

**PENGENDALI KECEPATAN MOTOR DC BERBASIS *SYNCHRONOUS*
ZETA CONVERTER DENGAN METODE PID KONTROL**

(Skripsi)

Oleh

DANIEL FERDINAN

2115031116



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2025

**PENGENDALI KECEPATAN MOTOR DC BERBASIS *SYNCHRONOUS*
ZETA CONVERTER DENGAN METODE PID KONTROL**

Oleh

DANIEL FERDINAN

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar

SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Elektro

Fakultas Teknik Universitas Lampung



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2025

ABSTRAK

PENGENDALI KECEPATAN MOTOR DC BERBASIS *SYNCHRONOUS ZETA CONVERTER* DENGAN METODE PID KONTROL

Oleh

DANIEL FERDINAN

Pengendalian kecepatan motor DC menjadi aspek penting dalam sistem otomasi modern yang menuntut presisi dan efisiensi tinggi. *Synchronous ZETA Converter* merupakan salah satu topologi konverter DC-DC yang mampu memberikan kestabilan tegangan *output* dengan efisiensi tinggi, serta dapat menaikkan atau menurunkan tegangan tergantung nilai *duty cycle*. Dalam penelitian ini, sistem pengendalian kecepatan motor DC dirancang dengan mengintegrasikan *Synchronous ZETA Converter* dan metode kendali PID untuk menghasilkan performa kendali yang responsif dan stabil. Penalaan parameter PID dilakukan menggunakan metode Ziegler Nichols II (*Ultimate Gain*), yang menghasilkan nilai konstanta kontrol sebesar $K_p = 0,4326$, $K_i = 1,7304$, dan $K_d = 0,02703$, kemudian dibandingkan dengan metode *trial and error* untuk mengevaluasi keefektifan masing-masing metode. Pengujian dilakukan dengan variasi *set-point* kecepatan motor dari 800 hingga 1400 RPM tanpa beban, dengan analisis parameter performa sistem meliputi *rise time*, *settling time*, *overshoot*, dan *steady-state error*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem dengan PID Ziegler Nichols II memberikan respon lebih cepat dan stabil dengan rata-rata *rise time* 0,571 detik, *settling time* 1,343 detik, *overshoot* 5,71%, dan *steady-state error* -0,11%. Dengan demikian, integrasi *Synchronous ZETA Converter* dan metode PID berbasis Ziegler Nichols II terbukti efektif dalam menjaga kestabilan kecepatan motor DC serta meningkatkan efisiensi dan akurasi pengendalian.

Kata kunci: Motor DC, *Synchronous ZETA Converter*, Kontrol PID, Ziegler Nichols, Pengendalian Kecepatan.

ABSTRACT

DC MOTOR SPEED CONTROLLER BASED ON *SYNCHRONOUS ZETA CONVERTER* USING PID CONTROL METHOD

By

DANIEL FERDINAN

Speed control of DC motors is a crucial aspect in modern automation systems that demand high precision and efficiency. The *Synchronous ZETA Converter* is a DC-DC converter topology capable of providing stable *output* voltage with high efficiency, and can either step up or step down the voltage depending on the duty cycle. In this work, a DC motor speed control system is designed by integrating the *Synchronous ZETA Converter* with the PID (Proportional-Integral-Derivative) control method to achieve a responsive and stable control performance. The PID parameters are tuned using the Ziegler Nichols II (Ultimate Gain) method, resulting in control constants of $K_p = 0,4326$, $K_i = 1,7304$, and $K_d = 0,02703$. These values are compared with parameters obtained using the trial and error method to evaluate their effectiveness. Testing was carried out under no-load conditions with speed set-point variations ranging from 800 to 1400 RPM. System performance was analyzed based on rise time, settling time, overshoot, and steady-state *error*. The results show that the system tuned with the Ziegler-Nichols II method achieves faster and more stable response, with an average rise time of 0.571 seconds, settling time of 1.343 seconds, overshoot of 5.71%, and steady-state *error* of -0.11%. Thus, the integration of the *Synchronous ZETA Converter* and PID control using the Ziegler-Nichols II method proves to be effective in maintaining DC motor speed stability while improving control accuracy and overall system efficiency.

Keywords: DC Motor, *Synchronous ZETA Converter*, PID Control, Ziegler Nichols, Speed Control

Judul Skripsi : **PENGENDALI KECEPATAN MOTOR DC
BERBASIS *SYNCHRONOUS* ZETA
CONVERTER DENGAN METODE PID
KONTROL**

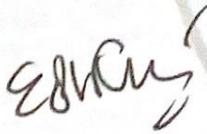
Nama Mahasiswa : **DANIEL FERDINAN**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2115031116**

Jurusan : **Teknik Elektro**

Fakultas : **Teknik**




Dr. Eng. Endah Komalasari, S.T., M.T.

NIP. 197302151999032003

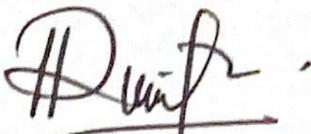

Anisa Ulya Darajat, S.T., M.T.

NIP. 199106102019032024

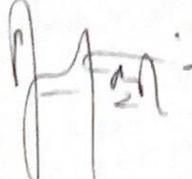
2. Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Elektro

Ketua Program Studi Teknik Elektro


Herlinawati, S.T., M.T.

NIP. 19710314 199903 1 001


Sumadi, S.T., M.T.

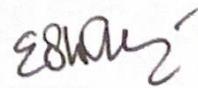
NIP. 19731104 200003 1 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

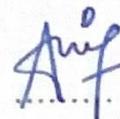
Ketua

: Dr. Eng. Endah Komalasari, S.T., M.T.



Sekretaris

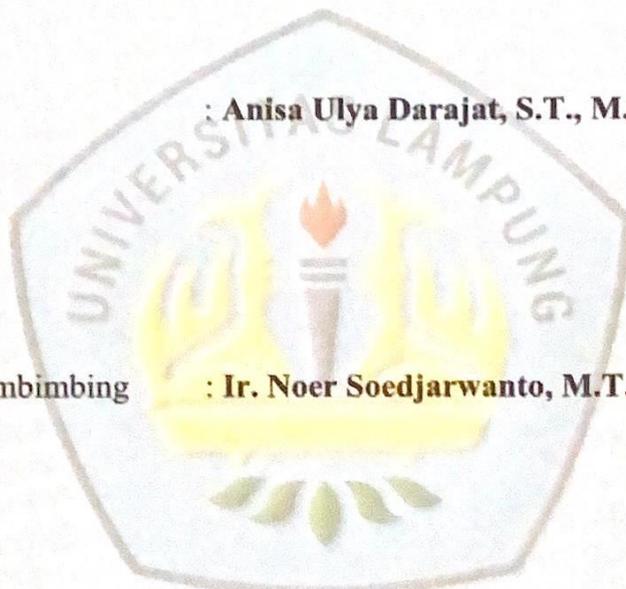
: Anisa Ulya Darajat, S.T., M.T.



Penguji

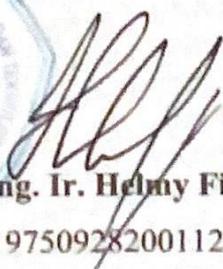
Bukan Pembimbing

: Ir. Noer Soedjarwanto, M.T.



2. Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung




Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.)

NIP. 197509282001121002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 1 Juli 2025

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepanjang sepengetahuan saya tidak terdapat atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana yang disebutkan dalam daftar pustaka. Selain itu, saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

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

Bandar Lampung, 1 Juli 2025



Daniel Ferdinan

NPM. 2115031116

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Cilegon, Banten. Pada tanggal 29 November 2002, sebagai anak ke-3 dari 3 bersaudara, dari pasangan Bapak Sabar Butar-butar dan Ibu Rapellie Pasaribu. Riwayat Pendidikan penulis dimulai dari TK Mardi Yuana pada Tahun 2008 hingga 2009. SD Mardi Yuana pada tahun 2009 hingga 2015. SMP Mardi Yuana pada tahun 2015 hingga 2018. Kemudian SMAN 2 Krakatau Steel pada 2018 hingga 2021. Penulis menjadi mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung pada tahun 2021 melalui jalur SBMPTN (Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri). Selama menjadi mahasiswa, penulis bergabung dalam keanggotaan asisten Laboratorium Konversi Energi Elektrik dari tahun 2023 dan berkesempatan menjadi asisten Praktikum Dasar Tenaga Listrik, Mesin – Mesin Listrik dan Elektronika Daya pada Tahun 2024. Selain itu, penulis juga tergabung dalam organisasi intra kampus Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (HIMATRO) sebagai anggota Departemen Sosial dan Kewirausahaan pada tahun 2022 dan anggota Departemen Pendidikan dan Pengembangan Diri pada tahun 2023. Penulis melaksanakan kerja praktik di PT. LDC Indonesia, Lampung yang tergabung dalam divisi Maintenance dan melakukan studi kasus berjudul “ANALISIS PERBAIKAN FAKTOR DAYA PADA PLANT REFENERY DI PT. LDC INDONESIA” tahun 2024

Dengan segala kerendahan hati,
Kupersembahkan karya sederhanaku ini sebagai tanda cinta,
kasih serta rasa terima kasihku kepada:

Tuhan Yesus Kristus

atas segala berkat dan penyertaan-Nya dalam seluruh proses
penyelesaian skripsi ini

Kedua Orang Tua

Bapak Sabar Butar-butar dan Ibu Rapellie Pasaribu

yang telah membesarkan dan mendidiku dengan penuh
perjuangan dan kasih serta selalu mendukung dan
mendo'akan yang terbaik untuk keberhasilan dan
kebahagiaanku

Kakak dan Abangku Tersayang

Dewi Efrita Santi dan Michael Aprialdo

Serta

Keluarga Besar, Dosen, Teman, dan Almamater

MOTTO

“Dalam Dia ada hidup dan hidup itu adalah terang manusia”

Yohanes 1:4

“Apa pun juga yang kamu perbuat, perbuatlah dengan segenap hatimu seperti untuk Tuhan dan bukan untuk manusia”

Kolose 3:23

“Ada waktu untuk menangis, dan ada waktu untuk tertawa:
ada waktu untuk meratap, dan ada waktu untuk menari”

Pengkhotbah 3:4

“God has perfect timing, never early, never late. It takes a little patience and it takes a lot of faith, but it's a worth to wait”

Berdoa, Berproses dan Bersyukur.

Daniel Ferdinan

SANWACANA

Segala puji dan syukur kepada Tuhan Yesus Kristus, atas berkat-Nya yang diberikan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan Tugas akhir yang berjudul “Pengendali Kecepatan Motor DC Berbasis *Synchronous ZETA Converter* Dengan Metode pengendali PID” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Keluarga penulis, Bapak, Mamak, Kak Dewi, dan Bang Ikel yang tercinta yang selalu memberikan dukungan dan motivasi kepada penulis selama menempuh pendidikan.
2. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A. IPM., ASEAN.Eng., selaku Rektor Universitas Lampung.
3. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
4. Ibu Herlinawati, S.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.
5. Bapak Sumadi, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Universitas Lampung.
6. Ibu Dr. Eng. Endah Komalasari, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing utama yang telah memberikan bimbingan, arahan, motivasi, nasihat, dan pandangan hidup kepada penulis di setiap kesempatan dengan baik dan ramah

7. Ibu Anisa Ulya Darajat S.T., M.T., selaku dosen pembimbing kedua dan juga dosen pembimbing akademik yang telah memberikan bimbingan, arahan, motivasi, nasihat, dan pandangan hidup kepada penulis di setiap kesempatan dengan baik dan ramah.
8. Bapak Ir. Noer Soedjarwanto, M.T., selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik, masukan, saran, serta motivasi kepada penulis di setiap kesempatan dengan baik dan ramah.
9. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah memberikan pengajaran dan pandangan hidup selama perkuliahan.
10. Staf administrasi Jurusan Teknik Elektro dan Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah membantu penulis dalam hal administrasi.
11. Ucapan terima kasih yang tulus saya sampaikan kepada keluarga RAMBAON: Jamed, Benyamin, Alex, Rizman, dan Unedo. Dalam perjalanan panjang di tanah rantau ini, kalian bukan hanya sahabat, tapi juga rumah kedua tempat saya berbagi tawa, lelah, dan harapan. Kehadiran kalian menjadikan setiap hari lebih bermakna—dengan canda, dukungan, dan kebersamaan yang tidak akan pernah saya lupakan. Terima kasih telah menjadi bagian penting dari cerita hidup dan perjuangan saya selama masa perkuliahan.
12. Segenap Keluarga Besar Laboratorium Konversi Energi Elektrik, Jefri, Benyamin, Alex, Dona, Ananda, Siti, Luki, Ruli, Marhadi, Bimo, Deni, Dina, Alfiza, dan lain – lain. Serta Adik – Adik asisten Lab KEE 2022, Septa, Awan, Aditio, Fina, Muti, Emil, Bani, Novian, Ayu, Humam, Krisna, dan Jopen. Terima kasih atas ilmu, bantuan, dan kerja samanya selama penulis menjadi asisten laboratorium.
13. Rekan – Rekan Konsentrasi Teknik Tenaga Listrik, Rasel, Serly, Eikel, Rijal, Imam, Mahen, Fawwaz, dan lain – lain yang telah menjadi rekan skripsi selama perkuliahan.
14. Keluarga besar Angkatan EXCALTO 2021, yang telah memberikan banyak motivasi, nilai-nilai sosial dan bantuan dalam berbagai hal.
15. Keluarga besar HIMATRO UNILA, yang telah menjadi wadah dalam mengembangkan nilai-nilai organisasi bagi penulis.

16. Keluarga besar komunitas Mahasiswa Kristen Fakultas Teknik UNILA, yang telah menjadi rumah Rohani dan tempat pertumbuhan iman saya selama masa perkuliahan.
17. *Last but not least, I wanna thank me I wanna thank me for believing in me, I wanna thank me for doing all this hard work, I wanna thank me for having no days off. I wanna thank me for never quitting, I wanna thank me for always being a giver and tryna give more than I receive. I wanna thank me for tryna do more right than wrong, I wanna thank me for just being me at all times.*

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penulisan skripsi ini. Penulis menerima kritik dan saran yang bersifat membangun dari semua pihak demi kemajuan bersama. Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Bandar Lampung, 1 Juli 2025

Daniel Ferdinan

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	iii
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xviii
BAB I PENDAHULUAN	1
17.1	La
tar Belakang	1
17.2	Ru
musan Masalah	2
17.3	Tu
juan Penelitian	2
17.4	Ba
tasan Masalah	3
17.5	M
anfaat Penelitian	3
17.6	Hi
potesis	3
17.7	Sis
tematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Terkait.....	5
2.2 Motor DC.....	7
2.2.1 Prinsip Kerja Motor DC	8
2.2.2 Komponen Motor DC	8
2.3 <i>ZETA Converter</i>	11
2.3.1 Prinsip Kerja <i>ZETA Converter</i>	11
2.3.2 <i>Synchrhonous ZETA Converter</i>	14
2.4 Kontrol PID	16
2.4.1 Penalaan Pengendali PID	18
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	20
3.1 Waktu dan Tempat.....	20
3.2 Alat dan Bahan.....	20
3.2.1 Perangkat Keras (<i>Hardware</i>).....	20

3.2.2 Perangkat Lunak (<i>Software</i>)	21
3.3 Metodologi Penelitian	21
3.4 Pemodelan Sistem	22
3.5 Perancangan Rangkaian <i>Synchronous ZETA Converter</i>	23
3.6 Pemilihan Mosfet	26
3.7 Perancangan <i>Gate Driver</i>	27
3.8 Penentuan Parameter PID	28
3.9 Perancangan Sensor Tegangan	29
3.10 Pengujian Sistem	29
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	31
4.1 Hasil Rancangan	31
4.1.1 Hasil Rancangan <i>Synchronous ZETA Converter</i>	32
4.1.2 Penalaan PID Menggunakan Ziegler Nichols II	34
4.2 Pengujian Sistem	36
4.2.1 Pengujian Parameter Pengendali PID	36
4.2.2 Pengujian Perubahan Beban dengan Pengendali PID	44
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN	46
5.1 Kesimpulan	46
5.2 Saran	47
DAFTAR PUSTAKA	48
LAMPIRAN	50

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2. 1 Motor DC.....	7
Gambar 2. 2 Kaidah Tangan Kiri	8
Gambar 2. 3 Konstruksi motor DC	9
Gambar 2. 4 Lilitan Penguat Magnet	9
Gambar 2. 5 Jangkar Dinamo.....	10
Gambar 2. 6 Komutator	10
Gambar 2. 7 Sikat / Brush	11
Gambar 2. 8 Rangkaian <i>ZETA Converter</i>	11
Gambar 2. 9 <i>ZETA Converter</i> pada saat <i>switch ON</i>	12
Gambar 2. 10 <i>ZETA Converter</i> pada saat <i>switch off</i>	13
Gambar 2. 11 Skema sederhana dan Gelombang karakteristik <i>Zeta Converter</i>	14
Gambar 2. 12 <i>Synchronous ZETA Converter</i>	15
Gambar 2. 13 Pulsa PWM dengan dead-time	15
Gambar 2. 14 Diagram Blok Kontrol PID	16
Gambar 2. 15 Respon sistem berbentuk kurva S.....	18
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian.....	22
Gambar 3. 2 Diagram Blok Sistem	23
Gambar 3. 3 <i>Synchronous ZETA Converter</i>	24
Gambar 3. 4 Rangkaian skematik <i>driver</i> MOSFET TLP250.....	27
Gambar 3. 5 Kondisi sistem dengan <i>sustained oscillation</i>	28
Gambar 4. 1 Hasil Rancang Perangkat Keras.....	31
Gambar 4. 2 Hasil rancangan <i>Synchronous ZETA Converter</i> , (a) PCB <i>Synchronous ZETA Converter</i> , (b) PCB Layout <i>Synchronous ZETA Converter</i>	33
Gambar 4. 3 Gelombang <i>Sustain Oscillation</i> dengan Masukkan Nilai $K_u = 0,721$	34

Gambar 4. 4 Grafik Respon Sistem dengan Ziegler Nichols II, (a) pada saat rpm 800, (b) pada saat rpm 900, (c) pada saat rpm 1000, (d) pada saat rpm 1100, (e) pada saat rpm 1200, (f) pada saat rpm 1300, (g) pada saat rpm 1400.....	39
Gambar 4. 5 Respon Sistem Dengan <i>Trial and Error</i> , (a) Pada saat <i>set-point</i> 1000 rpm, (b) Pada saat <i>set-point</i> 1200 rpm.	42
Gambar 4. 6 Respon Sistem Menggunakan beban Lampu 20watt dan 30watt	45

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2. 1 Penelitian Terkait	5
Tabel 2. 2 Karakteristik Kontroller PID	17
Tabel 2. 3 Aturan Ziegler-Nichols metode pertama	19
Tabel 2. 4 Aturan Ziegler-Nichols metode kedua	19
Tabel 3. 1 Parameter rangkaian <i>Synchronous ZETA Converter</i>	24
Tabel 3. 2 Penalaan Ziegler Nichols metode ke-dua	28
Tabel 3. 3 Pengujian Sistem	30
Tabel 4. 1 Nilai Komponen <i>Synchronous ZETA Converter</i>	33
Tabel 4. 2 Parameter Kp, Ki, dan Kd menggunakan Penalaan Ziegler-Nichols II.	36
Tabel 4. 3 Respon Sistem dengan Ziegler Nichols II	40
Tabel 4. 4 Perbandingan Respon Sistem Ziegler Nichols II dengan <i>Trial and Error</i>	43

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam dunia modern yang didominasi oleh otomatisasi dan efisiensi energi, motor listrik, khususnya motor DC, memainkan peranan penting sebagai penggerak utama dalam berbagai aplikasi industri maupun konsumen. Pengendalian motor DC yang efisien dan presisi menjadi kebutuhan mutlak untuk mendukung kinerja sistem yang optimal, terutama dalam aplikasi yang membutuhkan pengendalian kecepatan dan torsi yang presisi. Salah satu metode yang banyak digunakan untuk pengendalian motor DC adalah melalui pengaturan tegangan *input*. Dalam konteks ini, konverter DC-DC menjadi komponen kunci yang memungkinkan perubahan tegangan *input* menjadi tegangan *output* yang sesuai dengan kebutuhan motor. Di antara berbagai topologi konverter DC-DC, *Synchronous ZETA Converter* muncul sebagai alternatif menarik karena kemampuannya untuk menghasilkan tegangan *output* yang lebih stabil dibandingkan dengan *buck boost converter* meskipun terjadi variasi pada tegangan *input* [9-12].

Keunggulan utama *Synchronous ZETA Converter* dibandingkan topologi lainnya, adalah kestabilan loop umpan balik yang lebih baik, sehingga mampu menangani rentang variasi tegangan *input* yang lebih luas dan transien beban yang tinggi tanpa mengakibatkan resonansi. Selain itu, *ZETA Converter* memiliki tingkat riak tegangan *output* yang lebih rendah, yang merupakan faktor penting dalam menjaga keandalan dan umur panjang motor DC[12].

Tantangan dalam pengendalian motor DC tidak hanya terletak pada aspek perangkat keras, tetapi juga pada strategi kontrol yang digunakan. Untuk meningkatkan kinerja sistem pengendalian motor DC, diperlukan strategi kendali yang efisien serta mudah diimplementasikan.

Metode pengendali PID (*Proportional-Integral-Derivative*) menjadi pilihan yang tepat karena sederhana, stabil, dan telah terbukti efektif dalam berbagai aplikasi sistem kendali. Dengan mengintegrasikan *Synchronous ZETA Converter* dan metode pengendali PID, diharapkan dapat tercipta sistem pengendalian motor DC yang efisien, stabil, dan responsif terhadap perubahan kondisi beban[4][12].

Dengan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem pengendalian motor DC berbasis *Synchronous ZETA Converter* dengan metode pengendali PID. Sistem ini diharapkan dapat memberikan solusi praktis dan inovatif untuk pengendalian motor DC, serta memberikan kontribusi pada pengembangan teknologi konverter DC-DC dan sistem kontrol motor listrik.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang *Synchronous ZETA Converter* yang mampu menghasilkan tegangan *output* yang stabil untuk menggerakkan motor DC?
2. Bagaimana merancang dan mengimplementasikan metode pengendali PID untuk mengoptimalkan pengendalian kecepatan pada motor DC?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang dan mengimplementasikan *Synchronous ZETA Converter* yang terintegrasi dengan metode pengendali PID untuk menghasilkan *output* kecepatan motor DC yang stabil.
2. Menganalisa kinerja motor DC dalam hal kestabilan kecepatan dan respon terhadap variasi nilai referensi kecepatan.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam pelaksanaan tugas akhir ini dituliskan sebagai berikut:

1. Penelitian ini hanya mengontrol dan mempertimbangkan motor DC yang beroperasi tanpa beban, dan dengan kapasitas motor DC sebesar ≤ 100 watt.
2. Sistem akan mengatur kecepatan motor DC pada beberapa *set-point* RPM yang telah ditentukan, dan sistem pengendalian berfungsi untuk menjaga kecepatan motor agar tetap stabil pada nilai *set-point*.
3. Pada penelitian ini, pengendalian kecepatan motor DC menggunakan metode pengendali PID untuk menyesuaikan *duty cycle* konverter berdasarkan *error* antara *set-point* dan kecepatan motor aktual.
4. Tidak membahas motor DC secara detail.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Menyediakan solusi efisien dan andal untuk pengendalian motor DC berbasis *Synchronous ZETA Converter*, sehingga dapat menghasilkan *output* kecepatan motor yang stabil.
2. Memberikan kontribusi dalam pengembangan metode pengendali PID yang terintegrasi dengan converter daya untuk meningkatkan kestabilan dan efisiensi sistem pengendalian motor DC.

1.6 Hipotesis

Adapun hipotesis pada penelitian ini adalah pengendalian motor DC berbasis *Synchronous ZETA Converter* yang digabungkan dengan metode Pengendali PID dapat mempertahankan kestabilan kecepatan motor pada beberapa *set-point* RPM yang ditentukan, meskipun dalam kondisi tanpa beban. Sistem ini diharapkan dapat meminimalkan deviasi kecepatan motor akibat perubahan tegangan *input* atau gangguan eksternal, serta meningkatkan respons dinamis dan efisiensi pengaturan kecepatan motor secara keseluruhan.

1.7 Sistematika Penulisan

Penulisan tugas akhir ini dibagi ke dalam lima bab dengan sistematika sebagai berikut:

BAB I. PENDAHULUAN

Bab ini berisikan tentang latar belakang masalah yang mendasari penelitian ini, rumusan masalah, tujuan penelitian yang ingin dicapai, batasan masalah, manfaat penelitian, hipotesis, serta sistematika penulisan.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisikan penjelasan secara umum teori dasar yang digunakan sebagai landasan pada penelitian ini.

BAB III. METODE PENELITIAN

Bab ini menjelaskan waktu dan lokasi penelitian, alat dan bahan yang digunakan, metode penelitian yang diterapkan, serta diagram penelitian yang menunjukkan alur kerja dalam menyelesaikan tugas akhir.

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini memaparkan hasil-hasil penelitian yang telah dilakukan, termasuk perancangan serta analisis hasil dari kinerja suatu alat tersebut.

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN

Bab terakhir ini berisi kesimpulan dari penelitian yang dilakukan berdasarkan hasil dan pembahasan, serta memberikan saran untuk penelitian lebih lanjut atau implementasi praktis dari hasil penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

Adapun beberapa penelitian yang berkaitan dengan penelitian ini, yang dicantumkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Penelitian Terkait

No.	Judul	Nama Penulis	Kelebihan/Kekurangan
1	Rancang Bangun <i>ZETA Converter</i> untuk <i>Charging</i> Baterai	Puja Ramanda, Asnil, Pipit Anggraeni, 2024.	<ul style="list-style-type: none">• Dari hasil pengujian <i>converter ZETA</i> secara <i>hardware</i> telah dapat bekerja menurunkan (<i>buck</i>) dan menaikkan tegangan (<i>boost</i>) dengan baik.• Sesuai dengan data dapat dikatakan bahwa <i>converter ZETA</i> dapat bekerja secara fungsional dengan efisiensi rata-rata 70%.
2	Perancangan <i>ZETA Converter</i> Pada Pelacakan Titik Daya Maksimum Photovoltaic Menggunakan Algoritma Modifikasi Hill Climbing	Irwan Mahmudi, Jumiyatun, Baso Mukhlis, Lukman, 2021.	Pada penelitian ini <i>Zeta converter</i> didesain dengan nilai tegangan <i>output</i> (V_{out}) sebesar 24 Volt dan arus <i>output</i> (I_{out}) sebesar 3 Ampere, sehingga diperoleh daya <i>outputnya</i>

No.	Judul	Nama Penulis	Kelebihan/Kekurangan
			sebesar 72Watt yang mana telah lebih besar dari photovoltaic yang digunakan yaitu 60Watt pada pengujian <i>standard</i> pabrik.
3	Penalaan Parameter PID dengan Metode Ziegler-Nichols untuk Optimasi Kontrol Kecepatan Motor Pada Alat Spin Coater	Nasrul Hamid, Ahyar Mansur, 2021.	Proses optimasi kontrol kecepatan motor membuat sistem mencapai <i>set-point</i> relatif lebih cepat dibandingkan dengan sebelum optimasi. Sistem setelah dioptimasi mampu meminimalkan galat sebesar 83.51% dari sebelumnya yakni 81.77%.
4	DC-DC Chopper 4 Kuadran Untuk Penggerak Motor DC Penguat Terpisah	Mhd Safe'I, dan Krismadinata, 2023.	Dengan metode ini, DC Chopper 4 kuadran dapat mengoperasikan motor DC dalam kondisi <i>forward</i> , <i>break</i> , dan <i>reverse</i> dimana pemodelan <i>driver</i> motor DC dapat mempengaruhi karakteristik motor DC dengan mengubah tegangan konstan menjadi tegangan bervariasi sehingga menghasilkan kecepatan motor yang bervariasi.
5	Pengendalian Kecepatan Sudut Motor DC Menggunakan Kontrol PID dan <i>Tunning</i> Ziegler-Nihcols	Mila Diah Ika Putri, Alfian Ma'arif, Riky Dwi Puriyanto, 2022.	Penalaan pengendali PID menggunakan metode Ziegler Nichols menghasilkan keluaran dengan grafik kecepatan Motor DC yang stabil.

No.	Judul	Nama Penulis	Kelebihan/Kekurangan
			Metode Ziegler Nichols 1 menghasilkan keluaran dengan nilai overshoot terbaik sebesar 5%. Sedangkan metode Ziegler Nichols 2 menghasilkan nilai overshoot terbaik sebesar 1%.

2.2 Motor DC

Motor DC adalah perangkat listrik yang berfungsi mengubah energi listrik menjadi energi mekanik [3]. Jenis motor ini banyak digunakan dalam industri elektronik dan sebagai komponen pendukung berbagai peralatan atau instrumen elektronik. Motor DC, yang juga dikenal sebagai motor arus searah, memiliki berbagai tipe, seperti motor dengan magnet permanen dan motor dengan elektromagnet (serta jenis-jenis lainnya seperti seri, *shunt*, atau *compound*). Jenis motor DC dapat diklasifikasikan berdasarkan tipe magnet yang digunakan. Pada motor dengan elektromagnet, pembentukan medan magnet sering disebut eksitasi, yang terbagi menjadi eksitasi mandiri (*self-excitation*) dan eksitasi eksternal (*separate excitation*) [4]. Pada motor elektromagnetik yang terlihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Motor DC

2.2.1 Prinsip Kerja Motor DC

Motor listrik arus searah mempunyai prinsip kerja berdasarkan percobaan Lorents yang menyatakan “jika sebatang penghantar listrik yang berarus berada di dalam medan magnet maka pada kawat penghantar tersebut akan terbentuk suatu gaya”. Gaya yang terbentuk sering dinamakan gaya Lorents [4]. Hal ini dapat dituliskan dalam sebuah persamaan sebagai berikut:

$$F = B I L \quad (2.1)$$

Dengan:

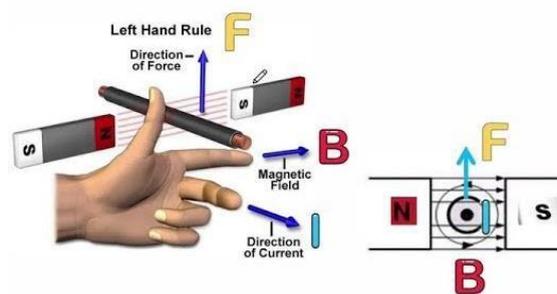
F = Gaya yang terbentuk pada penghantar (*Newton*)

I = Arus yang mengalir pada konduktor jangkar (*Ampere*)

B = Kerapatan fluksi *magnetic* atau induksi *magnetic* (*Tesla, T*)

L = Panjang konduktor jangkar (*m*)

Untuk menentukan arah gaya pada motor DC dapat digunakan kaidah tangan kiri (Lorents) atau kaidah telapak tangan kiri [5]. Yang ditunjukkan pada Gambar 2.2.

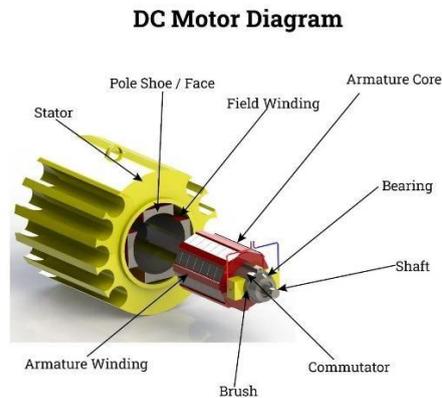


Gambar 2. 2 Kaidah Tangan Kiri

2.2.2 Komponen Motor DC

Pada dasarnya komponen motor DC dibagi menjadi dua jenis, yakni Rotor, atau bagian yang bergerak, serta Stator atau komponen yang diam. Untuk komponen stator ini terdiri dari jangkar dynamo dan komutator [2]. Dari beberapa komponen tersebut, ada tiga yang menjadi komponen utama, antara lain penguat

magnet (stator), jangkar *dynamo* dan komutator (rotor). Konstruksi motor DC ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Konstruksi motor DC

a. Lilitan Penguat Medan

Lilitan penguat medan pada motor DC berfungsi untuk mengalirkan listrik agar terjadi proses elektro magnet sehingga terjadi suatu magnet buatan, sedangkan inti kutub magnet merupakan tempat dihasilkannya fluks magnet [5]. Yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Lilitan Penguat Magnet

b. Jangkar Dinamo

Jangkar dynamo pada motor DC yang ditunjukkan pada Gambar 2.5, ialah yang berbentuk silinder yang diberi alur-alur pada permukaannya sebagai tempat melilitkan kumparan agar terbentuk ggl induksi pada motor [6]. Seperti halnya pada inti kutub magnet, jangkar dinamo ini biasanya terbuat dari bahan ferro

magnetik berlapis-lapis tipis untuk mengurangi panas yang terbentuk karena adanya arus liar.



Gambar 2. 5 Jangkar Dinamo

c. Komutator

Komutator pada motor DC memiliki kegunaan untuk membalikan arah arus listrik dalam jangkar. Komutator juga membantu dalam sistem transmisi arus antara jangkar dan sumber daya [6]. Yang ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Komutator

d. Sikat / *Brush*

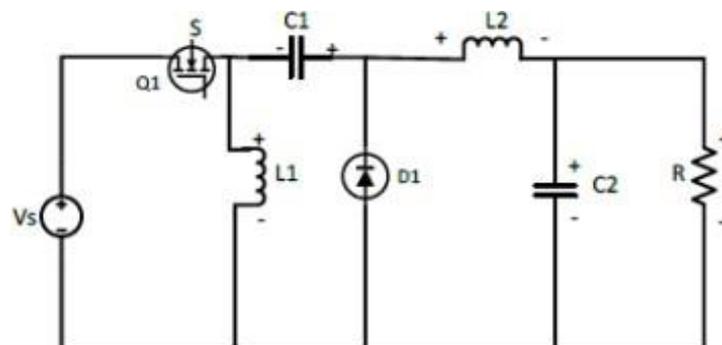
Fungsi dari sikat-sikat adalah untuk jembatan bagi aliran arus dari lilitan jangkar beban, aliran arus tersebut akan mengalir dari sumber dan diterima oleh komutator [2]. Yang ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2. 7 Sikat / Brush

2.3 ZETA Converter

ZETA Converter merupakan salah satu topologi konverter DC-DC yang sering digunakan untuk menghasilkan tegangan *output* yang dapat lebih tinggi, lebih rendah, atau sama dengan tegangan *input*, tergantung pada nilai *duty cycle* dari saklar kontrolnya [7]. *ZETA Converter* dikembangkan sebagai alternatif dari topologi SEPIC (*Single-Ended Primary-Inductor Converter*) dengan beberapa keunggulan, terutama dalam kestabilan umpan balik dan tingkat riak tegangan *output* yang lebih rendah [8]. Secara prinsip, *ZETA Converter* menggunakan kombinasi induktor dan kapasitor sebagai elemen penyimpan energi untuk mentransfer energi dari *input* ke *output*. Dalam mentransfer energi ini dikendalikan oleh sebuah perangkat *switching* *S*, seperti MOSFET ataupun IGBT [9]. Rangkaian *ZETA Converter* dapat dilihat pada Gambar 2.8.

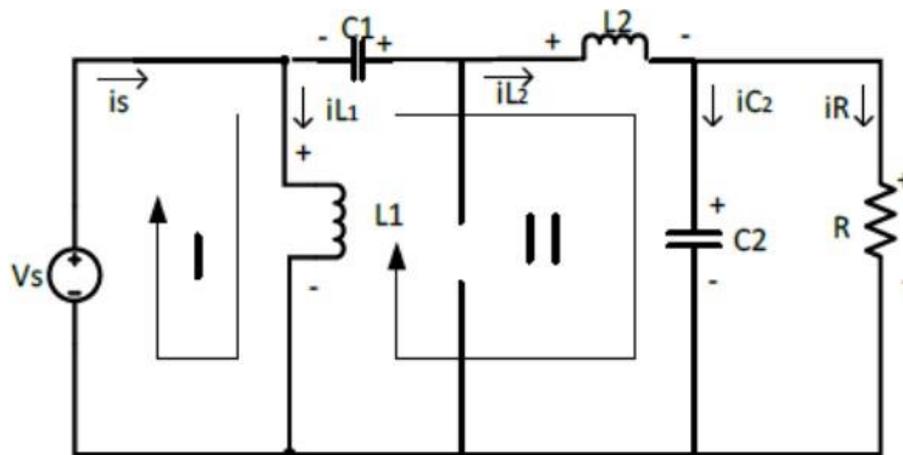


Gambar 2. 8 Rangkaian ZETA Converter

2.3.1 Prinsip Kerja ZETA Converter

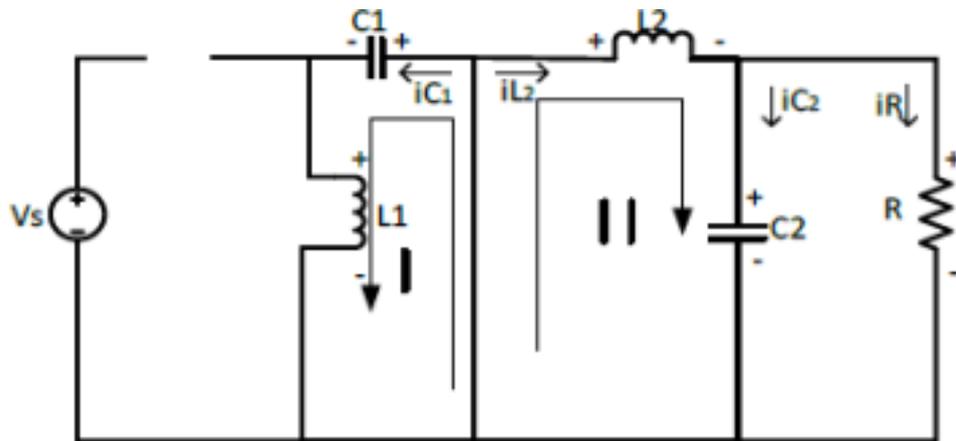
Berdasarkan prinsip kerjanya rangkaian *ZETA Converter* memiliki dua siklus operasi utama. Siklus pertama terjadi saat saklar (*switch*) dalam kondisi

tertutup (*ON*) [10]. Dalam kondisi ini, *diode* berada dalam keadaan *reverse bias* (*OFF*), menyebabkan rangkaian *diode* terbuka (*open circuit*), sementara saklar menjadi hubungan pendek (*short circuit*). Pada siklus ini, induktor L_i dan L_o memasuki fase pengisian energi (*charging*), di mana arus pada kedua induktor I_{L1} dan I_{L2} meningkat secara linier. Energi yang tersimpan dalam kapasitor C_1 akan dilepaskan (*discharging*) untuk memasok energi ke induktor L_o dan tegangan keluaran V_o [11]. Prinsip kerja Zeta converter ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2. 9 ZETA Converter pada saat *switch ON*

Pada siklus kedua, yaitu ketika saklar berada dalam kondisi terbuka (*OFF*), *diode* dalam keadaan *forward bias* (*ON*). Dalam kondisi ini, saklar berfungsi sebagai rangkaian terbuka (*open circuit*), sedangkan *diode* menjadi rangkaian tertutup (*short circuit*), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.10 Induktor L_i , yang sebelumnya berada dalam fase pengisian energi (*charging*), kini memasuki fase pelepasan energi (*discharging*). Induktor L_o juga mengalami fase pelepasan energi (*discharging*). Pada saat yang sama, kapasitor C_1 memasuki fase pengisian energi (*charging*) yang disebabkan oleh arus yang disuplai oleh induktor L_i [10]. Yang ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2. 10 ZETA Converter pada saat *switch off*

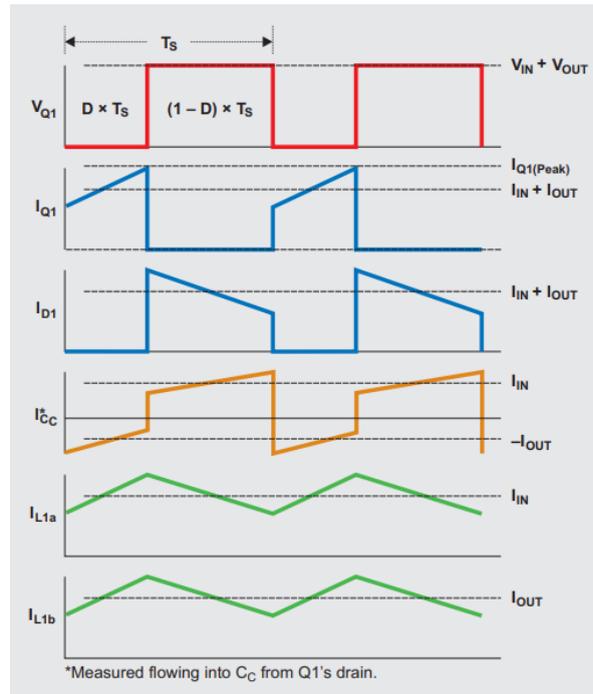
Berdasarkan Analisa hukum Kirchhoff pada rangkaian ZETA Converter, terdapat 2 siklus yaitu pada saat *switch ON* dan *OFF* yang dimana akan didapatkan nilai dari *duty cycle* pada Persamaan (2.2) [12]:

$$D = \frac{V_{OUT}}{V_{IN} + V_{OUT}} \quad (2.2)$$

Atau dapat dituliskan sebagai Persamaan (2.3):

$$\frac{D}{1 - D} = \frac{I_{IN}}{I_{OUT}} = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \quad (2.3)$$

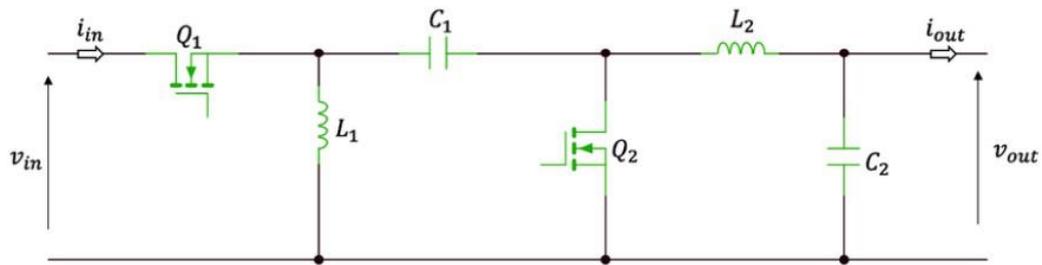
Adapun skema sederhana dan gelombang karakteristik pada tiap komponen ZETA Converter pada kondisi *on* dan *off* [7], yang ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2. 11 Skema sederhana dan Gelombang karakteristik *Zeta Converter*

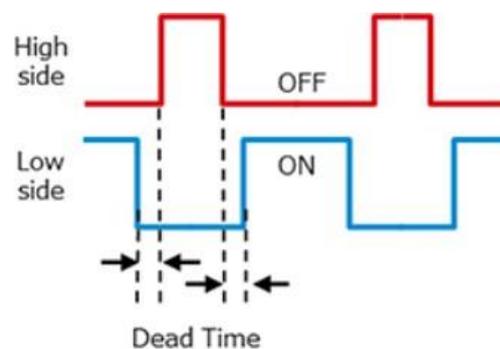
2.3.2 Synchronous ZETA Converter

Synchronous ZETA Converter adalah varian dari topologi *ZETA Converter* yang menggunakan saklar MOSFET sinkron sebagai pengganti *diode* pada bagian *rectifier*. Dalam topologi ini, MOSFET sinkron berfungsi untuk meningkatkan efisiensi konverter dengan mengurangi rugi-rugi daya yang biasanya terjadi akibat tegangan maju (*forward voltage drop*) pada *diode* konvensional. *Synchronous ZETA Converter* bekerja berdasarkan prinsip pengubahan energi menggunakan dua induktor, satu kapasitor kopling, dan saklar yang dikontrol secara sinkron [13]. Keunggulan utama dari *Synchronous ZETA Converter* adalah efisiensi energi yang lebih tinggi, terutama pada aplikasi dengan arus besar, serta kemampuan untuk mengatur tegangan *output* secara presisi dalam berbagai kondisi beban dan variasi tegangan *input*. Kombinasi ini menjadikannya pilihan ideal untuk aplikasi seperti pengendalian motor DC, catu daya yang stabil, dan perangkat elektronik modern yang membutuhkan efisiensi dan stabilitas tinggi. Rangkaian *Synchronous ZETA Converter* ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2. 12 Synchronous ZETA Converter

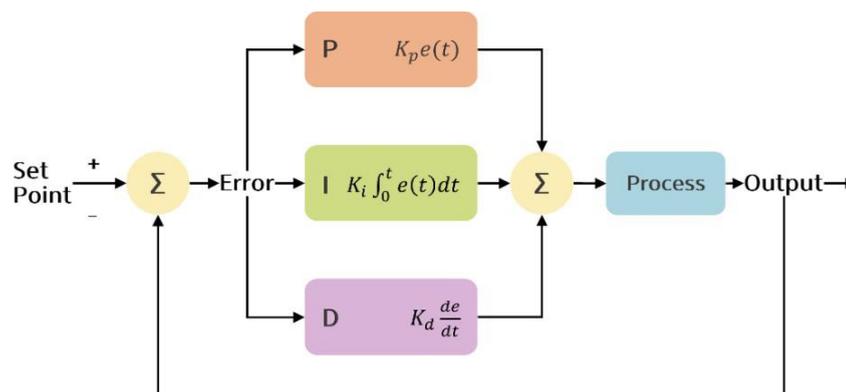
MOSFET Q_1 berfungsi sebagai saklar sisi tinggi (*High-side switch*), sedangkan MOSFET Q_2 berfungsi sebagai saklar sisi rendah (*Low-side switch*). Ketika MOSFET *High-side* dalam kondisi "ON", MOSFET *Low-side* harus berada dalam kondisi "OFF", dan sebaliknya. Kedua MOSFET tidak boleh ON secara bersamaan untuk menghindari terjadinya hubungan singkat [1]. Oleh karena itu, diperlukan waktu jeda atau *dead-time* selama transisi antara pengaktifan dan penonaktifan kedua MOSFET. *Dead-time* merupakan interval waktu ketika kedua MOSFET dalam keadaan mati (*OFF*). *Dead-time* ini memastikan MOSFET *High-side* benar-benar mati sebelum MOSFET *Low-side* dinyalakan, begitu juga sebaliknya yang ditunjukkan pada Gambar 2.13 [14]. Mekanisme ini dirancang untuk mencegah kondisi di mana kedua MOSFET aktif secara bersamaan, yang dapat menyebabkan kerusakan pada MOSFET atau komponen beban [1].



Gambar 2. 13 Pulsa PWM dengan *dead-time*

2.4 Kontrol PID

Salah satu tipe kontroler yang paling populer di dunia industri ialah kontroler PID. Elemen-elemen kontroler P, I, dan D masing-masing secara keseluruhan bertujuan untuk mempercepat reaksi sebuah sistem, menghilangkan *offset* dan menghasilkan perubahan awal yang besar. Kontrol *Proportional Integral Derivative* (PID) merupakan salah satu Pengendali yang bertujuan memperbaiki kinerja suatu sistem, termasuk sistem kendali putaran motor DC. Kecepatan respon dan *error steady-state* merupakan parameter yang diukur untuk menilai kinerja suatu sistem kendali [15]. Diagram blok kontrol PID ditunjukkan pada Gambar 2.14.



Gambar 2. 14 Diagram Blok Kontrol PID

Proporsional-Integral-Derivatif (PID) merupakan pengontrol konvensional yang digunakan dalam mengontrol parameter seperti: kecepatan, suhu, aliran, tekanan dan variabel proses lainnya. Keluaran dari kontrol PID akan mempengaruhi respons terhadap perubahan yang terdeteksi oleh sensor dan *set-point* yang telah ditentukan. Pada waktu kontinu, keluaran Pengendali PID dapat dijabarkan dalam persamaan sebagai berikut [16]:

$$u(t) = K_p[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}] \quad (2.4)$$

Dimana:

K_p = Koefisien Proporsional

K_i = Koefisien Integral

K_d = Koefisien Derivatif (turunan)

T_i = Waktu Integral

T_d = Waktu Derivatif (turunan)

Persamaan di atas adalah bentuk umum dari kontroler PID (*Proportional-Integral-Derivative*) dalam domain waktu. Persamaan ini menghitung sinyal kontrol $u(t)$ berdasarkan *error* $e(t)$, yaitu selisih antara nilai *set-point* dan nilai keluaran aktual sistem. Bagian pertama, $K_P \cdot e(t)$, merupakan komponen *proportional*, yang memberikan respon langsung sebanding dengan *error* untuk mengurangi deviasi. Bagian kedua, $\frac{1}{T_i} \int_0^t e(t)dt$, adalah komponen *integral*, yang mengakumulasi *error* dari waktu ke waktu untuk mengeliminasi *error steady-state*. Bagian ketiga, $T_d \frac{de(t)}{dt}$ komponen *derivative* yang bertindak sebagai *predictor* dengan memperhitungkan perubahan *error* terhadap waktu [17]. Karakteristik atau respon dari sistem kontrol PID dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Karakteristik Kontroller PID

<i>Close-Loop Response</i>	<i>Rise Time</i>	<i>Overshoot</i>	<i>Setting Time</i>	<i>SS Error</i>
K_p	<i>Decrease</i>	<i>Increase</i>	<i>Small Change</i>	<i>Decrease</i>
K_i	<i>Decrease</i>	<i>Increase</i>	<i>Increase</i>	<i>Eliminate</i>
K_d	<i>Small Change</i>	<i>Decrease</i>	<i>Increase</i>	<i>Small</i>

Dengan:

Rise Time = Waktu untuk mencapai *set-point*

Overshoot = Kesalahan *output* melebihi *set-point*

Settling Time = Waktu untuk mencapai stabilitas *output*

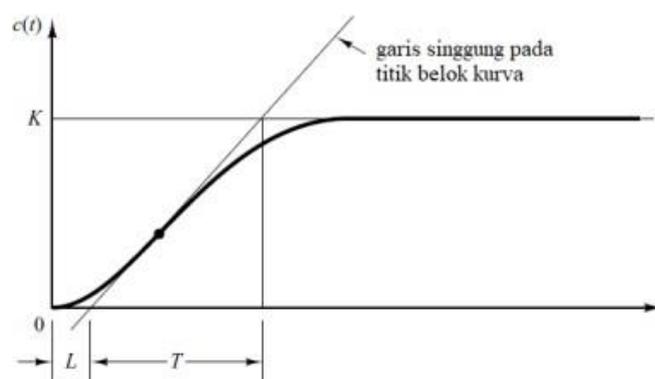
SS Error = *Error* dalam kondisi *steady state* (stabil)

2.4.1 Penalaan Pengendali PID

Proses pemilihan parameter Pengendali untuk memenuhi spesifikasi kinerja yang ditentukan dikenal sebagai penyetelan atau penalaan Pengendali (*controller tuning*). Penalaan pengendali PID ini berfungsi untuk mencari nilai K_p , K_i , dan K_d . Terdapat beberapa metode penalaan yang dapat digunakan, salah satunya adalah metode Ziegler-Nichols. Metode Ziegler-Nichols mengusulkan aturan dalam menentukan nilai K_p , T_i , dan T_d berdasarkan karakteristik respon transien dari sebuah sistem. Terdapat dua metode dalam aturan penalaan Ziegler Nichols, yang disebut sebagai metode pertama dan metode kedua [18].

a. Metode Pertama

Pada metode pertama, respon pada suatu sistem terhadap masukan satu satuan fungsi *step* ditentukan secara eksperimental. Jika respon yang dihasilkan melalui percobaan atau eksperimen dari Simulasi dinamika sistem menunjukkan kurva berbentuk S, maka metode pertama Ziegler-Nichols ini dapat diterapkan [19]. Kurva berbentuk S pada metode ini dapat dicirikan oleh dua konstanta yaitu waktu tunda " L " dan konstanta waktu " T " pada Gambar 2.15. Kedua konstanta ini ditentukan berdasarkan garis singgung pada titik belok kurva S, perpotongan garis singgung dengan sumbu waktu dan garis $c(t) = K$ menghasilkan konstanta " L " dan " T ".



Gambar 2. 15 Respon sistem berbentuk kurva S

Parameter K_p , T_i , dan T_d yang diperoleh dari metode pertama Ziegler-Nichols ditentukan berdasarkan Tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Aturan Ziegler-Nichols metode pertama

<i>Tipe Kontroler</i>	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

b. Metode Kedua

Pada metode kedua Ziegler-Nichols, pertama-tama diatur nilai dari $T_i = \infty$ dan $T_d = 0$, sehingga sistem ini hanya bekerja dengan pengendalian proporsional saja. Nilai K_p ditingkatkan dari 0 menuju nilai kritis K_{cr} sehingga diperoleh nilai keluaran yang mulai berosilasi dengan amplitudo yang konstan secara terus menerus (*continue*). Metode ini terdapat dua parameter yaitu nilai K_u yang didapat dari nilai K_{cr} dan P_{cr} yang merupakan periode osilasi. Berikut parameter K_p , T_i , dan T_d pada metode kedua Ziegler Nichols [15], ditentukan pada Tabel 2.4.

Tabel 2. 4 Aturan Ziegler-Nichols metode kedua

<i>Tipe Kontroler</i>	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2}P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

Metode penalaan Ziegler-Nichols bertujuan untuk maksimum overshoot 25% terhadap masukan *step* [20].

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilaksanakan selama \pm 6 bulan, yaitu dari Desember 2024 sampai dengan Mei 2025. Penelitian dilakukan di Laboratorium Konversi Energi Elektrik, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung.

3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini terbagi menjadi dua yaitu, Perangkat Keras (*Hardware*) dan Perangkat Lunak (*Software*).

3.2.1 Perangkat Keras (*Hardware*)

Adapun perangkat keras yang akan digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Motor DC.
2. *Power Supply*.
3. Mikrokontroler ATMEGA2560.
4. Rangkaian *Synchronous ZETA Converter*.
5. Rangkaian *Gate Driver*.
6. Rangkaian Sensor Tegangan
7. Sensor Arus ACS712.
8. Modul Sensor Kecepatan LM393.
9. Laptop HP.
10. *Multimeter Digital*.

3.2.2 Perangkat Lunak (*Software*)

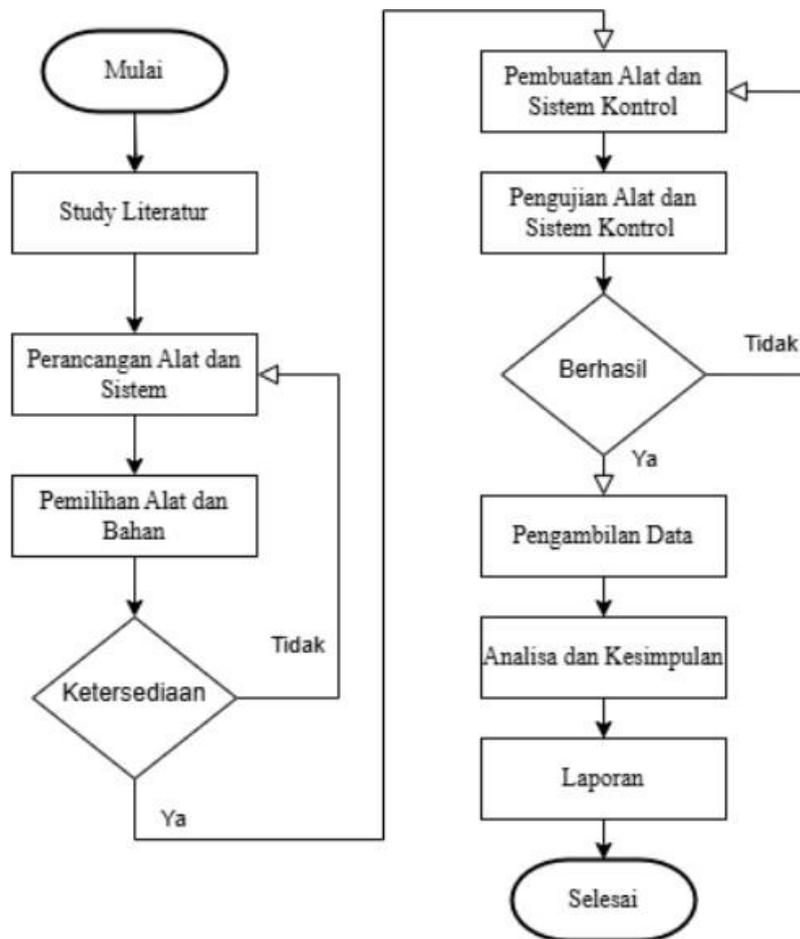
Adapun perangkat lunak yang akan digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Matlab *Simulink* R2021b, *software* untuk membuat simulasi rangkaian.
2. Arduino IDE, *software* untuk membuat program yang akan dimasukkan dalam *board mikrokontroler*.
3. EasyEDA, *software* membuat *layout PCB*.
4. *Microsoft Office* 2021.

3.3 Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian pada tugas akhir ini di tunjukkan seperti pada Gambar 3.1, diawali dengan studi literatur untuk memperoleh pemahaman yang mendalam mengenai konsep dan teori yang mendukung penelitian. Selanjutnya, dilakukan perancangan alat dan sistem, termasuk perancangan *Synchronous ZETA Converter* dan sistem kontrol PID. Setelah itu, dilakukan pemilihan alat dan bahan yang meliputi komponen utama seperti Kapasitor, Induktor, mikrokontroler, MOSFET, dan *gate driver*. Jika komponen tersedia, proses dilanjutkan dengan pembuatan alat dan sistem kontrol melalui perakitan rangkaian sesuai dengan hasil perhitungan dan simulasi yang telah dilakukan. Setelah perakitan selesai, dilakukan pengujian sistem untuk memastikan bahwa *Synchronous ZETA Converter* dan sistem kontrol PID berfungsi dengan baik.

Pengujian ini mencakup penyesuaian nilai *set-point* serta konstanta K_p , K_i , dan K_d menggunakan metode *tunning* Ziegler Nichols. Jika sistem belum bekerja dengan baik, maka dilakukan perbaikan hingga berhasil. Setelah sistem berfungsi dengan baik, dilakukan pengambilan data terkait pengendalian kecepatan motor DC, termasuk pengukuran tegangan, arus, dan duty cycle. Data yang diperoleh dianalisis untuk mengevaluasi kinerja sistem dan diambil kesimpulan terkait efektivitas alat yang dirancang. Hasil dari penelitian ini kemudian disusun dalam bentuk laporan akhir sebagai dokumentasi penelitian.



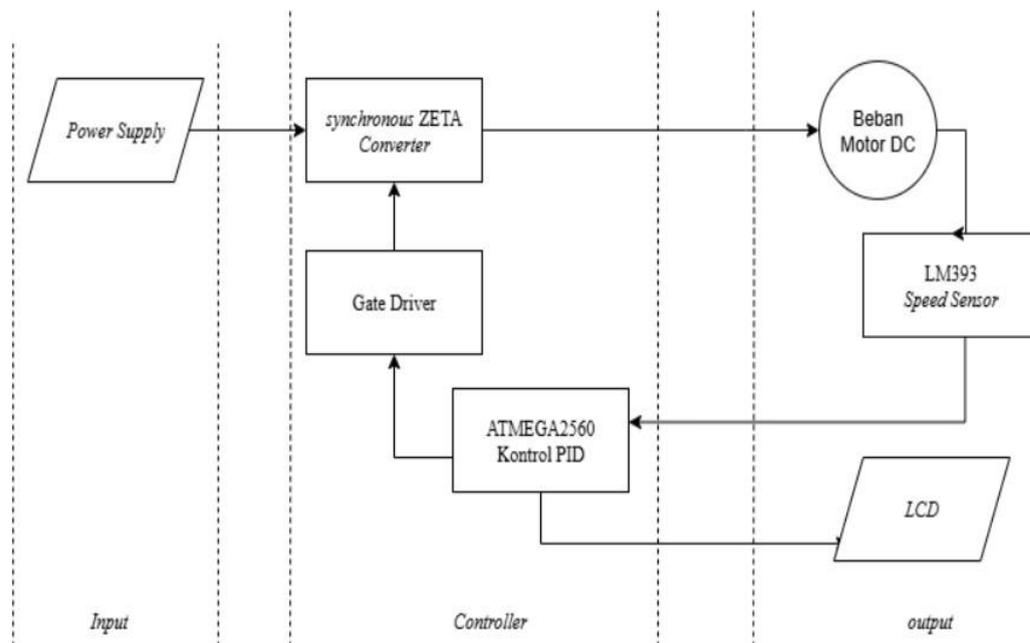
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.4 Pemodelan Sistem

Pemodelan sistem pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.2. Sistem yang dirancang dalam penelitian ini bertujuan untuk mengontrol kecepatan motor DC menggunakan *Synchronous ZETA Converter* yang dikendalikan oleh algoritma PID dengan *tunning Ziegler Nichols*. *Power supply* digunakan sebagai sumber daya utama yang mengalirkan tegangan ke *Synchronous ZETA Converter* untuk menghasilkan tegangan *output* yang sesuai dengan kebutuhan motor DC. Untuk mengontrol *switching* pada *converter*, digunakan *gate driver* yang menerima sinyal kendali dari mikrokontroler.

Sensor arus dan rangkaian sensor tegangan digunakan untuk memantau arus dan tegangan yang diberikan ke motor, sedangkan sensor kecepatan digunakan

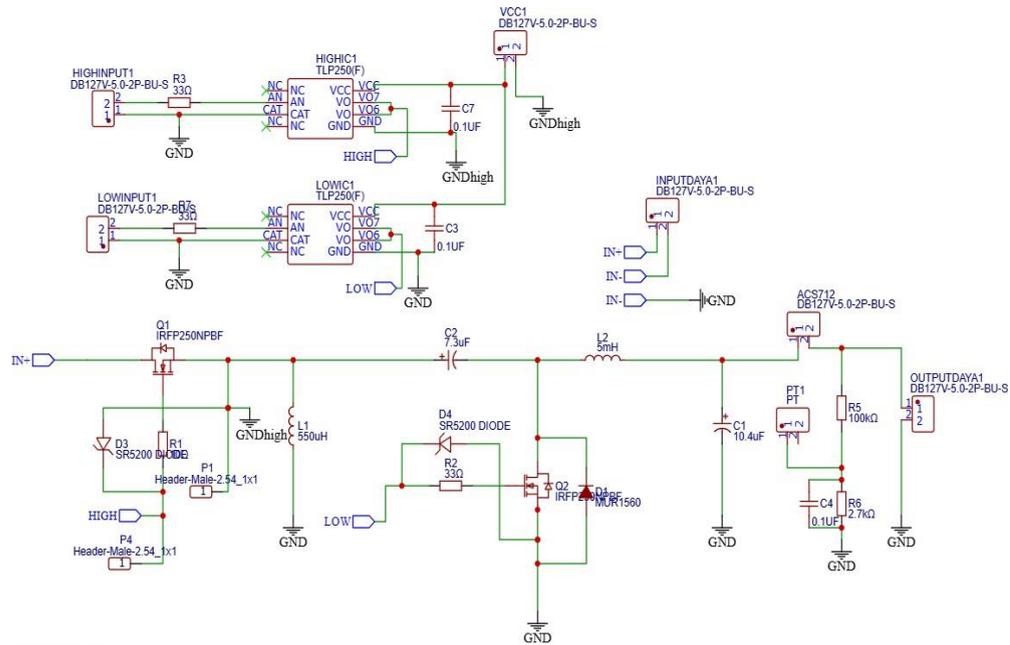
untuk mengukur kecepatan putaran motor. Data dari sensor dikirim ke mikrokontroler untuk diproses dalam algoritma kontrol PID guna menyesuaikan *duty cycle* sehingga kecepatan motor dapat dipertahankan sesuai *set-point*. Hasil pengolahan data juga ditampilkan pada LCD sebagai indikator kerja sistem. Dengan sistem ini, diharapkan dapat diperoleh pengendalian kecepatan motor DC yang optimal melalui metode *tunning* PID yang tepat.



Gambar 3. 2 Diagram Blok Sistem

3.5 Perancangan Rangkaian *Synchronous ZETA Converter*

Adapun perancangan rangkaian *Synchronous ZETA Converter* pada penelitian yang ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3. 3 *Synchronous ZETA Converter*

Dalam merancang *Synchronous ZETA Converter* dibutuhkannya parameter sebagai acuan dalam menentukan nilai-nilai dari komponen yang akan digunakan. Parameter *Synchronous ZETA Converter* ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Parameter rangkaian *Synchronous ZETA Converter*

<i>Parameter</i>	<i>Nilai</i>
Tegangan Masukan (V_{in})	24 Volt
Tegangan Keluaran (V_{out})	220 Volt
Daya	200 Watt
Arus Output (I_o)	0,9 A
Arus Input (I_{in})	8,3 A
Frekuensi Switching	50 kHz
Ripple Tegangan Output ($\Delta V_o/V_o$)	1%
Ripple Tegangan Kapasitor ($\Delta V_C/V_C$)	1%
Ripple Arus Induktor (ΔI_L)	10%
Resistor Beban	244 Ω

Langkah awal dalam menentukan nilai komponen pada *Synchronous ZETA Converter* yaitu menentukan nilai frekuensi *switching* MOSFET, kemudian menentukan nilai *Duty cycle* terdapat pada Persamaan (3.1):

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in} + V_{out}} \quad (3.1)$$

$$D = \frac{220}{24 + 220}$$

$$D = 0,9$$

Menentukan nilai komponen induktor L_1 yang digunakan menggunakan Persamaan (3.2):

$$L_1 \geq \frac{D \times V_{in}}{\Delta i L f_s} \quad (3.2)$$

Riak arus induktor (ΔIL) dari *Synchronous ZETA Converter* yang dirancang sebesar 10% dari arus *input*. Persamaan (3.3) digunakan untuk mencari nilai riak arus keluaran dari *Synchronous ZETA Converter*.

$$\Delta IL = 10\% \times I_{in} \quad (3.3)$$

$$\Delta IL = 0,83 \text{ A}$$

Setelah diperoleh nilai riak arus induktor L_1 , maka nilai induktansi dari induktor (L_1) dapat dihitung menggunakan Persamaan (3.2).

$$L_1 \geq \frac{0,9 \times 24}{0,83 \times 50000}$$

$$L_1 \geq 520 \mu H$$

Selanjutnya menentukan nilai inductor L_2 dengan Persamaan (3.4).

$$L_2 \geq \frac{D \times V_{in}}{\Delta i L f_s} \quad (3.4)$$

Arus induktor L_2 pada *Synchronous ZETA Converter* memiliki nilai yang sama dengan arus *output* pada rangkaian, sehingga untuk mencari *ripple* arus (ΔIL) terdapat pada Persamaan (3.5):

$$\Delta IL = 10\% \times I_o \quad (3.5)$$

$$\Delta IL = 0,09$$

Setelah diperoleh nilai riak arus induktor (ΔIL), maka nilai induktansi dari induktor (L_2) dapat dihitung menggunakan Persamaan (3.4).

$$L_2 \geq \frac{0,9 \times 24}{0,09 \times 50000}$$

$$L_2 \geq 4800 \mu H$$

Menentukan nilai kapasitor C_1 yang digunakan, menggunakan Persamaan (3.6):

$$C_1 \geq \frac{V_o \times D}{\Delta VC \cdot R \cdot f_s} \quad (3.6)$$

Tegangan kapasitor VC pada *Synchronous ZETA Converter* memiliki nilai yang sama dengan tegangan *output* pada rangkaian, sehingga untuk mencari *ripple* tegangan kapasitor (ΔVC) menggunakan Persamaan (3.7);

$$\Delta VC \geq 1\% \times V_o \quad (3.7)$$

$$\Delta VC \geq 2,2 V$$

Setelah diperoleh nilai riak tegangan kapasitor (ΔVC), maka nilai kapasitor untuk C_1 dapat dihitung menggunakan Persamaan (3.6).

$$C_1 \geq \frac{220 \times 0,9}{2,2 \times 244 \times 50000}$$

$$C_1 \geq 7,3 \mu F$$

Kemudian, untuk menentukan nilai kapasitor C_1 yang digunakan, menggunakan Persamaan (3.8):

$$C_2 \geq \frac{1 - D}{8 \cdot L_2 \cdot f_s^2 \cdot \frac{\Delta V_o}{V_o}} \quad (3.8)$$

$$C_2 \geq \frac{1 - 0,9}{8 \times 4800 \times 10^{-6} \times 50000^2 \cdot 0,01}$$

$$C_2 \geq 10,4 \mu F$$

3.6 Pemilihan Mosfet

Pemilihan komponen MOSFET *Synchronous ZETA Converter* yang terdiri dari *high-side* dan *low-side* MOSFET perlu mempertimbangkan beberapa faktor penting, yaitu tegangan *Input* (V_{in}) dan arus keluaran (L_{out}). Tegangan *Input* berguna untuk menentukan nilai rating VDS MOSFET yang diperlukan. Rangkaian *Synchronous ZETA Converter* ini dirancang dengan menggunakan tegangan *Input* sebesar 24 V, sehingga akan dipilih MOSFET dengan rating tegangan VDS lebih

dari 24 V. Kemudian untuk menentukan rating arus *high-side* dan *low-side* MOSFET yang diperlukan, dapat dicari menggunakan Persamaan (3.5) dan (3.6).

a. *High-side* MOSFET(Q1)

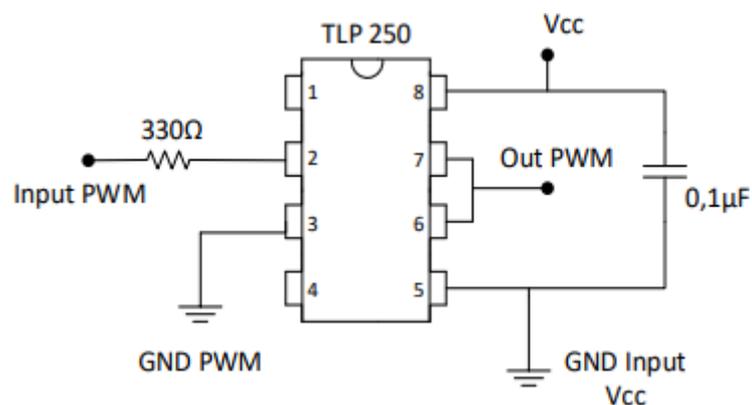
$$I_{RMS(Q1)} = I_o \times \sqrt{D} \quad (3.5)$$

b. *Low-side* MOSFET(Q2)

$$I_{RMS(Q2)} = I_o \times \sqrt{1 - D} \quad (3.6)$$

3.7 Perancangan *Gate Driver*

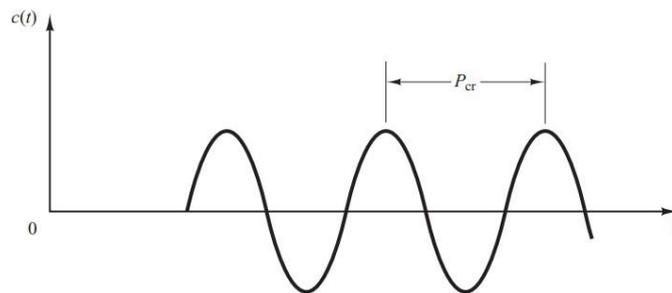
Pada penelitian ini menggunakan rangkaian *gate driver* sebagai penguat sinyal PWM yang dihasilkan oleh mikrokontroler seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4. Rangkaian TLP250 berfungsi sebagai penguat sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*) yang dihasilkan oleh rangkaian kontrol, dengan tujuan meningkatkan *level* tegangan sinyal dari 5V menjadi 15V. Tegangan yang lebih tinggi ini diperlukan agar mampu mengaktifkan MOSFET pada rangkaian konverter DC yang dirancang. Berdasarkan *datasheet* TLP250, arus *forward* (I_f) yang direkomendasikan adalah sebesar 10 mA, dengan tegangan *forward* tipikal berada pada kisaran 1,6V hingga 1,8V. Rangkaian *gate driver*



Gambar 3. 4 Rangkaian skematik *driver* MOSFET TLP250

3.8 Penentuan Parameter PID

Pada penelitian ini penentuan parameter Pengendalian PID menggunakan metode ke-dua atau metode Osilasi dari Metode Ziegler Nichols. Pengendalian pada metode ini hanya Pengendalian proporsional atau K_p , yang dimana nilai dari K_i , dan K_d diatur nilainya menjadi 0. Nilai dari K_p dinaikkan dari 0 hingga nilai kritis K_{cr} , sehingga diperoleh keluaran yang terus-menerus berosilasi dengan amplitudo yang sama (*Sustained Oscillation*). Nilai kritis K_p ini disebut sebagai *ultimate gain* K_u ($K_p = K_u$). Periode dari *sustained oscillation* tersebut disebut *ultimate period* (P_{cr}). Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3. 5 Kondisi sistem dengan sustained oscillation

Nilai dari K_u dan P_{cr} yang didapatkan akan digunakan untuk menentukan konstanta-konstanta Pengendali sesuai dengan tetapan empiri Ziegler Nichols yang ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3. 2 Penalaan Ziegler Nichols metode ke-dua

<i>Tipe Kontroler</i>	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2} P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

Setelah mendapatkan nilai dari K_p , T_i , dan T_d , selanjutnya ialah menentukan nilai K_i , dan K_d dengan menggunakan Persamaan (3.7) dan (3.8):

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (3.7)$$

$$K_d = K_p \times T_d \quad (3.8)$$

3.9 Perancangan Sensor Tegangan

Pembagi tegangan resistif digunakan untuk mengukur tegangan pada sisi keluaran *Synchronous ZETA Converter*. Dikarenakan tegangan yang masuk ke ADC mikrokontroler tidak dapat melebihi dari 5V, maka dilakukan pencarian nilai resistansi yang sesuai pada Persamaan (3.9):

$$V_{ADC} = V_{out} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.9)$$

Tegangan keluaran yang maksimal yang dapat dihasilkan rangkaian *Synchronous ZETA Converter* ini adalah sama dengan tegangan keluaran, yaitu 220 volt. Untuk mempermudah perhitungan, nilai R_2 ditetapkan sebesar 2.7k Ω . Sehingga didapatkan perhitungan sebagai berikut:

$$5V = 220V \times \frac{2700\Omega}{R_1 + 2700\Omega}$$

$$R_1 = 116k\Omega$$

Dari perhitungan tersebut didapatkan nilai R_1 sebesar 116k Ω dan untuk menyesuaikan nilai yang ada dipasaran, maka nilai R_1 yang digunakan sebesar 100k Ω dan nilai R_2 sebesar 2700 Ω .

3.10 Pengujian Sistem

Adapun tahap pengujian sistem yang akan dilakukan pada penelitian ini yang ditunjukkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3. 3 Pengujian Sistem

<i>No</i>	<i>Jenis Pengujian</i>	<i>Indikator Keberhasilan</i>	<i>Keterangan</i>
1	Pengujian Tegangan <i>Ouput Synchronous ZETA Converter.</i>	Tegangan <i>output</i> stabil sesuai dengan kebutuhan motor DC.	Dilakukan pengukuran tegangan <i>output</i> menggunakan sensor tegangan.
2	Pengujian Respon <i>PID Controller.</i>	Motor DC mencapai Kecepatan referensi dengan <i>error</i> minimal dan waktu respon cepat.	Pengujian dilakukan dengan mengubah nilai referensi kecepatan dan mengamati respons sistem, di mana parameter PID diatur melalui ATMEGA2560 untuk memastikan kestabilan dan respons cepat.

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Berdasarkan hasil penelitian, telah berhasil dirancang dan diimplementasikan sistem pengendali kecepatan motor DC dengan kapasitas 100watt berbasis *Synchronous ZETA Converter* yang terintegrasi dengan metode pengendali PID menggunakan parameter *tunning* Ziegler Nichols II dengan nilai *gain* $K_p = 0,4326$, $K_i = 1,7304$, dan $K_d = 0,02703$.
2. Sistem mampu menghasilkan respon sistem yang stabil serta meningkatkan efisiensi pengendalian motor DC, sesuai dengan tujuan penelitian. Hasil data pengujian pada berbagai variasi *set-point* kecepatan (800–1400 RPM), diperoleh nilai rata-rata; *rise time* <1 detik, *settling time* <2,2 detik, *overshoot* (sekitar 5–6,67%), serta *error steady-state* (sekitar $\pm 0,5\%$).

5.2 Saran

Adapun saran dari penelitian ini untuk penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Penelitian dapat dikembangkan dengan mengintegrasikan sistem kendali kecepatan motor DC berbasis *Internet of Things (IoT)* untuk pemantauan dan pengendalian secara *real-time*.
2. Pengembangan metode kontrol seperti Fuzzy-PID atau *Artificial Neural Network (ANN)* disarankan untuk meningkatkan kemampuan adaptasi dan kinerja sistem dalam mengatasi variasi beban dan perubahan kondisi operasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Rashmi, J. Manohar, and K. S. Rajesh, "A comparative study and performance analysis of synchronous SEPIC Converter and *Synchronous ZETA Converter* by using PV system with MPPT technique," *1st IEEE Int. Conf. Power Electron. Intell. Control Energy Syst. ICPEICES 2016*, 2017, doi: 10.1109/ICPEICES.2016.7853212.
- [2] I. Hudati, A. P. Aji, and S. Nurrahma, "Kendali Posisi Motor DC dengan Menggunakan Kendali PID," *J. List. Instrumentasi dan Elektron. Terap.*, vol. 2, no. 2, pp. 1–6, 2021, doi: 10.22146/juliet.v2i2.71148.
- [3] M. Diah Ika Putri, A. Ma'arif, and R. Dwi Puriyanto, "Pengendali Kecepatan Sudut Motor DC Menggunakan Kontrol PID dan *Tunning Ziegler Nichols*," *Techno (Jurnal Fak. Tek. Univ. Muhammadiyah Purwokerto)*, vol. 23, no. 1, 2022, doi: 10.30595/techno.v23i1.10773.
- [4] P. Media *et al.*, "Digital Digital Repository Repository Universitas Universitas Jember Jember Digital Digital Repository Repository Universitas Universitas Jember Jember," 2017.
- [5] L. K. Energi *et al.*, "Motor DC Penguat Terpisah," vol. 1, no. 1, pp. 1–64, 1967, [Online]. Available: [https://mesin.pnj.ac.id/upload/artikel/files/mesin/jobsheet/praktikum listrik dan elektronika 4.pdf](https://mesin.pnj.ac.id/upload/artikel/files/mesin/jobsheet/praktikum_listrik_dan_elektronika_4.pdf)
- [6] D. P. Nasional, "Dasar Mesin Listrik," pp. 1–51, 2008, [Online]. Available: <https://installist.files.wordpress.com/2009/12/mesin-listrik.pdf>
- [7] J. Falin, "Designing DC/DC Converters based on ZETA Topology," *Analog Appl. J. Texas Instruments Inc.*, vol. 2Q, pp. 16–21, 2010.
- [8] M. Rosu-hamzescu, "High-Power CC/CV Battery Charger using an Inverse SEPIC (Zeta) Topology," pp. 1–16, 2012.
- [9] J. Teknik, E. Fakultas, and U. Semarang, *Jurusan teknik elektro fakultas teknik universitas semarang 2018*, no. 1c. 2018.
- [10] A. P. Nandiwardhana, H. Suryoatmojo, and M. Ashari, "Perancangan Zeta Converter yang dilengkapi Power Factor Correction pada Aplikasi Pengaturan Kecepatan Motor Brushless DC," *J. Tek. ITS*, vol. 5, no. 2, 2016, doi: 10.12962/j23373539.v5i2.16099.
- [11] P. Ramanda and P. Anggraeni, "MSI Transaction on Education Rancang Bangun Zeta Converter untuk Charging Baterai MSI Transaction on Education," vol. 5, no. 4, 2024.
- [12] K. Woranetsuttikul, K. Pinsuntia, N. Jumpasri, T. Nilsakorn, and W. Khan-Ngern, "Comparison on performance between synchronous single-ended primary-inductor converter (SEPIC) and *Synchronous ZETA Converter*," *2014 Int. Electr. Eng. Congr. iEECON 2014*, 2014, doi: 10.1109/iEECON.2014.6925855.

- [13] J. Betten and T. Instruments, “Synchronous ZETA Converter Outperforms The SEPIC,” *How2Power*, no. May, pp. 1–7, 2014, [Online]. Available: http://www.how2power.com/pdf_view.php?url=/newsletters/1405/articles/H2PToday1405_design_Texas_Instruments.pdf
- [14] S. Roberts, “DC/DC Book of Knowledge - Practical tips for the User,” *Recom*, pp. 8–28, 2016.
- [15] N. Hamid and A. Mansur, “Penalaan Parameter PID dengan Metode Ziegler-Nichols untuk Optimasi Kontrol Kecepatan Motor pada Alat Spin Coater,” *Pros. Semin. Nas. Tek. Elektro dan Inform.*, vol. 1, no. 1, pp. 315–319, 2021.
- [16] A. Braun, “Auto-Tunning,” *Optim. und Adapt. Regelung Tech. Syst.*, pp. 213–219, 2020, doi: 10.1007/978-3-658-30916-9_12.
- [17] “SKRIPSI PENGARUH KONTROL PID PADA MOTOR DC BERBASIS MATLAB-SIMULINK _ PERPUSTAKAAN UNTIDAR _ Repositori Mahasiswa Untidar.pdf.”
- [18] P. N. Paraskevopoulos, *Modern control engineering*. 2017. doi: 10.1201/9781315214573.
- [19] K. Dalam, P. Pemilahan, B. Logam, and D. A. N. Non, “1 , 2 , 3 ,” vol. 4, no. 5, 2024.
- [20] Y. A. Putra, “Optimisasi *Tunning* Kontrol Pid Pada Amine Regenerator Di Proses Sweetening Gas,” pp. 1–81, 2017.