

# Modifikasi Topologi Pengendali PID untuk *Automatic Voltage Regulator* Generator Sinkron

Tri Dedi Pamungkas<sup>1</sup>, Muhamad Haddin<sup>2</sup>, Estiko Rijanto<sup>3</sup>

**Abstract**— Automatic voltage regulator (AVR) is one of key elements in an excitation system which controls the synchronous generator terminal voltage in an electrical power generation plant. PID control algorithm in an AVR has been designed to obtain good response towards voltage reference without considering the effect of torque disturbance. This paper proposes a PID with modified topology for a digital AVR in order to regulate the generator terminal voltage in more speedy and more accurate, while maintaining robustness against torque disturbance. Performance of the digital AVR has been compared with conventional PID controller through experiments using a hardware in the loop (HIL) system. The experiment results show that the proposed PID with modified topology provides better performance than the conventional PID controller. Under torque disturbance, the proposed algorithm provides 83% smaller steady state error and 4.8 second shorter settling time compared to the conventional PID controller. When the reference voltage changes, compared to the conventional PID controller, the proposed algorithm provides 15% smaller steady state error, 79% smaller overshoot, and 0.2 second shorter settling time.

**Intisari**— *Automatic voltage regulator* (AVR) adalah salah satu elemen kunci pada sistem eksitasi yang berfungsi mengatur tegangan terminal generator sinkron pada pembangkit listrik. Algoritme kendali Proporsional Integral Diferensial (PID) yang digunakan pada AVR selama ini dirancang dengan fokus hanya pada tanggapan yang baik terhadap referensi dan tidak memperhatikan kekokohan terhadap gangguan torsi akibat perubahan beban. Makalah ini mengusulkan modifikasi topologi PID untuk AVR digital agar regulasi tegangan terminal generator lebih cepat, lebih akurat, dan tetap kokoh terhadap gangguan torsi tersebut. Kinerja AVR digital tersebut telah dibandingkan dengan AVR digital beralgoritme PID konvensional melalui eksperimen menggunakan sistem *Hardware in the Loop* (HIL). Dari hasil eksperimen disimpulkan bahwa algoritme PID dengan modifikasi topologi yang diusulkan memberikan kinerja lebih baik dari pada algoritme PID konvensional pada AVR digital yang telah dirancang bangun. Saat terjadi perubahan torsi, dibandingkan dengan PID konvensional, algoritme yang diusulkan menghasilkan 83% *steady state error* yang lebih kecil, dan *settling time* yang lebih pendek 4,8 detik. Saat terjadi perubahan referensi tegangan, algoritme tersebut menghasilkan *steady state error* yang lebih

kecil 15%, *over shoot* 79% lebih kecil, dan *settling time* 0,2 detik lebih pendek dari pada PID konvensional.

**Kata Kunci**— AVR, Sistem eksitasi, Generator sinkron, PID

## I. PENDAHULUAN

Algoritme kendali proporsional integral (PI) banyak digunakan pada *automatic voltage regulator* (AVR) dan *manual voltage regulator* (MVR) untuk mengatur tegangan terminal generator sinkron. Berbagai produk AVR yang tersedia secara komersial umumnya masih banyak yang menggunakan algoritme PI atau proporsional integral derivatif (PID) [1]. Algoritme ini juga sejak dulu sampai saat ini menjadi perhatian para peneliti sebagai topik penelitian dan pengembangan untuk AVR pada sistem eksitasi pembangkit listrik.

Algoritme kendali PI telah digunakan pada simulasi AVR untuk generator sinkron 3 kVA [2], pada prototipe AVR analog untuk PLTA kapasitas 9 MVA [3], dan selanjutnya dikembangkan menjadi prototipe AVR digital menggunakan DSP [4], serta AVR digital menggunakan mikrokontroler ATmega 8 [5]. Nilai parameter pengendali PI/PID dapat ditentukan menggunakan metode *pole placement* [6] dan metode *model matching* [7]. Untuk memberikan karakteristik kekokohan, pengendali PID dirancang menggunakan pendekatan matematis yang dikenal dengan *Linear Matrix Inequalities* (LMI) [8], sedangkan fitur *antiwindup* juga dapat ditambahkan pada pengendali PID [9].

Pengaturan nilai parameter pengendali PID pada saat pemasangan di sistem eksitasi pembangkit listrik, biasa disebut *commissioning*, memerlukan waktu yang cukup lama karena sulit dilakukan secara manual. Oleh karena itu, sejalan dengan perkembangan teknologi, pengendali AVR kemudian dilengkapi dengan kemampuan menentukan nilai parameter sendiri secara otomatis. Algoritme penentuan nilai parameter AVR yang telah diusulkan misalnya berbasis metode *recursive least square* (RLS) [10] dan berbasis logika samar [11].

Metode komputasi evolusi telah digunakan untuk melakukan optimasi nilai parameter pengendali PID pada AVR. Hasil simulasi penerapan metode hibrid *bacteria foraging-cloning selection* menunjukkan bahwa metode hibrid tersebut memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan hasil metode *fuzzy neural network* [12]. Nilai parameter pengendali PID untuk AVR juga telah ditentukan menggunakan metode *genetic algorithm* dan *particle swarm optimization*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pengendali PID yang dioptimasi menggunakan metode tersebut memberikan kinerja yang lebih bagus [13].

<sup>1</sup> Mahasiswa, Program Studi Magister Teknik Elektro, Universitas Islam Sultan Agung, Jl. Raya Kaligawe Km. 4 Semarang 50012 (telp:082121232269; fax:0281-632870). Dosen, STT Wiworotomo, Purwokerto. e-mail: [pungkas.trie@gmail.com](mailto:pungkas.trie@gmail.com)

<sup>2</sup> Dosen, Program Studi Magister Teknik Elektro, Universitas Islam Sultan Agung, Jl. Raya Kaligawe Km. 4 Semarang 50012.

<sup>3</sup> Profesor Riset, Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronik, LIPI, Jln. Cisitno No.21/154D, Bandung, 40135

Pengendali PID tetap bertahan digunakan untuk AVR sistem eksitasi pada pembangkit listrik dengan penyempurnaan pada aspek algoritme penentuan nilai parameter secara otomatis, dan optimasi nilai parameter menggunakan metode sesuai dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi. Namun, semua pengendali PID pada AVR tersebut memiliki topologi yang sama, yaitu sinyal pengendali merupakan penjumlahan dari faktor proporsional, faktor integral dan faktor diferensial, dengan semua faktor tersebut merupakan hasil perkalian antara nilai *gain* masing-masing dengan nilai *error*. *Error* adalah nilai selisih antara nilai referensi tegangan terminal generator dengan tegangan terminal generator yang sebenarnya. Sampai saat ini, belum ada publikasi yang melaporkan gagasan dan/atau hasil implementasi gagasan mengubah topologi sebuah pengendali AVR yang tersusun oleh faktor proporsional (P), faktor integral (I), dan faktor diferensial (D).

Tujuan makalah ini adalah mengusulkan sebuah topologi pengendali PID yang berbeda dengan yang selama ini digunakan untuk AVR pada sistem eksitasi pembangkit listrik. Sasarannya adalah untuk mendapatkan sistem kendali AVR generator sinkron yang lebih baik daripada menggunakan pengendali PID konvensional. Melalui eksperimen, diteliti peningkatan kinerja pengendali PID yang diusulkan.

Makalah ini terdiri atas lima bagian. Bagian pertama mengulas publikasi sebelumnya, menunjukkan keterbaruan dan tujuan makalah ini. Bagian kedua membahas sistem eksitasi generator sinkron tiga fase. Usulan modifikasi topologi AVR disajikan pada bagian ketiga. Eksperimen dan pembahasan hasilnya diuraikan pada bagian keempat. Pada bagian kelima ditarik kesimpulan.

## II. AVR PADA PEMBANGKIT LISTRIK

### A. Generator Sinkron

Generator sinkron terdiri atas dua elemen penting, yaitu stator dan rotor. Stator merupakan bagian dari generator sinkron yang diam, yang merupakan tempat tegangan induksi dibangkitkan di tiga fase lilitan stator (a, b, c). Sedangkan rotor merupakan bagian dari generator sinkron yang bergerak dan dialiri arus searah pada kumparannya [14]. Gbr. 1 menunjukkan skema penampang generator sinkron tiga fase dengan sepasang kutub medan magnet.

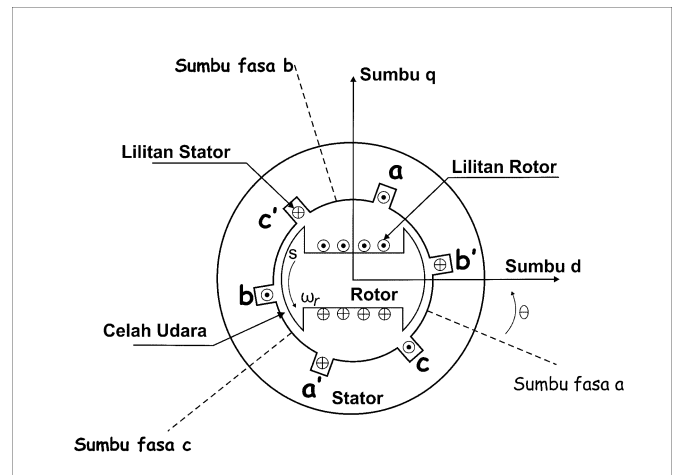
Frekuensi listrik yang dihasilkan terkunci di rotasi mekanik dari generator. Hubungan antara kecepatan mekanik rotor,  $n$  (rpm), dengan jumlah kutub magnet,  $P_f$ , dan frekuensi listrik dari arus stator,  $f$  (Hz), mengikuti persamaan berikut.

$$n = \frac{120f}{P_f} \tag{1}$$

Besarnya tegangan induksi,  $E_A$ , yang dihasilkan dalam fase stator diperoleh dari (2).

$$E_A = K\phi\omega \tag{2}$$

Tegangan ini tergantung pada fluks,  $\phi$ , di mesin, frekuensi,  $f$  (Hz), atau kecepatan rotasi,  $\omega$ , dan konstruksi mesin yang diwakili oleh konstanta,  $K$ .



Gbr. 1 Penampang generator sinkron tiga fase [14].

Tegangan keluaran generator,  $V_\phi$ , adalah selisih antara tegangan induksi,  $E_A$ , dengan total rugi-rugi akibat tegangan reaksi jangkar,  $jXI_A$ , tegangan akibat induktans diri,  $jX_A I_A$ , dan penurunan tegangan akibat resistans lilitan stator,  $R_A I_A$ .

$$V_\phi = E_A - jXI_A - jX_A I_A - R_A I_A \tag{3}$$

Gabungan reaktans akibat reaksi jangkar dan akibat induktans diri disebut dengan reaktans sinkron  $X_s = X + X_A$ . Persamaan tegangan keluaran,  $V_\phi$ , menjadi:

$$V_\phi = E_A - jX_s I_A - R_A I_A \tag{4}$$

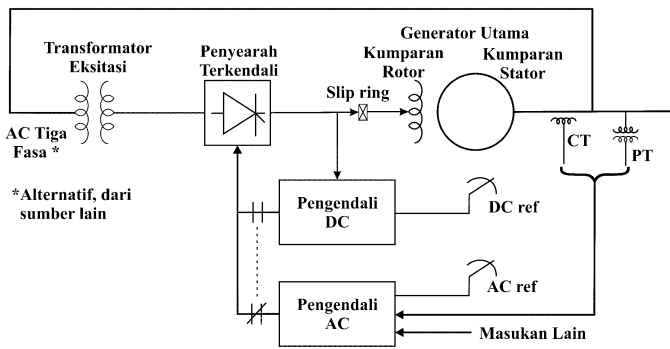
Tegangan dan arus rangkaian tiga fase dalam kondisi yang seimbang mempunyai besar yang sama, tapi terpisah pada sudutnya sejauh  $120^\circ$  satu sama lain. Jika konfigurasi rangkaian tiga fase berbentuk Y, maka tegangan terminal  $V_T$  bernilai:

$$V_T = \sqrt{3}V_\phi \tag{5}$$

### B. Sistem Eksitasi Generator Sinkron Tiga Fase

Sistem eksitasi bekerja dengan memberikan tegangan arus searah ke lilitan rotor pada generator sinkron. Sistem ini digunakan untuk mengendalikan dan memproteksi serta mengoptimalkan kinerja pembangkit listrik dengan mengatur tegangan dan arus. Selain dapat mengendalikan tegangan dan daya reaktif, hal ini juga meningkatkan kesetabilan sistem. Fungsi proteksi adalah untuk membatasi kerja generator sinkron, sistem eksitasi, dan perangkat lainnya agar tidak melebihi batas yang diberikan.

Sistem eksitasi yang banyak diterapkan pada pembangkit listrik modern adalah *static excitation system*, seperti ilustrasi pada Gbr. 2 [15]. Jembatan *thyristor* pada penyearah terkendali menjadi komponen yang vital dalam sistem ini, karena komponen inilah yang berfungsi untuk mencatu listrik arus searah ke lilitan medan. Tegangan yang mengalir ke lilitan medan bergantung pada sudut penyalan *thyristor*. Sudut penyalan *thyristor* dilakukan oleh pengendali tegangan yang disebut AVR.



Gbr. 2 Ilustrasi sistem eksitasi statik untuk generator sinkron [15].

AVR berupa sistem kendali umpan balik yang terus-menerus memantau tegangan yang dihasilkan pada terminal generator dan dengan pengendali sistem AVR mampu mengatur tingkat eksitasi rotor. Hubungan antara tegangan terminal,  $V_T$ , medan magnet dari kutub rotor,  $B$ , frekuensi rotor,  $\omega_m$ , dan parameter generator lainnya diberikan oleh persamaan berikut.

$$V_T = \sqrt{\frac{3}{2}} f_r 2pq l_s R_r \omega_m B \delta^0 \tag{6}$$

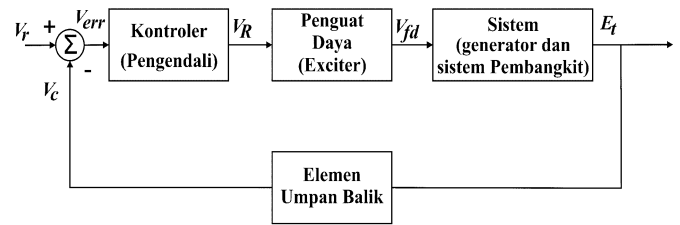
Tegangan terminal generator ditentukan oleh beberapa parameter, yaitu koefisien lilitan,  $f_r$ , yang merupakan perkalian faktor distribusi dan faktor jarak antar lilitan, jumlah kutub,  $p$ , jumlah slot per tiang dan fase,  $q$ , panjang stator,  $l_s$ , dan jari-jari rotor,  $R_r$ . Tegangan terminal tersebut juga tergantung nilai variabel, yaitu kecepatan rotasi rotor dan medan magnet yang dibangkitkan oleh kumparan rotor,  $B$ . Oleh karena itu, nilai tegangan terminal generator dapat diatur dengan cara mengendalikan tegangan kumparan rotor yang membangkitkan medan magnet dan biasa disebut eksitasi. Pengaturan secara otomatis dilakukan oleh AVR. Karakteristik pengendali yang digunakan di dalam AVR menentukan tanggapan dan kestabilan tegangan yang dihasilkan generator.

Tegangan generator merupakan bagian dari tegangan tinggi, sedangkan tegangan kerja kendali AVR adalah tegangan rendah. AVR menggunakan *Potential Transformer* (PT) sebagai sensor tegangan. PT menurunkan tegangan terminal generator menjadi tegangan rendah. AVR digital berbasis mikroprosesor menggunakan tegangan 0~3,3V, sehingga diperlukan rangkaian penurun tegangan.

Gbr. 3 menunjukkan diagram kotak pengendali eksitasi. Elemen umpan balik dari generator akan diolah pengendali dengan membandingkannya terhadap tegangan referensi. Selisih dari referensi dan umpan balik adalah *error*. Nominal *error* inilah yang diolah menjadi keluaran yang diberikan kepada power amplifier (*exciter*). *Exciter* akan berpengaruh secara langsung terhadap generator.

### III. METODOLOGI PERANCANGAN

Pengendali PI yang digunakan untuk AVR pada sistem eksitasi generator sinkron menghitung nilai tegangan medan menggunakan selisih nilai (*error*),  $e(t)$ , antara tegangan terminal generator yang diinginkan,  $v_t^*(t)$ , dan tegangan terminal generator,  $v_t(t)$ , menurut (7) dan (8) [2]- [5], [7].



Gbr. 3 Diagram kotak pengendali eksitasi.

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \tag{7}$$

$$e(t) = v_t^*(t) - v_t(t). \tag{8}$$

Untuk AVR dengan pengendali PID, digunakan persamaan berikut [6], [8], [10], [12], [13].

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}. \tag{9}$$

Perancangan pengendali PI dan PID tersebut selama ini umumnya mengacu kepada model dinamika generator berupa persamaan dinamika orde satu. Umumnya kinerja pengendali pada AVR tersebut dievaluasi dengan membandingkan tanggapan waktu tegangan terminal generator terhadap perubahan nilai referensi. Parameter kinerja tersebut adalah *steady state error* (SSE), *over shoot* (OS), *rise time* (TR), dan *settling time* (TS). Pengendali PI/PID yang berkualitas akan menghasilkan nilai SSE mendekati nol, dan nilai indikator kinerja lain (OS, TR, TS) yang kecil.

Dengan melalukan perhitungan pada titik operasinya, dinamika generator sinkron yang menjadi objek pengendalian dapat diekspresikan dalam bentuk persamaan ruang keadaan yang memiliki empat variabel keadaan dan dua masukan, seperti ditunjukkan pada (10) dan (11) [16].

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{10}$$

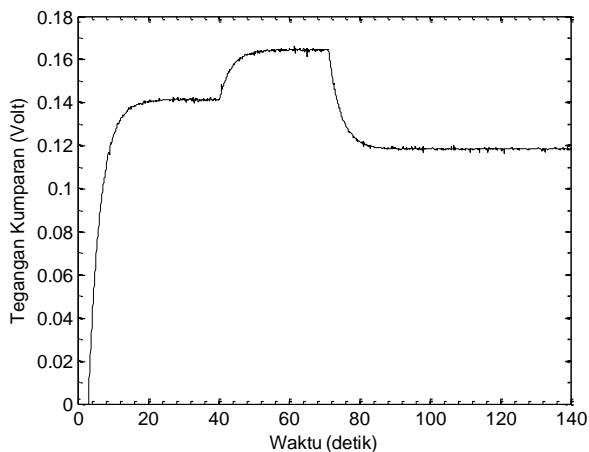
$$V_t = Cx. \tag{11}$$

Variabel ruang keadaan,  $x$ , dan masukan,  $u$ , masing-masing adalah  $x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$ , dan  $u = [\Delta E_f \ \Delta T_m]^T$ . Matriks sistem  $A$  berdimensi  $4 \times 4$ , matriks masukan  $B$  berdimensi  $4 \times 2$ , dan matriks keluaran  $C$  berdimensi  $1 \times 4$ . Variabel ruang keadaan adalah

$$x = [\Delta E'_q \ \Delta E'_d \ \Delta \left\{ \frac{(\omega_r - \omega_e)}{\omega_b} \right\} \ \Delta \delta]^T \tag{12}$$

dengan  $\Delta E'_q$  dan  $\Delta E'_d$  masing-masing melambangkan deviasi tegangan pada sumbu q dan sumbu d.  $\Delta \omega_b$ ,  $\Delta \omega_r$ ,  $\Delta \omega_e$  adalah deviasi kecepatan rotasi *base*, kecepatan rotasi elektrik, dan kecepatan rotasi rotor.  $\Delta \delta$  menunjukkan deviasi sudut. Dengan demikian, tegangan terminal generator,  $V_t$ , dipengaruhi oleh perubahan tegangan kumparan rotor,  $\Delta E'_f$ , dan perubahan torsi,  $\Delta T_m$ .

Oleh karena itu, pengendali untuk AVR perlu dirancang agar kokoh terhadap gangguan atau *disturbance* akibat perubahan torsi, sehingga saat terjadi perubahan torsi maka tegangan terminal dapat diregulasi dan kembali ke nilai nominal yang diharapkan. Selain itu, pengendali tersebut juga harus mampu menjejak nilai tegangan referensi sehingga tegangan terminal generator dapat mengikuti nilai yang diinginkan dalam waktu yang cepat dan *overshoot* yang kecil.



Gbr. 4 Tanggapan tegangan terminal generator sinkron tanpa pengendali AVR.

Guna memenuhi kebutuhan di atas, pada makalah ini diusulkan sebuah pengendali PID dengan modifikasi topologi untuk AVR pada sistem eksitasi generator sinkron.

$$u(t) = K_{p1}e(t) + K_{p2}V_t(t) + K_i \int_0^t e(t)dt + K_{d1} \frac{de(t)}{dt} + K_{d2} \frac{dV_t(t)}{dt} \tag{13}$$

Pengendali ini memiliki dua *gain* proporsional, satu *gain* integral, dan dua *gain* diferensial. *Gain* proporsional masing-masing menjadi pengali dari nilai *error* dan nilai tegangan terminal generator. Demikian juga *gain* diferensial.

Nilai parameter generator sinkron tiga fase mengacu pada penelitian sebelumnya [16], dengan fungsi alih sebagai berikut.

$$\Delta V_t(s) = \frac{0.020774}{s+0.2917} \Delta E_f \tag{14}$$

Gbr. 4 menunjukkan tanggapan tegangan terminal generator sinkron tersebut pada saat diberikan masukan perubahan tegangan kumparan rotor berupa *step* sebesar 1 unit dalam kondisi torsi nominal. Dari Gbr. 4 diketahui secara kasat mata bahwa generator ini memiliki *settling time* sekitar 21 detik. Pada detik ke-40 generator mendapat gangguan berupa perubahan torsi sebesar 0,4 dan kemudian pada detik ke-70 status gangguan torsi berubah menjadi sebesar -0,4. Tampak bahwa pengaruh gangguan torsi menimbulkan *offset* pada tegangan terminal generator.

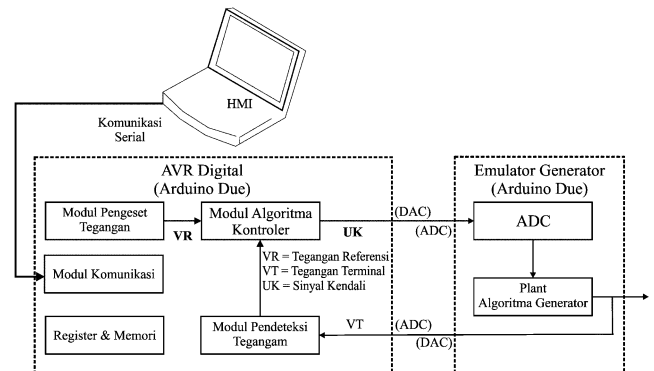
Pengendali PID dengan modifikasi topologi sesuai (13) telah dirancang dan algoritme tersebut telah ditanamkan ke dalam prosesor digital Arduino DUE pada prototipe AVR yang telah dibuat. Arduino DUE merupakan kit mikrokontroler berbasis mikroprosesor ATSAM3X8EA keluaran ATMEL yang sudah menggunakan arsitektur 32-bit ARM Cortex-M3 RISC *processor*. Fitur ATSAM3X8EA yang diutamakan dalam makalah ini adalah sebagai berikut.

1. ARM® Cortex®-M3 revision 2.0 dapat beroperasi hingga 84 MHz.
2. 16-channel 12-bit 1Msps ADC dengan *differential input mode* dan *programmable gainstage*.
3. 2-channel 12-bit 1 MSPS DAC.
4. 9-Channel 32-bit *Timer/Counter* (TC) untuk *capture*, *compare*, dan *PWM mode*.

5. Up to 4 USARTs (ISO7816, IrDA®, Flow Control, SPI, Manchester and LIN support) dan satu UART,

TABEL I  
NILAI PARAMETER PENGENDALI UNTUK AVR

PID konvensional		PID baru yang diusulkan (modifikasi topologi)	
Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
$K_p$	2	$K_{p1}$	0,6
$K_i$	1,5	$K_{p2}$	1,4
$K_d$	0,001	$K_i$	1,5
		$K_{d1}$	0,0003
		$K_{d2}$	0,0007



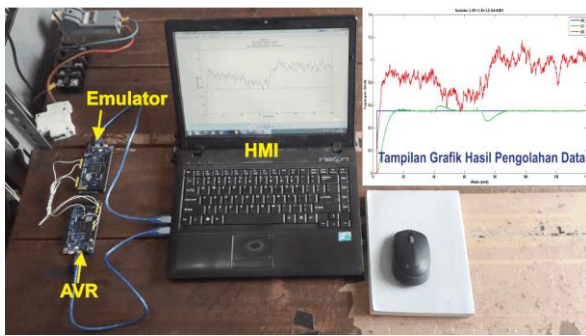
Gbr. 5 Skema eksperimen.

Kinerja pengendali tersebut telah dievaluasi melalui eksperimen menggunakan sistem *hardware in the loop* (HIL). Model generator sinkron ditanam ke dalam emulator yang juga menggunakan mikroprosesor Arduino. Untuk perbandingan kinerja, algoritme pengendali PID konvensional sesuai (9) juga telah dirancang dan diimplementasikan pada perangkat yang sama. Kedua pengendali tersebut bekerja pada waktu cuplik 1 milidetik.

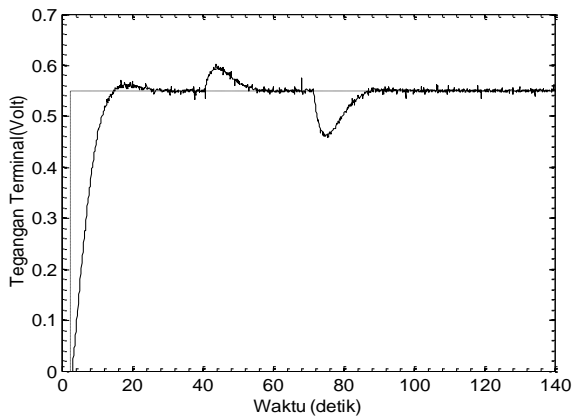
Nilai parameter pengendali PID telah ditentukan dengan metode coba-coba untuk mendapatkan hasil yang paling baik. Indikator kinerja utamanya adalah menghasilkan *steady state error* yang mendekati 0 dalam waktu yang sesingkat-singkatnya saat mendapat gangguan torsi. Indikator kinerja berikutnya adalah penjejakan nilai tegangan referensi yang akurat tanpa *steady state error*, *over shoot* yang kecil, dan *settling time* yang pendek. Nilai parameter kedua pengendali tersebut ditampilkan pada Tabel I.

IV. EKSPERIMEN DAN PEMBAHASAN

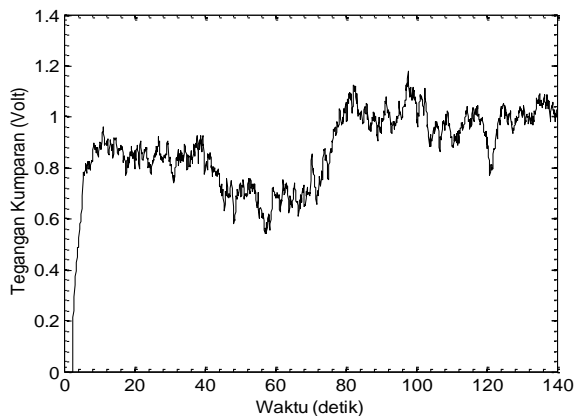
Gbr. 5 menunjukkan skema eksperimen yang tersusun oleh prototipe AVR digital, emulator generator sinkron, dan *human machine interface* (HMI) berupa laptop. Sistem ini dikenal dengan sebutan HIL karena peranti keras berupa prototipe AVR yang diuji tersambung di dalam sebuah untai ke emulator yang berisi model sistem yang dikendalikan. HMI memiliki fasilitas *grafical user interface* (GUI) untuk memonitor sinyal, menyimpan data waktu nyata, dan mengubah nilai parameter pengendali. Emulator bekerja dalam waktu cuplik 0,1 milidetik.



Gbr. 6 Foto perangkat eksperimen.



(a)

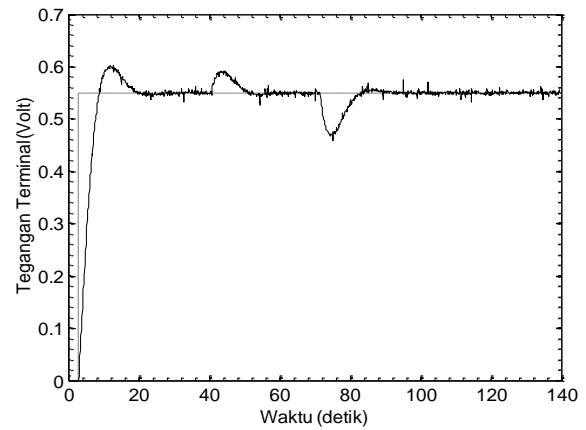


(b)

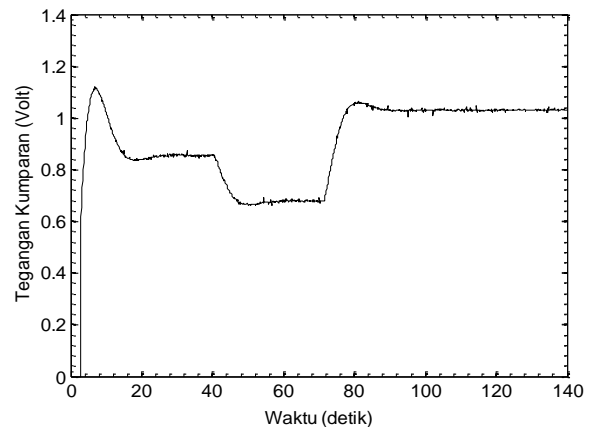
Gbr. 7 Hasil eksperimen menggunakan pengendali PID baru yang diusulkan (modifikasi topologi), (a) Tegangan terminal generator, (b) Tegangan kumparan rotor generator.

Gbr. 6 menunjukkan foto perangkat eksperimen. Mikrokontroler mendapat catu daya listrik dari laptop melalui kabel USB.

AVR digital mengeluarkan kendali masukan,  $\Delta E_f$ , melalui *pin* DAC dan mengirimnya melalui kabel putih ke *pin* ADC emulator generator. Tegangan terminal,  $\Delta V_t$ , dikeluarkan oleh emulator generator melalui *pin* DAC dan dikirimkan melalui kabel putih ke *pin* ADC AVR digital. Akuisisi data (waktu, tegangan terminal, tegangan referensi, kendali masukan) dilakukan dengan waktu cuplik 100 milidetik oleh laptop HMI dan menyimpannya di basis data. Hasil pengukuran tersebut kemudian di-plot sebagai fungsi waktu.



(a)



(b)

Gbr. 8 Hasil eksperimen menggunakan pengendali PID konvensional, (a) Tegangan terminal generator, (b) Tegangan kumparan rotor generator

Skenario eksperimen yang dilakukan dalam penelitian adalah sebagai berikut.

1. Kinerja penjejukan diuji dengan mengubah nilai referensi sebesar 0,4 (satuan) dalam keadaan torsi nominal.
2. Kinerja kekokohan diuji terhadap gangguan/disturbance perubahan torsi. Dalam keadaan tunak, tiba-tiba torsi membesar +0,4 (satuan) dan keadaan tersebut bertahan selama 30 detik. Kemudian torsi berubah -0,8 (satuan).
3. Akuisisi data diuji dengan cara selama eksperimen waktu, tegangan terminal dan kendali masukan direkam secara elektronik.
4. Prosedur eksperimen ini diterapkan untuk pengendali PID dengan modifikasi topologi dan pengendali PID konvensional.

Gbr. 7 menunjukkan hasil eksperimen menggunakan kendali PID yang diusulkan, sedangkan Gbr. 8 menunjukkan hasil eksperimen menggunakan pengendali PID konvensional. Gbr. 7(a) dan Gbr. 8(a) masing-masing menunjukkan tanggapan tegangan terminal. Kurva hitam terputus-putus adalah nilai referensi, sedangkan kurva hitam solid menunjukkan nilai tegangan terminal. Gbr. 7(b) dan Gbr. 8(b) masing-masing menunjukkan nilai masukan kendali berupa tegangan kumparan rotor generator.

TABEL II  
RANGKUMAN KINERJA PENGENDALI UNTUK AVR

Parameter	PID konvensional	PID baru (modifikasi topologi)
<b>Kinerja penjejukan:</b>		
<i>Overshoot</i> (OS)	9,098%	1,910%
<i>Settling Time</i> (TS)	28,1 detik	27,9 detik
<i>Steady state error</i> (SSE)	0,073%	0,062%
<i>Raising Time</i> (TR) 95%	5,3	10,2
<b>Kekokohan:</b>		
<i>Overshoot</i> (OSD)	7,333%	8,060%
<i>Settling time</i> (TSD)	21 detik	16,2 detik
<i>Steady state error</i> (SSED)	0,03%	0,005%

Dari hasil eksperimen tersebut dapat diketahui beberapa hal penting sebagai berikut.

1. Saat terjadi perubahan nilai referensi, pengendali PID konvensional menghasilkan *overshoot* yang tinggi, dan mengalami *undershoot* sebelum mencapai keadaan tunak, sedangkan pengendali PID yang diusulkan menghasilkan *overshoot* yang kecil dan tidak mengalami *undershoot*.
2. Saat terjadi gangguan perubahan torsi, pengendali PID konvensional mengalami *overshoot* dan *undershoot*, membutuhkan waktu yang lebih lama untuk mencapai keadaan tunak, dan memiliki *error* pada keadaan tunak setelah adanya distorsi torsi.
3. Saat terjadi gangguan perubahan torsi, pengendali PID dengan modifikasi topologi yang diusulkan memiliki *overshoot* yang rendah, tidak mengalami *undershoot* sebelum mencapai keadaan tunak, dan membutuhkan waktu yang cepat dalam mencapai keadaan tunak.
4. Pengendali PID yang diusulkan memiliki *error* pada keadaan tunak yang lebih kecil saat ada gangguan maupun tidak ada gangguan.

Kinerja pengendali hasil eksperimen tersebut dirangkum secara kuantitatif pada Tabel II. *Overshoot* dan *settling time* yang dihasilkan pengendali PID yang diusulkan lebih kecil daripada pengendali PID konvensional, karena umpan balik proporsional dan diferensial dari tegangan terminal dapat mengurangi *overshoot* masukan kendali. *Error* pada keadaan tunak tetap baik diyakini karena faktor integral dari nilai *error* berfungsi selayaknya pada pengendali PID konvensional.

Evaluasi kinerja dalam bentuk fungsi *fitness* menjadi topik penelitian yang menarik untuk ditindaklanjuti, terutama guna melakukan penentuan nilai parameter pengendali secara otomatis.

## V. KESIMPULAN

Dari hasil eksperimen disimpulkan bahwa algoritme PID dengan modifikasi topologi yang diusulkan memberikan kinerja lebih baik dari pada algoritme PID konvensional pada AVR digital yang telah dirancang bangun. Saat terjadi perubahan torsi, dibandingkan dengan PID konvensional, algoritme yang diusulkan menghasilkan 83% *steady state error* yang lebih kecil, dan *settling time* yang lebih pendek 4,8 detik. Saat terjadi perubahan referensi tegangan, algoritme tersebut menghasilkan *steady state error* yang lebih kecil 15%, *overshoot* 79% lebih kecil, dan *settling time* 0,2 detik lebih pendek dari pada PID konvensional.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Makalah ini merupakan salah satu hasil penelitian dalam rangka menyelesaikan Program Teknik Elektro S2 Universitas Islam Sultan Agung, Semarang. Penelitian ini telah dilakukan di Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronika LIPI, Bandung. Terima kasih kepada STT Wiworotomo Purwokerto yang telah memberikan beasiswa, dan kepada berbagai pihak yang telah membantu penelitian, penulisan, dan penerbitan makalah ini.

## REFERENSI

- [1] E. Rijanto, "Rancang bangun regulator tegangan manual dengan fitur interlock untuk PLTA kapasitas 9 MVA," *Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan*, vol. 11, no. 1, pp. 11-26, 2012.
- [2] A. A. Alam, Syahril dan N. Taryana, "Pemodelan dan Simulasi Automatic Voltage Regulator untuk Generator Sinkron 3 kVA Berbasis Proportional Integral," *Jurnal Reka Elkomika*, vol. 3, no. 2, pp. 97-110, Juli 2015.
- [3] E. Rijanto, "Rancang bangun kontroler tegangan analog untuk pembangkit listrik tenaga air (PLTA) dengan generator sinkron 3 fasa kapasitas 9 MVA," *Jurnal INKOM*, vol. 3, no. 1-2, pp. 76-89, 2009.
- [4] E. Rijanto dan A. Muqorobin, "Rancang bangun modul pengkondisi sinyal dan antar muka untuk kontroler tegangan digital pada PLTA," *Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan*, vol. 10, no. 1, pp. 61-74, 2011.
- [5] E. Mukti, S. Wijanarko dan A. Muqorobin, "Replacement of analog automatic voltage regulator using digital technology," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 6, no. 1, pp. 53-62, 2016.
- [6] K. Kim dan R. C. Schaefer, "Tuning a PID controller for a digital excitation control system," *IEEE Pulp and Paper Industry Technical Conference*, Victoria, BC, Canada, 2004.
- [7] E. Rijanto, "Perancangan regulator tegangan generator sinkron 3 fasa berbasis model matching," *Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan*, vol. 8, no. 1, pp. 1-11, 2009.
- [8] A. Bensenouci, "Robust iterative PID controller based on Linear Matrix Inequality for a sample power system," *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, vol. 2, no. 9, pp. 1899-1907, 2008.
- [9] A. K. Mahmmod, "Design of antiwindup AVR for synchronous generator using Matlab simulation," *Al-Rafidain Engineering*, vol. 17, no. 3, 2009.
- [10] K. Kim, P. Rao dan J. Burnworth, "Self tuning of the PID controller for a digital excitation control system," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, no. 4, pp. 1518-1524, 2010.
- [11] N. Farouk dan T. Bingqi, "Application of self tuning fuzzy PID controller on the AVR system," dalam *Proc. of 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, August 5-8, Chengdu, China*, 2012.
- [12] D. H. Kim dan J. H. Cho, "PID controller tuning using hybrid optimization based on bacterial foraging and clonal selection," dalam *SCIS & ISIS 2006*, pp. 825-829., Tokyo - Japan, 2006, September 20-24.
- [13] C. C. Wong, S. A. Li dan H. Y. Wang, "Optimal PID controller design for AVR system," *Tamkang Journal of Science and Engineering*, vol. 3, no. 259-270, p. 12, 2009.
- [14] C. Stephen J, *Electric machinery and power system fundamentals*, New York: McGraw-Hill, 2002.
- [15] P. Kundur, *Power Systems Stability and Control*, McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [16] L. Prabhawa, "Perancangan Automatic Voltage Regulator untuk Generator Sinkron Tiga Fasa Berbasis Pengendali PI", Tugas Akhir, Sekolah Teknik Elektro dan Informatika - ITB, Bandung, 2008.