

Analisis Konsumsi Arus Operasional Blok Kontrol dan Regulasi Tegangan pada Cascaded DC-DC Boost Converter sebagai Catu Daya Elektrostimulator Terapi Medis

Ivana Moren Eklesia Tawaru*, Devi Yuliani Seran, Agung Nugraha Rahman, Eko Arianto

Program Studi Teknologi Elektromedis, Fakultas Vokasi, Universitas Sanata Dharma,, Indonesia

*Email Korespondensi: ivanatawaru01@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik regulasi tegangan dan konsumsi arus kendali pada sistem catu daya bertingkat (*Cascaded DC-DC Boost Converter*) dua tahap (5 V ke 12 V, dan 12 V ke 97 V) sebagai penyuplai energi elektrostimulator terapi medis. Metode eksperimental dilakukan dengan mengintegrasikan blok catu daya tersebut bersama beban aktif berupa rangkaian pengondisi arus *Voltage Controlled Current Source* (VCCS). Pengujian dilakukan dengan memvariasikan arus terapi dari 2 mA hingga 10 mA pada frekuensi 100 Hz menggunakan tiga variasi resistansi beban tiruan tubuh pasien (470 Ω , 560 Ω dan 1 k Ω). Hasil eksperimen menunjukkan bahwa sistem catu daya bertingkat *open-loop* mengalami penurunan tegangan statis sebesar 24,32% dari regulasi ideal (97 VDC menjadi 73,4 VDC) akibat karakteristik rugi-rugi parasitis internal dan pembebanan awal sirkuit kontrol. Meskipun demikian, amplitudo tegangan 73,4 VDC tersebut menunjukkan stabilitas horizontal yang kokoh tanpa fluktuasi sekunder pada seluruh rentang pembebanan dinamis (2 mA hingga 10 mA), sehingga mampu menyediakan *voltage headroom* yang memadai untuk menjamin linieritas regulasi arus pada blok VCCS tanpa gejala *waveform clipping*. Nilai dari penelitian ini adalah memberikan kontribusi berupa analisis empiris mengenai karakteristik regulasi catu daya bertingkat tanpa umpan balik (*open-loop*) untuk menjaga akurasi dosis arus terapi pada instrumentasi medis portabel.

Kata kunci: *Cascaded Boost Converter*, Elektrostimulator, Regulasi Tegangan, Linieritas VCCS

Analysis of Operational Current Consumption of the Control Block and Voltage Regulation in a Cascaded DC-DC Boost Converter as a Power Supply for Medical Therapy

Abstract

This study aims to analyze the voltage regulation and control current consumption characteristics of a two-stage Cascaded DC-DC Boost Converter (5 V to 12 V, and 12 V to 97 V) utilized as a power supply for medical therapy electrostimulators. The experimental method was conducted by integrating the power supply block with an active load configuration consisting of a Voltage Controlled Current Source (VCCS) circuit. Testing was performed by varying the therapy current from 2 mA to 10 mA at a frequency of 100 Hz across three variations of simulated patient tissue resistance (470 Ω , 560 Ω , and 1 k Ω). The experimental results indicate that the open-loop cascaded power supply system undergoes a static voltage drop of 24.32% from the ideal regulation (97 VDC to 73.4 VDC) due to internal parasitic losses and initial loading of the control circuit. Nevertheless, this 73.4 VDC voltage amplitude exhibits robust horizontal stability without secondary fluctuations throughout the dynamic loading range (2 mA to 10 mA), thereby providing sufficient voltage headroom to ensure precise current regulation linearity in the VCCS block without waveform clipping. The value of this research lies in providing an empirical analysis of open-loop cascaded power supply regulation characteristics in maintaining accurate therapy current dosages for portable medical instrumentation.

Keywords: *Cascaded Boost Converter*, *Electrostimulator*, *Voltage Regulation*, *VCCS Linearity*

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi di bidang kesehatan secara masif telah mendorong optimalisasi fungsional perangkat elektromedis menuju dimensi yang lebih ringkas, portabel, dan berbasis sumber daya mandiri tanpa mengorbankan tingkat akurasi dosis klinis. Salah satu perangkat

rehabilitasi medis yang mengalami akselerasi portabilitas adalah elektrostimulator. Secara klinis, elektrostimulator memanfaatkan hantaran impuls pulsa listrik berskala miliampere (mA) untuk merangsang jaringan saraf (*neurostimulation*) atau serat otot (*myostimulation*) guna memicu pemulihan fungsi motorik serta mereduksi persepsi nyeri kronis pada pasien. Menurut standar keselamatan perangkat elektromedis IEC 60601-2-10, intervensi elektroterapi yang aman dan efektif memerlukan kepastian bahwa arus yang mengalir ke tubuh pasien harus bersifat konstan dan teregulasi ketat, terlepas dari fluktuasi impedansi dinamis yang dimiliki oleh jaringan biologis manusia.

Hambatan listrik pada antarmuka kulit dan jaringan biologis manusia tidaklah konstan, melainkan bersifat kompleks, non-linier, dan dinamis yang nilainya dapat berkisar antara beberapa ratus ohm hingga puluhan kilo-ohm tergantung pada frekuensi, kadar hidrasi, dan kondisi epidermis (Grimnes & Martinsen, 2015). Guna menembus impedansi tinggi tersebut dan menjamin arus terapi tetap mengalir secara kontinu sesuai dosis tanpa mengalami pemotongan gelombang (*waveform clipping*), sirkuit pengondisi arus elektroterapi membutuhkan pasokan rel tegangan DC tinggi (*high-voltage rail*) yang stabil, umumnya dirancang mencapai kisaran mendekati 100 VDC. Namun, kendala utama pada arsitektur perangkat elektroterapi portabel berbasis baterai lithium-ion atau port USB adalah keterbatasan level tegangan masukan awal yang sangat rendah, yaitu hanya berkisar antara 3,7 V hingga 5 V.

Konversi tegangan dengan rasio ekstim dari 5 VDC menuju 97 VDC tidak direkomendasikan menggunakan topologi konvensional *Single-Stage DC-DC Boost Converter*. Hal ini dikarenakan tuntutan *duty cycle* yang mendekati satu akan mengeksitasi rugi-rugi konduksi parasitik dan stres termal pada saklar semikonduktor, yang pada akhirnya mendegradasi efisiensi sistem secara drastis. Kondisi operasional ini secara inheren memicu lonjakan rugi-rugi konduksi (*conduction losses*) akibat akumulasi resistansi parasitis internal serta rugi-rugi saklar (*switching losses*) pada komponen aktif, yang berimplikasi pada penurunan efisiensi daya secara drastis serta risiko kegagalan termal (Rashid, 2017). Sebagai solusi, penggunaan topologi *Cascaded DC-DC Boost Converter* (konverter bertingkat) diterapkan untuk membagi beban rasio kenaikan tegangan menjadi beberapa tahapan optimal. Pada sistem yang dikembangkan, konfigurasi dirancang dalam dua tahap, yaitu menaikkan tegangan masukan utama 5 VDC menjadi 97 VDC pada tahap pertama, yang kemudian diteruskan untuk dilipatgandakan dari 12 VDC menuju target perancangan sebesar 97 VDC pada tahap kedua. Secara teoritis, hubungan antara tegangan masukan (V_{in}) dan tegangan keluaran ideal tahap akhir (V_{out2}) dikontrol oleh kombinasi nilai *duty cycle* dari masing-masing saklar semikonduktor, yang diformulasikan melalui persamaan berikut (Babaei et al., 2014):

$$V_{out2} = \frac{V_{in}}{(1-D_1)(1-D_2)} \quad (1)$$

Di mana D_1 merepresentasikan *duty cycle* konverter tahap pertama dan D_2 adalah *duty cycle* konverter tahap kedua. Dalam kondisi operasi tanpa umpan balik (*open-loop*), nilai D_1 dan D_2 bergantung penuh pada karakteristik statis pembangkit pulsa PWM bawaan modul. Adanya fluktuasi parameter parasitis komponen riil, seperti resistansi deret ekuivalen (ESR) kapasitor dan

Direct Current Resistance (DCR) pada induktor, akan menggeser nilai keluaran aktual V_{out2} dari target idealnya menuju level tegangan transien berbeban sirkuit kontrol.

Meskipun mampu menghasilkan penguatan tegangan yang tinggi tanpa membebani satu komponen saklar tunggal, interaksi fisis konverter bertingkat tanpa kendali umpan balik (*open-loop cascaded converter*) memunculkan tantangan kompleks pada parameter regulasi tegangan saat diintegrasikan secara langsung dengan sirkuit aktif *Voltage Controlled Current Source* (VCCS). Berdasarkan analisis yang dipaparkan oleh Babaei dkk. (2014), penambahan tahapan pensaklaran (*switching stage*) secara inheren akan meningkatkan akumulasi rugi-rugi daya parasitis, terutama dari *Direct Current Resistance* (DCR) pada induktor dan resistansi deret ekuivalen (*ESR*) kapasitor filter. Fenomena reduksi tegangan keluaran dari target teoritis 97 VDC ke level mapan (*steady-state*) 73,4 VDC mengindikasikan adanya akumulasi disipasi daya konstan pada *switching stage* kedua, yang merepresentasikan resistansi deret ekuivalen (*ESR*) kapasitor filter dan *Direct Current Resistance* (DCR) dari induktor saat beroperasi tanpa mekanisme kompensasi otomatis (*open-loop*). Namun, karakteristik kurva V_{out2} yang sepenuhnya datar (*flat*) pada nilai 73,4 VDC di seluruh spektrum variasi arus terapi membuktikan bahwa kapasitas *power delivery* konverter bertingkat ini sangat rigid terhadap fluktuasi impedansi beban dinamis.

Penelitian mengenai karakteristik konverter bertingkat telah banyak dipublikasikan, salah satunya oleh Laily dkk. (2024) yang mengevaluasi efisiensi konverter multi-level. Namun, sebagian besar studi terdahulu membatasi analisis mereka pada kondisi pembebanan resistif statis murni atau diaplikasikan untuk sistem konversi energi terbarukan berskala besar. Riset yang membedah perilaku dinamis regulasi tegangan konverter bertingkat *open-loop* saat berinteraksi langsung dengan karakteristik beban aktif sirkuit VCCS medis untuk arus rendah (2 mA hingga 10 mA) masih sangat terbatas. Kestabilan rel tegangan tinggi ini sangat krusial, karena seperti yang ditegaskan oleh Aqueveque dkk. (2016), efisiensi operasional dan proteksi keselamatan klinis pada perangkat stimulasi sangat ditentukan oleh kemampuan catu daya dalam menyediakan *voltage headroom* yang konstan demi mencegah terjadinya *clipping error* pada arus terapi.

Berdasarkan celah penelitian (*research gap*) tersebut, penelitian ini ditujukan untuk melakukan analisis eksperimental mendalam mengenai kemampuan regulasi tegangan keluaran *Cascaded DC-DC Boost Converter* di bawah kondisi berbeban aktif, serta menginvestigasi implikasinya secara komprehensif terhadap karakteristik konsumsi arus kontrol dan tingkat linieritas respons konversi arus terapi yang dihasilkan oleh blok VCCS elektrostimulator medis. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan landasan data empiris yang objektif dan menjadi referensi fisis dalam optimalisasi perancangan sistem catu daya tegangan tinggi yang stabil, efisien, dan aman untuk perangkat elektromedis portabel masa depan.

METODE

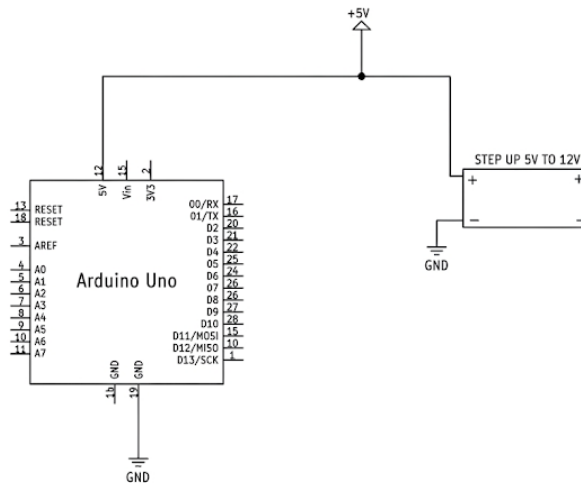
A. Konteks Penelitian dan Desain Sistem

Penelitian eksperimental ini dilakukan melalui pengujian langsung secara empiris di laboratorium guna mengevaluasi karakteristik elektrik sistem catu daya bertingkat (*Cascaded DC-DC Boost Converter*) tanpa umpan balik (*open-loop*) yang diintegrasikan dengan beban

aktif berupa rangkaian penstabil arus (*Voltage Controlled Current Source*) untuk aplikasi elektrostimulator terapi medis. Unit analisis dari penelitian ini berfokus pada kemampuan regulasi tegangan konverter bertingkat di bawah kondisi berbeban (*loaded condition*) serta linieritas respons kendali arus terapi yang dihasilkan.

Secara bertahap, arsitektur perangkat keras sistem ini dikonfigurasi ke dalam tiga tahapan integrasi fungsional:

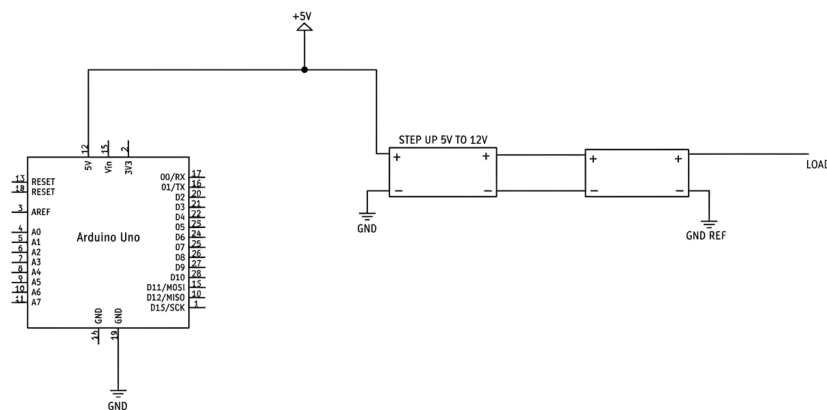
1. Tahap Pembangkitan Daya Awal (5 V ke 12 V)



Gambar 1. Pembangkitan Daya Awal (5 V ke 12 V)

Modul *boost converter* tingkat pertama dihubungkan dengan mikrokontroler Arduino Uno untuk menaikkan tegangan suplai utama dari 5 VDC menuju 12 VDC, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 1. Tegangan 12 VDC ini dialokasikan sebagai jalur catu daya operasional rendah (*low-voltage supply*) untuk IC Op-Amp LM358 pada blok kontrol.

2. Tahap Konverter Bertingkat (*Cascaded Rail*)

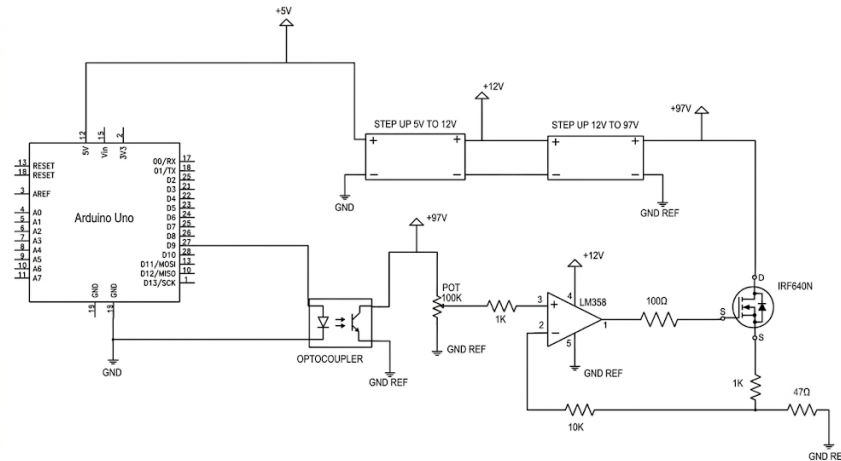


Gambar 2. Konverter Bertingkat (*Cascaded Rail*)

Output tingkat pertama (12 VDC) diteruskan menuju modul *boost converter* tingkat kedua untuk dilipatgandakan menjadi target tegangan tinggi perancangan sebesar 97 VDC pada kondisi tanpa beban (*no-load*), seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Rel

tegangan tinggi inilah yang bertindak sebagai penyedia energi utama bagi sirkuit elektrostimulator.

3. Tahap Sistem Integrasi Elektrostimulator



Gambar 3. Sistem Integrasi Elektrostimulator

Keseluruhan blok fungsional meliputi mikrokontroler, modul isolasi *optocoupler*, rangkaian pembagi tegangan isyarat kendali via potensiometer $100\text{ k}\Omega$, IC Op-Amp LM358, Transistor MOSFET IRF640N, catu daya *cascaded*, serta resistansi beban pengganti jaringan tubuh pasien (R_{load}) diintegrasikan menjadi satu kesatuan sistem elektrostimulator medis utuh yang ditunjukkan pada Gambar 3. Hubungan transfer fisis sirkuit penstabil arus umpan balik negatif ini dimodelkan melalui persamaan:

$$I_{out} = \frac{V_{in(Op-Amp)}}{R_{Sens}} \quad (2)$$

Di mana I_{out} merupakan arus keluaran stimulasi, $V_{in(Op-Amp)}$ adalah tegangan isyarat kendali input, dan R_{Sens} adalah resistansi sensor pada kaki *source* MOSFET yang ditentukan sebesar $47\ \Omega$.

B. Variabel Penelitian

Eksperimen ini melibatkan beberapa parameter yang diklasifikasikan ke dalam tiga variabel penelitian utama:

1. Variabel Bebas:

- Arus beban terapi target yang disimulasikan melalui pengaturan isyarat kendali, yaitu pada variasi 2 mA , 4 mA , 6 mA , 8 mA , dan 10 mA .
- Nilai resistansi beban tiruan jaringan tubuh pasien (R_{load}) yang ditentukan pada tiga variasi spesifik, yaitu $1\text{ k}\Omega$, $560\ \Omega$, dan $470\ \Omega$.

2. Variabel Terikat:

Karakteristik performa elektrik sistem yang meliputi regulasi tegangan keluaran aktual tingkat pertama (V_{out1}), regulasi tegangan keluaran aktual tingkat kedua (V_{out2}),

arus konsumsi operasional blok kontrol ($I_{in(VCCS)}$), dan nilai arus keluaran terapi aktual (I_{out}).

3. Variabel Kontrol:

Parameter sistem yang dipertahankan konstan sepanjang pengujian, meliputi tegangan input awal 5 VDC stabil dari catu daya utama, tipe modul *boost converter* bertingkat yang digunakan, serta parameter pulsa isyarat kendali yang dikunci pada frekuensi kerja 100 Hz dengan *Duty Cycle* sebesar 50%.

C. Prosedur Pengumpulan Data

Prosedur eksperimen dan langkah pengambilan data elektrik dilakukan secara bertahap melalui mekanisme berikut:

1. Pengkondisian awal dilakukan dengan memasang salah satu variasi resistor beban (R_{load}) pada terminal keluaran sistem elektrostimulator.
2. Sebelum pengujian arus dilakukan, multimeter digital diposisikan untuk mengukur tegangan keluaran tahap pertama (V_{out1}) dan tahap kedua (V_{out2}) pada kondisi awal guna memastikan seluruh rangkaian berada pada kondisi kerja normal.
3. Pengaturan arus beban terapi dilakukan dengan memutar potensio 100 k Ω secara bertahap untuk mengubah nilai tegangan isyarat kendali ($V_{in(Op-Amp)}$) dari 0,1 V hingga 0,5 V dengan kenaikan sebesar 0,1 V. Nilai tegangan kontrol ini diukur secara presisi pada pin 3 non-inverting IC Op-Amp LM358 terhadap referensi tanah terisolasi ($GNDREF$).
4. Setelah nilai tegangan kendali yang ditargetkan tercapai, dilakukan pengukuran arus konsumsi kontrol ($I_{in(VCCS)}$) pada titik suplai serta arus keluaran terapi aktual (I_{out}) yang mengalir melewati resistor sensor 47 Ω menuju $GNDREF$.
5. Seluruh parameter nilai tegangan dan arus aktual untuk setiap variasi beban R_{load} (1 k Ω , 560 Ω , dan 470 Ω) dicatat ke dalam tabel matriks pengujian.

D. Analisis Data

Data elektrik yang telah ditabulasi kemudian dianalisis secara grafis dan matematis untuk menilai karakteristik linieritas respons sirkuit dan persentase regulasi tegangan drop. Karakteristik regulasi tegangan pada output *Cascaded Boost Converter* (V_{out2}) dihitung secara kuantitatif menggunakan persamaan regulasi tegangan (*Voltage Regulation*):

$$\%VR = \frac{V_{no\ load} - V_{full\ load}}{V_{no\ load}} \times 100\% \quad (3)$$

Di mana $V_{no\ load}$ adalah nilai tegangan desain konverter tanpa beban sebesar 97 VDC, dan $V_{full\ load}$ merupakan nilai tegangan aktual konverter tingkat kedua saat sistem penstabil arus elektrostimulator aktif menyuplai arus terapi. Tren perubahan arus konsumsi operasional blok kontrol ($I_{in(VCCS)}$) dianalisis guna mengevaluasi disipasi daya internal sirkuit penstabil arus dalam mempertahankan akurasi keluaran isyarat pulsa terapi medis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian eksperimental pada penelitian ini ditujukan untuk mengevaluasi secara empiris karakteristik elektrik interkoneksi antara sistem catu daya bertingkat (*Cascaded DC-DC Boost Converter*) dua tahap dan rangkaian penstabil arus *Voltage Controlled Current Source* (VCCS) sebagai beban aktif dinamis pada sistem elektrostimulator terapi medis. Evaluasi data difokuskan pada tiga parameter utama yang dapat diukur secara langsung dan valid menggunakan instrumen multimeter digital regulasi stabilitas tegangan keluaran tahap kedua (V_{out2}), karakteristik kuantitas penyerapan arus konsumsi operasional blok kontrol (I_{in}), dan akurasi nilai keluaran arus terapi aktual (I_{out}).

Pengumpulan data dilakukan dengan memberikan variasi stimulus tegangan isyarat kendali pada pin 3 non-inverting IC Op-Amp LM358 ($V_{in(Op-Amp)}$) dari 0,1 V hingga 0,5 V dengan interval kenaikan berkisar 0,1 V. Pembebanan sirkuit diuji secara silang menggunakan tiga nilai spesifik resistansi beban tiruan jaringan tubuh pasien (R_{load}), yaitu sebesar 1 k Ω , 560 Ω , dan 470 Ω . Matriks tabulasi data elektrik hasil pengukuran eksperimental disajikan secara rinci pada Tabel 1.

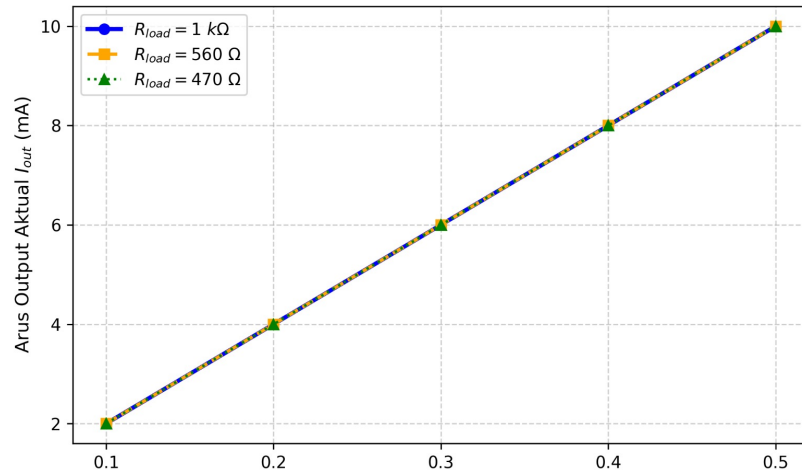
Tabel 1. Karakteristik Elektrik Blok VCCS Elektrostimulator Terapi Medis

R_{load} (Ω)	Arus Beban Target (mA)	Tegangan Kendali $V_{in(Op-Amp)}$ (V)	Arus Konsums i Kontrol I_{in} (mA)	Tegangan Catu Daya V_{out1} (12 V)	Tegangan Catu Daya V_{out2} (97 V Aktual)	Arus Output Aktual I_{out} (mA)
1k	2	0,1	2,5	11,9	73,4	2
	4	0,2	4,0	12,0	73,4	4
	6	0,3	5,5	12,0	73,4	6
	8	0,4	6,0	11,9	73,4	8
	10	0,5	6,0	12,0	73,4	10
560	2	0,1	2,5	12,0	73,4	2
	4	0,2	4,0	12,0	73,4	4
	6	0,3	6,5	11,9	73,4	6
	8	0,4	7,5	11,9	73,4	8
	10	0,5	12,0	11,5	73,4	10
470	2	0,1	2,5	12,1	73,4	2
	4	0,2	4,5	12,0	73,4	4
	6	0,3	5,5	12,0	73,4	6
	8	0,4	8,0	11,9	73,4	8
	10	0,5	13,0	11,8	73,4	10

Sumber: hasil penelitian tim

A. Evaluasi Grafis Linieritas Arus Keluaran VCCS

Berdasarkan visualisasi data elektrik dari Tabel 1 yang dipetakan ke dalam bentuk kurva pada Gambar 5, dapat dianalisis bahwa respons hubungan fisis antara variasi tegangan isyarat kendali ($V_{in(Op-Amp)}$) dan arus output aktual (I_{out}) yang dihantarkan ke resistor beban menunjukkan karakteristik derajat linieritas yang sangat tinggi.



Gambar 5. Linieritas Kendali Arus VCCS

Evaluasi visual memperlihatkan bahwa kurva respons data untuk seluruh variasi nilai impedansi beban ($R_{load} = 1\text{ k}\Omega, 560\ \Omega, 470\ \Omega$) saling berhimpit secara sempurna membentuk satu garis lurus diagonal tanpa adanya penyimpangan atau pencilan (*outlier*) data yang signifikan. Ketika isyarat kendali dinaikkan secara bertahap dari $0,1\text{ V}$ menuju $0,5\text{ V}$, arus terapi meningkat secara proporsional dari 2 mA hingga mencapai batas atas beban puncak sebesar 10 mA . Setiap penambahan isyarat input sebesar $0,1\text{ V}$ secara konsisten direspons oleh sirkuit dengan kenaikan arus sebesar 2 mA . Data empiris ini membuktikan alasan fisis bahwa sirkuit VCCS berbasis Op-Amp LM358 bekerja secara akurat sebagai sumber arus konstan yang performanya tidak terpengaruh oleh fluktuasi nilai resistansi beban.

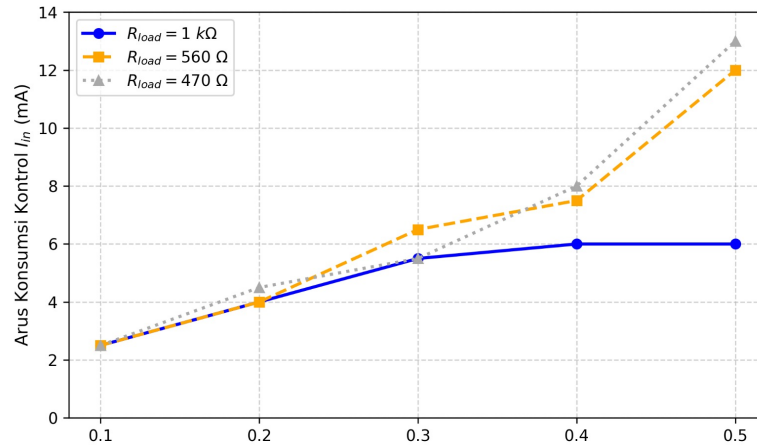
Kestabilan dan linieritas penataan arus yang ditunjukkan pada Gambar 5 dapat divalidasi secara matematis menggunakan nilai parameter sirkuit aktual. Dengan nilai R_{sens} sebesar $47\ \Omega$, setiap kenaikan isyarat kendali $V_{in\ (Op-Amp)}$ dengan kelipatan $0,1\text{ V}$ secara teoritis akan mengalirkan arus stimulasi sebesar:

$$I_{out} = \frac{0,1\text{ V}}{47\ \Omega} \approx 2,12\text{ m} \quad (4)$$

Pembuktian matematis ini memberikan justifikasi rasional yang kokoh mengapa kurva respons arus aktual pada pengujian empiris (Tabel 1) menunjukkan grafik horizontal yang berhimpit presisi tanpa deviasi ekstrem pada seluruh variasi resistansi beban pasien ($470\ \Omega, 560\ \Omega$, dan $1\text{ k}\Omega$), sekaligus membuktikan keandalan regulasi *open-loop* sistem catu daya dalam mempertahankan *voltage headroom* blok VCCS.

B. Evaluasi Grafis Karakteristik Konsumsi Arus Kontrol VCCS

Karakteristik disipasi arus operasional dari komponen aktif blok kontrol ($I_{in\ (VCCS)}$) sebagai fungsi dari perubahan tegangan isyarat kendali dipetakan secara grafis pada Gambar 6. Plot data menunjukkan adanya kecenderungan peningkatan kebutuhan arus operasional kontrol seiring dengan peningkatan level tegangan masukan kendali dan arus terapi sistem.

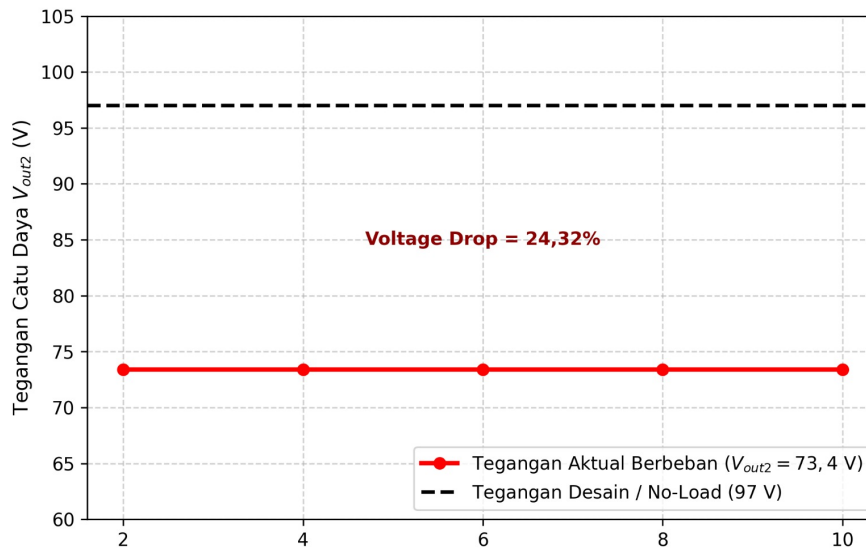


Gambar 6. Karakteristik Konsumsi Arus Blok Kontrol

Analisis variasi data pada Gambar 6 mendeteksi perbedaan kemiringan kurva yang kontras antar-variasi beban. Pada beban resistansi tinggi ($1\text{ k}\Omega$), penyerapan arus operasional naik dari $2,5\text{ mA}$ lalu mengalami saturasi konstan pada nilai 6 mA sejak input berada pada level $0,4\text{ V}$. Namun, pada kondisi pengujian dengan nilai resistansi beban yang lebih rendah ($560\ \Omega$ dan $470\ \Omega$), lonjakan konsumsi arus kontrol terukur jauh lebih curam dan signifikan, dengan pencapaian nilai arus masing-masing sebesar 12 mA dan 13 mA pada kondisi batas tegangan kendali penuh $0,5\text{ V}$. Penurunan impedansi beban eksternal memaksa sirkuit kontrol internal untuk meningkatkan kompensasi regulasi melalui penyerapan arus operasional dari jalur *low-voltage supply* (12 VDC) secara lebih masif. Hal ini dilakukan guna mempertahankan amplitudo dan keakuratan hantaran arus terapi pulsa pada kondisi arus tinggi tanpa mengalami redaman dinamis.

C. Evaluasi Grafis Karakteristik Regulasi Tegangan Catu Daya Bertingkat

Kinerja regulasi tegangan keluaran tahap kedua dari *Cascaded DC-DC Boost Converter* (V_{out2}) di bawah pengaruh pembebanan dinamis sistem divisualisasikan melalui grafik komparatif pada Gambar 7. Berdasarkan pengukuran aktual, interkoneksi dengan beban aktif menyebabkan terjadinya *voltage drop* statis yang konstan dari nilai spesifikasi target desain tanpa beban (*no-load*) sebesar 97 VDC menjadi stabil di tingkat amplitudo $73,4\text{ VDC}$. Penerapan persamaan perhitungan regulasi tegangan menunjukkan bahwa sistem mengalami persentase regulasi tegangan drop statis sebesar $24,32\%$.



Gambar 7. Karakteristik Regulasi Tegangan Aktual V_{out2} terhadap Variasi Arus Terapi Pasien

Meskipun terdeteksi adanya penurunan dari target desain teoritis akibat pengoperasian secara *open-loop*, kurva tegangan aktual berbeban pada Gambar 7 membuktikan adanya karakteristik stabilitas yang kokoh. Sepanjang seluruh rentang pengujian penarikan arus beban terapi dinamis dari 2 mA hingga 10 mA, nilai tegangan catu daya V_{out2} konstan membentuk garis horizontal datar sempurna pada parameter 73,4 V tanpa mengalami fluktuasi atau degradasi nilai susulan. Karakteristik kurva datar ini membuktikan bahwa meskipun konverter bertingkat memiliki rugi-rugi konversi awal, catu daya tersebut mampu mempertahankan kestabilan regulasi tegangan statis dengan sangat andal selama melayani siklus kerja elektrostimulator.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian eksperimental dan analisis data yang telah dilakukan terhadap integrasi sistem catu daya bertingkat (*Cascaded DC-DC Boost Converter*) dua tahap dan rangkaian penstabil arus *Voltage Controlled Current Source* (VCCS) pada sistem elektrostimulator, dapat ditarik beberapa kesimpulan fisis yang objektif sebagai berikut:

1. Sistem catu daya bertingkat bertopologi *open-loop* (tanpa umpan balik) mengalami fenomena penurunan tegangan (*voltage drop*) statis yang konstan sebesar 24,32 %, yaitu terjadi reduksi dari nilai target perancangan awal sebesar 97 VDC pada kondisi tanpa beban (*no-load*) menjadi stabil di tingkat amplitudo 73,4 VDC saat dihubungkan dengan beban rangkaian aktif elektrostimulator.
2. Meskipun terjadi penurunan amplitudo tegangan akibat akumulasi rugi-rugi konduksi parasitis internal komponen, sistem catu daya yang dirancang memiliki karakteristik regulasi tegangan statis yang sangat kokoh. Sepanjang rentang penarikan beban arus terapi dinamis dari 2 mA hingga 10 mA, kurva tegangan keluaran aktual (V_{out2}) terbukti mampu bertahan membentuk garis horizontal yang sepenuhnya datar pada nilai 73,4 VDC tanpa mengalami degradasi atau fluktuasi susulan.

3. Stabilitas statis rel tegangan tinggi sebesar 73,4 VDC tersebut memberikan implikasi positif yang signifikan dalam mendukung kinerja blok rangkaian VCCS, di mana sirkuit penstabil arus mampu menghasilkan derajat linieritas konversi arus yang sangat tinggi dan presisi (rentang 2 mA hingga 10 mA dengan kelipatan 2 mA per kenaikan input 0,1 V) serta sepenuhnya mampu mengabaikan fluktuasi perubahan nilai resistansi beban tiruan jaringan pasien (470 Ω , 560 Ω , dan 1 k Ω).

Untuk pengembangan kualitas keteknikan instrumentasi medis dan optimalisasi sistem elektronika daya pada perancangan perangkat elektrostimulator di masa depan, disarankan beberapa langkah berikut:

1. Mengintegrasikan sirkuit kontrol umpan balik loop tertutup (*closed-loop feedback control*) berbasis mikrokontroler pada sistem *Cascaded DC-DC Boost Converter*, misalnya dengan menerapkan algoritma Proporsional-Integral-Derivatif (PID) untuk mengatur *duty cycle switching* secara otomatis, sehingga dapat menekan persentase regulasi tegangan drop statis dan memaksa nilai tegangan aktual berbeban mendekati target perancangan awal 97 VDC.
2. Melakukan investigasi mendalam mengenai pengaruh disipasi panas (*thermal dissipation analysis*) pada komponen semikonduktor aktif (MOSFET dan dioda tingkat kedua) serta melakukan optimasi teknik manajemen daya (*power management*) pada sirkuit kontrol untuk mereduksi lonjakan arus konsumsi operasional saat sistem melayani beban rendah.

Penulis menyadari bahwa penelitian eksperimental ini masih memiliki beberapa batasan ruang lingkup operasional yang perlu dipaparkan secara transparan:

1. Evaluasi dan pengambilan data karakteristik elektrik sistem baru dilakukan terbatas pada pembebanan rentang arus terapi statis tingkat rendah, yaitu dari 2 mA hingga 10 mA pada kondisi lingkungan laboratorium yang dikondisikan. Perilaku dinamis sirkuit pada penarikan arus yang lebih tinggi belum dicakup di dalam penelitian ini.
2. Aspek-aspek parameter pengujian lanjutan yang vital bagi standardisasi keamanan perangkat elektromedis portabel seperti faktor ketahanan operasi jangka panjang (*reliability analysis*), pengaruh fluktuasi temperatur kerja lingkungan terhadap pergeseran titik kerja komponen semikonduktor, serta pengukuran efisiensi daya total konverter secara menyeluruh, belum dianalisis secara mendalam dalam artikel ilmiah ini.
3. Penelitian ini terbatas pada evaluasi satu variasi topologi konverter murni (*single topology configuration*), yaitu *Cascaded DC-DC Boost Converter* dua tahap. Riset ini belum melibatkan analisis komparatif performa secara langsung dengan arsitektur konverter daya tinggi lainnya, seperti topologi *Single-Ended Primary-Inductor Converter* (SEPIC) atau *Interleaved Boost Converter*.

DAFTAR PUSTAKA

- Laily, Z., Wiryajati, I. K., & Satiawan, I. N. W. (2024). Simulation and performance analysis of high-efficiency multilevel boost converter. *Edusaintek: Jurnal Pendidikan, Sains dan Teknologi*, 11(3), 1458–1472. <https://doi.org/10.47467/edusaintek.v11i3.1328>

- Perez, M. A., & Gonzalez, C. A. (2023). Precision current sources utilizing negative feedback feedback loops for biomedical neurostimulation applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 349, 114012.
- Kavrogiannis, D. A., & Karatzaferis, C. P. (2021). Small-signal modeling and loss analysis of open-loop cascaded DC-DC converters for high step-up applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 57(4), 3821-3832.
- Safutra, E., & Setyawan, T. A. (2021). Perancangan sistem kontrol arus pada catu daya tegangan tinggi berbasis mikrokontroler. *Jurnal Edukasi Elektro*, 5(1), 12–21. <https://doi.org/10.21831/jee.v5i1.38622>
- Sooksood, K., & Sooksood, N. (2019). High-voltage power supply architectures for safe and efficient functional electrical stimulation (FES) devices. *IEEE Access*, 7, 112345-112356.
- Rashid, M. H. (2017). *Power Electronics Handbook: Devices, Circuits and Applications* (4th ed.). Academic Press.
- Aqueveque, P., Acuña, V., Saavedra, F., Debelle, A., Lonys, L., Julémont, N., Huberland, F., Godfraind, C., & Nonclercq, A. (2016). Power strategy in DC/DC converters to increase efficiency of electrical stimulators. *European Journal of Translational Myology*, 26(3), 223–228. <https://doi.org/10.4081/ejtm.2016.6061>
- Grimnes, S., & Martinsen, O. G. (2015). *Bioimpedance and Bioelectricity Basics* (3rd ed.). Academic Press.
- Babaei, E., Shokati Asl, M., & Karimi, S. (2014). Analytic analysis of cascaded DC-DC boost converters for high voltage gain applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(8), 4211–4220. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2281566>
- International Electrotechnical Commission. (2012). *Medical electrical equipment - Part 2-10: Particular requirements for the basic safety and essential performance of nerve and muscle stimulators* (IEC Standard No. 60601-2-10:2012+AMD1:2016).