

Konverter DC-DC Penaik Tegangan Multilevel 230 VDC dalam Sistem Listrik Hibrid Energi Terbarukan

Nassri Maulana, Faizal Arya Samman, Rhiza S. Sadjad
Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin

Abstract- Pemanfaatan panel surya sudah menjadi perhatian di Indonesia. Namun memiliki banyak kelemahan, terutama berkaitan dengan sistem kelistrikan Indonesia. Hal tersebut dikarenakan ketidaksinkronan antara keluaran tegangan panel surya terhadap sistem kelistrikan yang berlaku di Indonesia. Dalam tugas akhir ini dilakukan implementasi *boost converter* dengan konsep *multilevel boost converter* 3 tingkat. Konverter ini akan digunakan untuk menyuplai *inverter* dengan tegangan masukan 230 VDC. Konverter tersebut menggunakan tegangan masukan sebesar 24 VDC berasal dari sumber baterai. Hasil penelitian menunjukkan tegangan keluaran *multilevel boost converter* semakin meningkat terhadap kondisi beban yang menurun. Dengan menggunakan kontrol PI adaptif, overshoot yang dihasilkan konverter cukup rendah yang dibuktikan dengan tegangan *ripple* yang rendah.

Kata Kunci : *Boost Converter, Multilevel Boost Converter, Kontrol PI Adaptif, Tegangan Ripple.*

I. PENDAHULUAN

Energi matahari merupakan salah satu sumber energi baru dan terbarukan yang dapat digunakan untuk pembangkit listrik[1]. Panel surya sebagai pembangkit biasanya dihubungkan langsung dengan beban pada level tegangan yang rendah, mengakibatkan tidak sesuai dengan tegangan yang diperlukan. Dengan adanya perkembangan teknologi komponen dan rangkaian elektronika telah mampu menghasilkan sistem penyedia daya tegangan searah (Direct Current/DC), yang dihasilkan melalui konversi tegangan DC masukan ke bentuk tegangan DC keluaran yang lebih tinggi atau lebih rendah. Konversi tegangan DC ini biasa disebut sebagai DC-DC converter [2]. Penerapan DC-DC converter dalam perkembangannya telah memungkinkan suatu perangkat elektronika dapat berfungsi dengan menggunakan sumber energi baterai yang bertegangan kecil di mana tegangan keluarannya dapat diubah-ubah sesuai kebutuhan pemakaian [3]. Teknologi konverter elektronika daya ini telah diaplikasikan pada sumber energi terbarukan, fuel cell dan solar cell menghasilkan tegangan keluaran yang rendah dan ini membutuhkan alat untuk menaikkan tegangan.

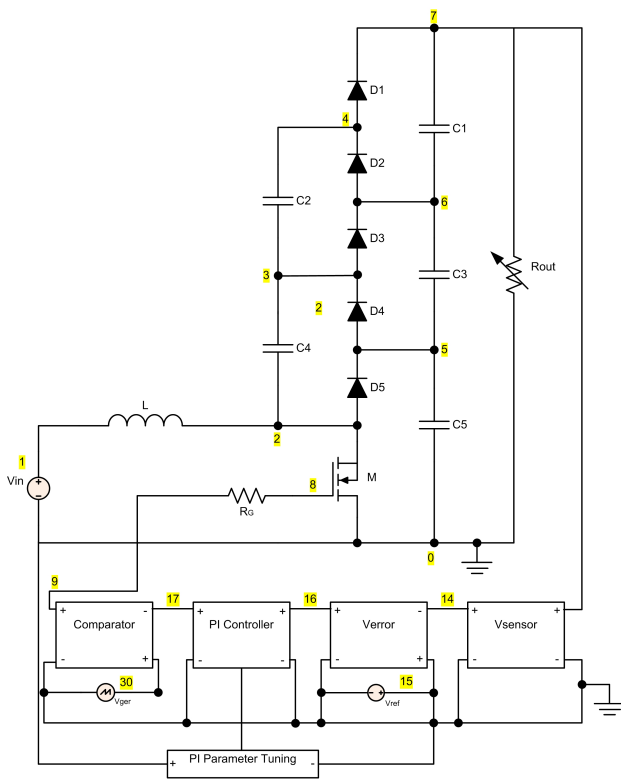
Salah satu converter yang digunakan untuk menaikkan tegangan arus searah adalah boost converter. Boost converter dapat menghasilkan tegangan keluaran yang lebih besar dari tegangan masukan dengan mengatur sinyal PWM untuk mengatur penyaklaran MOSFET. Dalam pemanfaatan panel surya, tegangan yang dihasilkan cukup kecil sehingga diperlukan suatu alat yang dapat menaikkan tegangan. Alat yang dapat digunakan merupakan DC-DC boost converter. Pemanfaatan panel surya sudah menjadi perhatian di Indonesia. Namun ada kendala dalam hal pemanfaatannya yaitu ketidaksinkronan antara keluaran tegangan dari panel surya dengan sistem kelistrikan yang berlaku di Indonesia. Di Indonesia, sistem kelistrikan yang digunakan merupakan sistem AC (Alternating Current) dengan tegangan berkisar 220 volt hingga 230 volt. Untuk mengatasi masalah tersebut, dibutuhkan alat yang dapat menaikkan tegangan keluaran DC pada panel surya menjadi 230 volt dan akan dikonversi menjadi tegangan AC (Alternating Current). Dalam tugas akhir ini dilakukan perancangan *multilevel boost converter* dengan menggunakan kontrol PI adaptif.

II. URAIAN PENELITIAN

A. Konfigurasi Multilevel Boost Converter

Multilevel boost converter adalah sebuah konverter DC-DC berbasis *PWM* yang mengkombinasikan antara konverter *boost* konvensional dan fungsi *switched capacitor* untuk menghasilkan tegangan keluaran yang berbeda dan stabil dengan hanya menggunakan satu *driven switch* 1 induktor, 2N-1 dioda dan 2N-1 kapasitor[4]. N yang dimaksud adalah jumlah tingkat pada konverter *boost multilevel*. Pada Gambar 1, terlihat konfigurasi rangkaian dari *multilevel boost converter*.

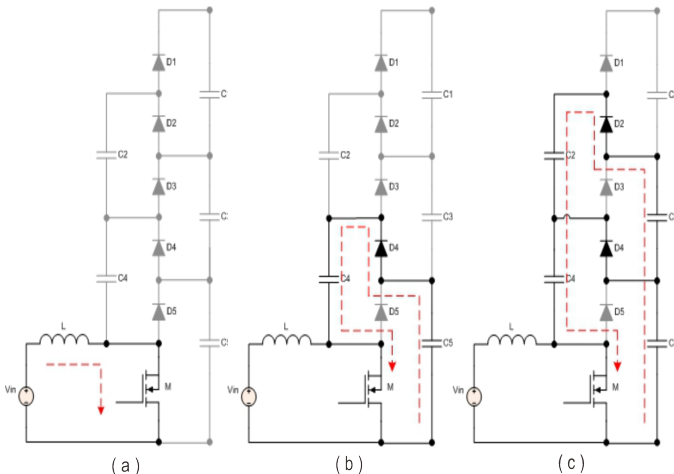
Terlihat bahwa konfigurasi di atas terdiri dari satu mosfet (M), lima kapasitor (C1-C5) dan lima dioda (D1-D5). *Vin* merupakan sumber tegangan yang akan digunakan pada rangkaian tersebut. Pada penelitian ini, *power supply* yang menjadi sumber tegangan rangkaian tersebut.



Gambar 1: Rangkaian Multilevel Boost Converter

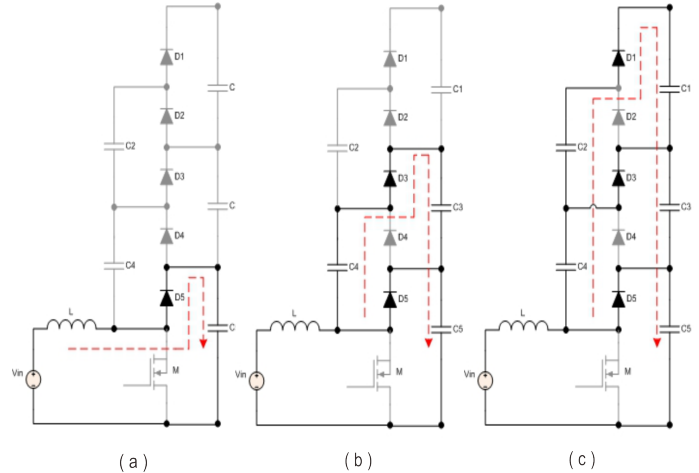
B. Prinsip Kerja Multilevel Boost Converter

Pada *multilevel boost converter* terdapat dua kondisi operasi pada rangkaian yaitu kondisi *switch on* dan kondisi *switch off*. Keadaan saat switch on ditunjukkan pada Gambar 2. Saat *switch* keadaan *on*, induktor akan terhubung ke tegangan masukan (V_{in}), (Gambar 2(a)). Jika tegangan di C_5 lebih besar dari tegangan di C_4 , maka C_5 menjepit tegangan di C_4 melalui D_4 dan M (gambar 2(b)). Bersamaan dengan itu, jika jumlah nilai tegangan dari C_3 dan C_5 lebih besar dari jumlah tegangan C_2 dan C_4 maka C_3 dan C_5 menjepit tegangan di C_2 dan C_4 melalui D_2 dan M (gambar 2(c)) [5].



Gambar 2: Kondisi Switch On

Keadaan pada saat *switch off* ditunjukkan pada Gambar 3. Ketika *switch off*, arus induktor menyalakan D_5 dan itu hal tersebut mengakibatkan semua dioda menyala. Selama keadaan *off*, arus induktor menyalakan D_5 untuk men-charge C_5 (Gambar 3(a)). Ketika tegangan yang melalui C_4 lebih besar daripada tegangan yang melalui C_3 , D_3 dalam kondisi konduksi membuat kapasitor C_3 dan C_5 dalam kondisi mengisi muatan (Gambar 3(b)). Dengan cara yang sama, tegangan induktor ditambah dengan tegangan masukan (V_{in}), C_4 , dan C_2 menjepit tegangan di C_1 , C_3 , dan C_5 melalui D_1 (Gambar 3(c)) [4].



Gambar 3: Kondisi Switch Off

C. Tegangan Keluaran Multilevel Boost Converter

Berdasarkan kondisi *switch on* dan kondisi *switch off* maka dapat diturunkan persamaan untuk memperoleh tegangan keluaran *multilevel boost converter*[6].

$$V_o = V_i \frac{N}{(1 - D)} \quad (1)$$

dimana

- V_o = Tegangan keluaran (V)
- V_i = Tegangan masukan (V)
- N = Jumlah tingkat konverter
- D = Duty cycle

Pada penelitian ini, penentuan jumlah tingkat level konverter didasari dengan parameter yang terlihat pada Tabel I.

Tabel I: Parameter Penyusun Multilevel Boost Converter

Parameter	Nilai
Tegangan Input	24 V
Tegangan Output	230 V
Duty Cycle	0,7

Dengan menggunakan persamaan dan parameter yang tersedia, maka didapatkan jumlah tingkat level konverter yang terlihat pada persamaan 2[7].

$$N = \frac{V_o}{V_i} * (1 - D) = \frac{230}{24} * (1 - 0,7) = 2,875 \quad (2)$$

Dari hasil perhitungan yang didapatkan, N bernilai 2,875 sehingga dapat dibulatkan menjadi 3. Sehingga penelitian dilakukan pada *multilevel boost converter* tingkat 3.

III. HASIL SIMULASI DAN PENGUKURAN

Pada proses simulasi dan pengukuran, digunakan dua belas jenis resistansi beban yaitu 2,597k Ω , 2,960k Ω , 10,87k Ω , 11,05k Ω , 11,34k Ω , 21,7k Ω , 22,7k Ω , 23,7k Ω , 24,65k Ω , 44,3k Ω , 45,3k Ω dan 46,2k Ω . Nilai frekuensi yang digunakan yaitu 10 kHz dengan *duty cycle* 21,65%. Nilai *duty cycle* tergantung pada beban uji yang digunakan. Proses simulasi rangkaian menggunakan program *PSpice*. Hasil simulasi tersebut akan dibandingkan dengan hasil pengukuran. Hal-hal yang dibandingkan antara lain tegangan *output*, arus *output*, daya *input*, daya *output*, efisiensi dan tegangan *ripple*. Sebelum itu, adapun parameter kontrol PI Adaptif yang digunakan pada proses simulasi dan pengukuran adalah sebagai berikut.

Tabel II: Konstanta Kontrol PI Adaptif *Multilevel Boost Converter*

Resistansi Beban (K Ω)	Konstanta	
	P	I
2,597	7	10
2,960		
10,87	0,5	3
11,05		
11,34		
21,7	20	5
22,7		
23,7	20	4
24,65		
44,3	18,5	5
45,3		
46,2		

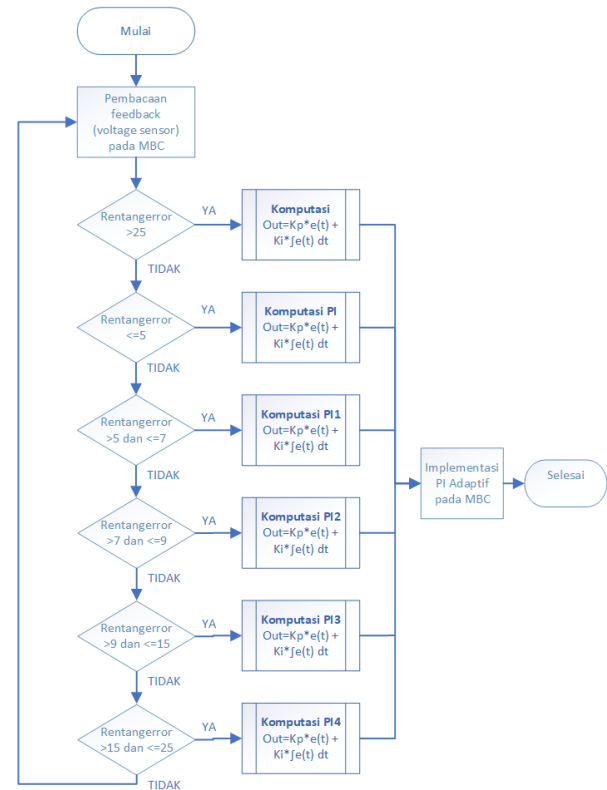
A. Algoritma Kontrol PI Adaptif

Dalam melakukan pengontrolan *multilevel boost converter*, sistem kontrol PI adaptif[8] merupakan sistem yang digunakan pada penelitian ini. Dalam penggunaannya, ada algoritma yang menyusun sistem tersebut. Adapun algoritma kontrol PI adaptif terlihat pada Gambar 4.

Berikut penjelasan dari diagram alir algoritma kontrol PI adaptif[8].

- 1) Pembacaan data feedback berguna sebagai data yang akan di olah oleh mikrokontroler dari data analog menjadi data digital. Data feedback yang terbaca sesuai dengan beban uji yang terpasang pada *multilevel boost converter*.
- 2) Data *feedback* digunakan untuk menentukan rentang error yang terbaca. Rentang error merupakan nilai error yang didapatkan dari selisih antara setpoint dengan feedback. Setiap beban uji memiliki rentang error yang berbeda-beda. Setiap rentang error memiliki ketentuan tersendiri. Jika telah memenuhi syarat yang ditentukan, maka akan dilakukan komputasi PI.
- 3) Setiap komputasi PI memiliki nilai K_p dan K_i yang berbeda-beda disesuaikan dengan kondisi rentang error.

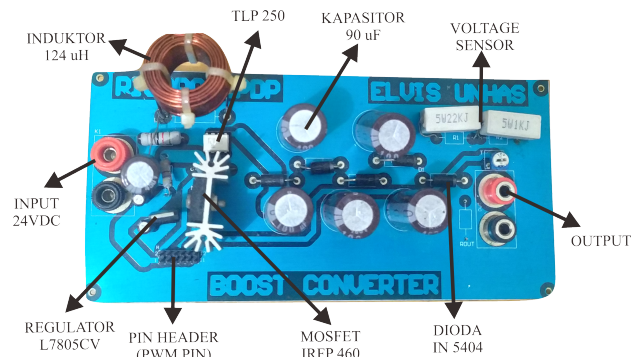
- 4) Setelah melakukan komputasi PI, data hasil komputasi diimplementasikan sebagai kontrol PI pada *multilevel boost converter*.



Gambar 4: Diagram Alir Algoritma Kontrol PI Adaptif

B. Bentuk Fisik dari Multilevel Boost Converter

Pada gambar 5, terlihat bentuk fisik dari *multilevel boost converter*. Induktor yang digunakan merupakan induktor jenis inti udara. Untuk komponen kapasitor, menggunakan kapasitor jenis elektrolit. Papan sirkuit untuk rangkaian *multilevel boost converter* di desain di aplikasi Altium Designer. Alasan papan sirkuit cukup luas disebabkan oleh lebar jalur dari tiap-tiap komponen yang di desain yaitu sebesar 10 mm.



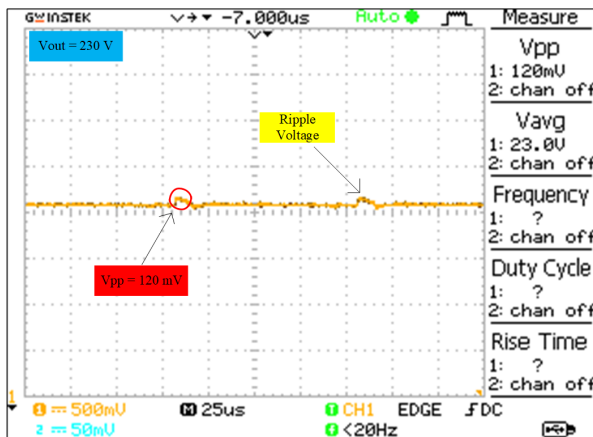
Gambar 5: Tampilan Fisik *Multilevel Boost Converter*

Berikut dibawah ini merupakan komponen-komponen yang digunakan untuk menyusun *multilevel boost converter* pada penelitian yang dilakukan.

Tabel III: Komponen Penyusun *Multilevel Boost Converter*

Nama Komponen	Nilai	Jumlah
MOSFET IRFP460	-	1 buah
Induktor	124 μ H	1 buah
Kapasitor	90 μ F	5 buah
Dioda IN 5404	-	5 buah
TLP 250	-	1 buah
Regulator L7805CV	Resistor 22 k Ω dan 1 k Ω	2 buah
	Trimmer 10 k Ω	1 buah

C. Tegangan Ripple *Multilevel Boost Converter*



Gambar 6: Grafik Tegangan *Ripple* Hasil Pengukuran Osiloskop

Pada Gambar 6 diatas, tegangan ripple yang dihasilkan dari alat cukup kecil dalam kondisi tegangan output bernilai 230 V. Pada osiloskop, nilai volt/div yang digunakan yaitu 500mV dengan time/div sebesar 25us. Adapun tegangan peak to peak (V_{pp}) yang dimiliki oleh ripple yaitu berkisar 120 mV. Dari grafik diatas terlihat bahwa ripple yang dihasilkan dari tegangan output multilevel boost converter sangat kecil.

D. Perbandingan Hasil Simulasi Pspice dan Hasil Pengukuran Alat dengan Kontrol PI Non Adaptif

Proses simulasi dilakukan pada software PSpice dengan kondisi ideal. Sedangkan untuk proses pengukuran alat, dilakukan dengan menggunakan power supply sebagai sumber tegangannya dengan melakukan pengukuran menggunakan multimeter digital dan osiloskop digital untuk mengukur parameter yang dibutuhkan sebagai data penelitian. Dapat dilihat di bawah data antara hasil simulasi dan hasil pengukuran alat dengan menggunakan kontrol PI non adaptif.

Tabel IV: Data Perbandingan Daya, Efisiensi dan Tegangan *Ripple* Simulasi dan Alat dengan Kontrol PI Non Adaptif

Resistansi Beban (K Ω)		Daya Input (VA)	Daya Output (VA)	Efisiensi (%)	Tegangan Ripple (%)
21,7	Simulasi	6,456	2,303	35,67	0,254
	Alat	15,024	5,326	35,44	0,253
22,7	Simulasi	6,336	2,202	34,75	0,242
	Alat	14,52	5,319	36,63	0,244
23,7	Simulasi	6,24	2,111	33,83	0,232
	Alat	14,376	5,241	36,45	0,231
24,65	Simulasi	6,144	2,031	33,05	0,223
	Alat	14,04	5,293	37,69	0,226
44,3	Simulasi	5,04	1,132	22,46	0,124
	Alat	11,136	4,834	43,40	0,128
45,3	Simulasi	4,8	1,108	23,08	0,121
	Alat	10,968	4,710	42,94	0,122
46,2	Simulasi	4,8	1,086	22,62	0,119
	Alat	10,68	4,710	44,10	0,121

Dari data Tabel IV, daya *input* cenderung menurun seiring dengan meningkatnya nilai resistansi beban. Pada hasil simulasi, daya input tertinggi bernilai 6,456 VA dengan resistansi beban sebesar 21,7 k Ω sedangkan daya input terendah terdapat pada resistansi beban bernilai 45,3 k Ω dan 46,2 k Ω dengan nilai sebesar 4,8 VA. Pada hasil pengukuran, daya input tertinggi bernilai 15,024 VA dengan resistansi beban sebesar 21,7 k Ω sedangkan daya input terendah bernilai 10,68 VA dengan resistansi beban sebesar 46,2 k Ω . Perbedaan utama dari hasil simulasi dan hasil pengukuran alat yaitu, nilai daya *input* yang digunakan pada pengukuran alat cenderung lebih besar dibandingkan dengan hasil simulasi.

Kondisi daya *output* cenderung menurun seiring dengan meningkatnya nilai resistansi beban. Kondisi ini berlaku pada hasil simulasi dan hasil pengukuran. Pada hasil simulasi, daya output tertinggi bernilai 2,303 VA dengan resistansi beban sebesar 21,7 k Ω sedangkan daya output terendah bernilai 1,086 VA dengan resistansi beban sebesar 46,2 k Ω . Pada hasil pengukuran, daya output tertinggi bernilai 5,326 VA dengan resistansi beban sebesar 21,7 k Ω sedangkan daya output terendah berada di resistansi beban 45,3 k Ω dan 46,2 k Ω dengan nilai sebesar 4,710 VA.

Pada hasil simulasi, nilai efisiensi cenderung menurun seiring nilai resistansi beban yang meningkat sedangkan pada hasil pengukuran, nilai efisiensi cenderung meningkat dengan meningkatnya nilai resistansi beban. Efisiensi tertinggi pada hasil simulasi bernilai 35,67 % dengan resistansi beban sebesar 21,7 Ω . Pada hasil pengukuran, efisiensi tertinggi berada pada resistansi beban 46,2 k Ω bernilai 44,10 %.

Kondisi tegangan *ripple* cenderung menurun seiring meningkatnya resistansi beban. Hal ini terjadi pada hasil simulasi maupun hasil pengukuran yang menggunakan kontrol PI non adaptif. Pada hasil simulasi, nilai tegangan ripple terendah yaitu 0,119 % dengan resistansi beban sebesar 46,2 k Ω sedangkan nilai tegangan ripple tertinggi yaitu 0,254 % dengan resistansi beban sebesar 21,7 k Ω .

Pada hasil pengukuran, nilai tegangan ripple terendah yaitu 0,121 % dengan resistansi beban 46,2 k Ω sedangkan nilai

tegangan ripple tertinggi yaitu 0,253 % dengan resistansi beban sebesar 21,7 k Ω . Dari tabel diatas, nilai tegangan *ripple* pada hasil simulasi dan hasil pengukuran alat berada pada nilai di bawah 5 %. Berdasarkan kondisi daya *input* dan daya *output*, terdapat perbedaan nilai hasil simulasi dan hasil pengukuran. Hal ini disebabkan oleh kondisi ideal. Pada proses simulasi, kondisi komponen dibuat seideal mungkin sehingga menghasilkan nilai yang optimal (minimum). Sedangkan pada proses pengukuran, banyak hal yang mempengaruhi kondisi komponen sehingga menyebabkan kondisinya kurang ideal dibandingkan dengan simulasi yang dilakukan, sehingga hasil pengukuran yang didapatkan memiliki perbedaan nilai dengan hasil simulasi.

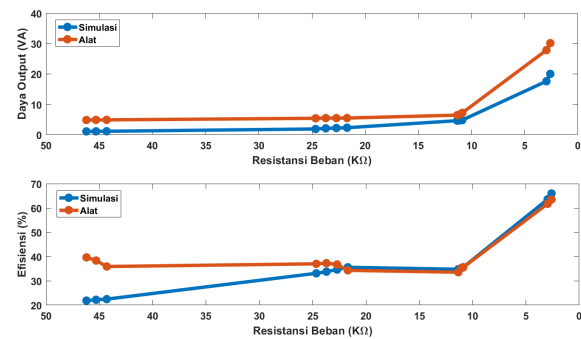
E. Perbandingan Hasil Simulasi Pspice dan Hasil Pengukuran Alat dengan Kontrol PI Adaptif

Proses simulasi dilakukan pada software PSpice dengan kondisi ideal. Sedangkan untuk proses pengukuran alat, dilakukan dengan menggunakan power supply sebagai sumber tegangannya dengan melakukan pengukuran menggunakan multimeter digital dan osiloskop digital untuk mengukur parameter yang dibutuhkan sebagai data penelitian. Dapat dilihat di bawah data dan grafik perbandingan antara hasil simulasi dan hasil pengukuran alat dengan menggunakan kontrol PI adaptif.

Tabel V: Data Perbandingan Daya, Efisiensi dan Tegangan *Ripple* Simulasi dan Alat dengan Kontrol PI Adaptif

Resistansi Beban (K Ω)		Daya Input (VA)	Daya Output (VA)	Efisiensi (%)	Tegangan Ripple (%)
2,597	Simulasi	30,358	20,024	65,96	3,4
	Alat	47,25	30,176	63,50	3,4
2,960	Simulasi	27,718	17,62	63,57	3,37
	Alat	45,12	27,853	61,73	3,375
10,87	Simulasi	13,522	4,8178	35,63	2,98
	Alat	20,232	7,199	35,58	2,982
11,05	Simulasi	13,43	4,7395	35,29	2,98
	Alat	19,248	6,785	35,25	2,81
11,34	Simulasi	13,287	4,6186	34,76	2,98
	Alat	19,2	6,44	33,54	2,981
21,7	Simulasi	6,46	2,298	35,57	0,254
	Alat	15,096	5,484	34,32	0,257
22,7	Simulasi	6,35	2,20	34,64	0,243
	Alat	14,904	5,475	36,73	0,246
23,7	Simulasi	6,22	2,10	33,76	0,233
	Alat	14,712	5,482	37,26	0,237
24,65	Simulasi	6,12	1,886	33,10	0,223
	Alat	14,592	5,4	37	0,227
44,3	Simulasi	5,04	1,132	22,46	0,124
	Alat	13,608	4,884	35,89	0,125
45,3	Simulasi	4,992	1,108	22,19	0,121
	Alat	12,72	4,879	38,35	0,123
46,2	Simulasi	4,968	1,086	21,85	0,119
	Alat	12,192	4,834	39,64	0,120

Pada Tabel V menunjukkan bahwa daya *input* cenderung menurun seiring dengan meningkatnya nilai resistansi beban. Hal ini terjadi pada hasil simulasi dan hasil pengukuran yang menggunakan kontrol PI adaptif.



Gambar 7: Grafik Daya Output dan Efisiensi Kontrol PI Adaptif pada Multilevel Boost Converter

Terlihat pada Gambar 7 bahwa kondisi daya output cenderung meningkat seiring dengan menurunnya nilai resistansi beban. Kondisi ini berlaku pada hasil simulasi dan hasil pengukuran. Yang membedakan antara daya output pada hasil simulasi dan hasil pengukuran yaitu range yang cukup besar antara hasil simulasi dan pengukuran. Hasil pengukuran memiliki nilai daya output yang lebih besar dibandingkan hasil simulasi pada setiap beban uji.

Pada hasil simulasi, kondisi efisiensi cenderung meningkat seiring menurunnya nilai resistansi beban. Sedangkan pada hasil pengukuran, kondisi efisiensi berubah-ubah pada setiap beban. Hal tersebut dapat dilihat pada tabel 4.5. Pada hasil simulasi efisiensi tertinggi bernilai 65,96 % dengan resistansi beban sebesar 2,597 k Ω , sedangkan pada hasil pengukuran memiliki efisiensi tertinggi sebesar 63,50 % dengan resistansi beban sebesar 2,597 k Ω .

Kondisi tegangan *ripple* cenderung menurun seiring meningkatnya resistansi beban. Hal ini terjadi pada hasil simulasi maupun hasil pengukuran yang menggunakan kontrol PI adaptif. Pada hasil simulasi, nilai tegangan ripple terendah yaitu 0,119 % dengan resistansi beban sebesar 46,2 k Ω sedangkan pada hasil pengukuran, nilai tegangan *ripple* terendah yaitu 0,120 %. Dengan kondisi tersebut, nilai tegangan *ripple* pada hasil simulasi dan pengukuran berada di bawah 5 %. Kondisi ini menunjukkan bahwa hasil pengukuran telah sesuai dengan kondisi hasil simulasi, namun yang membedakan yaitu perbedaan nilai *error* yang cukup besar antara hasil simulasi dan tegangan. Penyebab utamanya yaitu tidak tercapainya kondisi ideal pada alat sehingga nilai yang didapatkan berbeda dengan nilai hasil simulasi. Pada simulasi, kondisi komponen penyusun *multilevel boost converter* diatur dengan ideal sehingga menyebabkan perbedaan saat diimplementasikan pada alat secara langsung.

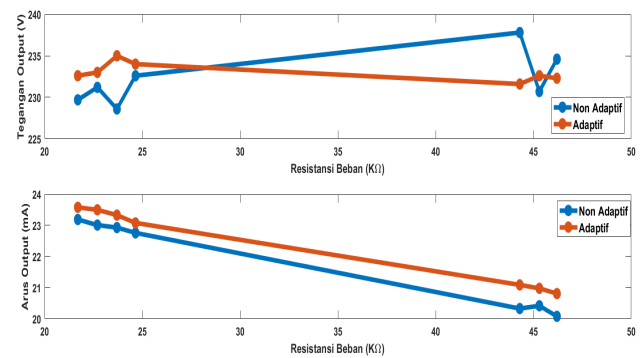
F. Perbandingan Kontrol PI Non Adaptif dan Kontrol PI Adaptif pada Pengujian Alat

Dalam melakukan pengujian alat, mekanisme kontrol PI non adaptif berbeda dengan kontrol PI adaptif. Perbedaannya terdapat pada program mikrokontroller yang telah dibuat. Pada kontrol PI non adaptif, nilai konstanta P dan konstanta I diinisiasikan untuk seluruh jenis beban. Sedangkan pada kontrol PI adaptif, untuk setiap beban memiliki nilai konstanta P dan konstanta I yang berbeda sehingga pada program diinisiasikan seluruh nilai konstanta dari jenis beban yang di uji. Sehingga dapat dikatakan adaptif dikarenakan program yang berjalan akan menyesuaikan penggunaan nilai konstanta P dan nilai konstanta I sesuai dengan beban yang sedang di ujikan. Dapat dilihat pada Tabel VI data hasil pengujian alat dengan menggunakan kontrol PI non adaptif dan kontrol PI adaptif.

Tabel VI: Data Perbandingan Kontrol PI Non Adaptif dan Adaptif pada Pengujian Alat

Resistansi Beban (K Ω)		Arus Input (A)	Tegangan Output (V)	Arus Output (mA)
21,7	Non Adaptif	0,626	229,7	23,19
	Adaptif	0,629	232,6	23,58
22,7	Non Adaptif	0,605	231,2	23,01
	Adaptif	0,621	233	23,50
23,7	Non Adaptif	0,599	228,6	22,93
	Adaptif	0,613	235	23,33
24,65	Non Adaptif	0,585	232,6	22,76
	Adaptif	0,608	234	23,08
44,3	Non Adaptif	0,464	237,8	20,33
	Adaptif	0,567	231,6	21,09
45,3	Non Adaptif	0,457	230,7	20,42
	Adaptif	0,530	232,6	20,98
46,2	Non Adaptif	0,445	234,6	20,08
	Adaptif	0,508	232,3	20,81

Pada Gambar 6 terlihat kondisi tegangan *output* dari hasil pengukuran. Pada kondisi non adaptif tegangan terendah berada di nilai 228,6 V dengan resistansi beban sebesar 23,7 k Ω sedangkan tegangan *output* tertinggi berada di nilai 237,8 V dengan resistansi beban sebesar 44,3 k Ω . Pada kondisi adaptif, tegangan tertinggi berada di nilai 235 V dengan resistansi beban sebesar 23,7 k Ω . Sedangkan tegangan terendah berada di nilai 231,6 V dengan resistansi beban sebesar 44,3 k Ω . Kondisi kontrol PI adaptif cenderung stabil dibandingkan dengan kontrol PI non adaptif yaitu dengan melihat kondisi tegangan *output* pada Gambar 6.

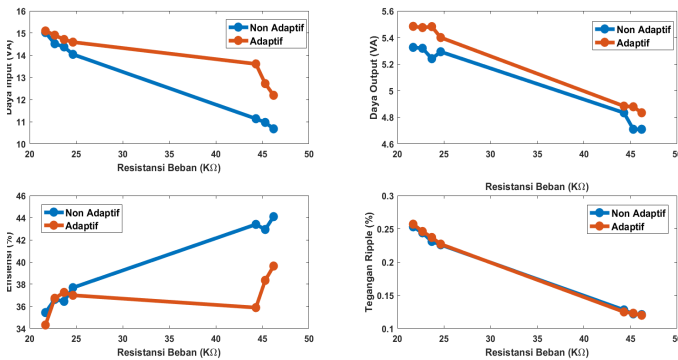


Gambar 8: Grafik Tegangan *Output* dan Arus *Output* Hasil Pengukuran *Multilevel Boost Converter*

Gambar 6 pula menunjukkan hasil pengukuran arus *output*. Arus *output* cenderung menurun seiring meningkatnya nilai resistansi beban. Hal ini berlaku untuk kondisi kontrol PI adaptif dan non adaptif. Untuk kondisi adaptif, arus tertinggi berada di nilai 23,58 mA dengan resistansi beban sebesar 21,7 k Ω . Sedangkan arus terendah berada di nilai 20,81 mA dengan resistansi beban sebesar 46,2 k Ω .

Tabel VII: Data Perbandingan Daya, Efisiensi dan Tegangan *Ripple* Simulasi dan Alat dengan Kontrol PI Adaptif

Resistansi Beban (K Ω)		Daya Input (VA)	Daya Output (VA)	Efisiensi (%)	Tegangan Ripple (%)
21,7	Non Adaptif	15,024	5,326	35,44	0,253
	Adaptif	15,096	5,484	34,32	0,257
22,7	Non Adaptif	14,52	5,319	36,63	0,244
	Adaptif	14,904	5,475	36,73	0,246
23,7	Non Adaptif	14,376	5,241	36,45	0,231
	Adaptif	14,712	5,482	37,26	0,237
24,65	Non Adaptif	14,04	5,293	37,69	0,226
	Adaptif	14,592	5,4	37	0,227
44,3	Non Adaptif	11,136	4,834	43,40	0,128
	Adaptif	13,608	4,884	35,89	0,125
45,3	Non Adaptif	10,968	4,710	42,94	0,122
	Adaptif	12,72	4,879	38,35	0,123
46,2	Non Adaptif	10,68	4,710	44,10	0,121
	Adaptif	12,192	4,834	39,64	0,120



Gambar 9: Grafik Hasil Pengukuran *Multilevel Boost Converter* dengan Kontrol PI Adaptif

Terlihat pada Gambar 7 bahwa daya input cenderung menurun seiring dengan meningkatnya nilai resistansi beban. Hal ini terjadi pada kondisi kontrol PI *non* adaptif dan kontrol PI adaptif. Pada saat kondisi kontrol *non* adaptif, daya *input* tertinggi bernilai 15,024 VA dengan resistansi beban sebesar 21,7 k Ω sedangkan daya *input* terendah bernilai 10,68 VA dengan resistansi beban sebesar 46,2 k Ω . Pada kondisi kontrol PI adaptif, daya *input* tertinggi bernilai 15,096 VA dengan resistansi beban sebesar 21,7 k Ω sedangkan daya *input* terendah bernilai 12,192 VA dengan resistansi beban sebesar 46,2 k Ω .

Kondisi daya *output* cenderung menurun seiring dengan meningkatnya nilai resistansi beban. Kondisi ini berlaku pada kontrol PI *non* adaptif dan kontrol PI adaptif. Pada kontrol PI *non* adaptif, daya *output* tertinggi bernilai 5,326 VA dengan resistansi beban sebesar 21,7 k Ω sedangkan daya *output* terendah berada di resistansi beban 45,3 k Ω dan 46,2 k Ω dengan nilai sebesar 4,710 VA. Pada kontrol PI adaptif, daya *output* tertinggi bernilai 5,484 VA dengan resistansi beban sebesar 21,7 k Ω sedangkan daya *output* terendah bernilai 4,834 VA dengan resistansi beban sebesar 46,2 k Ω .

Kondisi efisiensi pada kontrol PI *non* adaptif dan kontrol PI adaptif cukup berbeda. Pada kondisi kontrol PI *non* adaptif efisiensi cenderung meningkat seiring meningkatnya resistansi beban sedangkan pada kontrol PI adaptif, saat beban bernilai 44,3 k Ω efisiensi mengalami penurunan. Namun saat beban meningkat dari 44,3 k Ω , efisiensi kembali meningkat. Pada kontrol PI *non* adaptif, efisiensi tertinggi berada pada resistansi beban 46,2 k Ω bernilai 44,10 % sedangkan efisiensi terendah bernilai 35,44 % pada resistansi beban 21,7 k Ω . Pada kontrol PI adaptif, untuk resistansi beban 21,7 k Ω memiliki efisiensi sebesar 34,32 %. Saat resistansi beban 22,7 k Ω memiliki efisiensi sebesar 36,73 %. Saat resistansi beban 23,7 k Ω memiliki efisiensi sebesar 37,26 %. Namun saat resistansi beban 24,65 k Ω nilai efisiensi menurun dengan nilai 37 %. Begitu pula saat resistansi beban 44,3 k Ω efisiensinya bernilai 35,89 %. Dan kembali meningkat pada resistansi beban 45,3 k Ω dengan nilai efisiensi sebesar 38,35 % dan saat resistansi beban 46,2 k Ω memiliki efisiensi sebesar 39,64 % yang merupakan efisiensi tertinggi dari hasil kontrol PI adaptif.

Pada Gambar 7, kondisi tegangan *ripple* cenderung menurun seiring meningkatnya resistansi beban. Hal ini terjadi pada

kontrol PI *non* adaptif dan kontrol PI adaptif. Pada kontrol PI *non* adaptif, nilai tegangan *ripple* terendah yaitu 0,121 % dengan resistansi beban 46,2 k Ω sedangkan nilai tegangan *ripple* tertinggi yaitu 0,253 % dengan resistansi beban sebesar 21,7 k Ω . Pada kontrol PI adaptif, nilai tegangan *ripple* terendah yaitu 0,20 % dengan resistansi beban 46,2 k Ω sedangkan nilai tegangan *ripple* tertinggi yaitu 0,257 % dengan resistansi beban sebesar 21,7 k Ω . Dari hasil yang didapatkan terlihat bahwa kondisi tegangan *output* saat menggunakan kontrol PI adaptif mengalami kestabilan yang cukup baik dibandingkan menggunakan kontrol PI *non* adaptif. Namun untuk kondisi efisiensi, kontrol PI adaptif memiliki efisiensi yang lebih rendah dibandingkan kontrol PI *non* adaptif. Untuk kondisi tegangan *ripple* saat menggunakan kontrol PI *non* adaptif dan kontrol PI adaptif hasil pengukuran berada di bawah 5%.

IV. KESIMPULAN

Setelah melakukan penelitian terhadap rangkaian *multilevel boost converter* baik secara simulasi ataupun pengukuran alat, maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

- 1) *Multilevel boost converter* merupakan salah satu konverter penaik tegangan yang dapat mengubah tegangan *input* 24 VDC menjadi 230 VDC sehingga konverter ini dapat berfungsi pengganti transformator pada suatu inverter.
- 2) Penggunaan kontrol PI *non* adaptif dan kontrol PI adaptif berpengaruh pada kondisi tegangan *output* dari *multilevel boost converter*. Kontrol PI adaptif menunjukkan kestabilan yang lebih baik dibandingkan kontrol PI *non* adaptif saat kondisi beban berubah.
- 3) Dalam pengujian *multilevel boost converter*, efisiensi alat dengan kontrol PI *non* adaptif bernilai 44,10% sedangkan pada kontrol PI adaptif memiliki efisiensi sebesar 39,64 %.
- 4) Dari hasil pengujian yang dilakukan, tegangan *ripple* cenderung menurun seiring meningkatnya resistansi beban pada penggunaan kontrol PI *non* adaptif maupun kontrol PI adaptif. Tegangan *ripple* terendah yang dicapai pada kondisi *non* adaptif yaitu bernilai 0,121 % dan pada kondisi adaptif yaitu bernilai 0,120 %.
- 5) Tegangan *ripple* yang didapatkan berada di bawah 5%, yang menandakan bahwa *multilevel boost converter* ini memiliki tegangan *ripple* yang rendah.
- 6) Kontrol PWM pada *multilevel boost converter* menggunakan kontrol PI adaptif dengan teknik *trial and error*. Kontrol PI adaptif dilakukan dengan memanfaatkan *feedback* dari *multilevel boost converter* sebagai data untuk melakukan komputasi PI pada program mikrokontroler.

V. SARAN

Adapun saran untuk pengembangan dan kelanjutan penelitian adalah sebagai berikut.

- 1) Menganalisis mengenai nilai komponen disesuaikan dengan kondisi yang ada di pasaran.
- 2) Rangkaian *multilevel boost converter* dapat diubah dengan tingkat level *boost* yang lebih tinggi dari penelitian yang dilakukan.

- 3) Kontrol PI adaptif dapat dikembangkan dengan menggunakan kontrol kontrol PID.
- 4) Melakukan pengujian alat selain beban resistif.
- 5) Menggunakan jenis komponen yang mendekati kondisi ideal.
- 6) Mencari mikrokontroler yang lebih sederhana dalam melakukan pengontrolan alat.

PUSTAKA

- [1] A. Luque and S. Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. West Sussex: John Wiley & Sons, 2003.
- [2] A. J. Forsyth and S. V. Molloy, "Modelling and control of DC-DC converters," *Power Eng. J.*, vol. 12, no. 5, pp. 229–236, 1998.
- [3] M. R. A. Siddique, M. J. Ferdous, and I. Islam, "Charge pump capacitor based high voltage gain DC-DC step-up converter," 2014 Int. Conf. Informatics, Electron. Vision, ICIEV 2014, pp. 3–6, 2014.
- [4] A. Alateeq, Y. Almalaq, and M. Matin, "A switched-inductor model for a non-isolated multilevel boost converter," 2017 North American Power Symposium, NAPS 2017, 2017.
- [5] J. S. Reddy, Performance Analysis of A DC-DC Multilevel Boost Converter. Patiala: Thapar University, 2017.
- [6] J. S. Reddy and S. Sonar, "Closed Loop Control of Multilevel Dc-Dc Boost Converter," *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 4512–4518, 2019.
- [7] C. A. Villarreal-Hernandez, J. C. Mayo-Maldonado, J. E. Valdez-Resendiz, and J. C. Rosas-Caro, "Modeling and control of an interleaved DC-DC multilevel boost converter," in 2017 IEEE 18th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), Jul. 2017, pp. 1–6.
- [8] R. Shenbagalakshmi and S. D. Shelar, "Design PID Controller for Positive Output Voltage Converter," 2018 International Conference On Advances in Communication and Computing Technology, ICACCT 2018, pp. 455–458, 2018.



Nassri Maulana, lahir di Palangkaraya, 18 November 1998. Semasa kuliah pernah menerima beasiswa Karya Salemba Empat. Di tahun 2019-2020 aktif di Laboratorium Elektronika dan Divais Universitas Hasanuddin dan fokus mempelajari tentang elektronika daya, pemrograman komputer dan penggunaan mikrokontroler Arduino serta FPGA.