

**DESAIN DAN REALISASI SISTEM KONTROL KECEPATAN MOTOR
DC MENGGUNAKAN METODE *PROPORTIONAL INTEGRAL
DERIVATIVE* (PID) BERBASIS ARDUINO NANO UNTUK APLIKASI
ALAT SENTRIFUGASI**

(Skripsi)

Oleh

**FAUZI RAKHMAN DWI WIYANA
NPM 2057041001**



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
2024**

ABSTRAK

DESAIN DAN REALISASI SISTEM KONTROL KECEPATAN MOTOR DC MENGUNAKAN METODE *PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE (PID)* BERBASIS ARDUINO NANO UNTUK APLIKASI ALAT SENTRIFUGASI

Oleh

Fauzi Rakhman Dwi Wiyana

Perancangan dan pembuatan alat sentrifugasi dengan kontrol kecepatan motor *brushless* DC menggunakan metode PID telah direalisasikan berbasis Arduino Nano dengan sensor kecepatan efek Hall. Proses kontrol PID diterapkan untuk meningkatkan stabilitas putaran rotor, bahkan ketika terdapat beban tambahan. Pengujian kontrol PID dilakukan menggunakan metode Ziegler-Nichols kedua, dengan proses *tuning* parameter K_p , K_i , dan K_d hingga diperoleh hasil optimal. Rotor pada alat dirancang dengan bahan ABS menggunakan *3D printing* yang terdiri enam lubang *tube* sampel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kontrol PID dapat menjaga kestabilan putaran pada setiap *setpoint* antara 2.500 hingga 6.500 RPM dengan akurasi sensor rata-rata sebesar 99,95%. Pada uji beban 30, 60, dan 90 gram, kecepatan optimal alat dicapai pada kecepatan 2.000 hingga 3.000 RPM. Berdasarkan hasil ini, implementasi kontrol PID berbasis Arduino Nano efektif dalam menjaga kestabilan dan respon kecepatan alat sentrifugasi, meskipun motor *brushless* DC memiliki keterbatasan torsi dalam memutar beban berlebih.

Kata Kunci: Alat sentrifugasi, Kontrol PID, Arduino Nano, Motor *brushless* DC, Sensor efek Hall

ABSTRACT

DESIGN AND REALIZATION OF DC MOTOR SPEED CONTROL SYSTEM USING PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE (PID) METHOD BASED ON ARDUINO NANO FOR CENTRIFUGE APPLICATION

By

Fauzi Rakhman Dwi Wiyana

The design and manufacture of a centrifuge with brushless DC motor speed control using the PID method has been realized based on Arduino Nano with a Hall effect speed sensor. The PID control process is applied to improve the stability of the rotor rotation, even when there is additional load. PID control testing is done using the second Ziegler-Nichols method, with the process of tuning the K_p , K_i , and K_d parameters until optimal results are obtained. The rotor of the device is designed with ABS material using 3D printing which consists of six sample tube holes. The results show that PID control can maintain rotation stability at each setpoint between 2,500 to 6,500 RPM with an average sensor accuracy of 99.95%. In the 30, 60, and 90 gram load test, the optimal speed of the device was achieved at 2,000 to 3,000 RPM. Based on these results, the implementation of Arduino Nano-based PID control is effective in maintaining the stability and speed response of the centrifuge, even though the brushless DC motor has limited torque in rotating excessive loads.

Keywords: *Centrifuge, PID control, Arduino Nano, Brushless DC Motor, Hall effect sensor*

**DESAIN DAN REALISASI SISTEM KONTROL KECEPATAN MOTOR
DC MENGGUNAKAN METODE *PROPORTIONAL INTEGRAL
DERIVATIVE* (PID) BERBASIS ARDUINO NANO UNTUK APLIKASI
ALAT SENTRIFUGASI**

Oleh

FAUZI RAKHMAN DWI WIYANA

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS

Pada

**Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG**

2024

Judul Skripsi : **DESAIN DAN REALISASI SISTEM KONTROL
KECEPATAN MOTOR DC MENGGUNAKAN
METODE *PROPORTIONAL INTEGRAL
DERIVATIVE* (PID) BERBASIS ARDUINO NANO
UNTUK APLIKASI ALAT SENTRIFUGASI**

Nama Mahasiswa : *Fauzi Rakhman Dwi Wiyana*

Nomor Pokok Mahasiswa : **2057041001**

KBK : **Instrumentasi**

Jurusan : **Fisika**

Fakultas : **Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



[Signature]
Dr. Junaidi, S.Si., M.Sc.
NIP 19820618 200812 1 001

[Signature]
Humairoh Ratu Ayu, S.Pd., M.Si.
NIP 19901125 201903 2 018

2. **Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung**

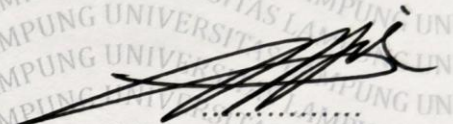
[Signature]
Arif Surtoto, S.Si., M.Si., M.Eng.
NIP 19710909 200012 1 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

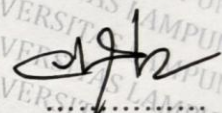
Ketua

Dr. Junaidi, S.Si., M.Sc.



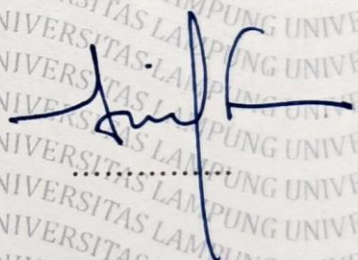
Sekretaris

Humairoh Ratu Ayu, S.Pd., M.Si.



Penguji

Bukan Pembimbing : **Arif Surtono, S.Si., M.Si., M.Eng.**



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si.

NIP. 197110012005011002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 19 Desember 2024

PERNYATAAN

Dengan ini, saya menyatakan bahwa di dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang sama persis dengan yang pernah dilakukan oleh orang lain. Sepanjang pengetahuan saya, tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan oleh orang lain kecuali yang secara tertulis telah diacu dalam naskah ini sebagaimana tercantum dalam daftar pustaka. Selain itu, saya juga menyatakan bahwa skripsi ini merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila ada pernyataan saya yang tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 19 Desember 2024



Fauzi Rakhman Dwi Wiyana
NPM. 2057041001

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Fauzi Rakhman Dwi Wiyana, dilahirkan di Kabupaten Lampung Utara, Provinsi Lampung pada 22 April 2003. Penulis menyelesaikan pendidikan di TK Darul Ulum Baturaja pada tahun 2008, SDN 02 Baturaja pada tahun 2014, MTsN 03 Lampung Utara pada tahun 2017, dan MAN 02 Lampung Utara pada tahun 2020. Penulis terdaftar sebagai mahasiswa di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung melalui jalur Mandiri pada tahun 2020. Selama menempuh pendidikan, penulis menyelesaikan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di unit Pusat Riset Konversi dan Konservasi Energi (PRKKE) BRIN Serpong dengan judul “Desain *Human Machine Interface* (HMI) pada *Battery Swapping Station 12 Channel* Menggunakan Pemrograman Python”. Penulis juga melakukan pengabdian masyarakat dengan mengikuti program Kuliah Kerja Nyata (KKN) Universitas Lampung Periode II tahun 2023 di Pekon Gedung Dalam, Pesawaran.

Penulis melaksanakan penelitian di Laboratorium Elektronika Dasar Fisika FMIPA Unila untuk menyusun skripsi dengan judul “**Desain dan Realisasi Sistem Kontrol Kecepatan Motor DC Menggunakan Metode *Proportional Integral Derivative* (PID) Berbasis Arduino Nano untuk Aplikasi Alat Sentrifugasi**” dibawah bimbingan Bapak Dr. Junaidi, S.Si., M.Sc. dan Ibu Humairoh Ratu Ayu, S.Pd., M.Si.

PERSEMBAHAN

Dengan Penuh Rasa Syukur Kepada Allah SWT, karya ini kupersembahkan kepada:

Papa dan Mama

Terimakasih untuk segala do'a dan usaha yang selalu diberikan demi kesuksesan putranya hingga mampu menyelesaikan pendidikan di tingkat Universitas sebagai Sarjana Fisika.

Mbak, Abang, dan Adik

Terimakasih atas do'a dan dukungan hingga saat ini.

Bapak dan Ibu Dosen

Terimakasih atas bekal ilmu pengetahuan, nasihat, dan saran yang membangun wawasanku hingga mencapai Sarjana Fisika.

Serta almamater tercinta

"Universitas Lampung"

MOTTO

“Selesaikan apa yang telah kamu mulai. Kabur bukan solusi, selesaikan sesuai kemampuanmu dengan gentle”

"Barangsiapa yang mengerjakan kebaikan sekecil apapun, niscaya dia akan melihat (balasan)nya."
(Q.S Al Zalzalah: 7)

“Keberuntungan adalah ketika kesempatan bertemu dengan kemampuan.”
(Dzawin Nur)

“Tekunlah dalam setiap proses, karena keberhasilan lahir dari usaha yang konsisten dan doa yang tulus.”
(Chat GPT)

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT. Tuhan Yang Maha Kuasa sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “**Desain dan Realisasi Sistem Kontrol Kecepatan Motor DC Menggunakan Metode *Proportional Integral Derivative (PID)* Berbasis Arduino Nano untuk Aplikasi Alat Sentrifugasi**”. Dengan segala kerendahan hati, penulis menyadari bahwa penyusunan skripsi ini masih terdapat kesalahan dan masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang bersifat membangun penulis harapkan untuk memperbaiki skripsi ini. Semoga skripsi ini bermanfaat bukan hanya untuk penulis, tapi juga untuk para pembaca.

Bandar Lampung, 19 Desember 2024

Penulis

Fauzi Rakhman Dwi Wiyana

SANWACANA

Segala puji bagi Allah, yang telah memberikan taufik dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan lancar. Dalam penyusunan skripsi ini, penulis menyadari tidak sedikit hambatan dan kesulitan yang dihadapi, namun berkat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, akhirnya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulis mengucapkan terimakasih telah membantu penyusunan skripsi ini kepada:

1. Kedua Orang Tua penulis yang selalu mendoakan serta memberikan semangat dan dukungan, baik berupa materi ataupun moril kepada penulis dalam menyelesaikan Pendidikan di Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Junaidi, S.Si., M.Sc. sebagai pembimbing utama yang tulus mengajari, membantu, memberi arahan, membimbing, dan memberi pemahaman kepada penulis.
3. Ibu Humairoh Ratu Ayu, S.Pd., M.Si. sebagai pembimbing kedua yang senantiasa membantu, membimbing, memberi saran dan memberi pemahaman kepada penulis.
4. Bapak Arif Surtono, S.Si., M.Si., M.Eng. sebagai dosen penguji yang telah memberi masukan dan koreksi dalam penyelesaian skripsi ini.
5. Bapak/Ibu Dosen Jurusan Fisika atas segala ilmu yang telah diberikan selama penulis menjadi mahasiswa Universitas Lampung.
6. Mbak, Abang, dan Adik penulis yang telah mendoakan serta memberikan semangat dan dukungan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
7. Kekasih penulis yang telah dengan tulus membantu dan mendukung penulis untuk terus berjuang menyelesaikan skripsi ini.

8. Teman-teman seperjuangan Aldi, Deden, Elva, dan Sutiana yang telah kebersamai, membantu, dan memberi semangat kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
9. Seluruh mahasiswa/i jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung angkatan 2020, dan teman-teman yang tidak bisa saya sebutkan satu per-satu.

Bandar Lampung, 19 Desember 2024

Fauzi Rakhman Dwi Wiyana

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
COVER DALAM	iii
HALAMAN PERSETUJUAN	iv
HALAMAN PENGESAHAN	v
PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
PERSEMBAHAN	viii
MOTTO	ix
KATA PENGANTAR	x
SANWACANA	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	2
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Batasan Masalah	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Penelitian Terkait	5
2.2 <i>Centrifuge</i>	10
2.2.1 <i>Fixed-angle</i>	11
2.2.2 <i>Vertical Tube</i>	12
2.2.3 <i>Swing-out</i>	13
2.3 Motor <i>Brushless DC</i>	13
2.4 <i>Pulse Width Modulation (PWM)</i>	16
2.5 <i>Electronic Speed Controller (ESC)</i>	17

2.6	<i>Encoder Hall Effect</i>	18
2.7	<i>Gear Ratio</i>	21
2.8	PID.....	22
2.9	Arduino Nano	26
III. METODE PENELITIAN		
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian	28
3.2	Alat dan Bahan Penelitian	28
3.3	Prosedur Penelitian	29
3.4	Desain dan Perancangan Alat	32
3.4.1	Perancangan Sensor Kecepatan Putar Efek Hall.....	33
3.4.2	Perancangan Sistem Gerak Rotor.....	34
3.4.3	Perancangan Perangkat Lunak.....	35
3.5	Pengujian Alat	36
3.5.1	Pengambilan Nilai Kalibrasi Kecepatan.....	36
3.5.2	Pengujian Waktu Kerja Alat Sentrifugasi.....	38
3.5.3	Pengujian Kontrol PID pada Variasi <i>Setpoint</i>	39
3.5.4	Pengujian Beban Tabung Sentrifugasi.....	40
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN		
4.1	Perancangan Alat Sentrifugasi.....	42
4.2	Sistem Gerak Alat Sentrifugasi.....	43
4.3	Sistem Kontrol Kecepatan Motor <i>Brushless DC</i>	44
4.3.1	Sistem Pengatur Kecepatan dan Waktu Alat.....	45
4.3.2	Sistem Layar Interface Pengguna.....	46
4.3.3	Sistem Pengontrol ESC dengan Arduino	47
4.4	Pengujian Alat	49
4.4.1	Pengambilan Nilai Kalibrasi Kecepatan.....	49
4.4.2	Pengujian Waktu Kerja Alat Sentrifugasi.....	51
4.4.3	Pengujian Kontrol PID pada Variasi <i>Setpoint</i>	52
4.4.4	Pengujian Beban Tabung Sentrifugasi.....	56
V. SIMPULAN DAN SARAN		
5.1	Simpulan.....	60
5.2	Saran	61

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Respon kecepatan motor terbaik pada (a) <i>setpoint</i> 1.500 dan (b) <i>setpoint</i> 2.000.....	6
Gambar 2.2 Tampak keseluruhan alat sentrifugasi	7
Gambar 2.3 Skematik rangkaian pengontrol kecepatan motor <i>brushless</i> DC.....	8
Gambar 2.4 <i>Time response</i> pada <i>setpoint</i> 800 RPM (a) tanpa beban (b) dengan beban	9
Gambar 2.5 Proses sentrifugasi pada rotor <i>fixed-angle</i>	12
Gambar 2.6 Proses sentrifugasi pada rotor <i>vertical tube</i>	12
Gambar 2.7 Proses sentrifugasi pada rotor <i>swing-out</i>	13
Gambar 2.8 Pendeteksi posisi rotor pada motor <i>brushless</i> DC dengan sensor efek Hall	14
Gambar 2.9 Hubungan kecepatan dengan torsi motor DC.....	15
Gambar 2.10 Frekuensi <i>duty cycle</i>	16
Gambar 2.11 Desain MOSFET pada ESC pengontrol kecepatan motor BLDC 3 fasa	18
Gambar 2.12 Ilustrasi kristal semikonduktor pada efek Hall.....	19
Gambar 2.13 Sensor kecepatan (a) permanen magnet diam (b) magnet tertanam pada putaran roda	20
Gambar 2.14 <i>Encoder</i> efek Hall pada motor listrik	20
Gambar 2.15 Detail bagian pada <i>gear ratio</i>	21
Gambar 2.16 Perbandingan dua <i>gear</i>	22
Gambar 2.17 Blok diagram kontrol PID	23
Gambar 2.18 Respon kurva berbentuk <i>S</i>	24
Gambar 2.19 Parameter acuan respon sistem PID	25
Gambar 2.20 <i>Pin outs</i> Arduino Nano	26

Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	30
Gambar 3.2	Diagram blok pengendalian motor	31
Gambar 3.3	Desain alat penelitian	32
Gambar 3.4	Desain rotor <i>centrifuge</i>	33
Gambar 3.5	<i>Encoder</i> sensor efek Hall pada rotor	33
Gambar 3.6	Sistem gerak rotor (a) Desain 3D sistem gerak (b) Skematik sistem gerak	34
Gambar 3.7	Skematik sistem alat sentrifugasi	35
Gambar 3.8	Grafik hasil pengujian sensor efek Hall	37
Gambar 3.9	Pengujian kecepatan motor terhadap PWM masukan	38
Gambar 3.10	Hasil pengujian stabilitas PID	40
Gambar 3.11	Pengaruh variasi beban terhadap kecepatan alat	41
Gambar 4.1	Sisi depan alat sentrifugasi	42
Gambar 4.2	Sisi belakang alat sentrifugasi	43
Gambar 4.3	Sistem gerak alat.....	43
Gambar 4.4	Sistem kontrol kecepatan.....	45
Gambar 4.5	Pengujian pengukuran sensor efek Hall terhadap <i>tachometer</i>	50
Gambar 4.6	Pengujian kecepatan motor terhadap PWM masukan	51
Gambar 4.7	<i>Tuning</i> awal PID (a) osilasi yang buruk (b) osilasi yang baik	53
Gambar 4.8	Respon alat pada awal <i>tuning</i> PID.....	53
Gambar 4.9	Diagram blok kontrol PID	54
Gambar 4.10	Pengujian respon kecepatan motor dengan <i>setpoint</i> (a) 2.500 (b) 3.000 (c) 3.500 (d) 4.000 (e) 4.500 (f) 5.000 (g) 5.500 (h) 6.000 (i) 6.500	55
Gambar 4.11	Pengaruh kecepatan putar alat terhadap beban (a) 30 g (b) 60 g dan (c) 90 g.....	57
Gambar 4.12	Kemampuan maksimum kecepatan alat terhadap beban.....	58

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Parameter <i>tuning</i> metode pertama Ziegler-Nichols.....	24
Tabel 2.2 Parameter <i>tuning</i> metode kedua Ziegler-Nichols.....	24
Tabel 2.3 Spesifikasi Arduino Nano.....	27
Tabel 3.1 Alat penelitian dan fungsinya.....	28
Tabel 3.2 Bahan penelitian dan fungsinya	29
Tabel 3.3 Data hasil pengujian dan kalibrasi sensor efek Hall	37
Tabel 3.4 Data hasil pengujian dan perhitungan waktu kerja alat.....	39
Tabel 3.5 Data hasil pengujian dan perhitungan kecepatan rotor	39
Tabel 3.6 Respon alat sentrifugasi pada tiap <i>setpoint</i>	40
Tabel 3.7 Data pengujian variasi beban tabung sentrifugasi.....	40
Tabel 4.1 Data kalibrasi kecepatan motor	49
Tabel 4.2 Data pengujian waktu kerja alat	52
Tabel 4.3 Data pengujian PID serta hasil perhitungan akurasi dan <i>error</i>	54
Tabel 4.4 Respon alat sentrifugasi pada tiap <i>setpoint</i>	56
Tabel 4.5 Pengaruh beban tabung terhadap alat sentrifugasi	57

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Berbagai ukuran partikel baik berukuran yang sangat kecil dan tidak mampu dilihat menggunakan mikroskop hingga ukurannya yang cukup besar dan dapat dilihat oleh mata telanjang mampu terdispersi ke dalam campuran. Campuran homogen yang terdiri dari partikel kecil dan cairan disebut dispersi koloid. Partikel zat yang terdispersi ke dalam koloid memiliki ukuran antara 1 – 100 nm. Ukuran partikel ini lebih besar dibandingkan ukuran partikel di dalam larutan, namun lebih kecil dibandingkan ukuran partikel di dalam suspensi (Sutresna, 2007). Partikel dengan ukuran yang berbeda memungkinkan untuk dipisahkan antara partikel terdispersi dari molekul yang berbentuk cairan. Salah satu cara pemisahan partikel terdispersi tersebut dapat dilakukan dengan proses sentrifugasi (Kenneth, 2009).

Koloid dapat memisah dengan sendirinya menjadi dua fasa jika didiamkan dalam waktu yang lama. Proses mendiamkan koloid dilakukan dengan membiarkan partikel-partikel tersebut mengendap ke bagian bawah wadah. Pengendapan dapat terjadi karena terdapat gaya gravitasi (Oxtoby *et al.*, 2001). Pada fase kontinu media dispersi berbentuk cairan dan partikel tidak mudah mengendap dan tidak dapat melewati membran filter. Koloid dapat berupa gel, emulsi, dan sistem biologis. Contoh koloid seperti susu, darah, cat dan lain sebagainya (Mewis *and* Wagner, 2012).

Pemisahan partikel dalam koloid yang sulit mengendap secara alami diperlukan alat bantu seperti sentrifugasi. Alat sentrifugasi dapat memisahkan partikel dengan cara memutar tabung yang berisi cairan campuran pada sumbu alat. Partikel tersebut mengalami gaya sentrifugal radial yang menjauhkannya dari sumbu rotasi. Zona

partikel akan bergerak ke bawah tabung bergantung pada massa dan ukuran partikel (Graham, 2020). Partikel akan mengendap dengan cepat setelah mencapai posisi kesetimbangan. Pada tahap ini, campuran dapat membentuk lapisan dengan massa jenis berbeda yang disebut pita kesetimbangan. Ketika sentrifugasi dihentikan, gradien massa jenis dan pita partikel akan berorientasi ke horizontal dan endapan terkumpul pada titik ujung tabung. Namun gradien massa jenis pada tabung dapat hancur ketika putaran awal dan akhir alat sentrifugasi tidak berjalan dengan halus dan stabil. Agar gradien dapat berorientasi ke posisi horizontal tanpa gangguan maka harus dirancang alat sentrifugasi yang stabil dan halus (Rickwood, 1978).

Stabilitas kontrol kecepatan motor sentrifugasi dapat ditingkatkan dengan menggunakan metode *Proportional Integral Derivative* (PID). Sistem kontrol kecepatan motor menggunakan kontrol PID dapat digunakan agar motor tetap stabil dan lebih halus walaupun diberikan beban tambahan. PID mengendalikan kecepatan motor dengan memperbaiki *rise time*, *settling time*, *steady state* dan *overshoot* yang berlebihan. Sehingga akan mendapat hasil kontrol kecepatan yang lebih baik saat diberikan beban (Anugrah *et al.*, 2020). Kontrol PID menggunakan tiga ketentuan yang memiliki fungsinya masing-masing. Kontrol *Proportional* (P) diperoleh dari sinyal *error* yang difungsikan untuk mempercepat *rise time*. Kontrol Integral (I) digunakan untuk mengurangi kesalahan pada *steady state*. Dan kontrol *Derivative* (D) ditujukan untuk meningkatkan redaman dan stabilitas *close-loop* (Díaz-Rodríguez *et al.*, 2019).

Penelitian mengenai rancang alat sentrifugasi menggunakan parameter PID sebelumnya dilakukan oleh Paga (2020). Pada penelitian tersebut digunakan sensor TCRT5000 untuk mengukur kecepatan *Revolutions Per Minute* (RPM). Motor *Alternating Current* (AC) digunakan pada penelitian tersebut dengan diatur kecepatannya menggunakan *Over Current Relay* (OCR). Penelitian lainnya yang menggunakan motor AC dilakukan oleh Putra *et al.* (2022) dengan menggunakan sensor *gyroscope* sebagai pendeteksi kemiringan alat. Perdana (2018) menggunakan *Solid State Relay* (SSR) sebagai *driver* motor AC. Kemudian Indrawati dan Amoryna (2023) memanfaatkan motor kipas angin dan membandingkan hasil preparasi dengan alat sentrifugasi laboratorium. Penggunaan

motor AC pada penelitian rancangan alat sentrifugasi tersebut memiliki keterbatasan pada kecepatan kerja alat. Rata-rata kecepatan tercepat yang berhasil dijalankan yaitu 3.000 RPM. Sementara penelitian lainnya yang menggunakan motor *Direct Current* (DC) dilakukan oleh Margirahayu *et al.* (2022) dengan motor *brushless* berkecepatan hingga 7.000 RPM. Sadegh-cheri (2020) memanfaatkan motor *brushless Digital Video Disc* (DVD) komputer bekas berkecepatan hingga 10.000 RPM. Alfian *et al.* (2021) memberikan fitur *Internet of Things* (IoT) sehingga kecepatan dan waktu dapat diatur melalui *smartphone*. Kecepatan yang berhasil didapatkan hingga 1.739 RPM. Aji *et al.* (2019) menggunakan metode logika *fuzzy* berdasarkan kekentalan yang menyesuaikan kecepatan dan waktu proses sentrifugasi. Kecepatan tanpa beban yang diperoleh yaitu 1.134,25 RPM, namun kecepatan turun 202,5 RPM ketika alat diberikan beban.

Berdasarkan uraian di atas maka pada penelitian ini akan dirancang dan direalisasikan sebuah kontrol kecepatan motor *brushless* DC menggunakan *input* kecepatan dan waktu menggunakan *rotary encoder*. Arduino Nano digunakan sebagai pusat kendali, pengontrol *Electronic Speed Controller* (ESC), dan penerima hasil pendeteksian sensor kecepatan efek Hall. Rotor alat sentrifugasi dirancang menggunakan *3D printing* berbahan plastik *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS) dengan 6 buah lubang tempat *tube* sampel. Kecepatan putaran rotor dikontrol melalui proses PID agar putaran tetap stabil dan lebih halus walau diberikan beban tambahan. Proses kontrol PID dilakukan dengan menguji coba nilai Konstanta *Proportional* (K_p), Konstanta Integral (K_i) dan Konstanta *Derivative* (K_d) pada masing-masing *setpoint* kecepatan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang dijelaskan diatas, maka rumusan masalah dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana merancang dan merealisasi alat sentrifugasi dengan kontrol PID berbasis Arduino Nano?
2. Bagaimana menerapkan kontrol PID untuk meningkatkan stabilitas motor sentrifugasi?

3. Bagaimana performa kecepatan dan stabilitas motor *brushless* yang diimplementasikan pada alat sentrifugasi?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang dicapai dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Merancang dan merealisasi alat sentrifugasi dengan kontrol PID berbasis Arduino Nano.
2. Menerapkan kontrol PID untuk meningkatkan stabilitas motor sentrifugasi.
3. Mengevaluasi performa motor *brushless* yang diimplementasikan pada alat sentrifugasi.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Memungkinkan pengguna untuk mengontrol kecepatan dan waktu sentrifugasi dengan presisi.
2. Mengoptimalkan kinerja motor sentrifugasi dengan mengurangi *overshoot* dan *settling time* sehingga dapat meningkatkan kestabilan alat.
3. Mengidentifikasi performa dan efisien alat sentrifugasi.
4. Memungkinkan pengguna untuk mendapatkan hasil yang konsisten dan dapat diandalkan dalam proses pemisahan campuran.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

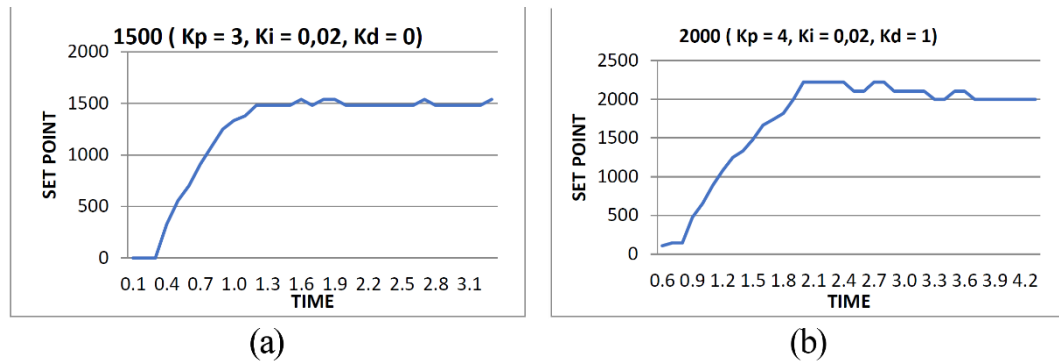
1. Menggunakan motor *brushless* 3650 4500kv dan ESC 30A.
2. Menggunakan Arduino Nano sebagai sistem pengendali dan LCD 128x64 sebagai media penampil data.
3. Menggunakan rotor sentrifugasi hasil *printing* 3D dari bahan ABS.
4. Kontrol PID dilakukan dengan program Arduino Nano pada *software* Arduino IDE.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

Penelitian terkait tentang perancangan *centrifuge* (alat sentrifugasi) dengan pengontrol kecepatan motor dan mengukur perputaran sentrifugasi menggunakan berbagai sensor telah banyak dilakukan. Beberapa diantaranya digunakan untuk memudahkan dalam penyelesaian penelitian ini.

Paga (2020) telah merancang kendali alat sentrifugasi dengan parameter *Proportional Integral Derivative* (PID) menggunakan metode *tuning*. Penelitian tersebut menggunakan motor *Alternating Current* (AC) yang diatur kecepatannya menggunakan *driver* motor AC. Driver motor tersebut dikontrol oleh PID dari mikrokontroler Arduino Mega. Kecepatan *Revolutions Per Minute* (RPM) dari motor tersebut diukur menggunakan sensor TCRT5000 dan datanya dikirimkan ke Arduino. Jika kecepatan membaca TCRT5000 mengalami kesalahan, maka akan beralih kembali ke kontrol PID untuk mengontrol *Over Current Relay* (OCR) guna memperlambat kecepatan motor sentrifugasi. Proses pengujian nilai Konstanta *Proportional* (K_p), Konstanta Integral (K_i) dan Konstanta *Derivative* (K_d) pada masing-masing *setpoint* dilakukan dengan *tuning* nilai satu persatu. Proses dimulai dengan nilai K_p untuk mencari respon sistem tercepat dengan meminimalisir nilai *rise time*. Proses *tuning* kedua dengan mencari nilai K_d yang bertujuan meredam osilasi dan mengecilkan amplitudo. Kemudian proses terakhir mencari nilai K_i apabila kondisi sistem memiliki *steady state error*. Didapatkan respon sistem dari pengujian nilai K_p , K_i dan K_d dengan hasil yang paling baik ditunjukkan pada **Gambar 2.1**. Namun perputaran motor masih terbilang belum cukup stabil dan dibutuhkan penelitian selanjutnya untuk dikembangkan.



Gambar 2.1 Respon kecepatan motor terbaik pada (a) *setpoint* 1.500 dan (b) *setpoint* 2.000 (Paga, 2020).

Penelitian lain yang menggunakan motor AC dilakukan Putra *et al.* (2022) yang merancang alat sentrifugasi berbasis Arduino Nano dilengkapi sistem deteksi kemiringan alat. Penelitian tersebut menggunakan sensor *gyroscope* sebagai pendeteksi kemiringan alat. Alat akan bekerja hanya pada posisi $1^{\circ} - 3^{\circ}$, jika kemiringan lebih dari itu maka relay akan memutuskan arus listrik dan alat sentrifugasi tidak bekerja. Adanya pendeteksi kemiringan alat merupakan salah satu syarat munculnya gaya sentrifugal, dimana gaya sentrifugal merupakan gerak rotasi yang menjauhi pusat putaran. Oleh karena itu, jika posisi alat berada pada permukaan miring maka gaya sentrifugal tidak akan terjadi. Hasil penelitian tersebut pada pengujian kecepatan 1.000 RPM memiliki kesalahan sebesar 1,7%, 2.000 RPM memiliki kesalahan sebesar 0,75%, 3.000 RPM memiliki kesalahan sebesar 0,6%, dan 4.000 RPM, memiliki kesalahan sebesar 0,2%.

Penelitian lainnya dilakukan Perdana (2018) yang memodelkan alat sentrifugasi berbasis Arduino Uno. Penelitian tersebut menggunakan komponen *Solid State Relay* (SSR) sebagai *driver* motor AC, sehingga beban motor AC dapat dikendalikan dengan *Pulse Width Modulation* (PWM) dari mikrokontroler Arduino Uno. Motor akan bekerja ketika pin emitor SSR menerima sinyal keluaran tinggi dari Arduino, tegangan tersebut akan menghidupkan fotodiode sebagai pemancar dan menghidupkan gerbang optik sebagai penerima pada SSR sehingga motor AC menyala. Semakin tinggi nilai PWM pada Arduino, maka putaran motor akan semakin cepat. Sebaliknya jika nilai PWM diatur ke nilai yang lebih kecil, maka akan memperlambat putaran motor. Pengujian kecepatan alat sentrifugasi dilakukan dalam rentang 500 – 3.000 RPM dengan hasil pengujian tersebut mendapat

keakurasian kecepatan alat rata-rata 98,94%. Alat sentrifugasi yang telah berhasil dibuat ditampilkan pada **Gambar 2.2**.

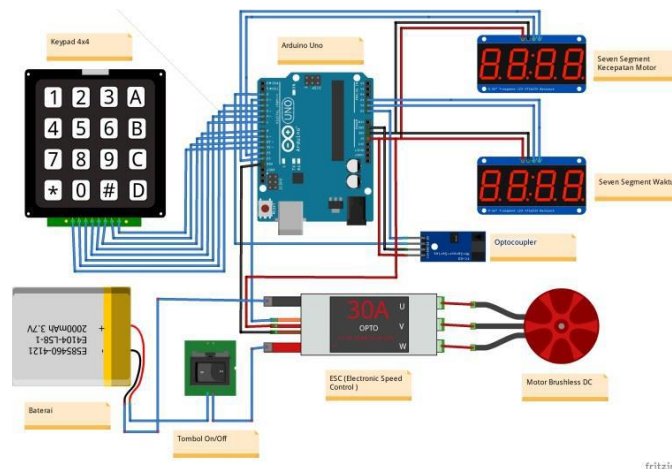


Gambar 2.2 Tampak keseluruhan alat sentrifugasi (Perdana, 2018).

Penelitian lain yang menggunakan motor AC dilakukan Indrawati dan Amoryna (2023) dengan melakukan inovasi alat sentrifugasi alternatif memanfaatkan motor kipas angin untuk preparasi pengujian berbagai sampel di laboratorium. Penelitian tersebut merancang rotor alat sentrifugasi dengan bahan plat besi yang didesain menggunakan mesin *Computer Numerically Controlled (CNC)*. Rotor tersebut dirancang dengan kemiringan 30° yang kemudian dipasangkan ke motor kipas angin Regency ZDLX20. Perputaran motor tersebut diatur menggunakan dimmer dengan mengacu pengukuran kecepatan RPM yang terukur pada sensor *proximity*. Uji coba dilakukan terhadap sampel tanah, katalis Ni/CaO dan urin. Didapat hasil perbandingan sampel preparasi dari alat sentrifugasi alternatif dan alat sentrifugasi pabrikan dengan hasil yang hampir sama jika dilakukan pemeriksaan mikroskopik. Namun kekurangan pada alat sentrifugasi alternatif tersebut yaitu kecepatan maksimal hanya berada pada 1.420 RPM.

Margirahayu *et al.* (2022) melakukan penelitian pengatur kecepatan motor *Direct Current (DC)* dengan teknik PWM berbasis Arduino sebagai aplikasi sentrifugasi. Penelitian tersebut menggunakan *Electronic Speed Controller (ESC)* yang diatur berdasarkan sinyal PWM dari mikrokontroler Arduino Uno, dengan perintah kecepatan dan waktu berasal dari *keypad 4x4*. Kecepatan perputaran motor diukur menggunakan sensor *optocoupler* yang kemudian ditampilkan pada *seven*

segments. Skematik rangkaian yang telah dirancang pada penelitian tersebut ditampilkan pada **Gambar 2.3**.



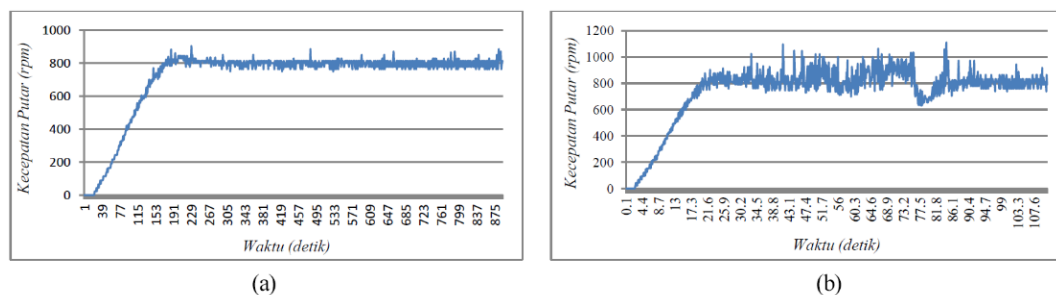
Gambar 2.3 Skematik rangkaian pengontrol kecepatan motor *brushless* DC (Margirahayu *et al.*, 2022).

Penelitian tersebut mendapatkan hasil pengukuran RPM pada *tachometer* dengan kesalahan tertinggi pada kecepatan 5.000 RPM sebesar 3,62% dan terendah pada kecepatan 6.000 RPM sebesar 1,01%. Tingkat keakurasian sensor *optocoupler* yang digunakan cukup tinggi yaitu 97,05%. Akan tetapi, kecepatan motor DC yang digunakan hanya bekerja dalam range 4.000 – 7.000 RPM, hal ini akan menjadi masalah apabila alat sentrifugasi tersebut ingin digunakan dengan kecepatan yang lebih rendah dari 4.000 RPM.

Penelitian lain yang menggunakan ESC berdasarkan sinyal PWM dilakukan Sadegh-cheri (2020), yang merancang alat sentrifugasi biaya rendah dengan memanfaatkan *Digital Video Disc* (DVD) komputer bekas. Penelitian tersebut menggunakan *servo tester* sebagai pengatur sinyal PWM untuk mengontrol kecepatan motor DVD. Kecepatan RPM motor tersebut diukur menggunakan sensor efek Hall yang menerima dua sinyal dari magnet yang berputar. Dengan sinyal yang dibaca tersebut, Arduino Nano digunakan untuk menghitung kecepatan RPM dari motor dan ditampilkan ke layar LCD 16x2. Hasil pembuatan *microcentrifuge* tersebut mendapat total biaya kurang dari Rp400.000 dan konsumsi daya hanya 5 W, dengan kemampuan motor bekerja pada kecepatan 1.000 – 10.000 RPM.

Penelitian lainnya dilakukan Alfian *et al.* (2021), merancang alat sentrifugasi menggunakan mikrokontroler NodeMCU ESP8266 yang mampu dikendalikan melalui *smartphone*. Penelitian tersebut menggunakan driver motor L298N yang mengatur kecepatan motor DC berdasarkan sinyal PWM dari NodeMCU, dengan kecepatan motor diukur menggunakan sensor A3144. Pengendalian kecepatan dan waktu pada *smartphone* menggunakan aplikasi blink yang terhubung dengan jaringan WiFi pada NodeMCU. Penggunaan *Internet of Things* (IoT) dalam pengendalian kecepatan alat sentrifugasi merupakan cara yang baru, namun penelitian tersebut mendapat hasil sensor yang kurang sensitif dan kurang linier, serta tidak ada pengatur kecepatan dan pemilihan *timer*. Kecepatan motor hanya bergantung pada waktu perintah bekerja motor, semakin lama waktu yang diberikan kecepatan RPM semakin tinggi.

Aji *et al.* (2019) melakukan penelitian pengendali kecepatan pada alat sentrifugasi menggunakan metode logika fuzzy. Penelitian tersebut menggunakan logika fuzzy dengan masukan konsentrasi dan waktu proses sentrifugasi dari suspensi. Nilai konsentrasi dan waktu tersebut menjadi acuan untuk menentukan kecepatan motor dalam bekerja. Kecepatan sentrifugasi diukur menggunakan sensor *increment encoder* yang berbentuk piringan sentrifugasi dengan satu putaran terdapat 30 pulsa bernilai “HIGH” dan 30 pulsa bernilai “LOW”. Sinyal keluaran sensor *encoder* ditampilkan pada osiloskop untuk melihat bentuk dan frekuensi pulsa yang dikeluarkan sensor *increment encoder*. Pada saat pengujian dilakukan dengan menggunakan beban sampel dan tanpa beban. Ditampilkan hasil pengujian kecepatan dengan *setpoint* 800 RPM pada **Gambar 2.4**.



Gambar 2.4 Time response pada *setpoint* 800 RPM (a) tanpa beban (b) dengan beban (Aji *et al.*, 2018).

Berdasar **Gambar 2.4(a)** kecepatan perputaran sentrifugasi tanpa beban berhasil berputar dengan stabil. Namun ketika diberikan beban sampel (**Gambar 2.4(b)**), sentrifugasi terjadi perputaran yang tidak stabil. Sensor kecepatan *increment encoder* yang digunakan pada alat tersebut memiliki tingkat kesalahan 1,52%.

2.2 Centrifuge

Centrifuge (alat sentrifugasi) merupakan alat yang dapat memisahkan berbagai bagian dari fluida dengan menerapkan gaya sentrifugal. Proses pemisahan fluida tersebut dilakukan dengan memutar wadah dalam kecepatan tinggi hingga cairan atau padatan terpisah satu sama lain (Sabry, 2022). Sentrifugasi dalam bidang biologi digunakan untuk memisahkan dan memurnikan campuran partikel biologis dalam media cair. Hal ini merupakan teknik utama untuk menganalisis sel, fraksi subseluler, kompleks supramolekul, dan makromolekul yang terisolasi seperti protein atau asam nukleat. Saat ini, teknik sentrifugasi merupakan alat penting untuk biokimia modern dan digunakan pada hampir semua studi subseluler invasif. Sementara sentrifugasi analitik terutama berkaitan dengan studi makromolekul yang dimurnikan atau rakitan supramolekul yang diisolasi, metodologi sentrifugasi preparatif dikhususkan untuk pemisahan jaringan, sel, struktur subseluler, vesikula membran, dan partikel lain yang memiliki kepentingan biokimia (Wilson and Walker, 2010).

Alat sentrifugasi memisahkan partikel dengan cara memutar tabung yang berisi suspensi partikel pada suatu sumbu. Partikel-partikel tersebut mengalami gaya sentrifugal radial yang menjauhkannya dari sumbu rotasi. Setiap partikel pada tabung mengalami gaya sentrifugal ketika diputar pada kecepatan tertentu dan gaya sentrifugal (F) dinyatakan pada Persamaan (2.1).

$$F = m\omega^2 r \quad (2.1)$$

dengan F = gaya sentrifugal (N), m = massa dari partikel (kg), ω = percepatan sudut (rad/s), dan r = jarak partikel dari sumbu rotasi (m). Dari Persamaan (2.1) tersebut, besarnya gaya radial yang dihasilkan oleh rotor yang berputar dapat dinyatakan

relatif terhadap gaya gravitasi bumi dan dikenal sebagai persamaan *Relative Centrifugal Field* (RCF) dinyatakan dalam Persamaan (2.2).

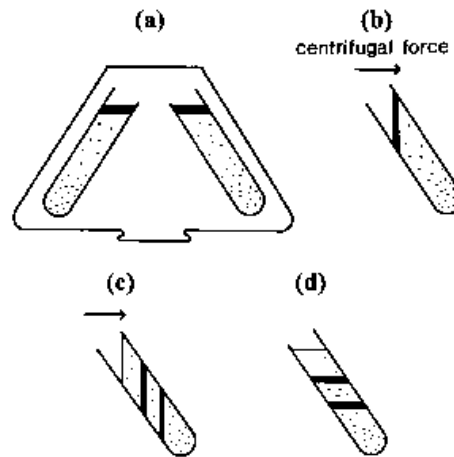
$$RFC = 11,18r \left(\frac{n}{1000} \right)^2 \quad (2.2)$$

dengan $RCF = \text{relative centrifugal field}$ (m/s^2), $n =$ kecepatan perputaran rotor (RPM) dan $r =$ jarak partikel dari sumbu rotasi (m) (Graham, 2020).

Alat sentrifugasi memiliki rotor yang biasanya terbuat dari bahan aluminium ataupun titanium, tujuannya digunakan bahan tersebut yaitu agar tidak terjadi korosi pada logam. Salah satu penyebab korosi yaitu terjadi karena logam mengalami tegangan yang terbentuk ketika perputaran alat sentrifugasi dan regangan pada struktur kristal logam. Salah satu cara mengatasi tegangan dan regangan yang terjadi pada logam yaitu dengan membentuk rotor yang optimal (Rickwood, 1978). Berdasarkan bentuk rotornya, alat sentrifugasi dibagi menjadi beberapa kategori, yaitu terdiri dari *fixed-angle*, *vertical tube*, dan *swing-out*.

2.2.1 *Fixed-angle*

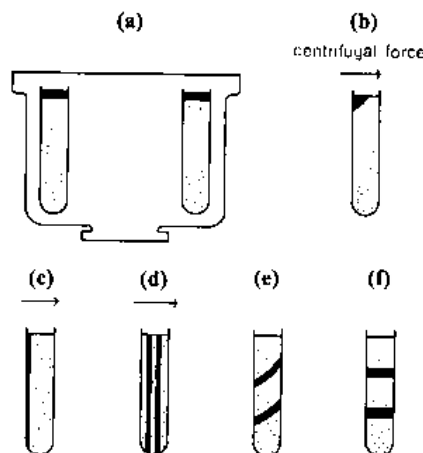
Jenis rotor *fixed-angle* ini tabung diposisikan pada lubang pada rotor yang telah diatur pada sumbu rotasi, sudut yang diatur tetap biasanya antara $14^\circ - 40^\circ$. Pada rotor jenis ini endapan yang berhasil dipisahkan terkumpul sebagai pelet kecil yang padat pada titik luar tabung. Terjadi konveksi yang cukup besar dan hal ini membantu terjadi pengendapan yang cepat. Rotor *fixed-angle* digunakan untuk sentrifugasi isopiknik karena gradien massa jenis akan berorientasi saat akselerasi, sehingga partikel mencapai posisi kesetimbangan dengan cepat. Gradien tersebut kemudian dikatakan isopiknik ketika partikel telah membentuk pita kesetimbangan. Ketika rotor dihentikan, gradien massa jenis dan pita partikel diorientasikan kembali ke horizontal. Proses sentrifugasi pada rotor *fixed-angle* dapat dilihat pada **Gambar 2.5**. Pada **Gambar 2.5(a)** Sampel diletakkan pada rotor, **(b)** Terjadi gaya sentrifugal sehingga gradien massa jenis terorientasi, **(c)** Terbentuk pita kesetimbangan partikel, dan **(d)** Gradien massa jenis dan pita terorientasi kembali ke horizontal (Rickwood, 1978).



Gambar 2.5 Proses sentrifugasi pada rotor *fixed-angle* (Rickwood, 1978).

2.2.2 *Vertical Tube*

Jenis rotor *vertical tube* ini tabung diposisikan pada lubang rotor yang telah diatur pada posisi vertikal. Pada jenis rotor ini jika gradien densitas telah terbentuk, gradien itu sendiri berubah arah hingga 90° saat rotor berakselerasi, sehingga gradien menjadi tegak lurus terhadap sumbu rotasi dan sejajar dengan medan gaya sentrifugal. Setelah sedimentasi partikel sampel, rotor diperlambat selama waktu tersebut gradien berubah arah ke posisi semula. Proses sentrifugasi pada rotor *vertical tube* ditampilkan pada **Gambar 2.6**. Pada **Gambar 2.6(a)** Sampel diletakkan pada rotor, **(b)** Terjadi gaya sentrifugal sehingga gradien massa jenis mulai terorientasi, **(c)** Gradien massa jenis telah terorientasi, **(d)** Terbentuk pita kesetimbangan partikel, **(e)** Gradien massa jenis dan pita mulai terorientasi kembali ke horizontal, dan **(f)** Gradien massa jenis dan pita telah terorientasi.

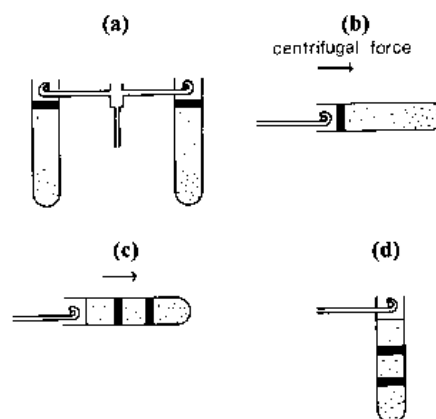


Gambar 2.6 Proses sentrifugasi pada rotor *vertical tube* (Rickwood, 1978).

Mungkin kita akan beranggapan bahwa orientasi dan reorientasi drastis yang terjadi selama sentrifugasi gradien massa jenis pada rotor *vertical tube* akan menghancurkan gradiennya. Namun, asalkan pada awal sentrifugasi berjalan dan pada akhir sentrifugasi dilakukan perlambatan yang halus, gradien dapat kembali dengan sendirinya dengan sedikit atau tanpa gangguan (Rickwood, 1978).

2.2.3 *Swing-out*

Jenis rotor *swing-out* ini tabung diposisikan ke dalam lubang rotor pada posisi vertikal. Namun berbeda dengan rotor *vertical tube*, sudut tabung sentrifugasi dapat berayun secara vertikal hingga 90° selama proses sentrifugasi. Gradien yang terbentuk sejajar tegak lurus dengan sumbu rotasi rotor dan sejajar dengan medan gaya sentrifugal. Partikel-partikel yang telah terpisah dalam sampel membentuk pita-pita diskrit dan kemudian ketika proses sentrifugasi telah selesai, tabung sentrifugasi kembali ke posisi semula. Pada **Gambar 2.7(a)** Sampel diletakkan pada rotor, **(b)** Terjadi gaya sentrifugal sehingga tabung sentrifugasi berayun 90° , **(c)** Terbentuk pita kesetimbangan partikel, dan **(d)** tabung sentrifugasi kembali ke posisi semula (Rickwood, 1978).



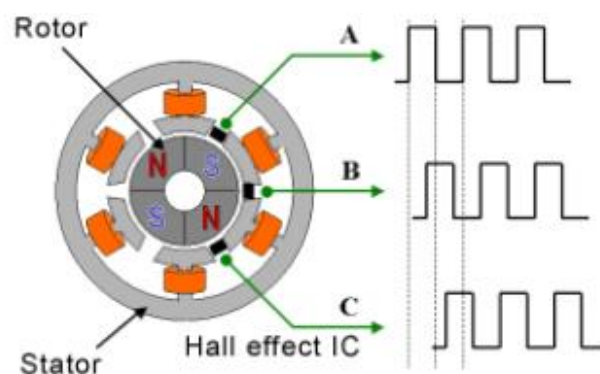
Gambar 2.7 Proses sentrifugasi pada rotor *swing-out* (Rickwood, 1978).

2.3 Motor *Brushless DC*

Komponen elektrik yang fungsinya untuk merubah besaran elektrik menjadi besaran fisik dalam bentuk putaran yaitu salah satunya motor listrik. Motor listrik secara umum dibagi menjadi dua, yaitu motor DC (*Direct Current*) dan motor AC

(*Alternating Current*). Sesuai dengan namanya, motor DC bekerja menggunakan arus DC (searah) dan motor AC bekerja menggunakan arus AC (bolak-balik). Bagian utama dari motor DC terdiri dari stator, *armature*, rotor, dan komutator dengan sikat. Rotor dapat berputar berdasarkan hukum kemagnetan yang dipengaruhi oleh arus listrik (Widharma, 2022).

Motor *brush* DC memiliki prinsip kerja ketika kumparan rotor dialiri arus listrik pada kumparan tersebut maka akan timbul medan magnet. Karena kumparan tersebut diletakkan pada medan magnet permanen stator, maka kumparan tersebut memperoleh gaya dorong sehingga rotor berputar. Berbeda dengan motor *brush* DC, motor *brushless* DC (BLDC) memiliki magnet permanen pada rotor. Apabila kumparan stator dialiri listrik, maka akan timbul medan magnet. Karena adanya medan magnet tersebut, rotor yang berupa magnet permanen akan mendapat gaya dorong dan rotor berputar. Agar rotor dapat berputar kontinu terjadi pembalikan arah arus listrik pada BLDC yang dilakukan secara elektronik. Pembalikan arah arus listrik dikontrol berdasarkan posisi rotor, sehingga selalu ada gaya yang dialami oleh magnet pada rotor. Posisi rotor dapat terdeteksi dengan memanfaatkan sensor posisi, biasanya digunakan sensor *Hall-effect*. Sensor *Hall-effect* mendeteksi posisi rotor ditampilkan pada **Gambar 2.8**.



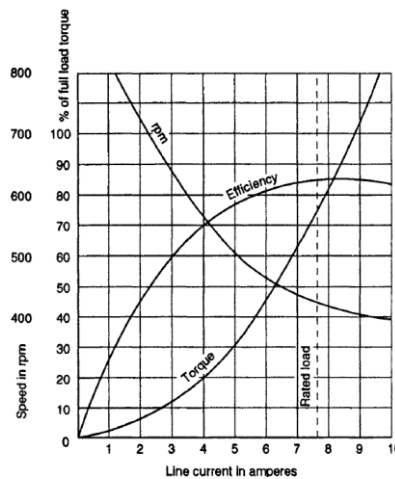
Gambar 2.8 Pendeteksi posisi rotor pada motor *brushless* DC dengan sensor efek Hall (Mahardika *et al.*, 2021).

Kecepatan perputaran motor listrik dinyatakan dalam satuan *Revolution per Minute* (RPM) yang dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.3). Torsi dari motor listrik juga dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.4).

$$n = \frac{E_A}{k_m \phi} \quad (2.3)$$

$$\tau = k_t \phi I_A \quad (2.4)$$

dengan n = kecepatan perputaran motor (RPM), E_A = *electromotive force*/EMF (V), k_m = konstanta motor, dan ϕ = fluks medan magnet (Wb), τ = torsi motor (Nm), I_A = arus armature (A), dan k_t = konstanta torsi (Chapman, 2005). Hubungan kecepatan motor DC dengan torsi berbanding terbalik, dimana kecepatan motor yang tinggi akan menghasilkan torsi yang kecil. Sebaliknya jika ingin mendapatkan torsi yang tinggi maka kecepatan motor sulit untuk mendapat kecepatan yang tinggi (Gottlieb, 1997). Grafik yang dapat menggambarkan performa kecepatan dan torsi motor DC ditampilkan pada **Gambar 2.9**.



Gambar 2.9 Hubungan kecepatan dengan torsi motor DC (Gottlieb, 1997).

Motor *brushless* DC banyak memiliki keunggulan dibanding dengan motor DC *brush*, yaitu (Gottlieb, 1997).

- a. Kecepatan putar jauh lebih tinggi dibandingkan dengan motor DC *brush*, perbandingannya hingga sekitar 75.000 RPM.
- b. Memiliki torsi yang lebih besar dari mesin yang relatif kecil dan ringan.
- c. Tidak ada *Electromagnetic Interference* (EMI) dan *Radio Frequency Interference* (RFI) yang terkait dengan armature.
- d. Motor *brushless* lebih aman pada lingkungan ekstrim.
- e. Perawatan yang lebih mudah karena tidak ada komutator dan *brush*.
- f. Tidak ada stator eksternal penyebab suhu tinggi.

g. Mekanisme dan elektrikal yang lebih sederhana.

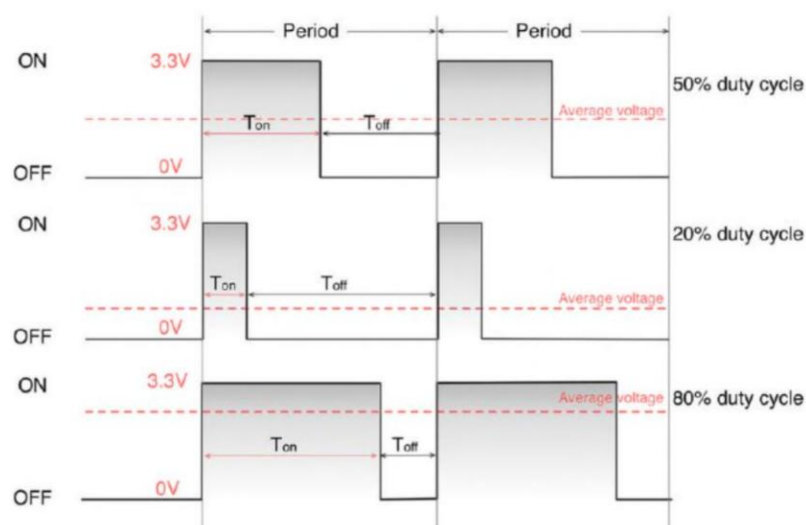
2.4 Pulse Width Modulation (PWM)

Pulse Width Modulation (PWM) merupakan suatu cara modulasi yang dilakukan dengan mengatur lebar pulsa (*duty cycle*) dengan nilai amplitudo dan frekuensi tetap. Satu siklus pulsa diwakili dengan kondisi high kemudian berada pada daerah transisi ke kondisi *low* dan lebar pulsa PWM berbanding lurus dengan amplitudo sinyal asli yang belum termodulasi (Suhaeb *et al.*, 2017). Teknik modulasi waktu ON atau waktu OFF dengan tujuan untuk mengatur lebar pulsa dapat dirumuskan seperti pada Persamaan (2.5).

$$d = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \quad (2.5)$$

dengan $d = \text{duty cycle}$, t_{on} = waktu sinyal *high* (s), dan t_{off} = waktu sinyal *low* (s).

Dengan demikian modulasi t_{on} dan t_{off} keduanya dapat bervariasi (Ang and Olivia, 2005). Biasanya *duty cycle* dituliskan dalam persen, misalnya deretan pulsa yang selalu *low* akan dituliskan *duty cycle* 0%, ataupun contoh lain pulsa *high* separuh periode dan separuh pulsa *low* maka dituliskan *duty cycle* 50% (Widodo, 2021). Grafik contoh frekuensi *duty cycle* dalam PWM ditampilkan pada **Gambar 2.10**.



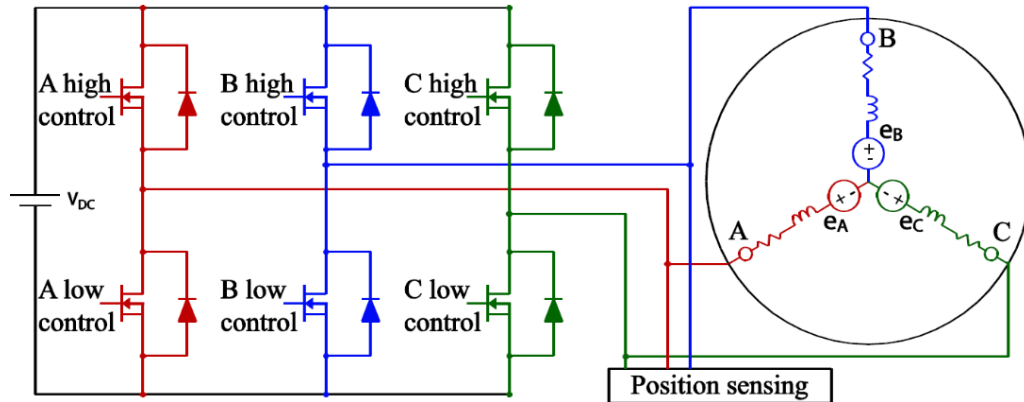
Gambar 2.10 Frekuensi *duty cycle* (Widodo, 2021).

Pada aplikasi motor DC, *duty cycle* berguna dalam proses kontrol kecepatan motor dengan rentang *duty cycle* 0% sampai 100%. Pada *duty cycle* 0% atau pada minimum sinyal, motor DC tidak akan bergerak. Pada *duty cycle* 100% atau pada maksimum sinyal, motor DC akan berputar dengan kecepatan penuh (Dern, 2015).

2.5 Electronic Speed Controller (ESC)

Electronic Speed Controller (ESC) merupakan perangkat elektronika yang memiliki peranan penting dalam mengendalikan dan mengatur kecepatan motor listrik. ESC juga dapat digunakan untuk mengubah arah putaran mesin dan pengereman dinamis (Thusnavis *et al.*, 2022). ESC harus mampu menangani arus maksimum yang akan digunakan oleh motor, dan dapat menyesuaikan pada tegangan yang tepat. Komponen kecil yang dikenal sebagai ESC inilah yang menghasilkan arus AC tiga fasa yang dibutuhkan untuk menggerakkan motor. Pengontrol mengirimkan sinyal ke ESC untuk memberitahukan seberapa cepat ia ingin memutar motor berdasar titik waktu tertentu (Sebbane, 2022). Meskipun banyak ESC dirancang untuk menerima sinyal pulsa dari sistem *Radio Controller* (RC) standar atau tegangan analog dari potensiometer, dapat pula digunakan Arduino untuk meniru pulsa atau nilai potensiometer analog. Hal ini dapat memungkinkan pengguna untuk mengontrol ESC dengan Arduino (Warren *et al.*, 2011).

ESC dapat mengontrol kecepatan dengan daya yang diberikan ke motor dinyalakan dan dimatikan secara cepat. Sakelar pengontrol yang digunakan yaitu transistor MOSFET yang dapat aktif sekitar 2.000 kali per-detik. Oleh karena itu, kecepatan motor elektronik dapat dikontrol secara efektif oleh ESC (Thusnavis *et al.*, 2022). Desain pengontrol tiga fasa ini menggunakan tiga jembatan setengah MOSFET seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.11**.



Gambar 2.11 Desain MOSFET pada ESC pengontrol kecepatan motor BLDC 3 fasa (Tefay *et al.*, 2011).

Proses kontrol kecepatan tersebut memanfaatkan kerja MOSFET aktif dan mati secara berurutan yang terorganisir agar motor bekerja secara efisien sesuai dengan **Gambar 2.11**. ESC mengontrol motor BLDC dengan mengatur arus listrik ke fase-fase motor secara bergantian, yang akan mempengaruhi arus listrik di stator dan medan magnet di rotor sehingga rotor berputar. Pengaturan ESC yang paling umum digunakan, dilakukan dengan mengatur arus tiga fase motor berbentuk trapesium dan berbeda fase 120° . Motor BLDC dapat beroperasi tanpa sensor posisi rotor, tetapi jika posisi rotor diketahui, pengontrol dapat lebih efisien dengan mengalirkan arus ke lilitan yang tepat pada waktu yang tepat untuk mencapai torsi dan kecepatan optimal. Sebagian besar motor BLDC tidak memiliki sensor posisi rotor, tetapi posisi ini dapat diperkirakan melalui back-EMF (Gaya Gerak Listrik Balik), yaitu tegangan yang dihasilkan oleh rotor saat berputar. Back EMF yang dihitung kemudian dapat digunakan untuk menentukan kapan pengontrol harus beralih ke langkah pergantian berikutnya (Tefay *et al.*, 2011).

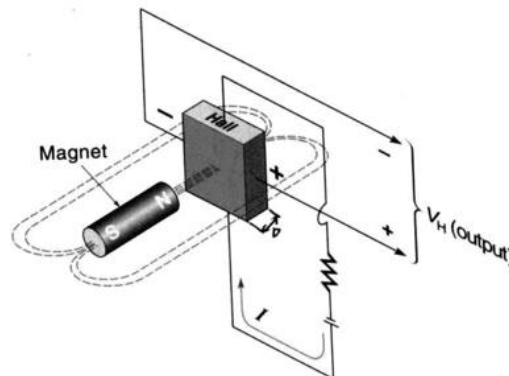
2.6 Encoder Hall Effect

Sensor *Hall effect* (efek Hall) merupakan sensor berbahan semikonduktor yang dapat menghasilkan tegangan saat berada di dalam medan magnet, terutama bahan yang digunakan yaitu berjenis germanium dan indium. Efek Hall awalnya hanya digunakan untuk watt meter dan gauss meter saja, namun saat ini banyak aplikasi dari penggunaan sensor efek Hall ini salah satunya sebagai pengukur kecepatan perputaran (*tachometer*). Pada setiap penggunaan sensor efek Hall ini

menghasilkan tegangan saat medan magnet meningkat. Peningkatan medan magnet ini dapat terjadi ketika sebuah magnet digerakkan atau terjadi perubahan lintasan medan magnet (bergantung pada keberadaan magnet). Sensor efek Hall memerlukan sumber tegangan luar yang digunakan untuk membangkitkan arus (I) di dalam kristal semikonduktor seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.12**. Tegangan keluaran (V_H) yang terukur oleh sisi kristal yang tegak lurus dengan arah arus. Saat medan magnet B didekatkan, maka muatan negatif akan terdefleksi ke satu sisi dan menghasilkan beda potensial antar kedua sisi. Hubungan tegangan dan arus tersebut dinyatakan dengan Persamaan (2.6) (Putra, 2020).

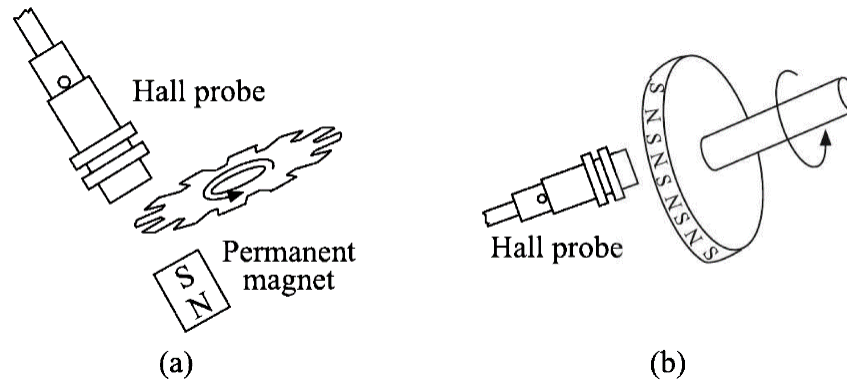
$$V_H = \frac{kIB}{d} \quad (2.6)$$

dengan V_H = tegangan efek Hall (V), k = konstanta (tergantung bahan), I = arus dari sumber tegangan luar (A), B = kerapatan fluks magnet (Tesla), dan d = tebal sensor Hall (m).



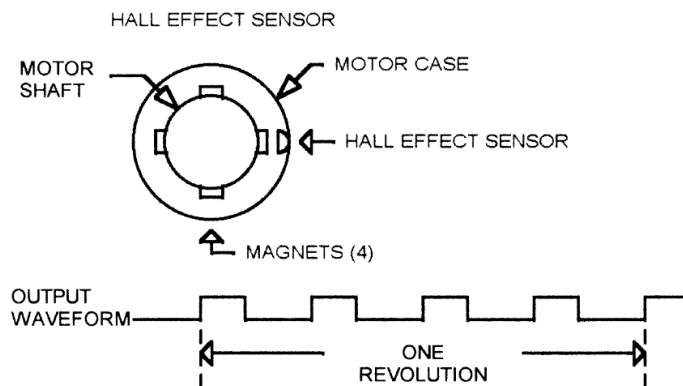
Gambar 2.12 Ilustrasi kristal semikonduktor pada efek Hall (Putra, 2020).

Aplikasi yang dapat menggunakan sensor efek Hall salah satunya ialah *encoder* takometer. *Encoder* tersebut mengukur kecepatan perputaran roda berdasarkan kecepatan pulsa induksi per putaran. Medan magnet yang dideteksi dapat berupa magnet diam dan terdapat roda feromagnetik bergigi yang terpasang pada poros yang berputar seperti pada **Gambar 2.13(a)**. Variasi celah udara yang ditimbulkan oleh bagian gigi menyebabkan variasi intensitas medan magnet B pada sensor efek Hall. Sementara terdapat alternatif lain yaitu magnet yang tertanam pada roda, sehingga magnet berputar sesuai dengan kecepatan perputaran roda seperti pada **Gambar 2.13(b)** (Ghosh, 2012).



Gambar 2.13 Sensor kecepatan (a) permanen magnet diam (b) magnet tertanam pada putaran roda (Ghosh, 2012).

Pada motor *brushless* DC biasanya menggunakan sistem *encoder* magnet yang tertanam pada poros. *Encoder* ini dapat menjadi umpan balik ke mikroprosesor mengenai posisi motor ataupun kecepatan motor. *Encoder* yang terdapat pada motor listrik ditunjukkan pada **Gambar 2.14**. Dalam skema tersebut terdapat empat magnet yang ditempatkan pada sekitar poros motor dan sensor efek Hall ditempatkan pada *casing*. Sensor efek Hall ini akan mengeluarkan empat pulsa per putaran poros motor (Ball, 2001).

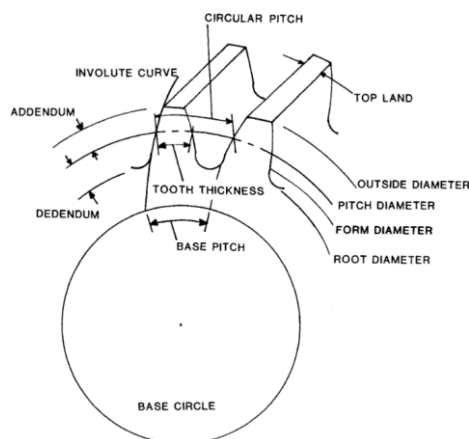


Gambar 2.14 *Encoder* efek Hall pada motor listrik (Ball, 2001).

Encoder efek Hall ini merupakan perangkat yang tangguh dan memiliki banyak keunggulan. Karena merupakan sensor non-kontak, sensor ini tidak terpengaruh oleh efek kecepatan (tegangan yang dihasilkan tidak terpengaruh perubahan magnet). Selain itu kinerja sensor tidak terlalu terpengaruh oleh faktor lingkungan, kecuali pada lingkungan yang memiliki medan magnet. Beberapa histeresis akan muncul namun bukan masalah yang serius pada sensor digital (Ball, 2001).

2.7 Gear Ratio

Gear digunakan untuk mentransmisikan gerak rotasi dari penggerak utama ke mesin yang digerakkan. Alat penggerak dan yang digerakkan dapat berotasi pada kecepatan yang berbeda, oleh karena itu memungkinkan kedua alat beroperasi pada kecepatan yang paling efisien. Ukuran *gear* yang diperlukan untuk sebuah mesin bergantung pada seberapa besar diameter *pitch* gigi dan lebarnya (Lynwander, 1983). **Gambar 2.15** menampilkan detail bagian yang terdapat pada gigi.



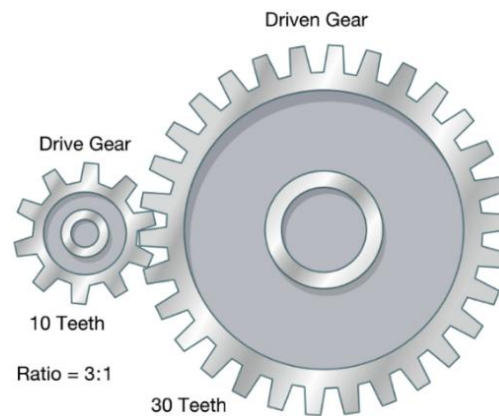
Gambar 2.15 Detail bagian pada *gear ratio* (Lynwander, 1983).

Besar daya dan gaya yang mampu ditransmisikan oleh *gear* perlu kita pertimbangkan dari kekuatan gigi rasio itu sendiri. Hasil dari transmisi gigi rasio tidak dapat meningkatkan torsi dan kecepatan putaran (RPM) secara bersamaan, karena torsi yang ditransmisikan gigi merupakan kebalikan dari kecepatan. Sehingga agar mendapatkan torsi yang lebih tinggi pada poros, maka harus digunakan gigi rasio yang lebih besar dibandingkan gigi pemutar. Hubungan torsi, kecepatan, dan jumlah gigi pada *gear* ditampilkan pada Persamaan (2.7).

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{T_1}{T_2} \quad (2.7)$$

dengan τ_1 = torsi pada *gear* 1 (Nm), τ_2 = torsi pada *gear* 2 (Nm), n_1 = kecepatan putaran *gear* 1 (RPM), n_2 = kecepatan putaran *gear* 2 (RPM), T_1 = jumlah gigi *gear* 1, dan T_2 = jumlah gigi *gear* 2 (Kosky *et al.*, 2010). Penulisan perbandingan jumlah gigi antara *gear* pemutar dengan *gear* yang diputar dilakukan dengan menuliskan gigi yang diputar terlebih dahulu, diikuti jumlah gigi *gear* pemutar. Contohnya *gear*

pemutar memiliki 10 gigi dan *gear* yang diputar memiliki 30 gigi, maka perbandingan mekanisnya dapat dituliskan 3:1 (VanGelder, 2018). Berikut ditampilkan pada **Gambar 2.16** contoh perbandingan dua *gear* dengan rasio yang berbeda ukuran.



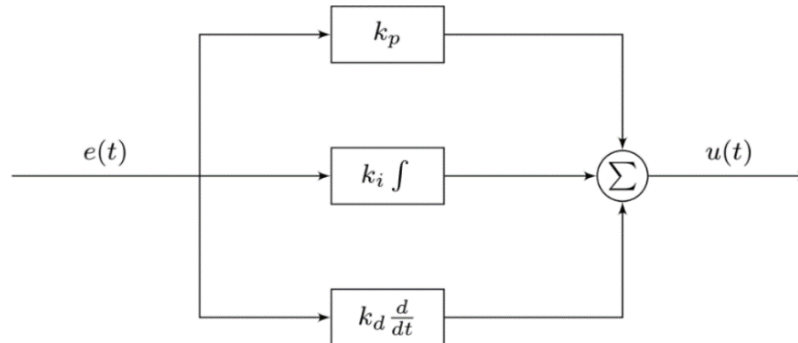
Gambar 2.16 Perbandingan dua *gear* (VanGelder, 2018).

Penggunaan *gear ratio* (gigi rasio) pada sistem yang menggunakan kontrol *Proportional Integral Derivative* (PID) dapat meningkatkan stabilitas putaran alat. Perbandingan penggunaan gigi rasio 1:1 dengan rasio 5:1 pada *setpoint* yang sama memiliki hasil rasio 1:1 dapat mencapai *setpoint* dengan cepat dibandingkan rasio 5:1. Namun pada rasio 1:1 memiliki hasil yang kurang stabil dan memiliki lebih banyak error dibandingkan dengan rasio 5:1 (Dewi *et al.*, 2021).

2.8 PID

Kontrol PID merupakan nama yang digunakan untuk kontrol dengan tiga ketentuan. Tiga ketentuan tersebut merujuk pada huruf awal PID, *Proportional Integral Derivative* (PID). Kontrol *Proportional* (P) berhubungan dengan nilai sekarang yang diperoleh dari sinyal *error*. Hal ini sebanding dengan besarnya variabel kontrol ketika sinyal *error* meningkat. Ketika hanya digunakan kontrol P, penguatan *proportional* K_p secara umum dapat mempercepat respon waktu. Namun, terdapat kemungkinan bahwa *error* keadaan stabil akan terjadi. Kontrol Integral (I) digunakan untuk mengurangi *error* keadaan stabil agar menjadi nol. Ketika menggunakan penguatan integral, nilai K_i dapat menghasilkan berbagai jenis respon selain menghilangkan kesalahan *offset*. Kontrol *Derivative* (D) sering digunakan untuk meningkatkan redaman dan stabilitas *close-loop*. Hal ini berhubungan

dengan kemungkinan nilai sinyal *error* yang akan terjadi berdasarkan tingkat perubahan saat ini (Díaz-Rodríguez *et al.*, 2019). Dari ketiga ketentuan PID tersebut dapat digambarkan diagram kontrol seperti pada **Gambar 2.17**.



Gambar 2.17 Blok diagram kontrol PID (Díaz-Rodríguez *et al.*, 2019).

Struktur PID yang umum digunakan yaitu struktur kontrol PID paralel, bentuk persamaannya ditampilkan pada Persamaan (2.8).

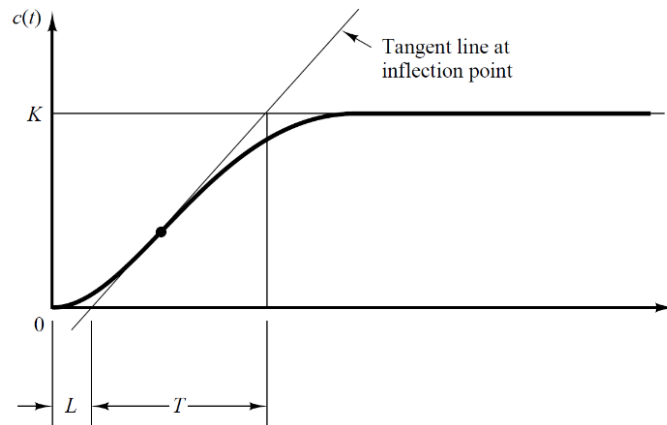
$$C(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2.8)$$

dengan $C(t)$ = *output* kontroler (s), $e(t)$ = selisih antara *setpoint* dengan nilai *output* proses (s), T_i = *time integral* (s), dan T_d = *time derivative* (s). Struktur PID pada Persamaan (2.8) dikenal dengan sebutan PID *dependent*, karena setiap suku persamaan bergantung (dependensi) terhadap nilai gain *proportional* (K_p). Dalam kawasan Laplace, Persamaan (2.8) dapat dituliskan seperti pada Persamaan (2.9) (Setiawan, 2008).

$$C(s) = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] e(s) \quad (2.9)$$

Proses pemilihan parameter kontrol untuk memenuhi spesifikasi kinerja yang diberikan dikenal dengan *controller tuning*. Ziegler dan Nichols menyarankan sebuah aturan untuk mengatur kontrol PID dengan menetapkan nilai K_p , T_i , dan T_d berdasarkan respon dari eksperimental atau berdasarkan nilai yang menghasilkan stabilitas baik. Terdapat dua metode pengatur Ziegler-Nichols, metode pertama dan metode kedua.

Metode pertama, pada metode ini kita memperoleh respon *plant* secara eksperimental terhadap masukan *unit-step*. Jika *plant* tidak melibatkan integrator yang dominan, maka kurva merespon *unit-step* tersebut seperti berbentuk *S* seperti pada **Gambar 2.18**. Kurva berbentuk *S* dapat dicirikan oleh dua konstanta, yaitu waktu tunda L dan konstanta waktu T . Parameter *tuning* Ziegler dan Nichols metode pertama ditampilkan pada **Tabel 2.1** (Ogata, 2010).



Gambar 2.18 Respon kurva berbentuk S (Ogata, 2010).

Tabel 2.1 Parameter *tuning* metode pertama Ziegler-Nichols

Tipe kontroler	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0,9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2\frac{T}{L}$	$2L$	$0,5L$

Metode kedua, pertama akan ditetapkan $T_i = \infty$ dan $T_d = 0$. Dengan hanya menggunakan kontrol *proportional*, K_p dinaikkan dari 0 ke nilai kritis K_c hingga keluaran pertama kali menunjukkan osilasi berkelanjutan. Parameter *tuning* Ziegler dan Nichols metode kedua ditampilkan pada **Tabel 2.2** (Ogata, 2010).

Tabel 2.2 Parameter *tuning* metode kedua Ziegler-Nichols

Tipe kontroler	K_p	T_i	T_d
P	$0,5K_c$	∞	0
PI	$0,45K_c$	$\frac{1}{1,2}P_c$	0
PID	$0,6K_c$	$0,5P_c$	$0,125P_c$

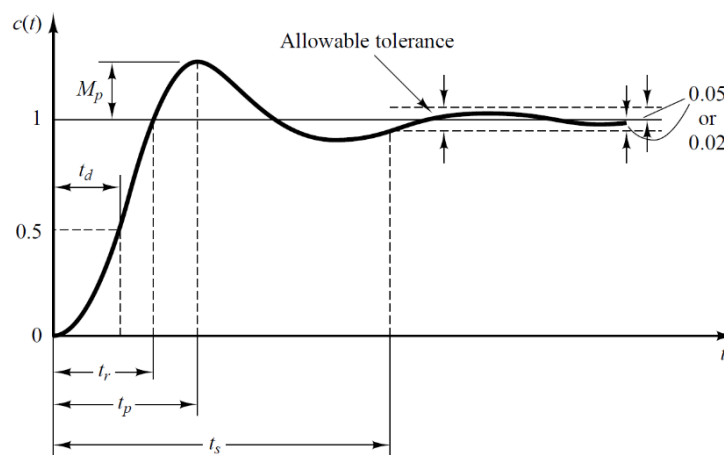
Karakteristik kinerja sistem kontrol dinilai berdasarkan respon alat terhadap waktu, karena sistem memiliki perubahan yang cukup signifikan. Respon ini dipengaruhi oleh kondisi awal sistem yang umumnya kondisi awal dalam keadaan diam. Dengan cara ini, respon dari berbagai kontrol sistem dapat dibandingkan dengan lebih mudah. Respon sistem kontrol sering kali menunjukkan adanya osilasi sebelum mencapai kondisi stabil. Dalam menentukan karakteristik respon yang diinginkan, terdapat beberapa parameter acuan yang akan diperhatikan yaitu.

- Rise time* (t_r), merupakan waktu respon sistem dari keadaan diam hingga mencapai *setpoint* yang ditentukan.
- Maximum overshoot* (M_s), merupakan nilai puncak pengukuran yang terjadi pada awal respon sistem hingga sistem stabil. Perhitungan persentase *overshoot* yaitu.

$$\text{Maximum overshoot} = \frac{\text{Peak} - \text{Setpoint}}{\text{Setpoint}} \times 100\% \quad (2.10)$$

- Settling time* (t_s), merupakan waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai keadaan stabil.
- Steady State*, merupakan kondisi di mana sistem telah mencapai keadaan stabil setelah melewati *settling time*. Pada tahap ini, meskipun mungkin masih terjadi sedikit osilasi, osilasi tersebut tetap berada dalam batas toleransi yang dapat diterima, sehingga sistem dianggap telah bekerja secara baik.

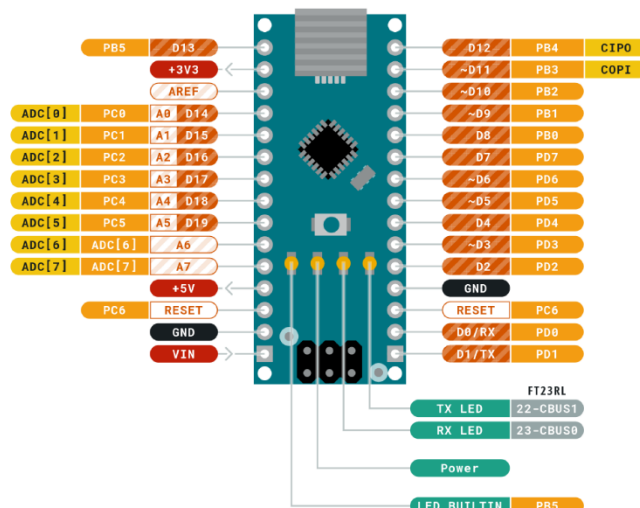
Dari definisi beberapa parameter acuan tersebut, keadaan respon sistem dalam bentuk grafik ditampilkan pada **Gambar 2.19** (Ogata, 2010).



Gambar 2.19 Parameter acuan respon sistem PID (Ogata, 2010).

2.9 Arduino Nano

Arduino Nano merupakan papan mikrokontroler berukuran kecil yang menggunakan IC Atmega328P. Arduino Nano ini memiliki fungsi dan spesifikasi yang kurang lebih sama dengan Arduino Uno, hanya dalam ukuran yang berbeda. Dengan ukurannya yang kecil maka Arduino Nano memiliki kelebihan salah satunya ramah lingkungan, padat, diandalkan, dan mikrokontroler mudah dipahami. Pin yang terdapat pada Arduino Nano ditampilkan pada **Gambar 2.20**. Pada Arduino Nano pin digital diberi huruf “D” pada bagian depan, contohnya seperti pin D2, D3 dan seterusnya. Kemudian pada pin PWM Arduino Nano diberikan tanda “~” pada bagian depan (Widharma, 2022).



Gambar 2.20 Pin outs Arduino Nano (Arduino, 2022).

Spesifikasi Arduino Nano ditampilkan pada **Tabel 2.3**. Pin LED berada pada pin 13 yang berfungsi untuk menyalakan LED yang terpasang *built-in* pada papan. Terdapat 14 pin digital I/O yang dapat digunakan untuk membaca sinyal digital berupa nilai 0 atau “LOW” dan 1 atau “HIGH”. Dari 14 pin digital tersebut, terdapat 6 pin PWM yang ditandai dengan tanda “~” berfungsi untuk menggunakan fitur *Pulse Width Modulation* (PWM). Kemudian pin yang digunakan untuk menerima TTL data serial yaitu pin RX dan yang berfungsi untuk mengirim TTL data serial yaitu pin TX. Selain pin digital terdapat 8 pin analog yang ditandai dengan huruf “A” di bagian depan pin. Dari ke-delapan pin tersebut terdapat pin SDA dan SCL. Pin SDA berfungsi sebagai pin komunikasi data I2C atau *Two Wire Interface* (TWI)

dan pin SCL berfungsi sebagai penghantar sinyal *clock* guna memungkinkan terjadinya komunikasi I2C atau TWI (Widharma, 2022).

Tabel 2.3 Spesifikasi Arduino Nano (Arduino, 2022)

Komponen	Spesifikasi
Mikrokontroler	Atmega328
USB	Mini-B USB
Pin LED	Pada pin 13
Pin digital I/O	14
Pin <i>input</i> analog	8
Pin PWM	6
UART	RX/TX
I2C	A4 (SDA), A5 (SCL)
Tegangan I/O	5 V
Tegangan <i>input</i>	7-12 V
Arus DC per I/O pin	20 mA
<i>Clock speed</i>	Atmega 328 16 MHz
Memori	2 kB SRAM, 32 kB Flash, 1 kB EEPROM
Bobot	7 g
Lebar	18 mm
Panjang	45 mm

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini akan dilaksanakan mulai bulan Mei sampai November 2024, dengan rentang waktu yang mencakup beberapa bulan untuk menjamin keakuratan dan kelengkapan proses penelitian. Tahapan penelitian ini terdiri dari studi literatur, perancangan alat, perancangan sistem elektronik, perancangan sistem gerak rotor, perancangan sensor pengukur kecepatan efek Hall, perancangan sistem *Proportional, Integral* dan *Derivative* (PID), pengambilan data, dan analisis hasil. Tempat pelaksanaan desain, perancangan, dan pengujian alat akan dilakukan di Laboratorium Elektronika Dasar Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Alat yang digunakan pada penelitian ini ditampilkan pada **Tabel 3.1**.

Tabel 3.1 Alat penelitian dan fungsinya

No	Nama Alat	Fungsi
1	Multimeter Zotek ZT102	Mengukur tegangan, arus, dan hambatan
2	Mesin bor Mailtank SH191	Membuat lubang pada kotak alat
3	Mesin gerinda Isku 500 W	Memotong kotak alat
4	Solder Tekiro 60 W	Merakit ataupun membongkar rangkaian elektronika
5	Laptop Asus Vivobook 14X	Membuat program dan mengolah data
6	Kabel USB	Mengunggah program ke papan Arduino Nano
7	<i>Toolkit</i>	Menunjang proses pembuatan alat
8	Penggaris	Mengukur panjang dan lebar

No	Nama Alat	Fungsi
9	<i>Stopwatch</i>	Mengukur waktu kerja alat
10	<i>Tachometer DT-2234C+</i>	Mengukur kecepatan putaran rotor

Bahan yang digunakan pada penelitian ini ditampilkan pada **Tabel 3.2**.

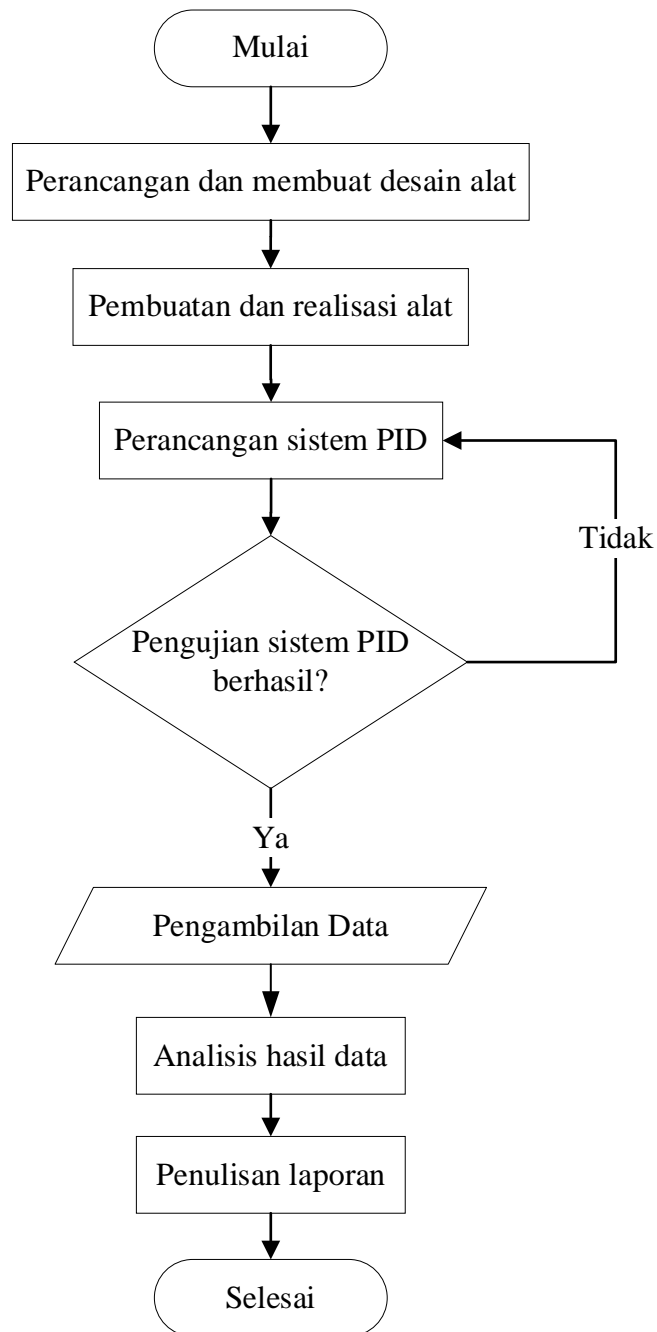
Tabel 3.2 Bahan penelitian dan fungsinya

No	Nama Bahan	Fungsi
1	Arduino Nano	Sistem kontrol masukan keluaran dan pemroses data
2	Motor <i>Brushless</i> DC 3650 4500 kv	Mengubah energi listrik menjadi energi mekanik
3	Sensor efek Hall A3144	<i>Encoder</i> pengukur kecepatan perputaran alat
4	<i>Gear ratio</i> 64:21	Memperbesar torsi motor <i>brushless</i> DC
5	ESC 30 A	Mengontrol kecepatan motor <i>brushless</i> DC sesuai <i>setpoint</i> dari mikrokontroler
6	Sakelar	Menghidupkan atau mematikan alat
7	<i>Button</i>	Menjalankan atau memberhentikan alat bekerja
8	<i>Buzzer</i> aktif	Indikator ujung nilai masukan
9	<i>Liquid Crystal Display</i> (LCD) 128x64	Menampilkan proses pemilihan kecepatan dan waktu kerja alat
10	<i>Power supply</i> 12 V	Memberikan daya listrik
11	Kabel penghubung	Menghubungkan seluruh komponen elektronik
12	Timah 60/40	Menyambung antar komponen
13	Papan PCB	Merangkai seluruh komponen elektronik
14	Magnet neodmium 4 mm	<i>Encoder</i> kecepatan perputaran rotor
15	<i>Bearing</i> 695 ZZ	Menahan poros rotor
16	<i>Rotary encoder</i>	Pemilih kecepatan dan waktu kerja alat

3.3 Prosedur Penelitian

Penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan antara lain membuat desain alat, perancangan elektronik, perancangan sistem gerak alat, perancangan sensor kecepatan efek Hall, pengujian alat, perancangan sistem *Proportional*, *Integral* dan *Derivative* (PID), dan pengambilan data. Secara keseluruhan prosedur penelitian

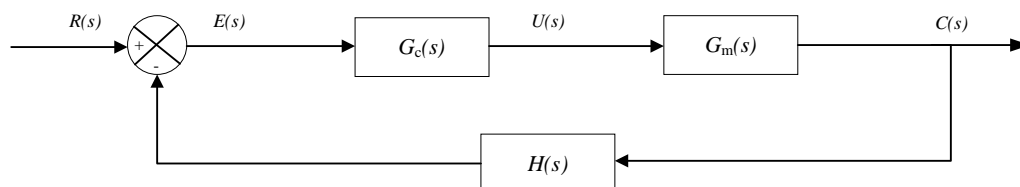
mengenai desain dan realisasi sistem kontrol motor *brushless* DC menggunakan metode PID ditunjukkan dalam diagram alir pada **Gambar 3.1**.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.

Dalam proses pembuatan dan realisasi alat terdapat proses pengendalian kecepatan motor *brushless* DC secara *close loop* dengan masukan sesuai *setpoint* yang ditentukan pengguna. Masukan *setpoint* dari pengguna akan diterima Arduino

Nano, kemudian akan mengirimkan sinyal PWM ke ESC dan motor *brushless* DC akan berputar. Putaran motor akan diukur kecepatannya dengan sensor efek Hall dan menjadi *feedback* ke Arduino agar kecepatan tetap dijaga. Berikut ini adalah diagram blok pengendalian motor *brushless* DC yang akan digunakan untuk aplikasi alat sentrifugasi yang diperlihatkan pada **Gambar 3.2**.



Gambar 3.2 Diagram blok pengendalian motor.

Dari **Gambar 3.2** kita definisikan:

$R(s)$ = *Setpoint*

$E(s)$ = *Error* antara *output* dengan *setpoint*

$G_c(s)$ = Fungsi transfer kontroler PID

$U(s)$ = Sinyal kontrol dari PID

$G_m(s)$ = Fungsi transfer motor *brushless* DC

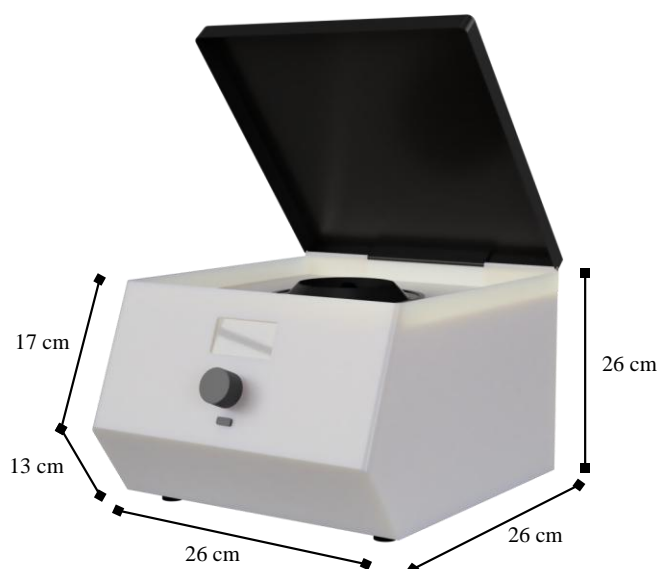
$H(s)$ = Fungsi transfer sensor

$C(s)$ = *Output*

Sistem memiliki masukan dari *rotary encoder*, tombol dan sensor efek Hall, kemudian mikrokontroler akan menerima dan mengolah nilai yang ada dan langsung menampilkan pada LCD. Masukan nilai dari *encoder* putar memiliki kelipatan 500 RPM pada pemilihan kecepatan hingga 6.500 RPM, dan kelipatan 60 detik pada pemilihan waktu kerja hingga 1.800 detik. Nilai yang diterima mikrokontroler juga akan menghasilkan perintah sinyal berbentuk PWM yang dikirimkan ke ESC. Sinyal perintah dari mikrokontroler tersebut membuat motor *brushless* DC akan bekerja sesuai dengan kecepatan dan waktu yang diminta. Untuk memastikan kecepatan rotor sesuai dengan perintah, digunakan sensor efek Hall yang akan memberikan *feedback* ke mikrokontroler mengenai seberapa cepat putaran rotor alat sentrifugasi. *Feedback* hasil pengukuran sensor efek Hall ini juga yang akan menjadi data kontrol PID.

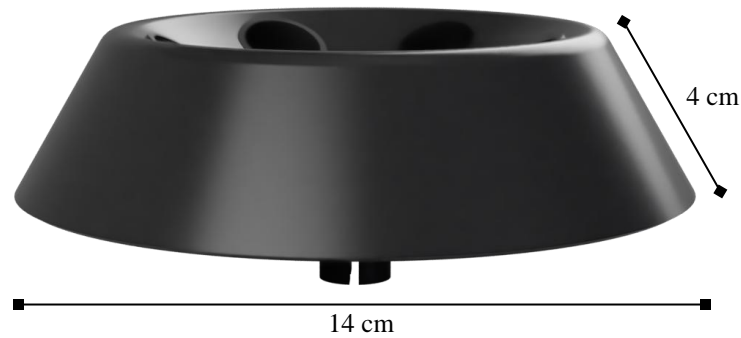
3.4 Desain dan Perancangan Alat

Desain sistem kontrol kecepatan menggunakan motor *brushless* DC ini menggunakan *body* berbahan pipa *Polivinil Klorida* (PVC) yang dibentuk sedemikian rupa sesuai dengan rancangan kotak alat, pada bagian rotor dicetak menggunakan *3D printing* berbahan plastik *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS) dengan 6 lubang *tube*, pada bagian belakang kotak terdapat *connector* kabel sumber arus AC 220V, dan pada bagian depan terdapat LCD 128x64, knop *encoder* putar, dan *button*. Desain alat sentrifugasi ini ditunjukkan pada **Gambar 3.3**.



Gambar 3.3 Desain alat penelitian.

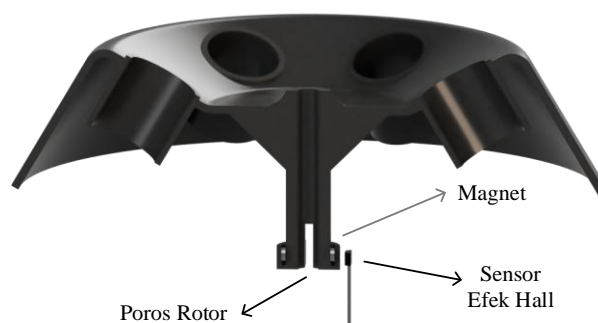
Rotor *centrifuge* yang dicetak menggunakan teknologi *3D printing* dari bahan ABS merupakan komponen utama dalam alat sentrifugasi yang dirancang untuk mengakomodasi enam tabung uji sekaligus. Rotor ini memiliki bentuk melingkar dengan enam lubang yang terletak secara simetris di sekelilingnya, memungkinkan distribusi berat yang seimbang saat berputar dengan kecepatan tinggi. Setiap lubang didesain untuk menahan tabung uji dengan aman, mengurangi risiko getaran atau pergeseran selama proses sentrifugasi. Desain rotor *centrifuge* ditampilkan pada **Gambar 3.4**.



Gambar 3.4 Desain rotor *centrifuge*.

3.4.1 Perancangan Sensor Kecepatan Putar Efek Hall

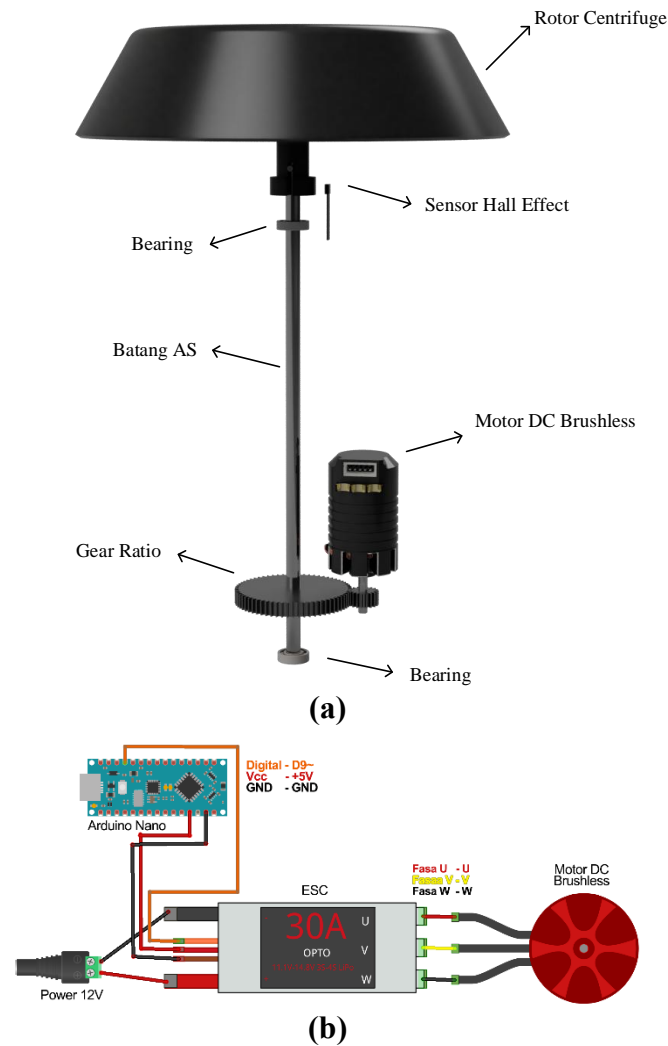
Kecepatan rotor *centrifuge* akan diukur menggunakan sensor efek Hall yang diukur berdasarkan interval waktu antar pulsa induksi. Magnet tertanam pada rotor, sehingga magnet berputar sesuai dengan kecepatan perputaran roda. Pengukuran kecepatan perputaran menggunakan sensor efek Hall ini juga dapat disebut sebagai *encoder* efek Hall. *Encoder* ini dapat menjadi umpan balik ke mikrokontroler sebagai acuan kecepatan agar selalu konstan. *Encoder* ini dipilih karena sensor ini termasuk sensor non-kontak, sehingga sensor diharapkan tidak terpengaruh oleh gangguan lingkungan. Desain *encoder* yang dipasangkan pada rotor *centrifuge* ditampilkan pada **Gambar 3.5**.



Gambar 3.5 *Encoder* sensor efek Hall pada rotor.

3.4.2 Perancangan Sistem Gerak Rotor

Komponen yang digunakan dalam sistem gerak rotor adalah rotor *centrifuge*, poros rotor, *bearing*, *gear ratio*, ESC, dan motor *brushless* DC. Desain rancangan sistem gerak ditampilkan pada **Gambar 3.6**.



Gambar 3.6 Sistem gerak rotor (a) Desain 3D sistem gerak (b) Skematik sistem gerak.

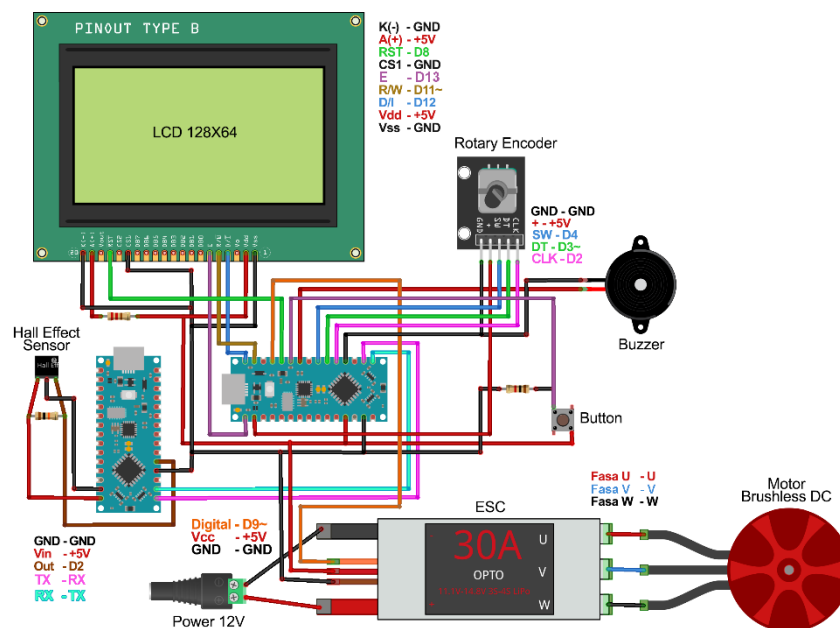
Ditampilkan pada **Gambar 3.6** desain sistem gerak rotor alat sentrifugasi yang akan dibuat. Keterangan lengkap dari skematik dituliskan sebagai berikut.

1. Rotor *centrifuge* sebagai tempat dimana sampel akan ditempatkan. Rotor ini dibuat menggunakan 3D printing berbahan ABS dan diharapkan mampu digunakan dalam kecepatan putaran tinggi.

2. *Bearing* berfungsi untuk menopang poros rotor dan *bearing* ini yang akan bersentuhan dengan *body* alat.
3. Batang poros berfungsi sebagai poros utama yang akan menopang rotor.
4. *Gear ratio* digunakan untuk memperoleh torsi lebih besar yang dihasilkan oleh motor *brushless* DC.
5. Motor *brushless* DC dipilih karena motor ini memiliki kecepatan tinggi. Kecepatan motor dapat mencapai 40.000 RPM ketika tidak ada beban. Tegangan yang dibutuhkan motor *brushless* DC yaitu sebesar 12 V.

3.4.3 Perancangan Perangkat Lunak

Komponen yang digunakan dalam sistem adalah sensor efek Hall A3144, Arduino Nano, *Liquid Crystal Display* (LCD) 128×64, *rotary encoder*, *buzzer* dan *button*. Desain skematik perancangan sistem ditunjukkan pada **Gambar 3.7**.



Gambar 3.7 Skematik sistem alat sentrifugasi.

Ditampilkan pada **Gambar 3.7** desain skematik rangkaian sistem dari alat sentrifugasi yang akan dibuat. Keterangan lengkap dari skematik dituliskan sebagai berikut.

1. Sensor Efek Hall A3144 sebagai pengukur kecepatan perputaran rotor dengan memanfaatkan magnet yang ada pada rotor, sehingga dapat diperoleh hasil

interval waktu antar pulsa pada tiap putaran rotor *centrifuge*. Sensor ini terhubung dengan Arduino ke-2 dengan pin *output* sensor ke pin D2 dan dibutuhkan tegangan sebesar 5V.

2. *Liquid Crystal Display* (LCD) 128×64 sebagai penampil dalam proses memilih kecepatan dan waktu kerja alat. Selain itu, pada layar LCD akan ditampilkan waktu mundur pada saat alat bekerja hingga selesai. Pin LCD tidak seluruhnya dihubungkan dengan Arduino, hanya pin RST yang dihubungkan dengan pin D8, pin SC1 dihubungkan dengan pin GND, pin E dihubungkan dengan pin D13~, pin R/W dihubungkan dengan pin D11, pin D/I dihubungkan dengan pin D12, pin Vdd dan pin A(+) sebagai *input* tegangan LCD sebesar 5V, pin K(-) dan pin Vss sebagai GND.
3. *Rotary Encoder* atau *encoder* putar digunakan sebagai pemilih kecepatan dan waktu kerja alat. *Encoder* putar merupakan sensor yang mendeteksi posisi dengan mengubah perpindahan mekanis rotasi menjadi sinyal listrik. Pin yang digunakan yaitu pin SW dihubungkan dengan pin D4, pin DT dihubungkan dengan pin D3~, pin CLK dihubungkan dengan pin D2, dan *encoder* putar membutuhkan tegangan 3,3V.
4. *Button* atau tombol dalam rangkaian alat ini digunakan 1 buah, tombol tersebut memiliki fungsi untuk memerintahkan alat untuk bekerja.
5. *Buzzer* digunakan sebagai indikator ujung pemilihan kecepatan dan waktu pada *encoder* putar. Ketika pengguna memutar *encoder* putar kurang dari minimum atau melebihi maksimum masukan, maka *buzzer* akan berbunyi sebagai indikasi batas nilai.

3.5 Pengujian Alat

3.5.1 Pengambilan Nilai Kalibrasi Kecepatan

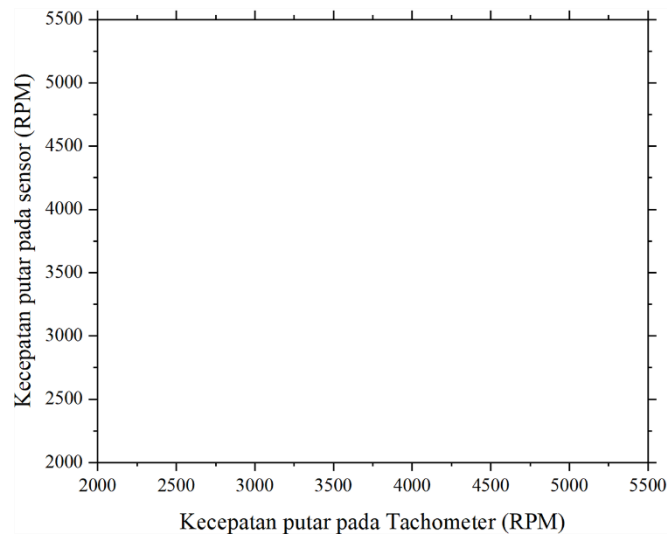
Proses pengujian alat diawali dengan mengkalibrasi sensor efek Hall dengan membandingkan hasil pengukuran yang diperoleh dengan standar yang telah ditetapkan yaitu menggunakan alat kalibrasi yang sesuai. Alat kalibrasi yang digunakan pada penelitian ini yaitu *tachometer* digital bertipe DT-2234C+. Pengujian dilakukan dengan 3 kali perulangan untuk memastikan konsistensi dan

akurasi hasil yang diperoleh. Setiap pengujian diatur *setpoint* pada berbagai variasi kecepatan yang terendah hingga tertinggi untuk memastikan responsibilitas dan keakurasian sensor. Selama proses pengujian, hasil pengukuran sensor dan alat kalibrasi dicatat pada setiap pengujian yang dilakukan. Setelah data terkumpul akan dilakukan analisis pada langkah selanjutnya. Data hasil pengujian sensor efek Hall ditampilkan pada **Tabel 3.3**.

Tabel 3.3 Data hasil pengujian dan kalibrasi sensor efek Hall

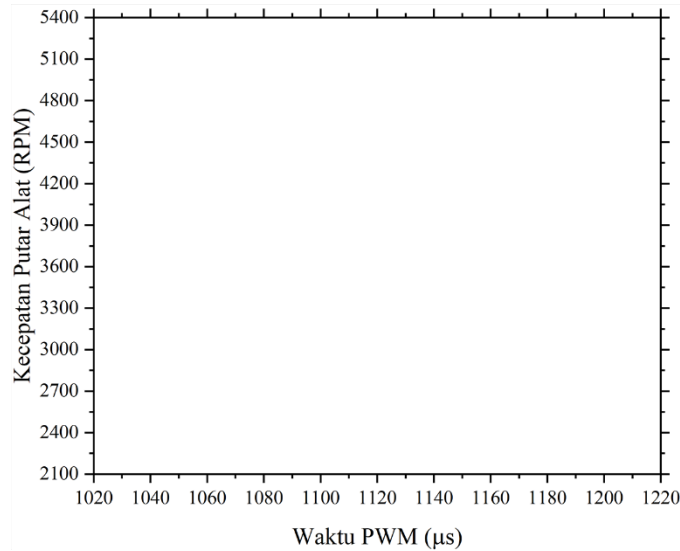
PWM (μ s)	Kecepatan putar alat (RPM)						
	Tachometer			Rata-rata	Sensor efek Hall		
	1	2	3		1	2	3
1000							
...							
...							

Data hasil pengujian sensor efek Hall yang diperoleh kemudian dianalisis. Data pengamatan yang diperoleh akan disajikan ke dalam bentuk kurva grafik yang ditampilkan pada **Gambar 3.8**. Hasil analisis tersebut dapat digunakan untuk mengetahui seberapa linier data pengukuran sensor efek Hall dengan alat kalibrasi *tachometer*.



Gambar 3.8 Grafik hasil pengujian sensor efek Hall.

Selain pengujian pengukuran sensor terhadap *tachometer*, terdapat pengujian nilai PWM masukkan dengan pengukuran sensor yang telah dikalibrasi sebelumnya. Hasil visualisasi data pengukuran sensor terhadap PWM ditampilkan pada **Gambar 3.9**.



Gambar 3.9 Pengujian kecepatan motor terhadap PWM masukan.

Data hasil pengujian yang diperoleh akan dihitung nilai kesalahan dan akurasi menggunakan Persamaan (3.1) dan Persamaan (3.2).

$$E(\%) = \left| \frac{Y - X_n}{Y} \right| \times 100\% \quad (3.1)$$

$$A(\%) = \left[1 - \left| \frac{X - \overline{X}_n}{\overline{X}_n} \right| \right] \times 100\% \quad (3.2)$$

dengan Y = nilai parameter referensi, X_n = nilai parameter ke- n pada sensor, dan \overline{X}_n = nilai rata-rata keseluruhan parameter n pada sensor.

3.5.2 Pengujian Waktu Kerja Alat Sentrifugasi

Selain pengujian sensor kecepatan motor, akan diuji waktu kerja alat sentrifugasi dengan membandingkan menggunakan *stopwatch*. Alat sentrifugasi ini dapat berjalan sesuai dengan waktu masukan dari pengguna pada *encoder* putar. Pemilihan waktu pada *encoder* putar memiliki kelipatan 60 detik hingga maksimum waktu 1.800 detik. Pengujian waktu kerja alat dengan membandingkan menggunakan *stopwatch* akan dihitung kesalahan, akurasi, dan presisi waktu kerja alat. Data hasil dari pengujian waktu kerja alat ditampilkan pada **Tabel 3.4**.

Tabel 3.4 Data hasil pengujian dan perhitungan waktu kerja alat

No	Input (s)	Stopwatch (s)			Rata-rata	Akurasi (%)	Error (%)
		1	2	3			
1							
2							
3							
...							

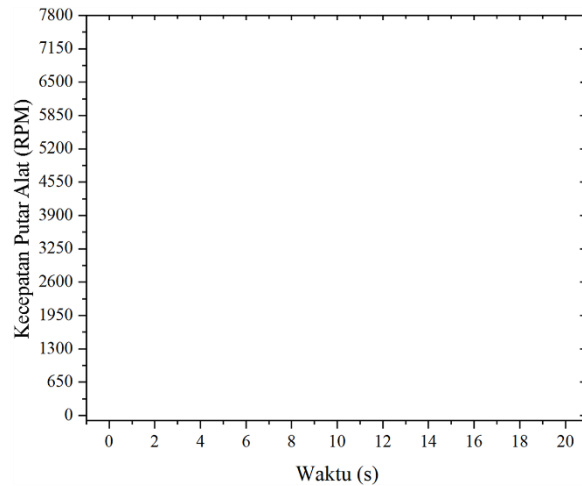
3.5.3 Pengujian Kontrol PID pada Variasi *Setpoint*

Setelah alat sudah memperoleh hasil kalibrasi dan pengujian waktu yang baik, dapat dilakukan *tuning* PID untuk memperoleh hasil putaran rotor yang lebih stabil. Proses *tuning* PID ini dilakukan dengan *trial and error* hingga mendapat hasil yang diinginkan. Hasil pengujian *tuning* PID dengan mencari konstanta *proportional*, konstanta integral, dan konstanta *derivative* maka akan diperoleh data stabilitas rotor pada setiap *setpoint* alat sentrifugasi. Kontrol PID diimplementasikan untuk mengoreksi setiap pergerakan rotor yang mengalami *overshoot*, *rise time*, *settling time*, dan *steady state*. Hasil dari implementasi kontrol PID dengan rata-rata kecepatan saat *steady state* disajikan pada **Tabel 3.5**.

Tabel 3.5 Data hasil pengujian dan perhitungan kecepatan rotor

No	<i>Setpoint</i> (RPM)	Kecepatan putar alat (RPM)			Rata-rata	<i>Tachometer</i>	Akurasi (%)	Error (%)
		Alat						
		1	2	3				
1								
2								
3								
...								

Analisis data berupa grafik hasil kalibrasi yang diperoleh dari pengujian alat sentrifugasi terhadap masukan kecepatan *setpoint* alat ditunjukkan pada **Gambar 3.10**.



Gambar 3.10 Hasil pengujian stabilitas PID.

Hasil analisis *overshoot*, *rise time*, *settling time*, dan *steady state* pada tiap *setpoint* yang diuji ditampilkan pada **Tabel 3.6**.

Tabel 3.6 Respon alat sentrifugasi pada tiap *setpoint*

No	Setpoint	Respon alat sentrifugasi		
		Rise time (s)	Overshoot (%)	Settling time (s)
1				
2				
3				
...				

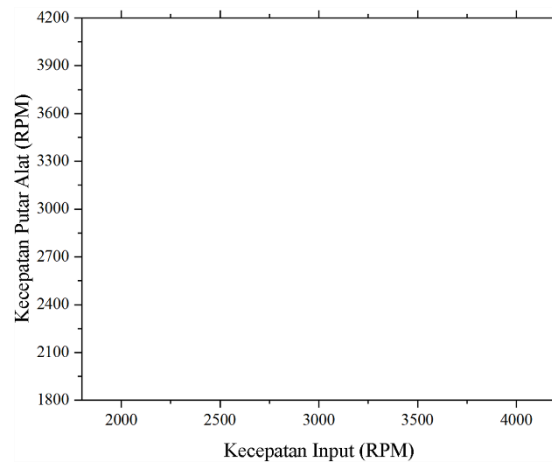
3.5.4 Pengujian Beban Tabung Sentrifugasi

Setelah alat sentrifugasi mendapat hasil kontrol PID yang diinginkan baik pada aspek *rise time*, *overshoot*, *settling time*, akurasi, dan *error*. Dilakukan pengujian beban pada alat sentrifugasi untuk mengetahui kecepatan terendah dan tertinggi yang dapat dicapai oleh alat. Hasil pengujian ini disajikan dalam **Tabel 3.7** yang menunjukkan kecepatan terendah dan tertinggi alat pada variasi beban, sehingga dapat dianalisis performa optimal alat sentrifugasi.

Tabel 3.7 Data pengujian variasi beban tabung sentrifugasi

No	Input (RPM)	2000
	Beban (g)				
1					
2					
3					
...					

Hasil data pengujian beban ditampilkan dalam bentuk grafik menunjukkan kemampuan performa alat pada kecepatan terendah yang dapat dilakukan. Dapat dianalisis bahwa pengaruh antara beban dan kecepatan putaran alat memiliki batasan pada berbagai kondisi beban. Pengaruh beban pada kecepatan putar alat ditampilkan pada **Gambar 3.11**.



Gambar 3.11 Pengaruh variasi beban terhadap kecepatan alat.

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Berdasarkan hasil pengujian, pengukuran dan pengamatan dari penelitian ini maka dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Alat sentrifugasi dengan kontrol PID berbasis Arduino Nano berhasil dirancang dan direalisasi dengan baik. Sistem ini mampu mengontrol kecepatan motor *brushless* secara presisi sesuai dengan rentang *setpoint* yang ditentukan.
2. Penerapan kontrol PID pada alat sentrifugasi secara signifikan dapat meningkatkan stabilitas kecepatan motor. Dengan menggunakan kontrol PID, stabilitas terbaik yang dicapai dengan 4,7 detik terjadi pada kecepatan 2.500 RPM dan stabilitas terendah yang dicapai dengan 7,2 detik terjadi pada 6.000 RPM. Akurasi terbaik pada kecepatan 3.000 RPM yaitu 100% dan akurasi terendah terjadi pada kecepatan 4.000 dan 6.500 RPM yaitu 99,91%.
3. Hasil pengujian menunjukkan bahwa motor *brushless* DC yang diimplementasikan pada alat sentrifugasi memiliki performa yang baik dalam kecepatan dan stabilitas. Dalam kondisi beban 30, 60, dan 90 gram motor dapat beroperasi dengan optimal pada rentang 2.000 hingga 3.000 RPM. Pada rentang tersebut kinerja yang paling sesuai dan ideal untuk mencapai kecepatan yang diharapkan.

5.2 Saran

Saran yang dapat dilakukan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. Mengurangi penggunaan komponen mekanikal seperti *gear ratio* agar mengurangi kebisingan antar gesekan mekanik.
2. Menggunakan motor yang memiliki torsi yang lebih besar agar ketika diberikan beban tidak akan mempengaruhi performa kecepatan motor.
3. Mengubah rotor sentrifugasi menjadi mikro sentrifugasi, dengan fungsi sentrifugasi dengan beban yang lebih rendah.

DAFTAR PUSTAKA

- Aji, G. K., Purwanto, D., & Rivai, M. (2019). Pengendali Kecepatan pada Alat Sentrifugasi Menggunakan Metode Logika Fuzzy. *Jurnal Teknik ITS*, 7(2), A325–A330.
- Alfian, R., & Nugroho, A. K. (2021). Perancangan mesin centrifuge berbasis kontrol pulse width modulation (PWM) dengan menggunakan mikrokontroler node mcu untuk memisahkan partikel organel darah. *Skripsi*. Universitas Semarang.
- Ang, S., & Olivia, A. (2005). *Power Switching Converters* (2nd ed.). CRC Press. USA.
- Anonim. (2013). *ClickEncoder*. Github. <https://github.com/0xPIT/encoder>
- Anugrah, R. F., Diah, I., & Dewantara, B. Y. (2020). Kontrol Motor Brushless DC Menggunakan Six Step Comutation dengan Kontrol PID (Proportional Integral Derivative). *Jurnal Teknik Elektro Dan Komputer TRIAC*, 7(2), 1–7.
- Arduino. (2022). *Arduino Nano*. <https://docs.arduino.cc/hardware/nano>
- Ball, S. (2001). *Analog Interfacing to Embedded Microprocessors*. Butterworth Heinemann. USA.
- Byagathvalli, G., Pomerantz, A., Sinha, S., Standev, J., & Bhamla, M. S. (2019). A 3D-printed hand-powered centrifuge for molecular biology. *PLOS Biology*, 17(5), 1–10.
- Chapman, S. J. (2005). *Electric Machinery Fundamentals* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Dern, J. (2015). *Embedded Software: Striving for Excellence in Development*. Books on Demand GmbH. USA.
- Dewi, A. sandra, Arifin, Z., & Adiyasa. (2021). Study case ratio gear of stepper motor on electronic throttle using PID control. *Journal of Engineering and Applied Technology*, 2(1), 36–42.
- Díaz-Rodríguez, I. D., Han, S., & Bhattacharyya, S. P. (2019). *Analytical Design of PID Controllers*. Springer International Publishing. Germany.
- Ghosh, A. K. (2012). *Introduction to Measurements and Instrumentation* (4th ed.). PHI Learning Private Limited. India.
- Gottlieb, I. (1997). *Practical Electric Motor Handbook*. Newnes. United Kingdom.

- Graham, J. (2020). *Biological Centrifugation*. CRC Press. United Kingdom.
- GreatScottLab. (2020). *DIY Tachometer (RPM Meter)*. Instructables. <https://www.instructables.com/DIY-Tachometer-RPM-Meter/>
- Indrawati, Y., & Amoryna, D. (2023). Inovasi Centrifuge Alternatif dari Motor Kipas Angin untuk Preparasi Pengujian Berbagai Sampel di Laboratorium. *Indonesian Journal of Laboratory*, 6(2), 106–113.
- Kenneth, R. W. (2009). *General, Organic & Biological, Chemistry an Integrated Approach* (3rd ed.). Wiley. USA.
- Kosky, P., Balmer, R., Keat, W., & Wise, G. (2010). *Exploring Engineering* (2nd ed.). Elsevier.
- Lynwander, P. (1983). *Gear Drive Systems: Design and Application*. CRC Press.
- Mahardika, M., Sudiarso, A., & Prihandana, G. S. (2021). *Perancangan dan Manufaktur Pompa Sentrifugal*. Gadjah Mada University Press. Yogyakarta.
- Margirahayu, E., Junaidi, Pauzi, G. A., & Suciwati, S. W. (2022). DC Motor Speed Control System with PWM (Pulse Width Modulation) Technique Based on Arduino For Centrifugation Equipment Application. *Journal of Energy, Material, and Instrumentation Technology*, 3(3), 99–104.
- Margolis, M. (2011). *Arduino Cookbook* (1st ed.). O'Reilly.
- Mewis, J., & Wagner, N. J. (2012). *Colloidal Suspension Rheology*. Cambridge University Press. United Kingdom.
- Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering* (5th ed.). Pearson Prentice Hall. USA.
- Olikraus. (2015). *U8glib*. Github. <https://github.com/olikraus/u8glib>
- Oxtoby, D. W., Gillis, H. P., & Nachtrieb, N. H. (2001). *Prinsip-prinsip Kimia Modern* (S. S. Achmadi (ed.); 4th ed.). Erlangga. Jakarta.
- Paga, S. (2020). Evaluasi Parameter PID Pada Perancangan Kendali Centrifuge Dengan Sistem Umpan Balik. *Skripsi*. Poltekkes Kemenkes Surabaya.
- Perdana, D. N. (2018). Pemodelan Alat Centrifuge Berbasis Arduino Uno. *Skripsi*, Politeknik Kesehatan Kemenkes Jakarta II.
- Putra, I. M. S. A., Mahardiananta, I. M. A., & Aryasa, I. W. T. (2022). Rancang Bangun Alat Centrifuge Berbasis Arduino Nano Dilengkapi Sistem Deteksi Kemiringan Alat. *Jurnal RESISTOR (Rekayasa Sistem Komputer)*, 5(2), 174–181.
- Putra, Y. H. (2020). *Perangkat Pengontrol Elektronik*. UNIKOM. Jawa Barat.
- Rickwood, D. (1978). *Centrifugation a Partical Approach*. Information Retrieval. United Kingdom.
- Sabry, F. (2022). *Gravitasi Buatan*. One Billion Knowledgeable. USA.

- Sadegh-cheri, M. (2020). SeparateDuino: Design and Fabrication of a Low-Cost Arduino-Based Microcentrifuge Using the Recycled Parts of a Computer DVD Drive. *Journal of Chemical Education*, 97(8), 2338–2341.
- Sebbane, Y. B. (2022). *A First Course in Aerial Robots and Drones*. CRC Press. United Kingdom.
- Setiawan, I. (2008). *Kontrol PID untuk Proses Industri*. PT Gramedia. Jakarta.
- Shmueli, G. (2010). To Explain or to Predict? *Statistical Science*, 25(3), 289–310.
- Suhaeb, S., Djawad, Y. A., Jaya, H., Ridwansyah, Sabran, & Risal, A. (2017). *Buku Ajar Mikrokontroler dan Interface*. Universitas Negeri Makasar. Makassar.
- Sutresna, N. (2007). *Cerdas Belajar Kimia*. Grafindo Media Pratama. Jakarta.
- Tefay, B., Eizad, B., Crosthwaite, P., Singh, S., & Postula, A. (2011). Design of an Integrated Electronic Speed Controller for Compact Robotic Vehicles. *Proceedings of Australasian Conference on Robotics and Automation*, 1(9), 1–8.
- Thusnavis, B. M. I., Sagayam, K. M., & Elngar, A. A. (2022). *Unmanned Aerial Vehicles and Multidisciplinary Applications Using AI Techniques*. IGI Global. USA.
- Tosun, O., & Serteller, N. F. O. (2022). The Design of the Outer-Rotor Brushless DC Motor and an Investigation of Motor Axial-Length-to-Pole-Pitch Ratio. *Sustainability*, 14(19), 1–14.
- VanGelder, K. (2018). *Fundamentals of Automotive Technology* (2nd ed.). Jones & Bartlett Learning.
- Warren, J.-D., Adams, J., & Molle, H. (2011). *Arduino Robotics*. Apress. Netherlands.
- Widharma, I. G. S. (2022). *Mikrokontroler dan Aplikasi* (N. Wahid (ed.)). Wawasan Ilmu. Jawa Tengah.
- Widodo, N. S. (2021). *Sistem Berbasis Mikroprosesor*. UAD Press. Yogyakarta.
- Wilson, K., & Walker, J. (2010). *Principles and Techniques of Biochemistry and Molecular Biology*. Cambridge University Press. United Kingdom.