem.....	18
Gambar 17. Ilustrasi hubungan blok diagram	19
Gambar 18. (a) Rangkaian regulator tegangan LM317 (b) Rangkaian regulator tegangan 7805	20
Gambar 19. Model <i>driver</i> motor <i>H-Bridge</i>	21
Gambar 20. Blok diagram rangkaian <i>driver</i> motor.....	21
Gambar 22. Diagram alir tahapan penelitian	30
Gambar 23. Prototipe kendaraan listrik	31
Gambar 24. Sensor hall dan magnet	32
Gambar 25. Mikrokontroler dan motor <i>driver</i> (ECU)	32
Gambar 26. (a) Perbandingan pengukuran kecepatan menggunakan sensor hall dan takometer pada pengujian tanpa beban dengan uji <i>direct supply</i> . (b) Hubungan tegangan dan kecepatan pada pengujian tanpa beban: <i>direct supply</i> dan kontroler.	33
Gambar 27. (a) Hubungan tegangan dan arus pada pengujian tanpa beban: <i>direct supply</i> dan kontroler. (b) Hubungan tegangan dan daya pada pengujian tanpa beban: <i>direct supply</i> dan kontroler.....	35
Gambar 28. Tegangan dan arus terukur pada <i>output</i> motor <i>driver</i> pada pengujian tanpa beban di tegangan 18V.	36

Gambar 29. Hubungan tegangan, kecepatan, arus, dan daya pada pengujian dengan beban.....	37
Gambar 30. Pengujian dengan beban dalam domain waktu	38
Gambar 31. Data uji simpangan kendaraan	39
Gambar 32. Perbandingan <i>output</i> tegangan dengan dan tanpa metode kontrol di tegangan 9V dan 36V.....	40
Gambar 33. Pengambilan data pada uji dengan beban	41

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Spesifikasi motor DC MY1020.....	19
Tabel 2. Alat dan bahan dalam penelitian.....	26

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Tampak depan prototipe kendaraan listrik	47
Lampiran 2. Perangkat I/O dan baterai	48
Lampiran 3 Gambar (<i>Setup</i>) pengambilan data	49
Lampiran 4 Layout desain PCB dan 3D	53
Lampiran 5 Skematik desain PCB	54
Lampiran 6 Program arduino	55
Lampiran 7 Tabel data penelitian.....	60

KATA PENGANTAR

Puji syukur Penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya kepada Penulis sehingga dapat menyelesaikan penelitian dan skripsi ini yang berjudul “IMPLEMENTASI SISTEM KENDALI MOTOR DC PADA PROTOTYPE KENDARAAN LISTRIK MODEL *GOKART*”. Serta selawat dan salam penulis sampaikan kepada junjungan Nabi Muhammad SAW yang telah membawa kita dari alam jahiliah menuju alam kemajuan seperti sekarang ini. Penyelesaian skripsi ini merupakan salah satu upaya Penulis untuk memenuhi syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik di Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari bahwa untuk menyelesaikan skripsi serta penelitian ini tidaklah mudah, banyak hambatan dan masalah yang penulis hadapi hingga sampai ke penyelesaian skripsi dan penelitian ini. Namun berkat doa dan dukungan dari berbagai pihak akhirnya skripsi dan penelitian ini Alhamdulillah Penulis telah berhasil menyelesaikannya. Oleh sebab itu pada kesempatan kali ini perkenankan Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada :

- 1) Bapak Prof. Dr.-Ing. Ir. Faizal Arya Samman, ST, MT, IPU, AseanEng, ACPE. Selaku Dosen Pembimbing I dan Ibu Ida Rachmaniar Sahali, ST., MT. selaku Dosen Pembimbing II yang telah meluangkan waktu dan memberikan bimbingan dalam pengerjaan skripsi ini.
- 2) Bapak Muh Anshar, ST. M.Sc(Research), Ph. D. dan Ibu Dr. A. Ejah Umraeni Salam, S.T, M.T. selaku dosen penguji.
- 3) Seluruh dosen dan staf pegawai Departemen Teknik Elektro yang telah banyak membantu dan memberi kemudahan selama menempuh proses perkuliahan.
- 4) Ibu Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T., IPM. selaku Kepala Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
- 5) Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T. Selaku dekan Fakultas Teknik dan Bapak Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc. selaku Rektor Universitas Hasanuddin.

- 6) Orang tua yang sangat Penulis cintai Bapak (Alm.) Sri Darmawangsa dan Ibu Juharni serta keluarga yang telah memberikan doa dan dukungan baik dari segi moril dan materi.
- 7) Semua teman-teman seperjuangan CAL18RATOR yang turut memberi dukungan terhadap penyelesaian skripsi ini.
- 8) Teman-teman Lab Research Group Elektronika dan Divais yang selalu menemani di laboratorium saat proses penyusunan tugas akhir ini. Secara Khusus Kanda Nurul Hidayat, ST. yang banyak memberikan saran dan arahan kepada penulis.
- 9) Teman – teman perkumpulan Baji Pamai yang selalu memberikan motivasi dan dukungan kepada Penulis. Amirul Mu'minin Parenrengi, S.T., Vigo Aswari, S.T., Ihsan A Mansur, Iqbal Fajri, dan Brama Putra Kumbara.
- 10) Teman-teman dan dinda PROCEZ20R terkhusus dinda Jasmarani yang turut membantu dalam penyelesaian tugas akhir penulis.
- 11) Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu demi satu yang telah membantu dan mendukung dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

Semoga Allah SWT membalas kebaikan semua pihak yang telah membantu Penulis menyelesaikan skripsi ini. Penulis menyadari skripsi ini masih jauh dari kata sempurna, sehingga penulis dengan sangat terbuka menerima kritikan dan saran yang membangun untuk memperbaiki skripsi dan penelitian ini ke depannya.

Gowa, 23 Agustus 2023

Penulis

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kendaraan listrik merupakan mode transportasi darat yang diharapkan menjadi kendaraan yang bebas dari emisi gas. Kendaraan listrik terus diteliti dan dikembangkan dalam 2-3 dekade terakhir (EVBox, 2021), dan dalam beberapa tahun terakhir ini mengalami perkembangan dan kemajuan yang signifikan disisi teknologi dan infrastrukturnya sehingga dikenal merek kendaraan listrik seperti Tesla, dan Wuling. Komponen utama dalam kendaraan listrik yaitu: motor listrik sebagai penggerak utama, baterai sebagai suplai daya dalam sistem, dan modul pengontrol motor.

Motor DC (*Direct Current*) adalah salah satu jenis motor listrik yang banyak diaplikasikan di industri juga dalam kehidupan sehari-hari, termasuk juga diaplikasikan dalam kendaraan listrik (Agung et al, 2014). Keuntungan motor DC adalah penyesuaian kendali kecepatan yang lebar, memiliki torsi awal yang besar, dan sistem kontrolnya relatif lebih sederhana. Namun motor DC lebih cocok untuk pengaplikasian kecepatan rendah hingga sedang.

Penggunaan mikrokontroler (*microcontroller*) telah banyak dilakukan dalam aplikasi kendali motor, seperti dalam Agung et al (2014) dan Koca et al (2014). Mikrokontroler berperan untuk mengatur *output* (keluaran) sesuai dengan *input* (masukan) yang diberikan. Arduino menjadi salah satu mikrokontroler yang banyak digunakan, selain itu arduino juga relatif murah dan mudah dioperasikan.

Fokus utama kendaraan listrik adalah pengaturan kecepatan kendaraan, oleh karena itu perlu didesain sebuah sistem kendali motor pada prototipe kendaraan listrik sehingga kendaraan dapat berjalan dengan baik. Dapat mengatur kecepatan motor dan menjamin kendaraan berjalan dengan baik adalah hal yang utama dalam membuat prototipe kendaraan listrik.

Dalam penelitian ini, motor *driver* yang diintegrasikan dengan mikrokontroler akan diimplementasi sebagai sistem kendali motor DC pada prototipe kendaraan listrik yang dibuat. Selain itu, metode kontrol yang dibuat dalam program bahasa C diimplementasi dalam sistem. Pada penelitian ini juga, sebuah metode kontrol

digunakan untuk memastikan besar tegangan yang diterapkan pada motor akan tetap sama sesuai *input* yang diberikan terlepas dari perubahan nilai tegangan dari baterai selama penggunaan. Untuk memastikan implementasi sistem kendali motor DC pada prototipe kendaraan listrik bekerja dengan baik, variabel *input* dan *output* dianalisis. Tegangan, arus, dan kecepatan kendaraan menjadi variabel utama dalam penelitian ini yang berjudul “IMPLEMENTASI SISTEM KENDALI MOTOR DC PADA PROTORIBE KENDARAAN LISTRIK MODEL GOKART”.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana mengimplementasi sistem kendali motor DC pada prototipe kendaraan listrik ?
2. Bagaimana karakteristik instrumen pengukuran yang diimplementasi dalam prototipe kendaraan listrik ?
3. Bagaimana respons metode kontrol yang digunakan pada sistem kendali motor DC yang diimplementasi dalam prototipe kendaraan listrik ?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Merancang sistem kendali motor DC yang akan diimplementasi pada prototipe kendaraan listrik.
2. Menggambarkan karakteristik instrumen pengukuran yang diimplementasi dalam prototipe kendaraan listrik.
3. Menganalisa respons metode kontrol yang digunakan pada sistem kendali motor DC yang diimplementasi dalam prototipe kendaraan listrik.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah memberikan hasil terkait rancangan sistem kendali motor DC sehingga diketahui karakteristik dari sistem yang diimplementasi pada prototipe kendaraan listrik. Diharapkan dari penelitian ini dapat memberikan kontribusi terhadap kekayaan ilmu pengetahuan dibidang prototipe kendaraan listrik.

1.5 Batasan Masalah

1. Baterai yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis baterai asam timbal (*lead-acid battery*) 12V/7,2Ah.
2. Pengujian sistem dilakukan dengan batas arus maksimal 20A.
3. Implementasi dilakukan dengan mekanis dari prototipe kendaraan listrik dianggap ideal.
4. Pengambilan data dilakukan pada kondisi tunak.
5. Kecepatan yang diamati dibatasi pada kecepatan ban kendaraan (yang seporos dengan *gear* kendaraan, setelah hubungan *gear* motor dan *gear* kendaraan), dan tidak diamati kecepatan motor DC secara langsung.

1.6 Sistematika Penulisan

Untuk memudahkan pemahaman terhadap tugas akhir ini, maka penulis menyusun sistematika penulisan sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi studi pustaka yang menunjang dalam penelitian. Di antara studi pustaka yang digunakan yaitu berkaitan dengan motor DC dan komponennya serta metode PWM yang digunakan untuk pengaturan kecepatan motor.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini Menguraikan rancangan penelitian, lokasi dan waktu penelitian, alat dan bahan yang digunakan, serta alur penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menguraikan hasil pengujian alat dan analisisnya serta memberikan jawaban dari tujuan penelitian.

BAB V PENUTUP

Bab ini merupakan penutup berupa kesimpulan dan saran.

DAFTAR PUSTAKA.

Pada bagian ini berisi sumber atau rujukan dari pengerjaan tugas akhir.

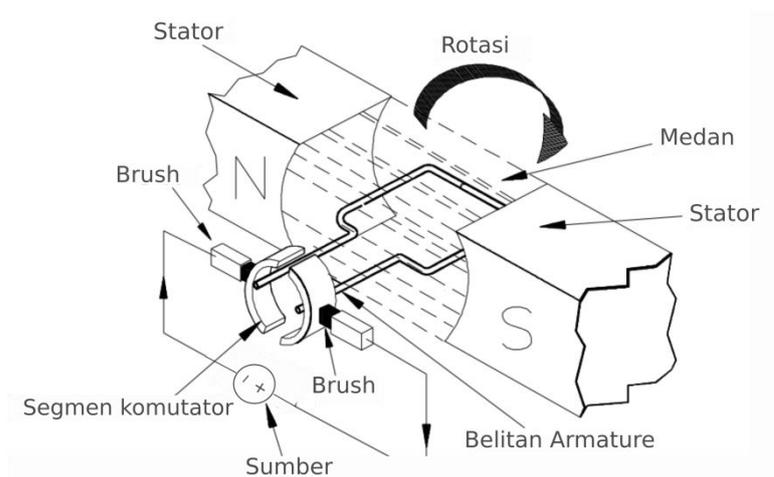
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Motor *Direct Current* (DC)

Motor listrik adalah mesin yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik.

2.1.1 Konstruksi Motor DC

Struktur dasar dari motor DC terdiri dari 2 bagian, yaitu stator dan rotor. Stator adalah bagian dari motor DC yang tidak bergerak, sedangkan rotor adalah bagian dari motor DC yang bergerak. Gambar 1. Menampilkan ilustrasi dasar dari motor DC.



Gambar 1. Dasar mesin DC
sumber: U.S.DOE (1992)

A) *Armature* / Rotor

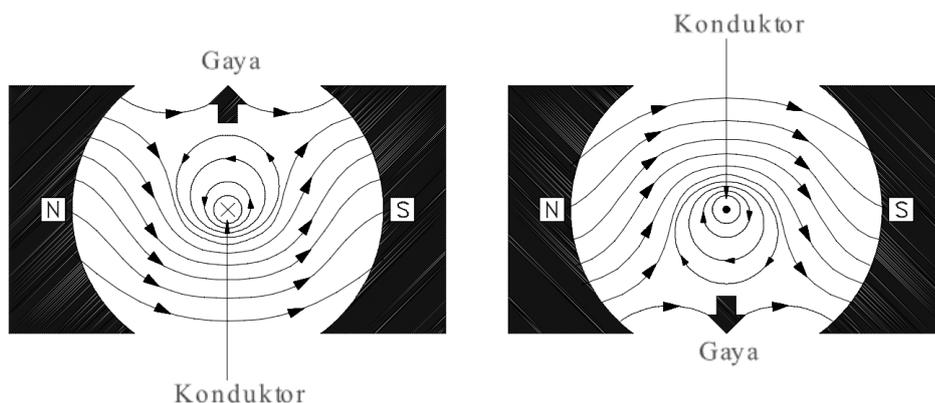
Fungsi (Belitan) *armature* adalah tempat terjadinya konversi energi dalam motor DC. *Armature* menerima energi listrik (berupa tegangan dan arus) dan mengubahnya menjadi energi mekanik dalam bentuk torsi (U.S. Department of Energy, 1992). Dari penjelasan sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa *armature* adalah elemen atau bagian yang berputar dari mesin DC atau disebut **Rotor**. *Armature* ini berupa konduktor dan membentuk rangkaian tertutup (*loop* tertutup) dengan bantuan *brush* (sikat) dan komutator. *Brush* dan komutator berfungsi sebagai konversi secara mekanik dari DC ke AC dalam motor DC.

B) Stator

Stator adalah bagian yang diam dari motor DC. Fungsi stator adalah menyediakan medan magnet. Dalam gambar 1, dapat dilihat bahwa stator berupa magnet permanen.

2.1.2 Prinsip Kerja Motor DC

Prinsip kerja motor DC didasarkan pada hukum Faraday, di mana konduktor yang dialiri arus ditempatkan dalam medan magnet, akan menimbulkan gaya mekanik yang arahnya ditentukan dengan aturan tangan kiri Fleming, dan besarnya gaya sesuai dengan persamaan $F = BIl$ (Theraja dan Theraja, 2005). Sebagaimana dijelaskan di atas, ada dua kondisi yang diperlukan untuk menghasilkan gaya pada konduktor, 1) konduktor harus dialiri arus, 2) konduktor harus berada dalam medan magnet. Ketika dua kondisi tersebut terpenuhi, gaya akan dihasilkan pada konduktor yang akan menggerakkan konduktor dalam arah yang tegak lurus dengan arah medan magnet. Berdasarkan hukum oersted, konduktor yang dialiri arus akan menimbulkan medan magnet di sekitar konduktor tersebut, di mana arah arus dan arah medan magnet ditentukan dengan aturan tangan kanan. Medan magnet yang dihasilkan pada konduktor yang dialiri arus akan berinteraksi dengan medan magnet dari magnet permanen (U.S. Department of Energy, 1992). Seperti ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2. Konduktor yang dialiri arus dalam sebuah medan magnet
sumber: U.S.DOE (1992)

2.1.3 Torka

Torka adalah gaya dalam gerak rotasi (gerak melingkar). Torka merupakan gaya yang cenderung mempertahankan rotasi. Dalam motor DC, gaya yang terbentuk pada *armature* adalah karena aksi-reaksi dari medan magnet (medan magnet dari konduktor dialiri arus dan medan magnet dari magnet permanen). Kekuatan medan magnet pada konduktor *armature* bergantung pada besar arus yang mengalir pada konduktor tersebut (U.S. Department of Energy, 1992).

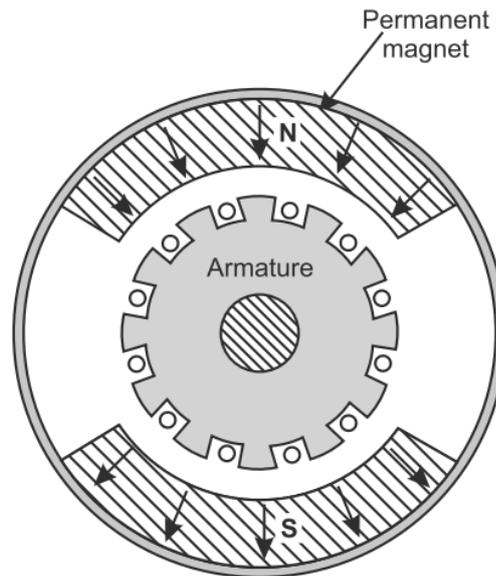
2.1.4 Aksi Generator pada Motor

Aksi generator terbentuk pada setiap motor. Generator adalah mesin listrik yang berkebalikan dengan motor. Generator adalah mesin yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Ketika konduktor (yang bergerak) memotong garis gaya (medan magnet), EMF (*electromotive force*) terinduksi pada konduktor tersebut. EMF yang terinduksi pada *armature* menghasilkan arus yang berlawanan arah dengan arus dari sumber daya (U.S. Department of Energy, 1992). EMF yang terinduksi disebut dengan CEMF (*counterelectromotive force*).

Karena CEMF dihasilkan dari aksi konduktor memotong garis gaya, besar nilai CEMF bergantung pada kekuatan medan dan kecepatan *armature*. CEMF berlawanan dengan tegangan yang diterapkan sehingga menyebabkan arus *armature* berkurang.

Peningkatan arus *armature* akan menghasilkan torsi yang lebih besar, torsi yang lebih besar mengakibatkan peningkatan kecepatan motor. Namun di waktu yang bersamaan, peningkatan kecepatan akan proporsional dengan peningkatan CEMF. Kecepatan dan CEMF akan terus meningkat sampai pada titik arus *armature* dan torsi berada pada nilai yang cukup besar untuk menyuplai beban di kecepatan yang konstan.

2.1.5 Motor DC Magnet Permanen



Gambar 3. Motor DC magnet permanen
sumber: Sahdev (2018)

Motor DC magnet permanen (PM) menggunakan medan magnet yang dihasilkan oleh magnet permanen untuk beroperasi. Motor jenis ini mirip dengan motor DC *shunt* biasa, kecuali kutubnya terbuat dari magnet permanen dan tidak diperlukan eksitasi untuk kutub.

Motor DC magnet permanen banyak ditemukan di pasaran dengan rentang daya beberapa watt (W) sampai puluhan kilowatt (kW). Motor dengan magnet permanen yang kecil memiliki rentang tegangan *input* 5V – 48V, untuk motor skala industri berada pada rentang 90V sampai 180V, dan untuk aplikasi yang lebih besar, di tegangan 250V bahkan lebih tinggi (Lab-Volt, 2014).

Motor DC dioperasikan dengan suplai DC yang dapat diperoleh dari baterai atau penyearah. Ketika suplai diberikan ke *armature*, torsi dan kecepatan motor meningkat seperti pada motor biasa. Motor DC umumnya dijalankan tanpa *starter* karena torsi pengeremannya sangat tinggi (5 hingga 6 kali torsi beban penuh) (Sahdev, 2018).

Motor DC magnet permanen digunakan pada banyak aplikasi, termasuk kendaraan listrik kecil, teknologi kincir angin, skuter, mobil golf, peralatan dapur,

robot, pompa air, *vacuum cleaner*, kipas angin, mainan dan lainnya (Lab-Volt, 2014).

2.1.6 Diagram Ekuivalen dari Motor DC Magnet Permanen

Kecepatan pada motor DC magnet permanen dapat dirumuskan sebagai berikut:

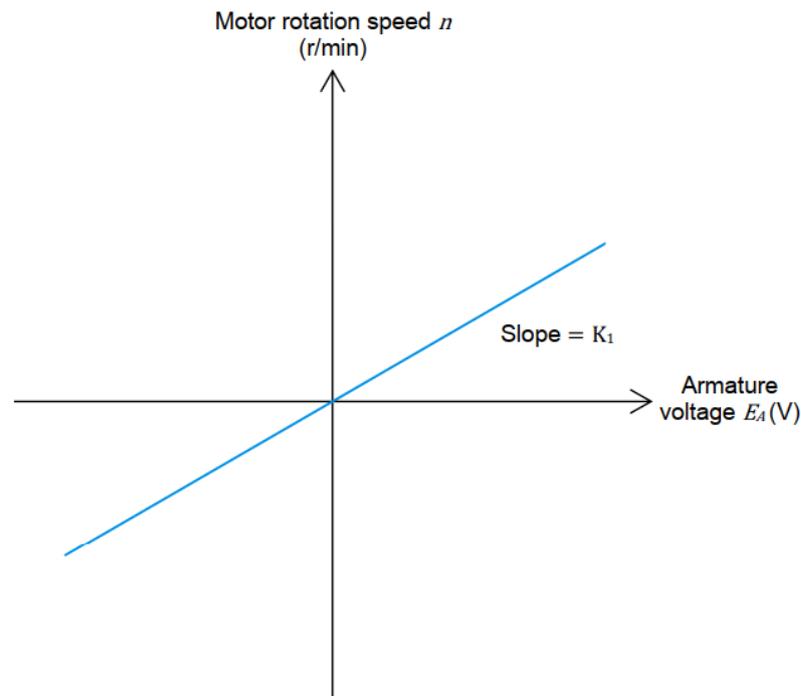
$$E_b = V - I_a R_a$$

kecepatan, $N \propto \frac{E_b}{\phi}$ or $N \propto \frac{V - I_a R_a}{\phi}$ (1)

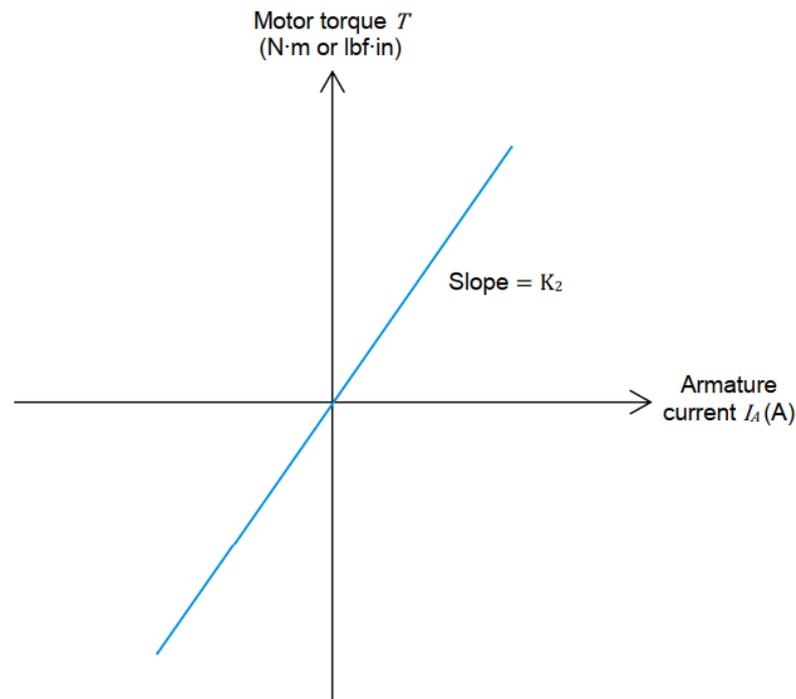
$$N \propto V - I_a R_a \quad (\phi \text{ konstan})$$

$$T \propto I_a$$

Hubungan antara kecepatan rotasi motor dan tegangan *armature* adalah berbanding lurus, ditunjukkan pada gambar 4. Hubungan yang serupa juga pada torka dan arus *armature*, memiliki hubungan yang linier, ditunjukkan pada gambar 5 (Lab-Volt, 2014).



Gambar 4. Hubungan antara kecepatan rotasi motor dan tegangan *armature*
sumber: Lab-Volt (2014)

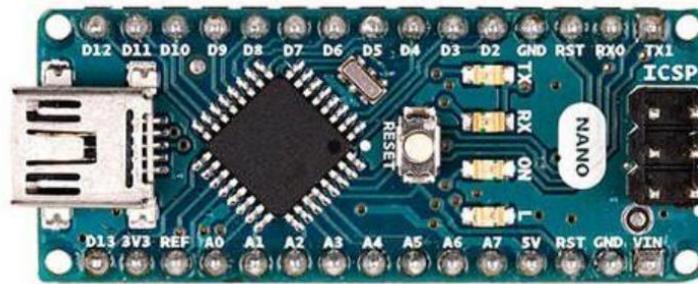


Gambar 5. Hubungan antara torka motor dan arus *armature*
sumber: Lab-Volt (2014)

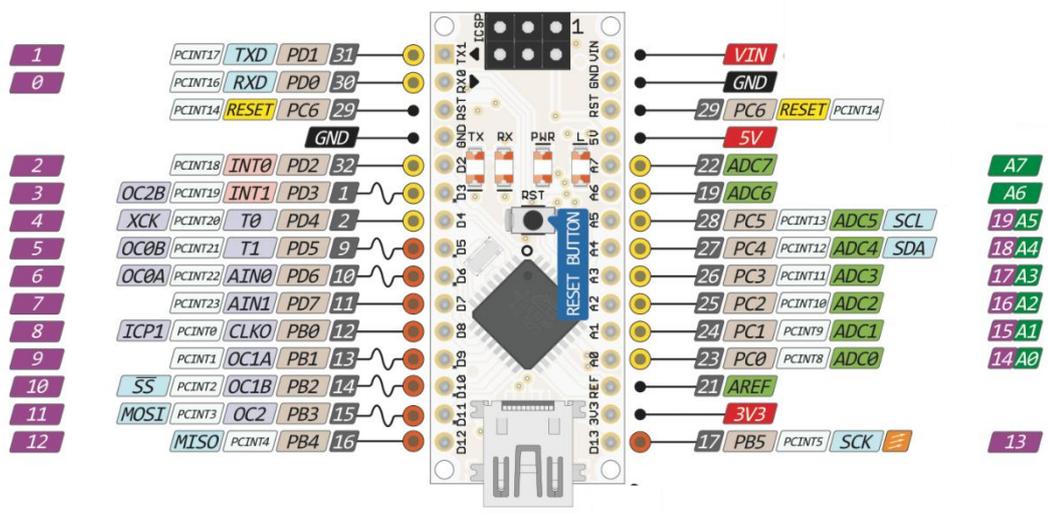
2.2 Arduino Nano

Dalam berbagai aplikasi, arduino digunakan untuk mendeteksi lingkungan dengan menerima *input* dari berbagai sensor (sensor suhu, cahaya, inframerah, tekanan, kelembaban, ultrasonik, jarak) dan digunakan untuk mengontrol perangkat lainnya seperti menyalakan LED, mengontrol kecepatan dan arah putar motor (Junaidi dan Prabowo, 2018).

Arduino nano memiliki ukuran yang relatif kecil (lebih kecil dari arduino UNO). Sama dengan tipe arduino UNO, arduino nano dibekali dengan prosesor ATmega328P dalam bentuk SMD dan memiliki 14 Pin Digital I/O (6 pin PWM), 8 Pin Analog *Input* (lebih banyak dari Uno), dan menggunakan FTDI untuk pemrograman dengan port mikro USB.



Gambar 6. Arduino nano
sumber: Arduino.cc

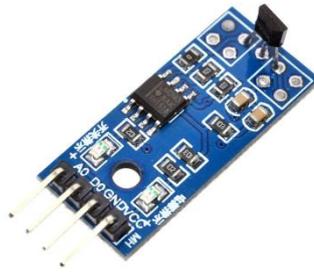


Gambar 7. Pinout arduino nano
sumber: Arduino.cc

2.3 Sensor Hall

Efek hall ditemukan oleh Edwin Hall pada tahun 1879. Efek hall merupakan suatu gejala di mana pada kedua sisi pelat logam tipis yang ditempatkan dalam medan magnet, menimbulkan beda potensial yang dinamakan dengan tegangan hall. Tegangan ini sebanding dengan arus yang mengalir melalui konduktor, dan kerapatan fluks atau induksi magnetik tegak lurus terhadap konduktor. Ketika konduktor pembawa arus ditempatkan di medan magnet, tegangan akan dihasilkan, tegak lurus terhadap arus dan medan.

Sensor hall memiliki volume yang kompak, memiliki presisi yang tinggi, dan bekerja pada kecepatan 0~100kHz (Chen et al, 2009).



Gambar 8. Modul sensor hall

2.4 Sensor Arus ACS712

Sensor arus ACS712 adalah sensor arus yang memiliki pembacaan hingga 20A. Sensor ini memiliki sensitivitas 100mV/A. Sensor ini bekerja dengan basis efek hall. Cara kerja sensor ini adalah arus yang dibaca mengalir melalui kabel tembaga yang terdapat di dalamnya yang menghasilkan medan magnet yang di tangkap oleh *integrated Hall IC* dan diubah menjadi tegangan proporsional. Pada umumnya aplikasi sensor ini biasanya digunakan untuk mengontrol motor, deteksi beban listrik, dan proteksi beban berlebih.

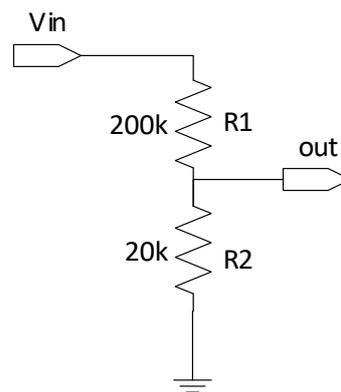


Gambar 9. Sensor arus ACS712

2.5 Sensor Tegangan

Sensor tegangan bekerja menggunakan prinsip pembagi tegangan resistor. Perhitungan *output* sensor tegangan dirumuskan sebagai berikut:

$$V_{out} = V_{in} \times \frac{R_2}{R_2 + R_1} \quad (2)$$



Gambar 10. Sensor tegangan

2.6 Pedal Gas Elektrik

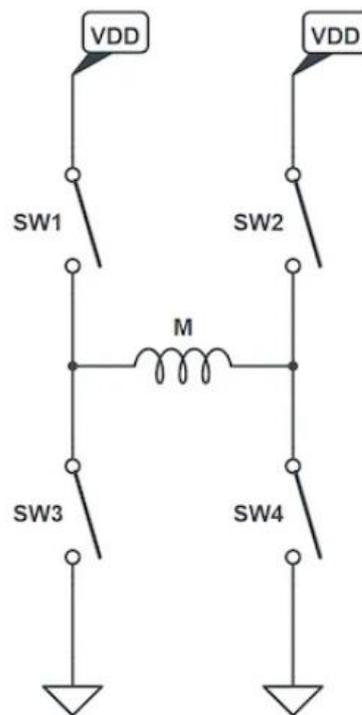
Pedal gas elektrik termasuk jenis resistor variabel. Resistor variabel adalah resistor yang nilai hambatannya listriknya dapat diatur. Resistor variabel pada dasarnya adalah transduser elektro-mekanis dan biasanya bekerja dengan menggeser kontak (*wiper*) di atas elemen resistif.



Gambar 11. Pedal gas elektrik

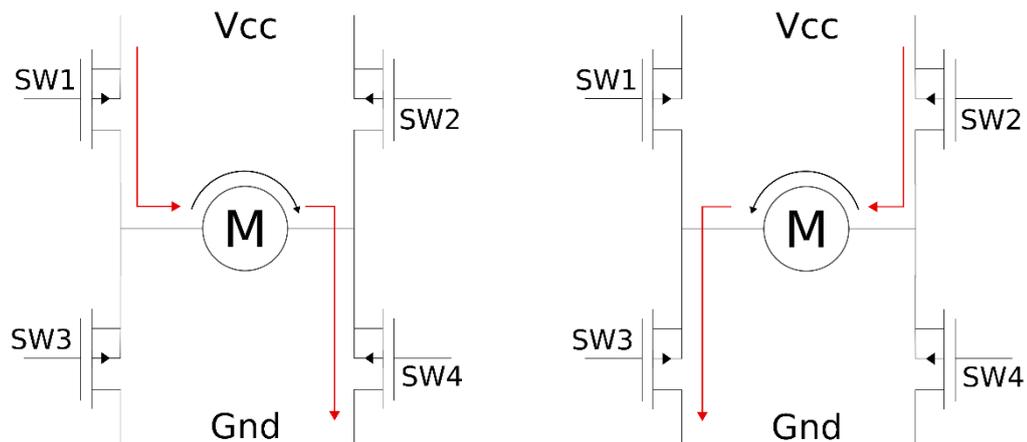
2.7 H-Bridge Converter

Dalam hal mengendalikan motor DC, rangkaian yang paling dasar dan banyak digunakan adalah rangkaian *H-Bridge* (Hertz, 2022). Rangkaian *H-Bridge* diilustrasikan pada gambar 12, terdiri dari empat saklar, yang biasanya menggunakan mosfet dalam bentuk topologi “H”.



Gambar 12. Standar rangkaian *H-Bridge* untuk kontrol motor DC
sumber: Hertz (2022)

Rangkaian *H-Bridge* berguna untuk kendali motor, karena dapat mengontrol arah dan kecepatan motor DC dengan mengaktifkan dan menonaktifkan serangkaian saklar secara selektif. Secara praktik, adalah standar untuk men-*drive gate* mosfet menggunakan PWM. Dengan PWM kita dapat mengontrol kecepatan motor dengan mengontrol *duty cycle* (persentase waktu aktif) (Vivekanand, 2019). Dengan cara tersebut kita dapat menyuplai motor dengan daya sebanyak atau sesedikit yang diinginkan. Dengan *duty cycle* 0%, motor mati (tidak ada arus yang mengalir), dengan *duty cycle* 50% motor berjalan dengan setengah daya dari sumber, dan 100% mewakili daya penuh pada arus maksimum yang mengalir.

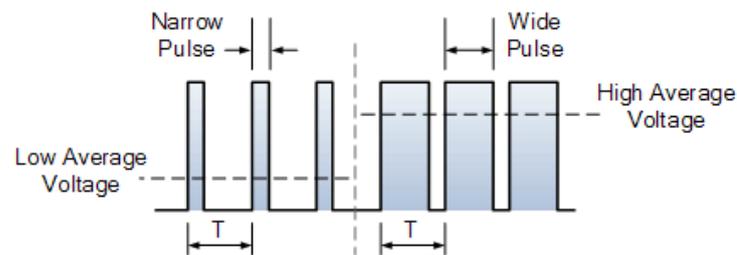


Gambar 13. Mengaktifkan saklar secara selektif untuk mengendalikan arah motor

Dengan mengaktifkan SW1 dan SW4 sedangkan SW2 dan SW3 dinonaktifkan, kita dapat mengontrol arah arus dalam arah tertentu ke motor yang menyebabkan berputar pada satu arah. Untuk memutar motor dalam arah sebaliknya, kita menonaktifkan SW1 dan SW4 sedangkan SW2 dan SW3 diaktifkan.

2.8 PWM (*Pulse Width Modulation*)

Ada banyak cara berbeda untuk mengontrol kecepatan motor DC, tetapi salah satu cara yang sangat sederhana dan mudah adalah dengan menggunakan PWM. PWM dapat mengontrol kecepatan motor DC dengan mengatur besar tegangan yang diterapkan pada motor. kontrol kecepatan dengan PWM bekerja dengan menggerakkan motor dengan serangkaian pulsa "ON-OFF" dan memvariasikan *duty cycle*, *duty cycle* adalah perbandingan waktu tegangan *on* (kondisi *HIGH*) dengan saat tegangan *off* (kondisi *LOW*), dari pulsa dengan menjaga frekuensi konstan (Electronics Tutorial, n.d.).



Gambar 14. Ilustrasi gelombang PWM
sumber: electronic tutorials (n.d.)

PWM diformulasikan sebagai berikut:

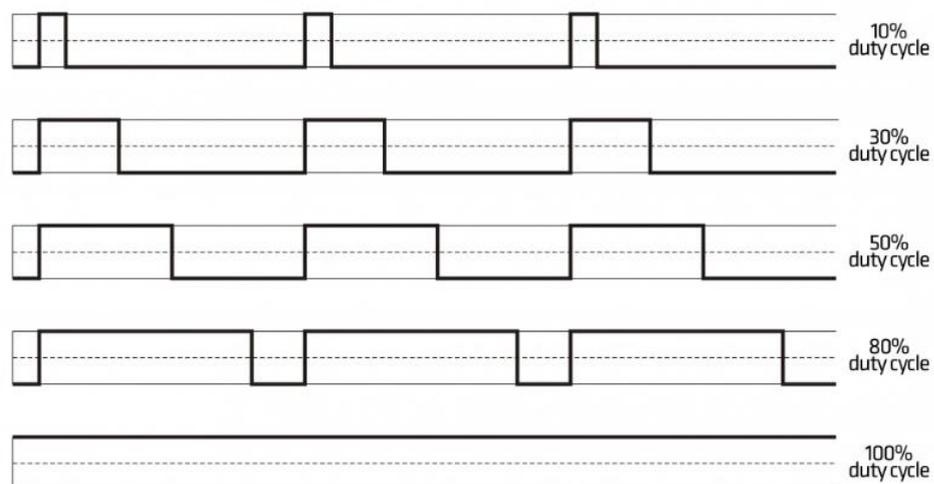
$$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \times 100\% \quad (3)$$

dimana

D = *duty cycle*

T_{on} = Waktu on (kondisi *high*)

T_{off} = waktu off (kondisi *low*)



Gambar 15. Ilustrasi *duty cycle* di level persentase berbeda
Sumber: Gobor (2019)

Untuk menentukan besar rata-rata tegangan keluaran dengan PWM diformulasikan sebagai berikut:

$$V_{out} = D \times V_{in} \quad (4)$$

dimana

V_{out} = tegangan keluaran (V)

D = *duty cycle*

V_{in} = tegangan masukan (V)

Dari persamaan di atas dapat disimpulkan semakin besar *duty cycle* maka semakin besar pula tegangan keluaran. *Duty cycle* 10% hanya memberikan sedikit impuls daya selama periode waktu tertentu, artinya motor akan berputar perlahan, dan *duty cycle* 100% berarti motor akan bekerja dengan kecepatan penuh, terus-menerus dinyalakan (Gobor, 2019). Pada arduino nano, *duty cycle* diskalakan dari 0-255, 0 merepresentasikan *duty cycle* 0% dan 255 merepresentasikan *duty cycle* 100% (Hirzel, 2023).

2.9 Kecepatan Linier dan Kecepatan Rotasi

Kecepatan linier dapat didefinisikan sebagai kecepatan suatu partikel yang bergerak dalam garis lurus. Kecepatan linier suatu partikel yang bergerak pada lintasannya adalah perubahan posisi dibagi perubahan waktu yang secara matematis dinyatakan sebagai berikut (Nugraha dan Isworo, 2018) :

$$V = \frac{ds}{dt} \quad (5)$$

dimana

V = kecepatan linier (m/s)

ds = perubahan posisi (jarak) (m)

dt = perubahan waktu (s)

Kecepatan rotasi dapat didefinisikan sebagai kecepatan suatu partikel yang bergerak dalam gerak melingkar. Kecepatan linier pada gerak melingkar, dihitung sebagai kecepatan benda dalam arah tangensial pada setiap titik pada lingkaran (Putri, 2023). Dalam gerak melingkar, kecepatan linear dihitung dalam satuan meter per detik (m/s). dirumuskan sebagai berikut:

$$V = \frac{2\pi r}{T} \quad (6)$$

dimana

V = kecepatan linier (m/s)

r = jari-jari lingkaran (m)

T = periode lingkaran (s)

Kecepatan angular (kecepatan sudut) adalah kecepatan suatu benda yang berputar mengelilingi sumbu tertentu (Putri, 2023). Kecepatan angular dihitung dalam satuan radian per detik (rad/s). dirumuskan sebagai berikut:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (7)$$

dimana

ω = kecepatan angular (rad/s)

T = periode Gerakan (s)

Dalam gerak melingkar, kecepatan linear dan kecepatan angular memiliki hubungan yang erat. Hubungan ini dinyatakan dalam rumus:

$$V = r \times \omega \quad (8)$$

dimana

V = kecepatan linier (m/s)

r = jari-jari lingkaran (m)

ω = kecepatan angular (rad/s)

Umumnya, kecepatan sudut dinyatakan dalam putaran per menit atau rpm (Nugraha dan Isworo, 2018). Mengingat bahwa satuan putaran adalah 2π radian maka diperoleh hubungan sebagai berikut:

$$\omega = \frac{2\pi}{60} n \quad (9)$$

dimana

ω = kecepatan angular (rad/s)

n = putaran per menit (rpm)

Jadi perlu diingat bahwa kecepatan angular (rad/s) tidak sama dengan kecepatan satu putaran/rotasi per detik (rps) atau kecepatan dalam satu revolusi.