

LAPORAN PENELITIAN REGULER



**PENINGKATAN KINERJA MPPT PADA *DC HOUSE* DENGAN FUZZY-
PID DALAM SISTEM DC MIKRO GRID**

Oleh :

Adhi Kusmantoro, ST, MT

NPP. 147301432

Margono, ST, M.Eng

NPP. 136101383

Muhammad Amiruddin, ST, M.Eng

NPP. 138401392

**LEMBAGA PENELITIAN DAN PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT
UNIVERSITAS PGRI SEMARANG**

2019

HALAMAN PENGESAHAN

1. a. Judul Penelitian : Peningkatan kinerja MPPT Pada *DC House* Dengan Fuzzy-PID Dalam Sistem DC Mikro Grid
2. b. Bidang Ilmu : Teknik Kendali
3. Ketua Peneliti
 - a. Nama Lengkap dan Gelar : Adhi Kusmantoro, ST, MT
 - b. Jenis Kelamin : Laki-laki
 - c. Golongan/Pangkat/NPP : III D /Penata/ 147301432
 - d. Jabatan Fungsional : Lektor
 - e. Fakultas/Jurusan : FTI/ Teknik Elektro UPGRIS Semarang
 - f. Pusat Penelitian : Laboratorium Teknik Elektro
 - g. Alamat kantor/Telp/Fax/E-mail : Jl. Lontar no 1 Sidodadi Timur / 024-8316377
 - h. Alamat rumah/Telp/Fax/E-mail : Jl.Taman Borobudur Timur V/8 Semarang / 024-7600855/ adhiteknik@gmail.com
4. Jumlah Anggota Peneliti : 2 orang
 - a. Nama Anggota 1 : Margono, ST, M.Eng
 - b. Nama Anggota 2 : Muhammad Amiruddin, ST, M.Eng
 - c. Perguruan Tinggi : Universitas PGRI Semarang
5. Lokasi Penelitian : Lab.Teknik Elektro UPGRIS Semarang
6. Lama Penelitian : 6 bulan
7. Biaya yang diperlukan : Rp. 7.000.000,-
8. Sumber Biaya : Universitas PGRI Semarang

Mengetahui,
Dekan Fakultas Teknik dan Informatika



Drs. Slamet Supriyadi, M.Env.St.
NIP. 195410151982031003


Semarang, 15 Juli 2019

Ketua Tim Peneliti



Adhi Kusmantoro, ST, MT.
NPP. 147301432

Menyetujui,
Ketua LPPM Universitas PGRI Semarang



Dr. Senowarsito, M.Pd.
NIP. 196108231987031003

RINGKASAN

Energi listrik merupakan energi yang sangat penting bagi kehidupan manusia, kebutuhan energi saat ini sebagai penggerak kehidupan semakin lama semakin meningkat. Hal ini didorong oleh lonjakan jumlah populasi manusia terutama di negara berkembang, sementara ketersediaannya pasokan daya yang ada juga tidak dapat mencukupi kebutuhan yang terus meningkat tersebut, maka dari itu dibutuhkan suatu sumber energi terbarukan. Energi terbarukan secara umum dapat didefinisikan sebagai energi yang didapat dari sumber yang alami yang ada disekitar manusia dan dapat kita peroleh secara gratis. Sebagai salah satu sumber energi yang bersifat terbarukan, sinar matahari atau energi surya ini dinilai tepat untuk menjadi salah satu sumber energi listrik alternatif yang dapat digunakan. Energi surya merupakan suatu energi yang bersih, terbarukan, serta tersedia dalam jangka waktu yang lama. Sumber energi surya ini juga merupakan energi terbarukan yang paling umum dimanfaatkan saat ini dan energi surya ini dapat dikonversi menjadi energi listrik. Pemanfaatan sinar matahari menggunakan panel surya sebagai pembangkit listrik mulai dikembangkan untuk mengurangi penggunaan bahan bakar fosil. Panel surya memiliki keunggulan seperti ramah lingkungan karena tidak mempunyai limbah yang menyebabkan polusi, murah perawatan, dan mudah dalam penerapannya. Tujuan dari penelitian ini adalah merancang model MPPT (*Maximum power point tracking*) dengan sumber PV. Pengendali hybrid fuzzy-PID digunakan untuk meningkatkan kinerja MPPT, dalam mengatur *boost converter*. Penelitian yang akan dilakukan merupakan jenis penelitian simulasi dan pemodelan, dimana pada penelitian ini akan membuktikan hipotesa berdasarkan pengujian terhadap beban dengan menggunakan *tool* yang berupa suatu algoritma dan perangkat keras. Uji coba dilakukan menggunakan beban listrik yang ada dalam rumah tinggal. Pengujian juga dilakukan dengan mengubah intensitas dan panas dari sumber energi matahari. Hasil penelitian adalah berupa suatu model rancangan MPPT berbasis fuzzy-PID sebagai pengatur boost converter. Hasil penelitian memperlihatkan dengan penggunaan kontrol Fuzzy-PID mampu memperbaiki keluaran tegangan dan daya boost converter, sehingga dengan metode ini tegangan keluaran boost converter lebih bagus jika dibandingkan dengan metode yang lain.

Kata Kunci : Boost Converter, Fuzzy-PID, Photovoltaic, Mikro Grid

KATA PENGANTAR

Dengan memanjatkan puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan kelancaran maka kegiatan penelitian yang berjudul “Peningkatan Kinerja MPPT Pada DC *House* Dengan Fuzzy-PID Dalam Sistem DC Mikro Grid” dapat terlaksana dengan baik. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk meningkatkan penggunaan energi listrik satu fasa pada rumah tinggal, sehingga efisiensi penggunaan sumber energi listrik dapat ditingkatkan.

Laporan penelitian ini berisi rangkaian kegiatan dengan beberapa metode yang telah dilaksanakan dari awal sampai dengan akhir. Namun demikian penulis mengharapkan saran dan kritik yang membangun demi kesempurnaan penelitian selanjutnya. Kami berharap penelitian ini dapat memberikan sumbangsih dalam bidang teknik tenaga listrik khususnya masalah sumber energi terbarukan.

Pada kesempatan ini, Tim peneliti menyampaikan terima kasih terhadap pihak yang telah banyak memberikan dukungan dan bantuan dalam melaksanakan penelitian serta penyusunan laporan penelitian ini :

1. Rektor Universitas PGRI Semarang.
2. Ketua LPPM Universitas PGRI Semarang.
3. Dekan Fakultas Teknik dan Informatika Universitas PGRI Semarang.
4. Ketua Program Studi Teknik Elektro Universitas PGRI Semarang.
5. Kepala Laboratorium Teknik Elektro Universitas PGRI Semarang.
6. Semua pihak yang telah membantu pelaksanaan penelitian ini.

Semoga laporan penelitian ini bermanfaat baik secara teori maupun secara praktek khususnya dalam bidang teknik tenaga listrik untuk meningkatkan efisiensi pemakaian sumber daya listrik pada rumah tinggal.

Semarang, 15 Juli 2019



Tim Peneliti

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
RINGKASAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	ix
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Manfaat Penelitian	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Konsep Smart Grid	3
2.2 DC Mikro Grid	12
2.3 Kontrol PID	13
2.4 MPPT (Maximum Power Point Tracking)	22
2.5 Boost Converter	25
2.6 Kontrol Fuzzy-PID	25
BAB III METODE PENELITIAN	
3.1. Pendekatan Penelitian	27
3.2. Populasi dan Sampel	27
3.3. Metode Pengambilan Sampel	27
3.4. Instrumen Penelitian	27
3.5. Rancangan Penelitian	28
3.6. Teknik Pengumpulan Data	29
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 Rancangan Hardware	30
4.2 Rancangan Model Simulasi	31

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	38
5.2 Saran	38
DAFTAR PUSTAKA	39
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Konsep perancangan smart grid	4
Gambar 2.2 Koordinasi diantara ISO (<i>Independent System Operators</i>)	7
Gambar 2.3 Infrastruktur dari Advanced Metering (AMI)	8
Gambar 2.4 Partisipasi Pelanggan (AMI, Komunikasi dan Software)	9
Gambar 2.5 Skema DC mikro grid	13
Gambar 2.6 Respon proses sebagai akibat perubahan <i>SetPoint</i>	16
Gambar 2.7 Blok kontrol Proporsional	17
Gambar 2.8 Relasi input-output kontrol Proporsional	17
Gambar 2.9 Diagram blok kontrol Proporsional Integral	18
Gambar 2.10 Diagram blok alternative kontrol PI	19
Gambar 2.11 Aksi kontrol Proporsional Integral (PI)	19
Gambar 2.12 Aksi kontrol Proporsional Derivative	20
Gambar 2.13 Diagram blok kontrol PID ideal bentuk <i>dependent</i>	21
Gambar 2.14 Diagram blok kontrol PID ideal bentuk <i>independent</i>	21
Gambar 2.15 Aksi kontrol PID	21
Gambar 2.16 Diagram blok alternatif kontrol PID	22
Gambar 2.17 Rangkaian ekuivalen sel surya	23
Gambar 2.18 Karakteristik P-V untuk level radiasi yang berbeda. Tiap titik mewakili MPP dari masing-masing kurva	24
Gambar 2.19 Karakteristik I-V pada temperatur permukaan sel surya yang berbeda	24
Gambar 2.20 Rangkaian <i>boost converter</i>	25
Gambar 2.21 Pengendali PID	26
Gambar 2.22 Blok diagram fuzzy-PID	26
Gambar 3.1 Algoritma penelitian.	28
Gambar 3.2 Alur rencana penelitian	28
Gambar 4.1 Hardware boost converter	30
Gambar 4.2 Fuzzy-PID BTC 8300	30
Gambar 4.3 Simulink MPPT Fuzzy-PID	32
Gambar 4.4 Karakteristik PV TSM-230PD05.10	32
Gambar 4.5 Pengujian PV (Irradiance 1000 W/m ² , suhu 20 C)	33

Gambar 4.6 Pengujian PV (Irradiance 1000 W/m ² , suhu 35 C)	33
Gambar 4.7 Pengujian PV (Irradiance 500 W/m ² , suhu 35 C)	33
Gambar 4.8 Pengujian PV (Irradiance 500 W/m ² , suhu 20 C)	34
Gambar 4.9 Suhu pada PV 35 C	34
Gambar 4.10 Suhu pada PV 20 C	34
Gambar 4.11 Daya keluaran konverter dengan kontrol PID	35
Gambar 4.12 Daya keluaran konverter dengan kontrol konvensional	35
Gambar 4.13 Daya keluaran konverter dengan kontrol Fuzzy	36
Gambar 4.14 Daya keluaran konverter dengan kontrol Fuzzy-PID	36
Gambar 4.15 Tegangan keluaran konverter dengan kontrol PID	36
Gambar 4.16 Tegangan keluaran konverter dengan kontrol Fuzzy-PID	37
Gambar 4.17 Tegangan keluaran inverter	37
Gambar 4.18 Arus beban pada jaringan rumah tinggal	37

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Jaringan saat ini dengan jaringan masa depan	6
Tabel 2.2 Karakteristik dari smart grid	11
Tabel 2.3. Pengaruh tuning salah satu parameter PID terhadap unjuk kerja proses	16
Tabel 2.4 Metode tuning kontrol Proporsional untuk model proses FOPDT	18
Tabel 2.5 Metode tuning kontrol Proporsional untuk model proses IPDT	18

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Energi listrik merupakan energi yang sangat penting bagi kehidupan manusia, kebutuhan energi saat ini sebagai penggerak kehidupan semakin lama semakin meningkat. Hal ini didorong oleh lonjakan jumlah populasi manusia terutama di negara berkembang, sementara ketersediaannya pasokan daya yang ada juga tidak dapat mencukupi kebutuhan yang terus meningkat tersebut, maka dari itu dibutuhkan suatu sumber energi terbarukan (Guo Chujia, 2015). Energi terbarukan secara umum dapat didefinisikan sebagai energi yang didapat dari sumber yang alami yang ada disekitar manusia dan dapat kita peroleh secara gratis. Sebagai salah satu sumber energi yang bersifat terbarukan, sinar matahari atau energi surya ini dinilai tepat untuk menjadi salah satu sumber energi listrik alternatif yang dapat digunakan. Energi surya merupakan suatu energi yang bersih, terbarukan, serta tersedia dalam jangka waktu yang lama. Sumber energi surya ini juga merupakan energi terbarukan yang paling umum dimanfaatkan saat ini dan energi surya ini dapat dikonversi menjadi energi listrik (Ahmad Faizal, 2016). Pemanfaatan sinar matahari menggunakan panel surya sebagai pembangkit listrik mulai dikembangkan untuk mengurangi penggunaan bahan bakar fosil. Panel surya memiliki keunggulan seperti ramah lingkungan karena tidak mempunyai limbah yang menyebabkan polusi, murah perawatan, dan mudah dalam penerapannya (S.Hadjammar, 2016).

Divais elektronik yang digunakan untuk mengubah energi yang dihasilkan dari cahaya matahari menjadi energi listrik adalah panel surya. Panel surya adalah komponen semikonduktor yang dapat mengkonversi energi surya menjadi energi listrik. Namun, karena tingkat penyinaran energi surya yang berbeda-beda pada setiap harinya menyebabkan daya keluaran dari panel surya bervariasi dan tidak maksimal, maka dari itu diperlukannya model yang menyerupai karakteristik sel surya sebenarnya, sehingga kita dapat melakukan percobaan sederhana dari beberapa data untuk mencari tahu bagaimana untuk mendapatkan performa semaksimal mungkin dan mempertahankannya (Aranzazu D. Martin, 2015). Panel surya memiliki karakteristik yang non-linear, hal ini membuat kita sulit untuk mendapatkan titik maksimum dari panel surya tersebut, sehingga untuk menyelesaikan masalah tersebut diperlukan pemodelan dari panel surya untuk mendesain dan mensimulasikan algoritma *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) untuk menjaga titik kerja panel surya tetap pada titik MPP (Muhammad Sheraz, 2014). Pada titik tersebut panel surya berada pada keadaan optimal,

baik dari tegangan dan arus yang dihasilkan. Ketika tegangan dan arus yang dihasilkan maksimal maka akan mendapatkan keluaran daya yang maksimal (Ahmad Faizal, 2016). Daya yang dihasilkan oleh panel surya dipengaruhi faktor suhu dan intensitas cahaya. Namun panel surya memiliki kekurangan dalam hal efisiensi yang rendah. Secara umum terdapat titik yang unik pada kurva V-I maupun V-P, yang dinamakan *Maximum Power Point* (MPP), dimana pada titik tersebut panel surya bekerja pada efisiensi maksimum dan menghasilkan daya keluaran yang paling besar. Letak dari MPP tidak diketahui tetapi dapat dicari menggunakan perhitungan atau algoritma penjejak. Oleh karena itu algoritma *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) dibutuhkan untuk menjaga titik kerja panel surya agar berada pada titik MPP (Wahyudi Budi Pramono, 2010).

1.2 Rumusan Masalah

Agar penelitian ini terarah dengan baik, maka fokus pada permasalahan yang akan diteliti yaitu :

1. Apakah MPPT yang dibuat mampu memberikan sumber energi matahari secara maksimum pada konverter ?
2. Apakah sistem hybrid antara pengendali fuzzy dengan pengendali PID mampu memperbaiki dan meningkatkan MPPT sebelumnya ?
3. Apakah sumber daya listrik dari photovoltaic (PV) dengan kendali MPPT fuzzy-PID mampu memenuhi kekurangan energy *DC house* ?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah merancang model MPPT (*Maximum power point tracking*) dengan sumber PV. Pengendali hybrid Fuzzy-PID digunakan untuk meningkatkan kinerja MPPT, dalam mengatur *boost converter*.

1.4 Manfaat Penelitian

Model rancangan yang telah dihasilkan dapat digunakan warga masyarakat sebagai alternatif sumber listrik satu fasa, pengganti Genset dan bahkan dapat digunakan sebagai sumber listrik utama rumah tinggal. Penelitian yang dihasilkan dapat digunakan untuk mengembangkan riset tentang energi listrik dan pengendali, khususnya masalah energi terbarukan. Untuk Universitas PGRI Semarang diharapkan dapat menjadi salah satu informasi, evaluasi, dan referensi dalam meningkatkan efisiensi dalam rangka penghematan daya listrik.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

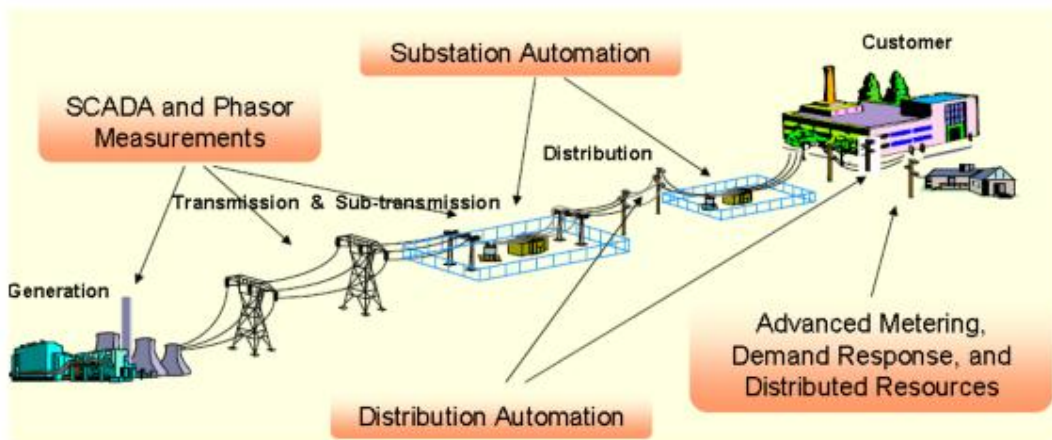
Energi mempunyai peranan penting dalam pencapaian tujuan sosial, ekonomi dan lingkungan untuk pembangunan berkelanjutan serta merupakan pendukung bagi kegiatan ekonomi nasional. Penggunaan energi di Indonesia meningkat pesat sejalan dengan pertumbuhan ekonomi dan penambahan penduduk. Sedangkan akses ke energi yang andal dan terjangkau merupakan prasyarat utama untuk meningkatkan standar hidup masyarakat. Keterbatasan akses ke energi komersial telah menyebabkan pemakaian energi per kapita masih rendah dibandingkan dengan negara lainnya. Konsumsi per kapita pada saat ini sekitar 3 SBM yang setara dengan kurang lebih sepertiga konsumsi per kapita rerata negara ASEAN. Dua pertiga dari total kebutuhan energi nasional berasal dari energi komersial dan sisanya berasal dari biomassa yang digunakan secara tradisional (non-komersial). Sekitar separuh dari keseluruhan rumah tangga belum terjangkau dengan sistem elektrifikasi Nasional. Kondisi kehidupan yang bergantung pada BBM impor yang semakin besar, harga minyak yang cenderung meningkat, subsidi yang sulit dihentikan, dan penggunaan energi yang sangat boros, serta pertumbuhan penduduk masih tinggi, akan membawa kehidupan ke berbagai permasalahan yang menghambat pertumbuhan ekonomi. Apabila kondisi buruk ini terjadi, maka akan sulit untuk memperbaikinya.

Pada saat ini kondisi energi nasional mengalami masa transisi dari monopoli sentralisasi ke arah terbuka-desentralisasi. Tantangan globalisasi dan reformasi telah membentuk restrukturisasi sektor energi agar dapat meningkatkan efisiensi dan transparansi. Penggunaan energi nasional meningkat pesat sejalan dengan pertumbuhan ekonomi dan penambahan penduduk. Sedangkan akses ke energi yang andal dan terjangkau merupakan salah satu prasyarat penting untuk meningkatkan standar hidup masyarakat. Krisis energi merupakan salah satu masalah yang dihadapi negara-negara di seluruh dunia saat ini, menyebabkan berbagai negara berusaha untuk mencari sumber energi selain energi fosil yang dinyatakan lebih ramah lingkungan dan dapat mencukupi kebutuhan energinya. Ada beberapa energi alternatif yang ramah lingkungan dengan jumlah yang sangat melimpah, seperti energi matahari (*solar energy*), tenaga angin, tenaga air dan panas bumi.

2.1 Konsep Smart Grid

Permintaan listrik saat ini sedang booming di seluruh dunia. Selain itu, dalam rangka untuk menghadapi persoalan perubahan iklim, kita perlu mengurangi emisi CO₂. Dimana salah satu penyebabnya adalah penggunaan energi yang tidak efisiensi (di rumah, bangunan dan

fasilitas industri) dan penggunaan sumber energi fosil yang besar-besaran serta penggunaan sumber energi terbarukan yang belum banyak. Pertumbuhan jumlah penduduk dan tingkat ekonomi suatu negara akan mendorong peningkatan konsumsi energi, khususnya energi listrik. Hal ini disebabkan energi listrik digunakan untuk menggerakkan roda perekonomian seperti industri, transportasi, perbankan, hingga pemerintahan. Selain itu energi listrik juga telah menjadi salah satu kebutuhan tak tergantikan bagi masyarakat saat ini. Sehingga permintaan akan suplai daya listrik menjadi semakin besar dan akan menimbulkan permasalahan baru, yakni ketersediaannya dan cara penyediaannya. Saat ini sumber energi utama yang digunakan untuk menggerakkan pembangkit-pembangkit di Indonesia masih terdiri atas sumber-sumber yang tidak terbarukan (*fossil fuel*). Selain masalah jumlah sumbernya yang semakin sedikit, isu lingkungan juga turut mendorong untuk segera dilakukan perubahan.



Gambar 2.1 Konsep perancangan smart grid.

Saat ini di Indonesia, kapasitas terpasang energi listrik sekitar 31.930 Mega Watt (MW) yang dihasilkan melalui 4.991 unit pembangkit listrik. Jumlah pelanggan saat ini ada sekitar 48.659.667 pelanggan, terbesar pelanggan rumah tangga sejumlah 45.152.244 pelanggan. Dari jumlah itu, pelanggan listrik prabayar sekitar 6,6 juta pelanggan. Rasio elektrifikasi sekitar 71 %. Ini berarti masih ada 29 % dari rakyat Indonesia yang belum memiliki akses terhadap listrik. Tantangan itu bukan cuma buat PLN karena sesuai Undang-Undang Ketenagalistrikan No. 30 Tahun 2009, kewajiban penyediaan tenaga listrik juga ada di pundak pemerintah daerah melalui badan usaha milik daerah.

Kebutuhan listrik tumbuh sejalan dengan pertumbuhan populasi manusia. Ini berarti bahwa jumlah pembangkit listrik yang ada saat ini tidak akan cukup di masa depan, jika tidak seimbang dengan pembangunan pembangkit listrik baru. Dalam draft Listrik Nasional, yang disebut Rancangan UMUM Kelistrikan Nasional (RUKN) 2003-2020, pada beberapa tahun mendatang diperkirakan Indonesia akan mengalami kekurangan kapasitas pembangkit listrik

nasional. Ini berarti, jika pendirian pembangkit listrik tidak seimbang, maka krisis listrik dapat terus terakumulasi di Indonesia. Oleh karena itu selain pembangunan pembangkit baru, perlu dilakukan penyeimbangan antara pasokan dan permintaan yang efisien, sehingga grid perlu menjadi lebih cerdas (smart grid). Fungsi jaringan saat ini adalah satu arah (*top-down*) dimana listrik terpusat, pemasok dikendalikan dan dimasukkan ke dalam grid yang didasarkan pada prediksi konsumsi dan kemudian disesuaikan dengan margin sesuai permintaan energi puncak. Sedangkan pada sistem Smart grid akan bersifat/berfungsi dua arah (*bidirectional*): energi listrik akan mengalir kedalam dan keluar rumah atau kantor. Permintaan dan penawaran akan berinteraksi secara cerdas dan efisien, jaringan interoperable tidak terpusat. Smart grid akan mengintegrasikan energi secara efisien bergantian dari semua pembangkit baik pembangkit listrik tidak terbarukan maupun pembangkit listrik terbarukan (terpusat terdesentralisasi). Jadi jaringan yang lebih cerdas (smart grid) menerapkan teknologi/ pengetahuan, alat dan teknik yang tersedia sekarang, sehingga teknologi mampu membuat jaringan bekerja jauh lebih efisien antara lain:

- Memastikan kehandalan untuk tingkatan belum pernah mungkin.
- Menjaga keterjangkauan-nya.
- Memperkuat daya saing global.
- Sepenuhnya menampung sumber energi terbarukan dan konvensional.
- Berpotensi mengurangi jejak karbon.
- Memperkenalkan kemajuan dan efisiensi yang belum pernah terbayangkan.

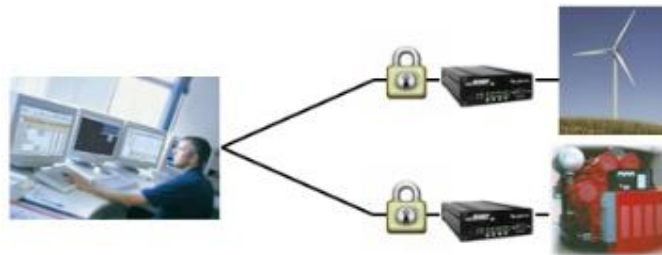
Dengan menerapkan solusi manajemen energi terpadu pada industri, bangunan komersial atau perumahan saat ini, kita bisa menghemat hingga 30% dari konsumsi energi final dunia. Penyediaan solusi dengan smart grid memungkinkan untuk penggunaan manajemen energi dan efisiensi energi, manajemen pada sisi permintaan, distribusi yang fleksibel, integrasi energi terbarukan dan kebutuhan permintaan. Dan karena smart grid merupakan suatu perubahan besar untuk jaringan listrik, maka akan tercipta lingkungan bisnis yang baru. Selain penyedia teknologi tradisional, produsen energi dan pemasok, sistem dan operator jaringan, serta pemerintah dan regulator, smart grid juga mempertemukan pengguna akhir yang aktif, manajer fasilitas, produsen energi terbarukan skala kecil dan besar, pedagang energi, perusahaan IT integrator, penyedia efisiensi energi, pemasok manajemen data dan lain-lain.

Tabel 2.1 Jaringan saat ini dengan jaringan masa depan.

Karakteristi	Jaringan Saat Ini	Smart Grid
Memungkinkan partisipasi aktif oleh konsumen	Konsumen seragam dan non-partisipatif dengan sistem tenaga listrik	Konsumen diinformasikan, terlibat dan aktif – respon permintaan dan sumber daya energi didistribusika
Mengakomodasi semua pembangkit dan opsi penyimpanan	Didominasi oleh pusat pembangkit – banyak kendala ada untuk interkoneksi sumber energi terdistribusi	Banyak sumber daya energi didistribusikan dengan plug-and-play yang fokus pada kenyamanan energi terbarukan
Memungkinkan produk baru, layanan dan pasar	Pasar grosir yang terbatas, tidak terintegrasi dengan baik – kesempatan terbatas bagi konsumen	Matang, pasar grosir yang terintegrasi dengan baik, pertumbuhan pasar listrik baru bagi konsumen
Menyediakan kualitas daya untuk ekonomi digital	Fokus pada gangguan – respon lambat untuk masalah kualitas daya	Kualitas daya merupakan prioritas dengan berbagai pilihan kualitas/ harga - resolution cepat terhadap masalah
Mengantisipasi dan merespon terhadap gangguan sistem (memperbaiki diri)	Merespon untuk mencegah kerusakan lebih lanjut – fokus pada melindungi aset menyusul kesalahan	Mendeteksi secara otomatis dan merespon masalah – fokus pada pencegahan, meminimalkan dampak kepada konsumen
Mengoptimalkan aset dan beroperasi secara efisien	Sedikit integrasi dari data operasional dengan manajemen aset – proses silo bisnis	
	Data akuisisi sangat luas untuk parameter jaringan – fokus pada pencegahan, meminimalkan dampak kepada konsumen	
Beroperasi secara ulet terhadap serangan dan bencana alam	Rentan terhadap tindakan berbahaya dari teror dan bencana alam	Tangguh terhadap serangan dan bencana alam dengan kemampuan pemulihan yang cepat

Sistem smart grid meringankan masalah banyak jaringan listrik saat ini. Pertama, mengurangi jumlah daya pembangkit yang diperlukan, karena utilitas listrik tahu persis berapa banyak listrik yang dibutuhkan pada waktu tertentu. Tidak hanya akan menghemat uang bagi konsumen, juga mengurangi jumlah emisi udara berbahaya dari pembangkit listrik konvensional. Untuk mencapai hal ini, smart grid membutuhkan aliran dua arah komunikasi antara meter di mana energi mengalir, pusat kendali di sebuah gardu untuk mengarahkan aliran listrik ke tempat yang diperlukan, dan pembangkit listrik menyediakan listrik. Kedua, smart grid dapat mengintegrasikan sumber energi terbarukan yang dibutuhkan jaringan dengan berkomunikasi beberapa pembangkit sumber daya energi terbarukan

Smart grid juga akan mengurangi beban selama jam puncak konsumsi energi yaitu jam dimana perusahaan utilitas menghasilkan/menjual energi yang paling mahal. Penggunaan smart meter memungkinkan konsumen untuk memantau konsumsi listrik per jam, sehingga konsumen akan menjadi lebih sadar akan energi yang mereka gunakan, dan mendorong mereka untuk menghemat energi pada waktu tertentu dan menjalankan peralatan di malam hari. Smart grid, dalam teori, dapat mengurangi beban puncak dengan mendorong konsumen untuk menggunakan lebih sedikit energi pada saat jam sibuk, meratakan puncak, dan menciptakan produksi bahkan energi untuk pembangkit listrik dan mengurangi biaya listrik. Smart grid dapat memecahkan banyak masalah, tetapi saat ini masih mahal untuk diimplementasikan. Perusahaan utilitas tidak hanya menginstal sistem, tetapi juga perlu melatih personil mereka sendiri atau menyewa pihak ketiga untuk menjaga dan mengelola sistem ini. Selain itu, teknologi smart grid yang berkembang pesat dan bisa menjadi lebih hemat biaya menyebabkan banyak perusahaan belum mau berinvestasi sampai teknologi diuji secara ekstensif. Sebagai contoh pengembangan smart grid di AS mungkin perlu biaya sekitar \$ 1 triliun, tetapi masih belum jelas, siapa yang akan membayar dan apakah penghematan energi dan ekonomi pada akhirnya akan terjadi. Sebagian besar konsumen industri yang paling khawatir tentang biaya smart grid. Jika sistem smart grid dibangun akan mencakup rencana harga, kenaikan biaya listrik, terutama pada saat jam sibuk. Oleh karena itu agar penerapan smart grid menjadi sukses, konsumen harus diyakinkan bahwa kelak keuntungan bersih lebih besar daripada biaya dan mereka harus mengetahui serta memahami manfaat untuk konsumen.

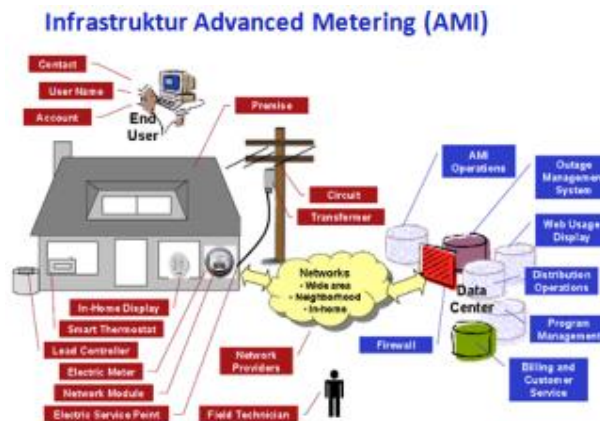


Gambar 2.2 Koordinasi diantara ISO (*Independent System Operators*).

Area teknologi smart grid pada rentang keseluruhan jaringan cukup banyak, mulai dari pembangkitan, transmisi dan distribusi sampai bermacam-macam tipe pelanggan listrik. Sejumlah teknologi secara aktif dimanfaatkan dan dianggap mapan untuk pengembangan dan penerapannya. Sistem kelistrikan yang telah dioptimasi akan disebarakan pada seluruh area teknologi. Akan tetapi tidak seluruh teknologi perlu dipasang untuk meningkatkan kecerdasan jaringan. Pengintegrasian sumber energi terbarukan dan energi terdistribusi (*distributed energy resources*), meliputi skala besar pada tingkat transmisi, menengah pada tingkat distribusi dan

skala kecil pada komersial atau bangunan perumahan, dapat menjadi tantangan untuk pengiriman dan pengendalian dari sumber daya ini dan untuk pengoperasian sistem kelistrikan. Sistem penyimpanan energi, baik berbasis listrik dan untuk panas (thermal), dapat meringankan permasalahan seperti penggantian produksi dan pengiriman energi. Smart grid dapat membantu melalui otomatisasi kontrol dari pembangkitan dan permintaan untuk menjamin keseimbangan pasokan dan permintaan.

Penginderaan distribusi dan sub-stasiun dan otomatisasi dapat mengurangi waktu pemadaman dan perbaikan, menjaga tingkat tegangan dan meningkatkan pengelolaan asset. Otomatisasi distribusi maju (*advanced*) mengolah informasi real-time dari sensor dan meter untuk lokasi salah (*fault*), otomatis rekonfigurasi dari pengumpan (*feeder*), tegangan dan optimasi daya reaktif, atau untuk mengontrol pembangkit terdistribusi (*distributed generation*). Sistem *advanced metering* yang terdiri dari *state-of-the-art elektronik/ digital hardware* dan software, yang menggabungkan interval pengukuran data dengan komunikasi jarak jauh terus tersedia. Sistem ini memungkinkan pengukuran secara rinci, informasi berdasarkan waktu dan pengumpulan dan pengiriman informasi kepada berbagai pihak. AMI biasanya mengacu pada sistem pengukuran keseluruhan dan pengumpulan yang mencakup meter di lokasi pelanggan, jaringan komunikasi antara pelanggan dan penyedia layanan, seperti gas, listrik, atau utilitas air, dan penerimaan data dan sistem manajemen yang membuat informasi tersedia bagi penyedia layanan. Meter ini memiliki kemampuan untuk mengirimkan data yang dikumpulkan melalui jaringan yang tersedia seperti *Broadband over Power Line (BPL)*, *Power Line Communications (PLC)*, jaringan Frekuensi Radio Tetap (RF), dan jaringan publik (misalnya, kabel, seluler, paging).



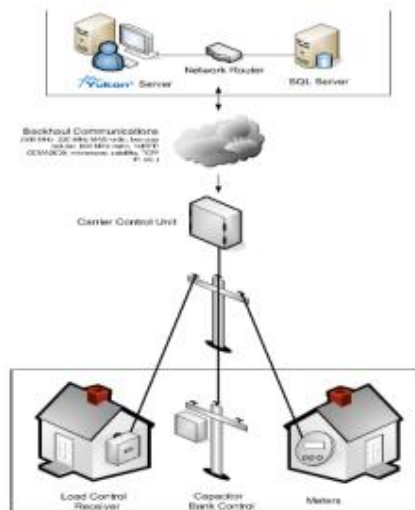
Gambar 2.3 Infrastruktur dari Advanced Metering (AMI).

Teknologi AMI menyediakan kemampuan bagi utilitas untuk mengurangi biaya operasi sistem distribusinya dengan mengotomatisasi berbagai fungsi yang saat ini dilaksanakan secara

manual, termasuk membaca meter pelanggan dan menghidupkan dan mematikan daya pada meter pelanggan. Utilitas juga dapat menggunakan AMI untuk membantu pelanggan mengurangi penggunaan listrik mereka bila dalam sistem harga listrik yang mahal (*peak hour*).

A. Sistem pada sisi pelanggan

Sistem pada sisi pelanggan, yang digunakan untuk membantu mengelola konsumsi listrik di industri, tingkat pelayanan dan perumahan, termasuk sistem energi manajemen, perangkat penyimpanan energi, peralatan yang smart dan pembangkit terdistribusi. Peningkatan efisiensi energi dan pengurangan permintaan beban puncak dapat dipercepat dan dilakukan dari rumah dengan display/energy dashboard . Respon permintaan meliputi respon pelanggan pengguna manual dan otomatis, peralatan harga-responsif dan termostat yang terhubung ke suatu sistem manajemen energi atau dikendalikan dengan sinyal dari operator atau sistem utilitas.



Gambar 2.4 Partisipasi Pelanggan (AMI, Komunikasi dan Software).

Kebutuhan akan data yang spesifik mengenai jaringan distribusi untuk beberapa wilayah sangat diperlukan didalam mengantisipasi tumbuhnya teknologi maju yang merupakan suatu produk smart grid. Selain itu elemen teknologi smart grid yang mulai merambah dari Negara Maju ke Indonesia perlu dilakukan kajian yang komprehensif dari segi teknologi maupun fungsi ekonomisnya.

B. Keuntungan Smart Grid

Smart grid dapat memecahkan banyak masalah, tetapi sangat mahal untuk diimplementasikan. Perusahaan utilitas tidak hanya menginstal sistem, tetapi juga perlu melatih personil mereka sendiri atau menyewa pihak ketiga untuk menjaga dan mengelola sistem ini. Dengan ini, ada risiko keuangan yang cukup besar. Sedangkan payback untuk utilitas yang

diharapkan karena biaya pemeliharaan diturunkan, dan pengembalian kepada konsumen diharapkan karena penurunan penggunaan listrik, tabungan yang tidak dijamin (Energi Industri Forum Kemitraan, 2010; Bossart, 2009). Harga listrik benar-benar bisa meningkat dengan pemasangan smart grid terutama jika instalasi tidak dibayar atau disubsidi oleh hibah pemerintah.

Selain itu, teknologi smart grid yang berkembang pesat dan bisa menjadi lebih hemat biaya menyebabkan banyak perusahaan belum mau berinvestasi sampai teknologi diuji secara ekstensif. Sebagai contoh pengembangan smart grid di AS mungkin perlu biaya sekitar \$1 triliun, tetapi masih belum jelas, siapa yang akan membayar dan begitu juga Inggris membutuhkan biaya investasi sebesar \$2,56 Miliar untuk memanfaatkan smart grid. apakah penghematan energi dan ekonomi pada akhirnya akan terjadi. Sebagian besar konsumen industri yang paling khawatir tentang biaya smart grid. Jika sistem smart grid diinstal yang mencakup rencana harga, biaya listrik akan naik, terutama saat jam sibuk. Oleh karena itu agar penerapan smart grid menjadi sukses, konsumen harus diyakinkan bahwa kelak keuntungan bersih lebih besar daripada biaya dan mereka harus mengetahui manfaat bagi konsumen. Pengembangan smart grid merupakan salah satu kegiatan dalam program Desain Teknologi Operasi Tenaga Listrik Untuk Mengontrol Power Quality. Pengembangan smart grid dilakukan dalam bentuk studi road map dan standarisasi smart grid, dan studi kelayakan terhadap implementasi teknologi smart grid pada perkotaan dengan mengambil 3 lokasi kajian di Jakarta. Kajian dilakukan dengan terlebih dahulu melakukan survei tentang road map dan standarisasi yang telah dikeluarkan oleh institusi yang terlebih dahulu mengkajinya seperti IEC atau IEEE. Pembuatan Studi kelayakan akan dibahas dalam bentuk *roundtable meeting* atau FGD untuk memperoleh masukan dari semua pemangku kepentingan baik dari pihak pemerintah, akademisi, dan praktisi di sektor pembangkitan dan sistem tenaga listrik serta komunikasi.

Respon permintaan (*Demand Response-DR*) merupakan salah satu pendekatan kunci yang dimungkinkan oleh smart grid. Perubahan di sektor pembangkit akan mencakup penyebaran peningkatan dari variabel pembangkitan ke tingkat lebih dari 20% dari keseluruhan permintaan di berbagai daerah. Peningkatan konsumsi listrik baik dari yang ada maupun beban baru akan terus menempatkan tekanan pada sistem kelistrikan dan meningkatkan permintaan beban puncak. Pengelolaan beban, dalam bentuk kontrol beban langsung, pemotongan beban puncak, pergeseran puncak dan berbagai program manajemen beban, telah dan sedang dilaksanakan. Dengan respon permintaan, operator sistem akan dapat memantau dan mengelola permintaan dan jaringan listrik sehingga akan bergerak dari beban-berikut untuk strategi

loadshaping di mana sumber daya pada sisi permintaan (*demand side*) dikelola untuk memenuhi ketersediaan pembangkitan dan kemampuan jaringan listrik untuk pengiriman pada waktu tertentu (Ipakchi dan Albuyeh, 2009). Pemotongan respon permintaan di beberapa bidang teknologi yang disorot sebelumnya, termasuk sistem customer-side, infrastruktur advanced metering, manajemen distribusi dan otomatisasi, dan kadangkadang dimulai dari pembangkitan sampai ke pelanggan. Selain itu, ada tiga kelompok pelanggan utama dengan profil DR yang berbeda yaitu: industri, jasa/pelayanan dan perumahan. Pelanggan industri yang relatif sedikit dengan kebutuhan listrik yang besar bisa memiliki dampak yang signifikan pada sistem kelistrikan; teknologi yang mapan dan pendekatan pasar tersedia bagi aplikasi di sektor pengguna akhir. Sejumlah besar konsumen perumahan akan diperlukan untuk mendapatkan efek yang sama. Respon permintaan secara signifikan dapat mengurangi permintaan puncak dan dalam jangka panjang menyediakan fleksibilitas yang dibutuhkan, baik dari segi volumetrik dan kecepatan respon, untuk mendukung teknologi pembangkitan variabel.

Tabel 2.2 Karakteristik dari smart grid.

Karakteristik	Deskripsi
Memungkinkan partisipasi pemakai	Para pemakai menolong untuk menyeimbangkan antara suplai dan demand, dan memastikan kehandalan dengan modifikasi cara mereka menggunakan dan membeli energi listrik. Modifikasi ini terjadi sebagai hasil dari para pelanggan yang mempunyai pilihan yang memotivasi pola pembelian dan kelakuan. Pilihan ini menyangkut pada teknologi baru, informasi baru tentang penggunaan listrik mereka, dan bentuk baru dari harga listrik dan insentif.
Mengakomodasi pilihan untuk semua pembangkitan dan storage	Smart Grid mengakomodasi tidak hanya pembangkit yang besar terpusat, tetapi juga pertumbuhan sumber-sumber energi terdistribusi pada sisi pelanggan. Integrasi dari sumber-sumber energi ini, termasuk energi terbarukan, small-scale combine heat and power, dan energy storage, akan meningkatkan secara cepat seluruh value chain, dari suplayer-marketers-pelanggan.

<p>pelayanan dan pasar</p>	<p>pelanggan untuk memilih pelayanan yang kompetitif. Sejumlah variabel jaringan independen harus secara jelas mengelola energi, kapasitas, lokasi, waktu, laju perubahan dan kualitas. Pasar dapat bermain sebagai pemeran utama dalam pengelolaan variable-variabel ini. Para pengatur, pemilik/operator dan pelanggan membutuhkan fleksibilitas untuk memodifikasi peraturan bisnis sesuai kondisi operasi dan pasar</p>
----------------------------	---

Dalam penerapan sistem smart grid diperlukan suatu standar, karena standar dapat menghindari terjadinya “re-inventing the wheel”, dapat belajar dari praktek-praktek terbaik industri, menetapkan persyaratan yang lebih mudah, mengurangi biaya integrasi, mencegah vendor tunggal "lock-in" dan Vendor berbagi pasar yang jauh lebih besar. Standar smart grid membutuhkan pengintegrasian bermacam-macam keahlian seperti:

- a. Penelitian pengukuran industri utilitas listrik.
- b. Teknologi jaringan maju.
- c. Bangunan dan infrastruktur kelistrikan
- d. Komputer dan keamanan jaringan
- e. Keahlian standar dokumentasi
- f. Pengalaman dalam pengujian dan sertifikasi

Pada tingkat internasional, standar teknis mendasari smart grid sedang dikembangkan oleh beberapa organisasi. Karena dalam pembuatan standar perlu bekerja sama untuk mendukung sistem secara keseluruhan, maka koordinasi diantara organisasi-organisasi ini sangat penting dilakukan.

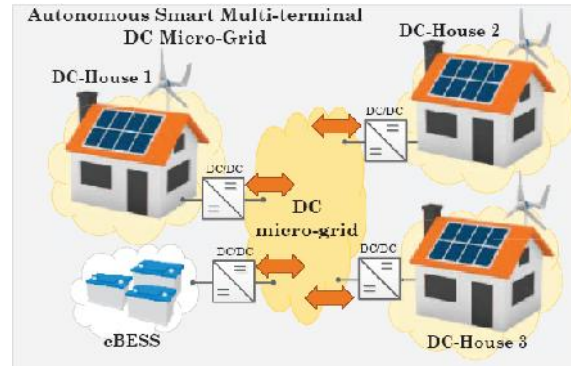
2.2 DC Mikro Grid

Jaringan DC mikro grid dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan daya listrik yang meningkat seiring dengan pengembangan sistem mikro grid. Beberapa keuntungan dari jaringan DC mikro grid adalah (Ali Maknouninejad, et al, 2014) :

- a. Efisiensi yang tinggi. Jaringan DC mikro grid dapat mengurangi tahap konversi dari konverter sehingga mempunyai efisiensi yang tinggi.
- b. Stabilitas yang lebih baik. Tidak dibutuhkan sinkronisasi yang menyebabkan osilasi seperti pada jaringan AC mikro grid.
- c. Kualitas daya yang baik. Jaringan DC mikro grid tidak mengirimkan daya reaktif sehingga kualitas daya lebih baik.

d. Keandalan yang tinggi. Jaringan DC mikro grid mempunyai komponen yang lebih sedikit, sehingga memiliki waktu yang lebih singkat bila sistem mengalami kegagalan hal ini menjadikan sistem mempunyai keandalan yang tinggi.

Sebuah rancangan simulasi multi terminal DC mikro grid (F. Gonzalez-Longatt, et al, 2016) dalam melayani beberapa beban rumah tinggal, dengan pengaturan secara tepat aliran daya dari sumber ke beban. Simulasi *quasi-dynamic* menggunakan *optimal power flow* (OPF) untuk meminimalkan rugi tegangan.



Gambar 2.5 Skema DC mikro grid.

2.3 Kontrol PID

Lebih dari setengah abad, PID telah menjadi tulang punggung keberhasilan pengontrolan beragam variabel proses industri. Kontrol PID dapat dijumpai hampir pada setiap industri yang bergerak dalam bidang proses. Menurut sebuah survey dinyatakan bahwa 97% industri yang bergerak dalam bidang tersebut menggunakan PID dalam pengontrolannya. Kesederhanaan struktur kontrol: Selain hanya ada tiga parameter utama yang perlu diatur atau dilakukan usaha penalaan (tuning), pengaruh perubahan setiap parameter PID terhadap dinamika pengontrolan secara intuitif mudah dipahami oleh operator. Kontrol PID dalam banyak kasus telah terbukti menghasilkan unjukkerja relative memuaskan, baik digunakan sebagai sistem Regulator (sistem kontrol dengan Setpoint konstan dan beban cenderung berubah-ubah) maupun sebagai sistem Servo (sistem kontrol dengan *setpoint* yang berubah dan beban cenderung konstan). Pada awal penggunaannya, strategi kontrol PID untuk tujuan kontrol proses industri umumnya diimplementasikan dengan menggunakan rangkaian elektronika analog, bahkan banyak diantaranya direalisasikan dengan menggunakan komponen mekanis dan pneumatis murni. Seiring dengan perkembangan dunia digital (terutama *microprocessor*), dewasa ini PID dapat dijumpai dalam berbagai bentuk modul komersil, yaitu mulai dari sekedar modul PID untuk pengontrolan satu jenis variabel proses tertentu saja (*special purpose process controller*), sampai modul PID untuk tujuan pengontrolan beragam variabel proses (*general purpose*

process controller) atau lebih dikenal dengan nama populer DCS- *Distributed Control System*. Bahkan perkembangan terakhir, kontrol PID juga telah banyak ditanamkan pada sistem PLC - *Programmable Logic Controller*. Ditinjau dari aspek tuning parameter kontrolnya, pengetahuan struktur PID tersebut juga sangat penting, karena struktur PID yang berbeda akan memiliki metode tuning yang relative berbeda pula. Dengan mengetahui struktur PID dan bersama-sama pengetahuan model proses yang dikontrol, nilai parameter PID yang optimal pada dasarnya dapat dicari secara mudah berdasarkan metode-metode tuning yang telah dikembangkan sebelumnya oleh sejumlah peneliti dan praktisi bidang kontrol proses, baik secara empiris maupun berdasarkan metode-metode optimasi tertentu.

Struktur kontrol PID ideal dikenal juga dengan nama struktur PID Tipe A atau struktur PID Paralel atau struktur PID *non-interacting*. Struktur ini adalah struktur PID yang umum ditemukan pada sebagian besar buku-buku teks kontrol. Persamaan (2.1) dan (2.2) berikut memperlihatkan bentuk umum dari PID ideal.

$$CO(t) = K_P \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2.1)$$

Atau

$$CO(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.2)$$

dengan

CO(t) : output kontroler

e(t) : selisih antara SetPoint dengan nilai output proses (dengan menganggap proses yang dikontrol bersifat direct maka $e = SP - PV$)

K_P : gain proporsional

T_I : time integral

T_D : time derivative

K_I : gain integral (K_P/T_I)

K_D : gain derivative ($K_P T_D$)

Secara praktis struktur PID pada persamaan (2.1) dan persamaan (2.2) diatas berturut turut dikenal juga dengan istilah PID ideal bentuk *dependent* dan PID ideal bentuk *independent*. Kedua istilah tersebut mengacu pada *depedensi* (ketergantungan) setiap suku persamaan terhadap perubahan nilai gain Proporsioanl (K_P). Perhatikan dalam bentuk persamaan (2.1), perubahan nilai K_P tidak saja berpengaruh pada nilai penguatan proporsional, tetapi juga akan mempengaruhi keluaran suku integrator dan suku derivator (sehingga persamaan tersebut dinamakan bentuk dependent), sedangkan untuk struktur PID pada persamaan (2.2), perubahan

nilai K_P hanya akan mempengaruhi suku keluaran proporsional saja (keluaran output kontrol dari suku integrator dan derivator tidak terpengaruh, sehingga dengan demikian persamaan tersebut dinamakan bentuk *independent*). Dalam bentuk transformasi laplace persamaan (2.1) dan (2.2) sebagai berikut

$$CO(s) = K_P \left[1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right] e(s) \quad (2.3)$$

$$CO(s) = \left[K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \right] e(s) \quad (2.4)$$

Berhubung kontroler komersil (dalam hal ini *general purpose process controller*) merupakan sebuah modul yang dirancang untuk dapat mengontrol beragam variabel proses (tidak hanya satu jenis saja), satuan-satuan atau terminologi yang digunakan pada kontroler biasanya akan bebas dari satuan fisik variabel yang dikontrol. Berikut ini adalah satuan yang umum digunakan pada kontroler PID komersil:

- Satuan K_P : %/% (atau tanpa satuan)
- Satuan T_I : menit atau detik (dalam beberapa modul ditulis menit/siklus atau detik/siklus)
- Satuan T_D : menit atau detik
- Satuan K_I : 1/menit atau 1/detik (dalam beberapa modul ditulis siklus/menit atau siklus/detik)
- Satuan K_D : menit atau detik

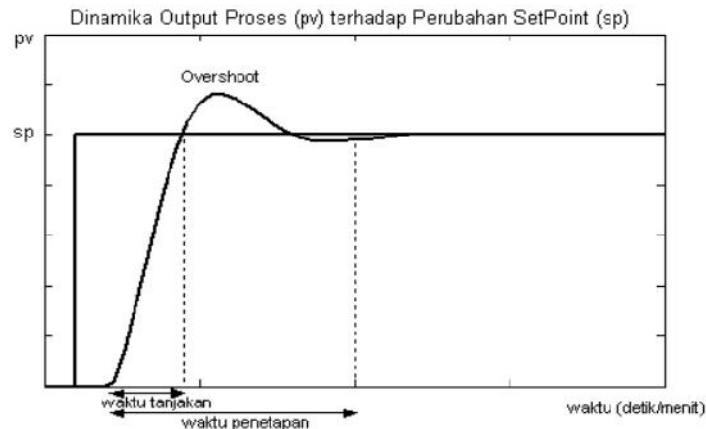
Khusus untuk gain Proporsional, beberapa vendor PID komersil seperti Yokogawa dalam produknya menggunakan istilah *Proporsional Band* (PB) yang dirumuskan oleh persamaan (2.5) berikut:

$$PB(\%) = \frac{100\%}{K_P} \quad (2.5)$$

Dalam hal ini, semakin besar nilai PB maka gain Proporsional yang digunakan akan semakin kecil. Walaupun secara teoritis nilai-nilai parameter kontrol PID besarnya dapat diatur secara *independen*, tetapi secara praktis (terutama terkait dengan model proses yang dikontrol), pengaturan atau tuning yang dilakukan terhadap salah satu parameter kontrol, umumnya memerlukan pengaturan ulang pada parameter yang lain. Sebagai contoh, untuk sebuah model proses tertentu, perubahan nilai K_P (diperbesar atau diperkecil) umumnya akan memerlukan setting ulang pada besaran parameter kontrol K_I (atau T_I) dan K_D (atau T_D). Tabel 2.1 dibawah memperlihatkan pengaruh perubahan setiap parameter PID terhadap unjuk kerja pengontrolan proses secara umum.

Tabel 2.3. Pengaruh tuning salah satu parameter PID terhadap unjuk kerja proses.

Parameter	Waktu Lonjakan	Overshoot	Waktu Penetapan	Stabilitas
KP (diperbesar)	Berkurang	Bertambah	Sedikit bertambah	Menurun
KI (diperbesar) TI (diperkecil)	Sedikit berkurang	Bertambah	Bertambah	Menurun
KD (diperbesar) TD (diperbesar)	Sedikit berkurang	Berkurang	Berkurang	Bertambah

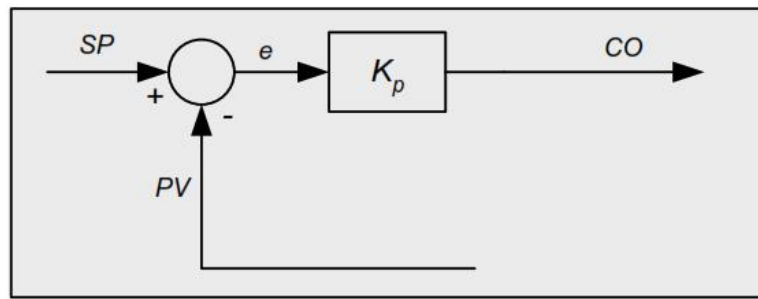


Gambar 2.6 Respon proses sebagai akibat perubahan *SetPoint*.

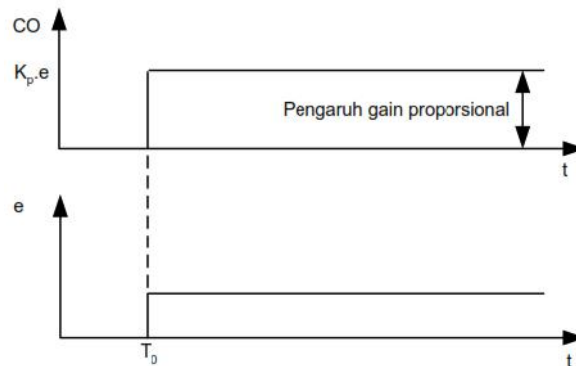
Dalam bentuknya yang ideal, parameter unjuk kerja yang terlihat pada tabel 2.3 diatas dapat dijelaskan sebagai berikut : Waktu tanjakan adalah waktu yang diperlukan respon (deviasi output variable proses) untuk naik dari 0 sampai 100% harga akhirnya, Overshoot adalah lonjakan maksimum yang dialami oleh respon proses, Waktu penetapan adalah waktu yang diperlukan respon untuk mencapai dan menetap disekitar 95%-98% dari harga akhirnya. Terkait dengan metode tuning parameter kontrol PID, salah satu hal yang perlu diperhatikan adalah problem yang dihadapi pada pengontrolan proses tersebut. Dalam hal ini, perlu diketahui terlebih dulu apakah proses yang dikontrol selama operasinya sering mengalami perubahan titik operasi (*problem servo*) atau apakah proses tersebut sering mengalami perubahan beban (*problem Regulator*). Tergantung nilai setting ke-tiga parameter PID, dibawah ini empat jenis kontrol yang dapat digunakan dalam pengontrolan variabel proses, yaitu :

- Kontrol Proporsional (Kontrol P)
- Kontrol Proporsional Integral (Kontrol PI)
- Kontrol Proporsional Derivative (kontrol PD)
- Kontrol Proporsional Integral Derivative (Kontrol PID)

A. Kontrol Proporsional (P)



Gambar 2.7 Blok kontrol Proporsional.



Gambar 2.8 Relasi input-output kontrol Proporsional

Berdasarkan Persamaan (2.1), kontrol Proporsional secara praktis dapat diperoleh dengan cara men-*setting* nilai T_I dan T_D berturut – turut sama dengan nilai tak hingga dan nol (atau $K_I = K_D = 0$), sehingga dengan demikian, hubungan antara output kontrol- CO dengan *error* penggerak pada aksi kontrol Proporsional dapat ditulis :

$$CO(t) = K_P e(t) \quad (2.6)$$

Dari persamaan (2.6), terlihat bahwa besar output kontrol (CO) akan selalu sebanding dengan besar sinyal *error* penggerak. Gambar 2.7 dan 2.8 berturut-turut memperlihatkan blok diagram kontrol Proporsional dan relasi input-output -nya. Khusus untuk pengontrolan proses FOPDT, aksi kontrol Proporsional dalam menanggapi perubahan *setpoint* dan/atau gangguan secara praktis akan selalu menunjukkan *offset (error steady)* pada output proses yang dikontrolnya. Besar-kecilnya *error steady* sangat tergantung pada nilai penguatan (gain) yang dipilih. Semakin besar K_P yang digunakan, maka *error steady* akan semakin mengecil. Pembesaran nilai gain tersebut selain akan memperkecil *error steady*, juga akan mempercepat respon output proses (memperkecil waktu penetapan proses). Tetapi walaupun demikian, pembesaran nilai K_P secara praktis tidak dapat dilakukan secara terus menerus karena pada penguatan tertentu, output proses akan menjadi relative kurang bahkan tidak stabil. Tabel 2.4 dan tabel 2.5 berikut

berturut-turut memperlihatkan metode tuning yang dapat digunakan untuk mendapatkan besar gain proporsional optimal pada pengontrolan proses FOPDT dan IPDT.

Tabel 2.4 Metode tuning kontrol Proporsional untuk model proses FOPDT

Metode	K _P	Keterangan
Ziegler and Nichols	T/ L.K	0.1 < L/T < 1

Tabel 2.5 Metode tuning kontrol Proporsional untuk model proses IPDT

Metode	K _P	Keterangan
Ziegler and Nichols	0.78 / L.K*	Metode ultimate gain

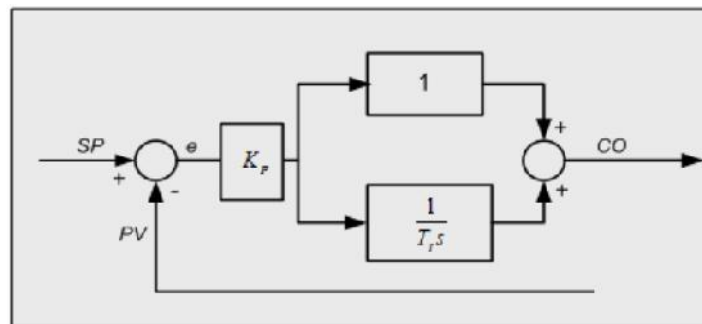
B. Kontrol Proporsional Integral (PI)

Dalam aplikasinya di lapangan, Kontrol Proporsional Integral biasanya digunakan untuk pengontrolan proses yang memiliki dinamika relative cepat (yaitu seperti aliran, tekanan dan level). Berdasarkan sebuah survey dinyatakan bahwa hampir 80% kontroler PID yang terinstal di industri menggunakan kontrol PI dalam operasinya. Untuk sebuah modul kontrol PID, Kontrol PI dapat diperoleh dengan cara men-*setting* nilai gain (waktu) derivative sama dengan nol, atau secara matematis dapat ditulis:

$$CO(t) = K_P \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt \right] \quad (2.7)$$

Dalam kawasan Laplace, persamaan 2.7 tersebut dapat direpresentasikan:

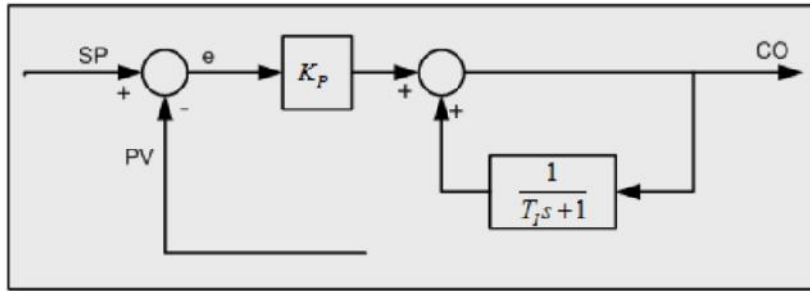
$$CO(s) = K_P \left[1 + \frac{1}{T_I s} \right] e(s) \quad (2.8)$$



Gambar 2.9 Diagram blok kontrol Proporsional Integral.

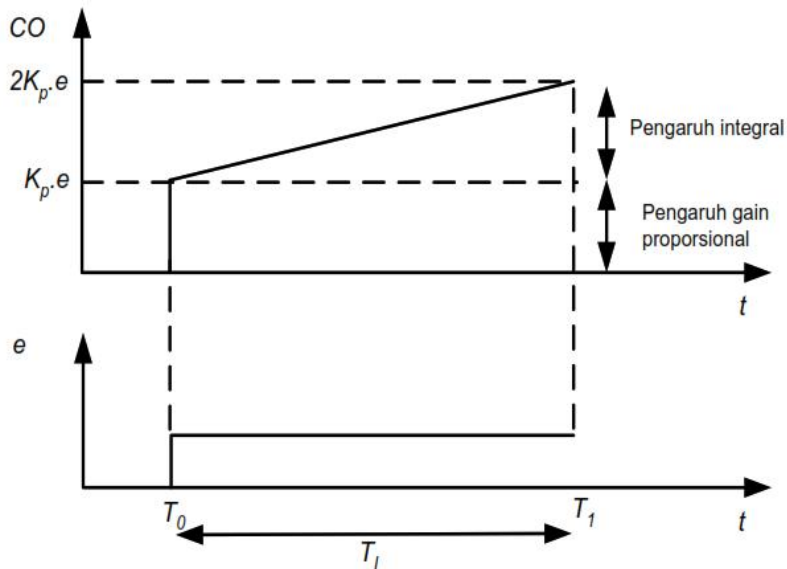
Penambahan blok integrator di dalam kontroler pada dasarnya dimaksudkan untuk menggantikan sinyal bias manual (atau manual reset) yang berfungsi menghilangkan error steady. Selama masih terdapat selisih atau *error* antara *setpoint* dengan variabel proses maka

output kontroler PI akan selalu membesar atau mengecil. Selain gambar 2.9 kontrol PI dapat juga direalisasikan dalam bentuk diagram blok seperti nampak pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Diagram blok alternative kontrol PI.

Salah satu kelebihan struktur PI alternatif pada gambar 2.10 tersebut adalah dapat disisipkannya model saturasi dalam kontroler yang berfungsi sebagai antiwindup.



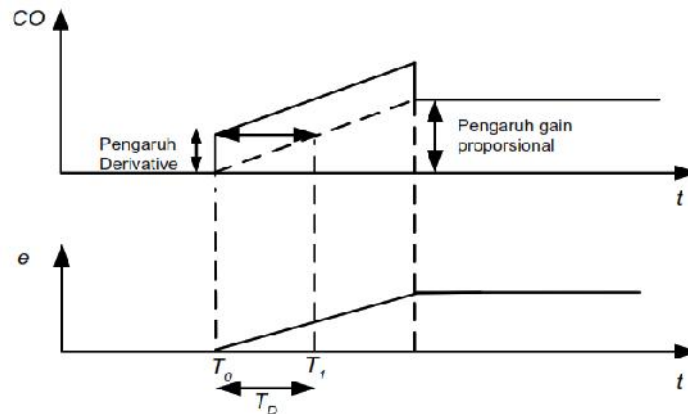
Gambar 2.11 Aksi kontrol Proporsional Integral (PI).

Untuk nilai K_P dan T_I yang dipilih, kontribusi suku integral akan sama nilainya dengan pengaruh kontrol proporsional setelah selang waktu T_I . Seperti halnya dengan gain Proporsional, pemilihan parameter waktu (atau gain) integral pada kontrol PI secara praktis akan sangat mempengaruhi dinamika keluaran variabel output proses yang sedang dikontrol. Jika kedua parameter kontrol (K_P dan T_I) ini dipilih secara tepat, maka respon yang didapat akan optimal (sesuai harapan). Pembesaran atau pengecilan nilai K_P dan T_I dari nilai optimalnya dapat menyebabkan respon menjadi terlalu lambat atau terlalu berosilasi.

C. Mode Kontrol Proporsional Derivative (PD)

Dalam modul kontrol PID, Kontrol PD diperoleh dengan cara men-setting penguatan integral pada struktur PID sama dengan nol. Sifat utama dari aksi kontrol PD adalah

mendahului sinyal masukan (*error*). Dalam hal ini waktu derivative (T_D) adalah waktu yang diperlukan sehingga keluaran Kontrol Proporsional besarnya sama dengan keluaran dari Kontrol Derivative. Secara umum dapat dikatakan bahwa fungsi dari kontrol derivative adalah memperbaiki stabilitas dan mempercepat respon output proses. Tetapi walaupun demikian penggunaan kontrol PD untuk pengontrolan proses (dalam hal ini model FOPDT) secara praktis jarang digunakan karena penggunaan mode kontrol PD ini akan selalu menghasilkan error steady (kecuali untuk proses-proses yang secara matematis memiliki integrator internal, yaitu seperti model IPDT)



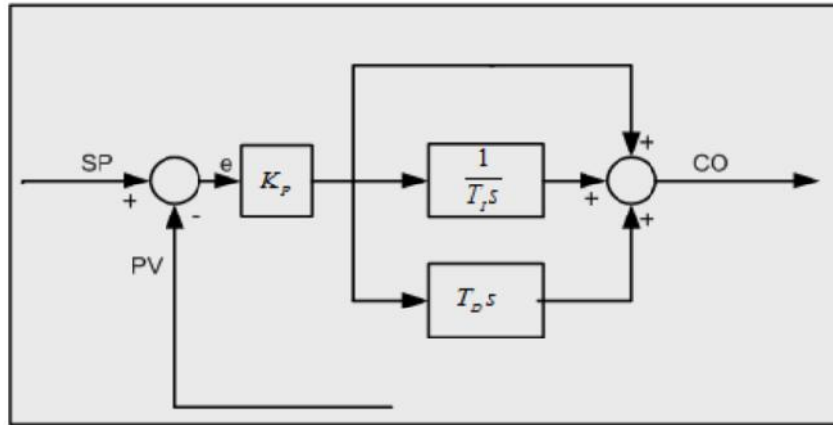
Gambar 2.12 Aksi kontrol Proporsional Derivative.

D. Mode Kontrol Proporsional Integral Derivative (PID)

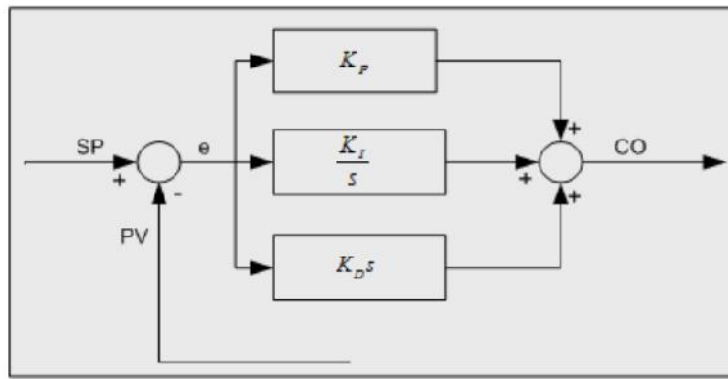
Aksi kontrol PID pada dasarnya bertujuan untuk menggabungkan kelebihan komponen-komponen dasar kontrol PID:

- Kontrol Proporsional : berfungsi untuk mempercepat respon
- Kontrol Integral : berfungsi untuk menghilangkan error steady
- Kontrol Derivative : berfungsi untuk memperbaiki sekaligus mempercepat respon transien.

Gambar 2.13 dan 2.14 berikut berturut-turut memperlihatkan blok diagram kontrol PID ideal bentuk dependent dan bentuk independent (lihat algoritmanya dalam persamaan 2.3 dan 2.4):

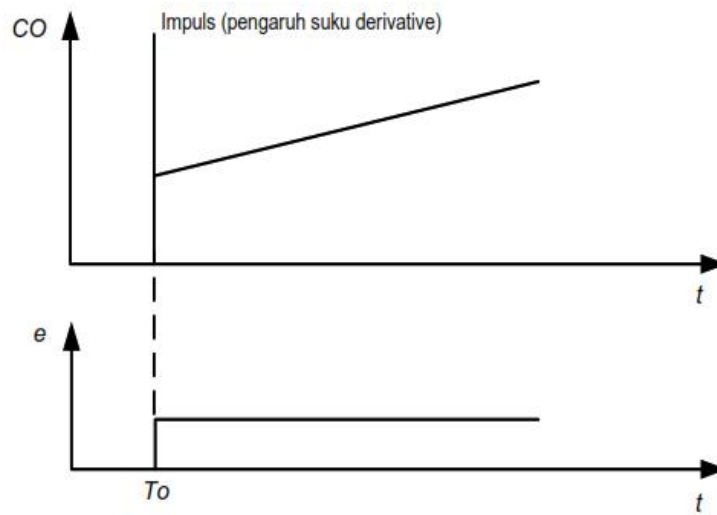


Gambar 2.13 Diagram blok kontrol PID ideal bentuk *dependent*.



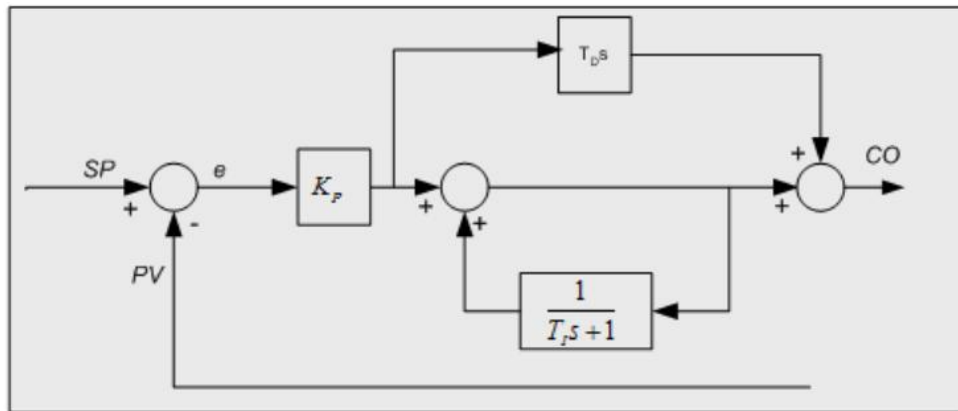
Gambar 2.14 Diagram blok kontrol PID ideal bentuk *independent*.

Seperti terlihat pada gambar 2.13 dan 2.14 diatas, semua komponen pada kontroler PID jenis ideal ini bekerja pada masukan error penggerak. Hubungan antara masukan error penggerak dengan output kontroler PID tersebut dapat dilihat pada gambar 2.15.



Gambar 2.15 Aksi kontrol PID.

Seperti halnya pemilihan metode tuning kontrol PI, Pemilihan metode tuning kontrol PID juga sangat ditentukan oleh problem kontrol yang dihadapi serta unjuk kerja yang diharapkan dari sistem umpan baliknya. Sebagai contoh, jika untuk proses tertentu tidak ditolerir adanya overshoot pada respon output proses, maka sebagai tuning awal sebaiknya digunakan metode yang memang dikhususkan untuk itu --lihat keterangan tabel (Tetapi walaupun demikian, respon output proses sebenarnya secara praktis mungkin tidak akan benar-benar seperti apa yang tertulis pada keterangan tabel tersebut, lihat konsepnya pada bagian Mode Kontrol Proporsional Integral). Kontrol PID ideal juga dapat direalisasikan dengan mengacu pada gambar 2.16.



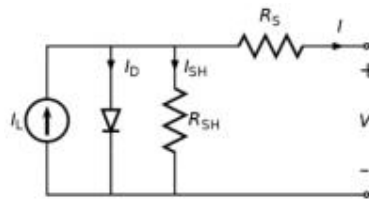
Gambar 2.16 Diagram blok alternatif kontrol PID.

2.4 MPPT (Maximum Power Point Tracking)

Sistem photovoltaic yang menggunakan energi surya menawarkan sumber energi yang ramah lingkungan. Kunci dasar solar cell adalah nilai efisiensi konversi energinya yang merupakan kemampuan converter-nya untuk mengekstraksi energi dan mendistribusikannya kepada beban. Peningkatan nilai efisiensi ini akan mempengaruhi daya yang dibangkitkan oleh sistem dimana daya akan naik. Hal ini mempunyai efek pada biaya yang harus dikeluarkan yang akan lebih murah untuk tiap kWh energi yang dihasilkan. Efisiensi sendiri dipengaruhi oleh tiga faktor: efisiensi solar panel (8% - 15%), efisiensi *inverter* (95% -98%) dan efisiensi *Maximum Power Point Tracking* ($\pm 98\%$) (L. Piegari and R. Rizzo, 2010). Peningkatan efisiensi solar panel dan *inverter* tidak biasa dilakukan disebabkan ketergantungan terhadap teknologi yang tersedia dan memerlukan komponen dengan spesifikasi yang lebih tinggi yang akan menaikkan biaya instalasi. Sementara itu improvisasi efisiensi melalui *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) menggunakan algoritma pada kontrolnya lebih mudah dilakukan, tidak mahal serta dapat diaplikasikan pada generator solar cell yang sudah ada tanpa merubah sistem. Peningkatan nilai efisiensi ini merujuk pada kurva karakteristik arus-tegangan sel surya yang

tergantung pada nilai irradiasi dan temperatur yang diterimanya (Rupendra Kumar Pachauri, 2014). Setiap modul memiliki titik operasi optimalnya masing-masing yang dikenal dengan Maximum Power Point (MPP). Karakteristik *Maximum Power Point* ini akan berubah sesuai dengan sinar matahari dan temperatur (Sri Utami, 2017). Ketergantungan terhadap cuaca menjadikan *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) tidak mudah untuk menjaga titik operasi tetap dalam kondisi maksimal dengan mengacu pada kurva karakteristik tegangan-daya yang juga bervariasi. Untuk menyelesaikan permasalahan ini, beberapa algoritma MPPT diajukan sebagaimana yang telah direview oleh Jaiswal dan Mahor (P. Jaiswal and A.Mahor, 2014). Kesadaran untuk menggunakan sumber energi baru terbarukan menjadikan algoritma untuk MPPT ini menjadi sangat penting.

Model matematik dikembangkan untuk menirukan sel surya. Gambar 2.17 menunjukkan rangkaian persamaan sel surya, dimana I dan V adalah arus dan tegangan sel surya, kemudian, I_L adalah *cell's photocurrent*. R_{sh} dan R_s adalah tahanan shunt dan tahanan seri dari sel surya.



Gambar 2.17 Rangkaian ekivalen sel surya.

Persamaan dari rangkaian ekivalen sel surya pada gambar 2.17, dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$I = I_L - I_o \left(\exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{nkT} \right] - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.9)$$

Dimana :

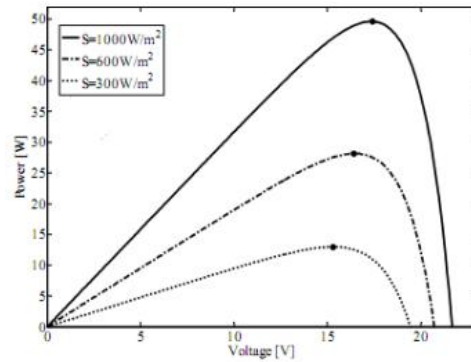
I_o = arus saturasi reverse (Ampere)

n = faktor ideal dioda (bernilai 1 untuk dioda ideal)

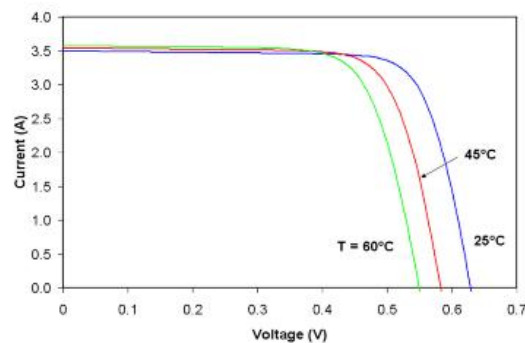
q = pengisian electron ($1.602 \cdot 10^{-19}$ C)

K = konstanta Boltzman ($1.3806 \cdot 10^{-23}$ J.K⁻¹)

T = temperature sel surya (°K)



Gambar 2.18 Karakteristik P-V untuk level radiasi yang berbeda. Tiap titik mewakili MPP dari masing-masing kurva.



Gambar 2.19 Karakteristik I-V pada temperatur permukaan sel surya yang berbeda.

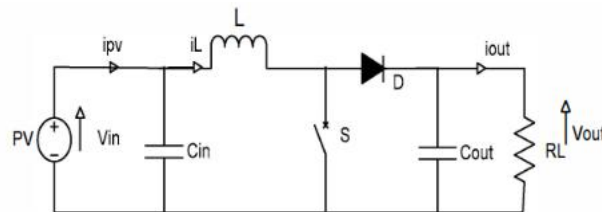
Kurva ini menunjukkan sangat jelas bahwa karakteristik keluaran sel surya adalah non-linier dan sangat dipengaruhi oleh radiasi sinar matahari, temperatur dan kondisi pembebanan (Rusminto Tjatur Widodo, 2017). Untuk mendekati kinerja dari panel surya, suatu modul matematis dikembangkan untuk menirukan karakteristik dari panel surya yang digunakan (selva, 2013).

Maximum Power Point Tracking (MPPT) merupakan sebuah metode untuk menentukan titik dimana daya maksimum dihasilkan oleh panel surya. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, salah satu keuntungan penggunaan MPPT adalah cepat terpenuhinya kondisi *equilibrium* photovoltaic untuk kondisi yang diperlukan oleh beban dan yang dapat dipenuhi panel surya. MPPT memerlukan dua komponen pendukung dalam pengoperasiannya: arus input (I) dan tegangan input (V). Dua komponen ini dikombinasikan untuk mendapatkan nilai daya P seperti dengan persamaan $P = V \times I$ (ZhangXiaoe, 2013). Dalam kondisi temperatur dan irradiansi berbeda, diperoleh nilai MPP yang berbeda. Metode yang tepat diperlukan untuk memperoleh nilai daya maksimum yang dihasilkan oleh panel surya (Arun Kumar Verma, 2012). *Maximum Power Point Tracking* atau yang biasa disingkat MPPT, adalah sebuah sistem elektronis yang mengoperasikan modul photovoltaic (PV) atau modul sel surya agar dapat

menghasilkan daya maksimal yang bisa diproduksi oleh modul sel surya (Chia Seet Chin, 2012). MPPT bukan merupakan sistem *tracking* mekanis yang secara fisik menggerakkan modul agar mengarah langsung ke matahari. MPPT merupakan sistem elektronis yang secara keseluruhan mengubah-ubah titik operasi elektronis modul sel surya sehingga dapat mengirim daya maksimal yang tersedia. Dari daya tambahan yang terkumpul yang berasal dari modul sel surya, sehingga arus pengisian baterai dapat ditingkatkan. MPPT dapat juga dihubungkan dengan sistem *tracking* mekanis, tetapi kedua sistem ini benar-benar sangat berbeda (Hamad, 2013).

2.5 Boost Converter

DC-DC *converter* merupakan *device elektronik* yang merubah tegangan DC ke tegangan DC lain yang berbeda level dan biasanya mengeluarkan output teregulasi. Model switch DC-DC *converter* beroperasi dengan menyimpan energi input sementara kemudian melepaskannya dalam bentuk tegangan atau arus di dalam level yang tidak sama. Konverter ini dapat dibandingkan dengan transformer karena keduanya memiliki karakteristik yang mirip dalam merubah energi input dan menjadikannya berbeda dalam level impedansinya. Variasi beban dapat menyebabkan perubahan titik operasi sel surya (karakteristik arus tegangannya) sehingga dapat menghasilkan nilai keluaran maksimum (A.I.Dounis, 2013). Rangkaian *boost converter* digunakan untuk menaikkan level tegangan dc ke level tegangan dc tertentu dengan mengontrol *duty cycle* pada *switch*-nya. Panel surya dihubungkan dengan rangkaian *boost converter* agar tegangan panel surya dapat dikontrol. Pada matlab simulink komponen-komponen utama penyusun *boost converter* ialah seperti induktor, kapasitor, dioda, mosfet dan resistor. Dalam merancang sebuah *boost converter* dibutuhkan parameter-parameter untuk menentukan besar hambatan, induktansi dan kapasitor yang akan digunakan. Parameter tersebut disesuaikan dengan spesifikasi dari modul panel surya (Rajib Baran Roy, 2014).

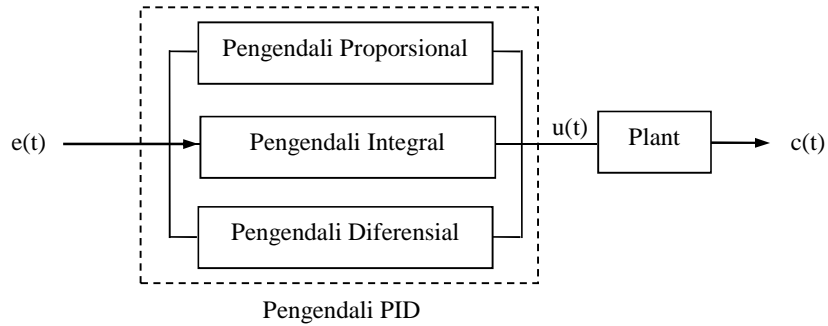


Gambar 2.20 Rangkaian *boost converter*.

2.16 Kontrol Fuzzy-PID

Pengendali PID sebenarnya merupakan gabungan dari tiga macam pengendali, dengan tujuan untuk memperbaiki kinerja pengendalian. Dengan cara ini maka kelemahan masing-masing pengendali dapat ditutupi. Masing-masing pengendali mempunyai karakteristik yang

berbeda. Pengendali P dapat mengurangi rise time, tetapi tidak mampu mengurangi steady-state error. Sebaliknya pengendali I mampu mengurangi steady-state error, tetapi respon yang dihasilkan tidak bagus. Pengendali D mampu mengurangi overshoot dan mampu meningkatkan transient response (R.K.Chauhan, 2017).



Gambar 2.21 Pengendali PID.

Persamaan pengendali PID kontinu dapat dinyatakan dalam persamaan 2.10.

$$u(t) = K_p(e(t)) + K_i \left(\frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \right) + K_d \left(T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.10)$$

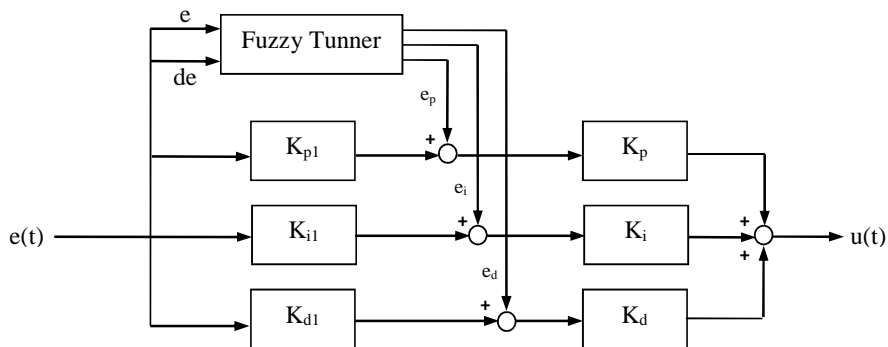
$$\ddagger_i = \frac{2\zeta}{\ddagger_n \omega_n}$$

$$\ddagger_d = \frac{1}{\ddagger_i \omega_n^2}$$

$$K_p = \frac{\ddagger_i}{\ddagger_n K}$$

Pengendali fuzzy-PID (merupakan gabungan antara pengendali fuzzy logic dengan pengendali PID. Dengan metode ini maka pengendali fuzzy logic dapat mengatur perubahan parameter PID secara cepat dan tepat, sehingga akan terjadi proses adaptasi parameter K_p , T_i , dan T_d jika terjadi gangguan dari luar. Oleh karena itu persamaan parameter PID dengan adanya proses adaptasi dapat dinyatakan pada persamaan di bawah ini (R.K.Chauhan, 2017).

$$K_p(t) = K_{p1}(t) + \Delta K_p, \quad T_i(t) = T_{i1}(t) + \Delta T_i, \quad T_d(t) = T_{d1}(t) + \Delta T_d$$



Gambar 2.22 Blok diagram fuzzy-PID.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1. Pendekatan Penelitian

Pendekatan yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif. Penelitian kuantitatif menurut Neuman bahwa penelitian kuantitatif merupakan suatu cara yang memulainya dari hal – hal yang bersifat umum tentang suatu isu atau permasalahan yang ada atau yang sedang terjadi saat sekarang atau tentang kecenderungan suatu hal. Kebutuhan masyarakat pada rumah tinggal dan industri dalam pemakaian energi listrik menggunakan energy terbarukan khususnya energi matahari pada saat sekarang sangat dibutuhkan, sehingga ketergantungan terhadap listrik PLN dapat dikurangi. Jadi penelitian ini mengangkat suatu permasalahan pemakaian energi listrik menggunakan energi matahari dengan PV, khususnya untuk rumah tinggal.

Penelitian yang akan dilakukan merupakan jenis penelitian simulasi dan pemodelan, dimana pada penelitian ini akan membuktikan hipotesa berdasarkan pengujian terhadap beban dengan menggunakan *tool* yang berupa suatu algoritma dan perangkat keras.

- a Uji coba dilakukan menggunakan beban listrik yang ada dalam rumah tinggal.
- b Pengujian juga dilakukan dengan mengubah intensitas dan panas dari sumber energi matahari.
- c Hasil penelitian adalah berupa suatu model rancangan MPPT berbasis fuzzy-PID sebagai pengatur boost converter.

3.2. Populasi dan Sampel

Populasi dalam penelitian ini rangkaian inverter satu fasa, boost converter, dan algoritma MPPT menggunakan fuzzy, PID, serta hybrid fuzzy-PID. Beban yang digunakan berupa beban resistif dan induktif, karena hal ini sesuai dengan beban dalam rumah tinggal.

3.3. Metode Pengambilan Sampel

Pengambilan sampel dilakukan dengan menguji keluaran inverter satu fasa, untuk mengetahui besar amplitude tegangan dan kapasitas daya yang dihasilkan. Selain itu juga dilakukan pengambilan data keluaran PV dengan berbagai intensitas energy matahari, dan keluaran tegangan boost converter

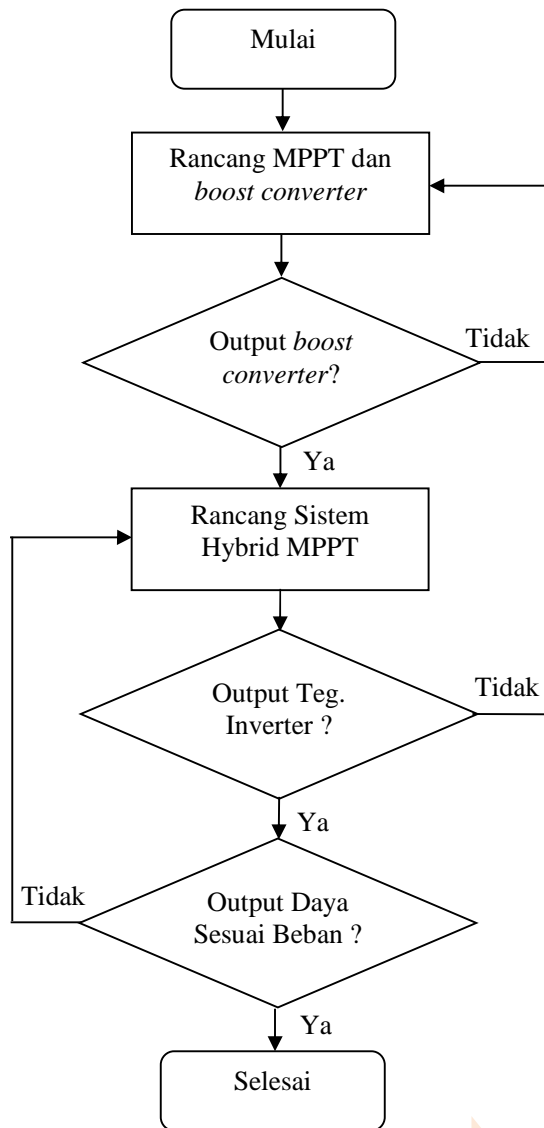
3.4. Instrumen Penelitian

Instrumen yang digunakan dalam penelitian ini adalah variabel atau besaran yang meliputi :

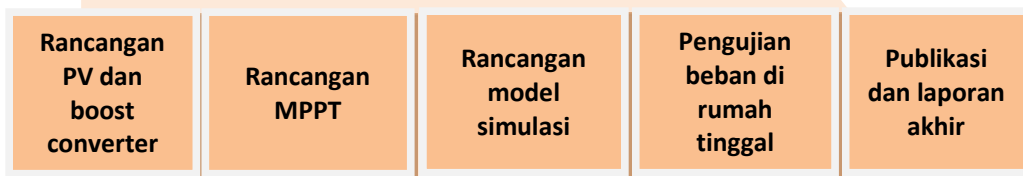
1. Amplitudo tegangan boost converter.

2. Grafik perubahan intensitas matahari dan daya keluaran PV.
3. Amplitudo tegangan AC pada beban.

3.5. Rancangan Penelitian



Gambar 3.1 Algoritma penelitian.



Gambar 3.2 Alur rencana penelitian

3.6. Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data yang dilakukan dalam penelitian ini adalah menggunakan tool dalam Simulink Matlab sebagai berikut :

1. Volt meter untuk mengukur amplitudo tegangan pada PV dan beban.
2. Ampere meter untuk mengukur besarnya arus pada beban.
3. Power meter untuk mengetahui daya keluaran PV.

Analisa data dilakukan untuk mengetahui kapasitas sumber listrik satu fasa yang dihasilkan dan untuk mengukur efisiensi sistem hybrid.

Tahap terakhir adalah tahap penyusunan atau pembuatan laporan penelitian. Tahap penyusunan laporan dilakukan pada saat penelitian sudah berjalan pada bulan ke dua dari empat bulan pelaksanaan penelitian. Selain itu juga dilakukan publikasi pada jurnal internasional

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian MPPT untuk photovoltaic ini digunakan dua metode kontrol, yaitu kontrol PID dan kontrol fuzzy-PID. Tegangan keluaran *boost converter* dikontrol oleh MPPT. Beban induktif dalam rumah tinggal adalah beban pompa air, kulkas, AC, dan mesin cuci dalam model simulasi ini dinyatakan dengan beban R dan beban L.

4.1 Rancangan *Hardware*

Untuk rancangan hardware terdapat dua jenis *hardware* yang digunakan untuk menaikkan tegangan keluaran PV. *Hardware* yang digunakan adalah *hardware boost converter* dan kontrol MPPT menggunakan Fuzzy-PID BTC-8300.



Gambar 4.1 *Hardware boost converter*.



Gambar 4.2 Fuzzy-PID BTC 8300.

A. Perhitungan Kebutuhan Beban

Dalam rancangan model simulasi ini, sebelumnya dilakukan perhitungan untuk menentukan kapasitas PV, karena akan disesuaikan dengan kapasitas daya yang digunakan dalam rumah tinggal. Dalam pembahasan ini sesuai dengan kebutuhan daya listrik rumah tinggal sebesar 1.500 Watt atau konsumsi energi per-jam sebesar 1,5 KWh. Beban listrik ini akan menyala pada jam 07.00 s/d 17.00, artinya beban listrik ini akan mengkonsumsi tenaga listrik selama 10 jam. Maka total energi yang dikonsumsi perharinya adalah :

- ❖ Total energi = 1,5 KW x 10 = 1,5 KW/hari.
- ❖ Jadi total keseluruhan energi yang diperlukan adalah 1,5 KWh.

Untuk sistem penyimpanan energi listrik digunakan baterai 12 Volt dengan kapasitas masing-masing 100 Ah. Untuk kebutuhan baterai dilakukan perhitungan sebagai berikut :

- ❖ Arus listrik per hari adalah $1.500 / (12 \times 10) = 12,5$ Ampere
- ❖ Jumlah baterai = $1.500 \text{ Watt/hari} : (12 \times 50 \text{ Ah}) = 3$ baterai
- ❖ Daya yang disediakan baterai = 1800 watt

Kebutuhan baterai dengan pertimbangan dapat melayani kebutuhan setiap hari tanpa sinar matahari, maka, jika kita menggunakan baterai yang sebesar 50 Ah 12 V, maka kita membutuhkan 3 baterai ($50 \times 12 \times 3 = 1.800$ watt).

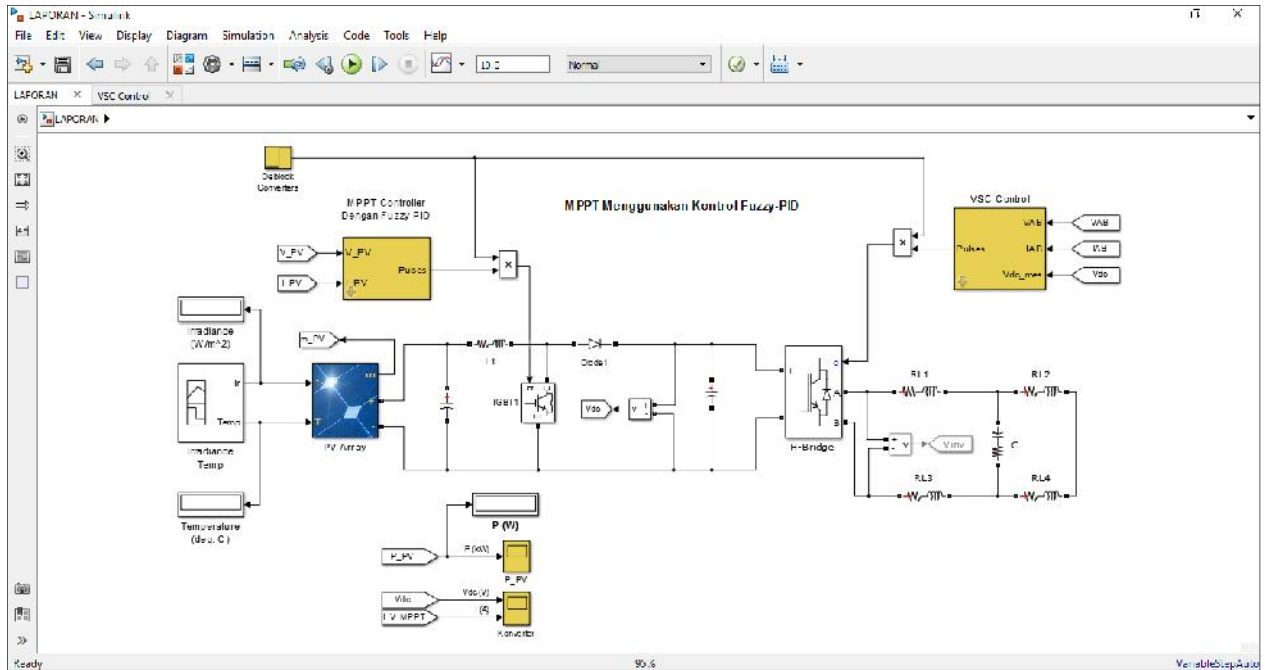
B. Perhitungan Kebutuhan PV

Dari perhitungan konsumsi energi diatas sebesar 1,5 Kwh atau sebesar 1.500 Wh, maka dapat kita pilih ukuran panel surya yang kita butuhkan. Dalam perancangan ini kita menggunakan panel surya 100 Wp (Watt peak), yaitu panel ini akan menghasilkan maksimum 100 Watt pada tegangan 12 V DC per jam, sehingga bila panel surya ini dipasang sehari (07.00-17.00 = 10 jam) dengan asumsi tidak mendung atau intensitas sinar matahari konstan maka panel surya ini bisa menghasilkan listrik $100 \text{ Wp} \times 10 \text{ jam} = 1000 \text{ Wh}$ atau sebesar 1 KWh. Keluaran daya panel surya 100 Wp dihasilkan pada kondisi temperatur 25 °C, tekanan 1,5 atm, dengan intensitas cahaya 1000 W/m^2 . Secara aktual rata-rata panel surya 100 Wp hanya akan menghasilkan energi listrik rata-rata sekitar 300 Wh – 400 Wh dalam satu hari. Hal disebabkan faktor intensitas cahaya matahari yang tidak sama sepanjang hari. Dalam rancangan menggunakan panel surya 100 Wp digunakan perhitungan sebagai berikut :

$1.500 / (100 \times 10) = 2$ panel surya. Jadi listrik yang dihasilkan adalah 2 unit $\times 100 \text{ Wp} = 200$ Watt per satu jam pemanasan pada puncak pemanasan. Dalam sehari, kurang lebih bisa menghasilkan listrik sebesar $200 \text{ Wp} \times 10 \text{ jam Pemanasan} = 2.000 \text{ Wh}$.

4.2 Rancangan Model Simulasi

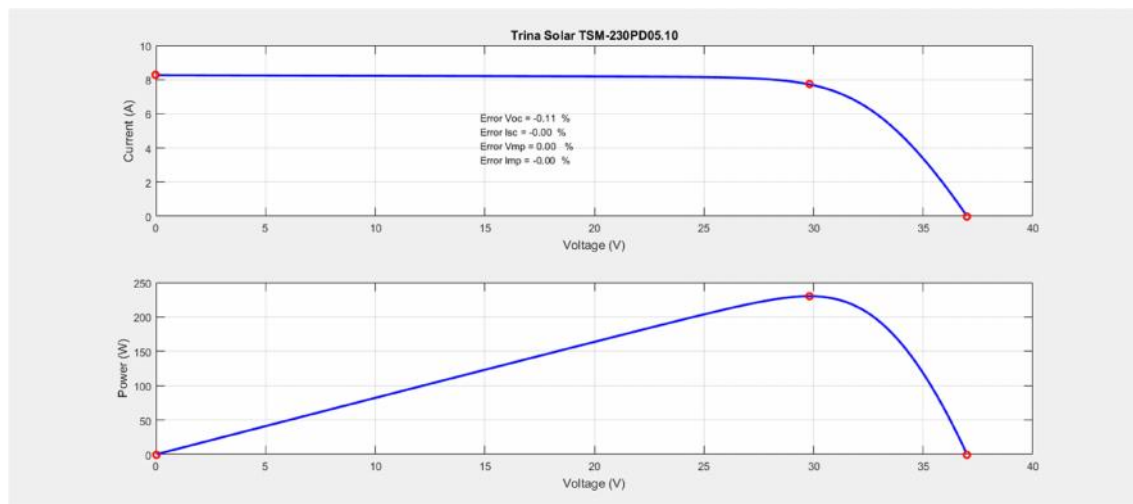
Dalam membuat rancangan simulasi menggunakan Matlab, jumlah dan nilai komponen dimasukkan sesuai dengan hasil perhitungan manual.



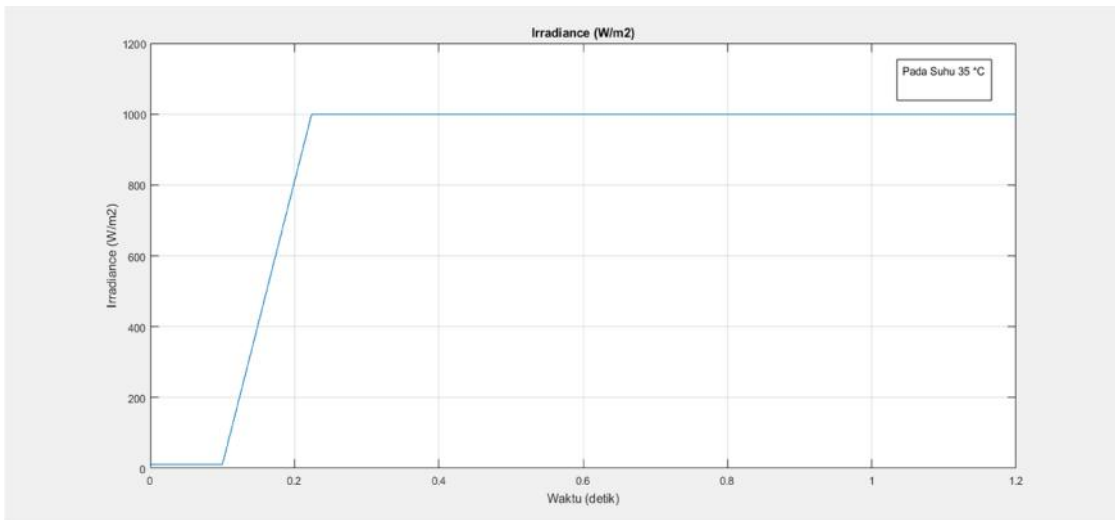
Gambar 4.3 Simulink MPPT Fuzzy-PID.

Untuk PV dalam simulasi ini menggunakan tipe TSM-230PD05.10. Jumlah PV yang digunakan dua panel surya yang terhubung secara seri. Sedangkan dalam pengujian intensitas dan suhu matahari untuk PV dilakukan dengan perubahan *irradiance* energi matahari dan suhu sebagai berikut :

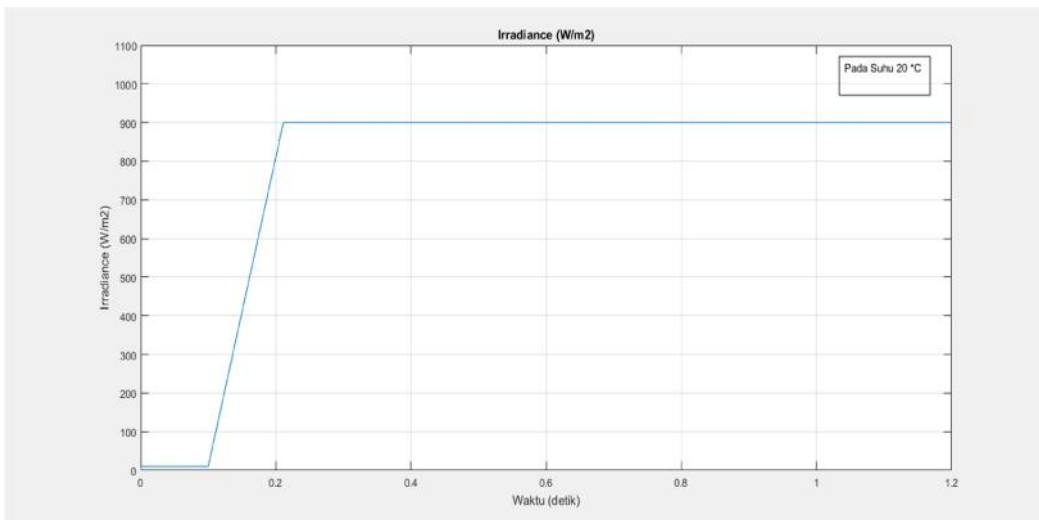
- ❖ *Irradiance* 1000 W/m², suhu 20 °C
- ❖ *Irradiance* 1000 W/m², suhu 35 °C
- ❖ *Irradiance* 500 W/m², suhu 20 °C
- ❖ *Irradiance* 500 W/m², suhu 35 °C



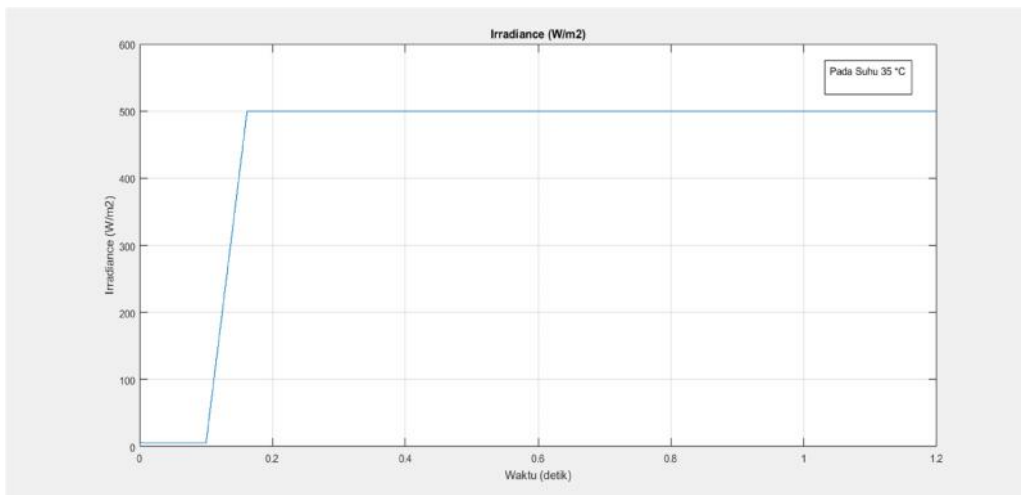
Gambar 4.4 Karakteristik PV TSM-230PD05.10.



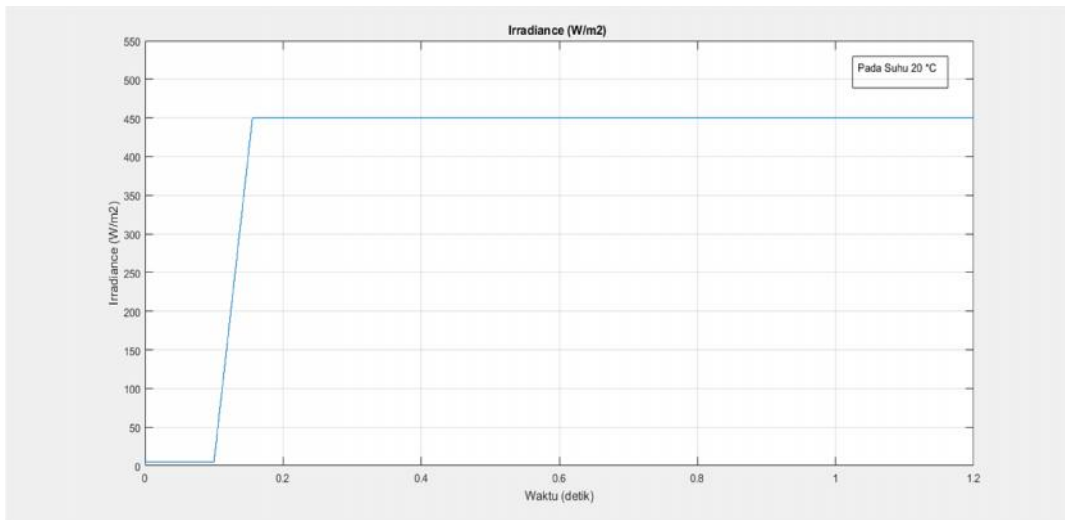
Gambar 4.5 Pengujian PV (*Irradiance* 1000 W/m², suhu 20 °C).



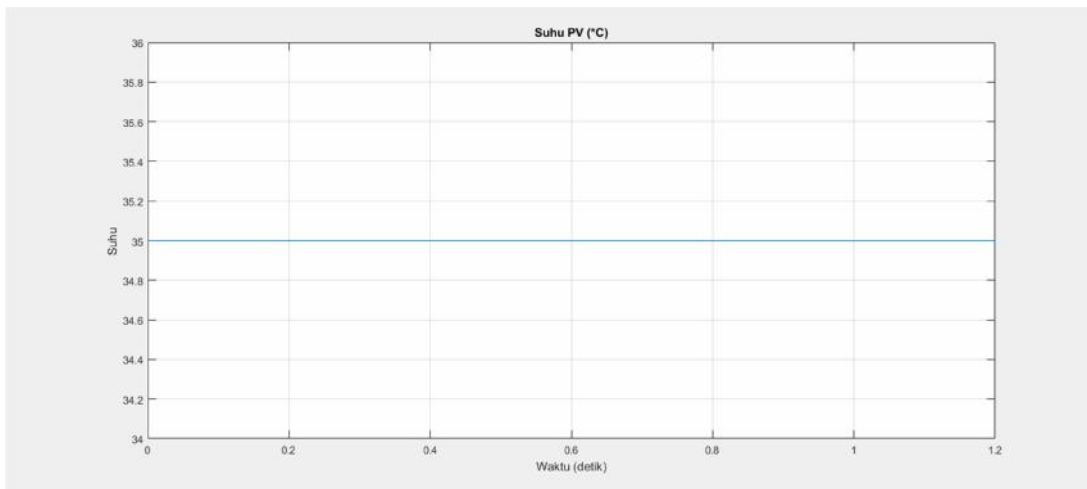
Gambar 4.6 Pengujian PV (*Irradiance* 1000 W/m², suhu 35 °C).



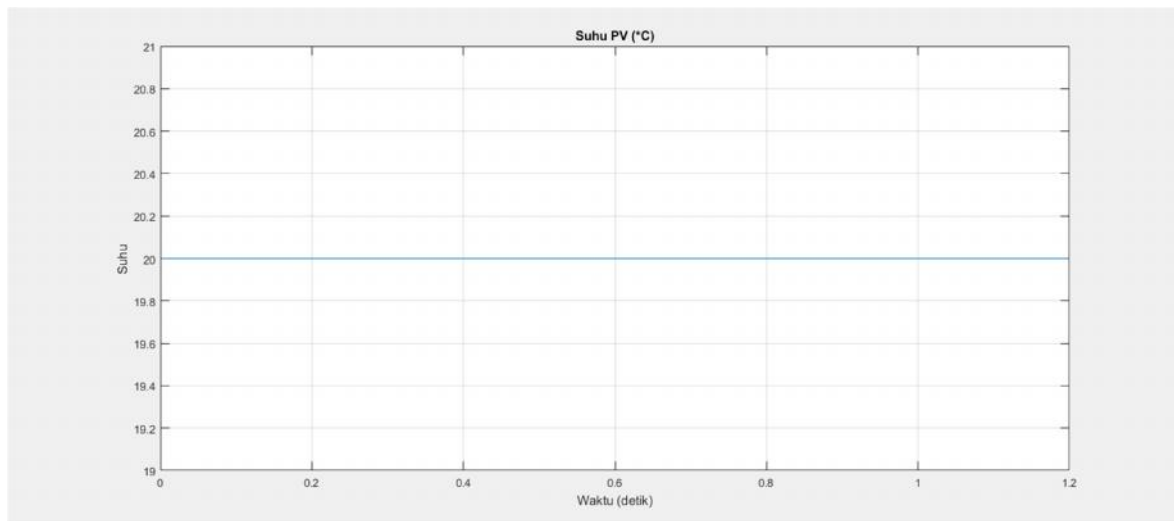
Gambar 4.7 Pengujian PV (*Irradiance* 500 W/m², suhu 35 °C).



Gambar 4.8 Pengujian PV (*Irradiance* 500 W/m², suhu 20 °C).



Gambar 4.9 Suhu pada PV 35 °C.

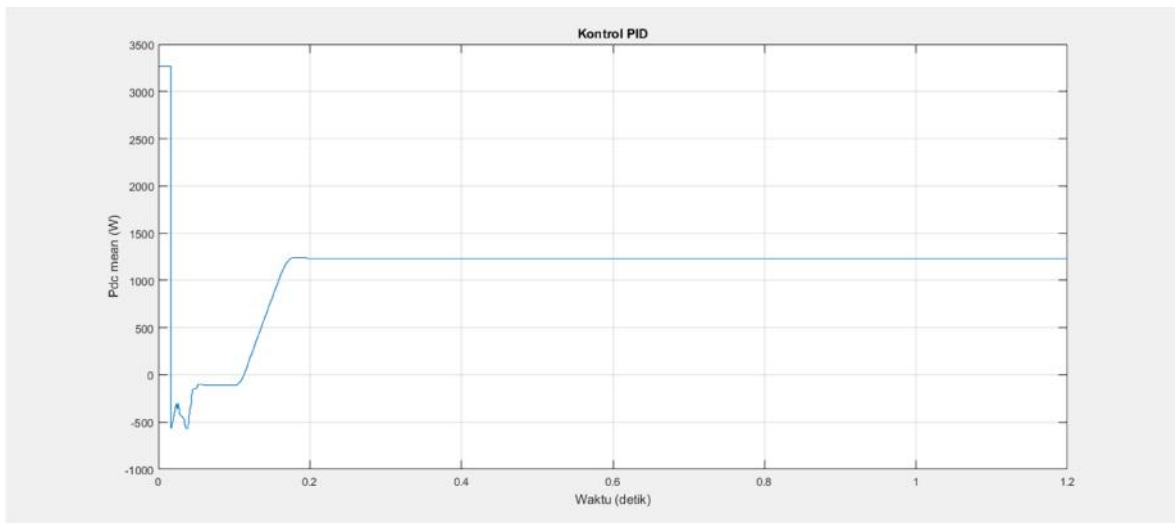


Gambar 4.10 Suhu pada PV 20 °C.

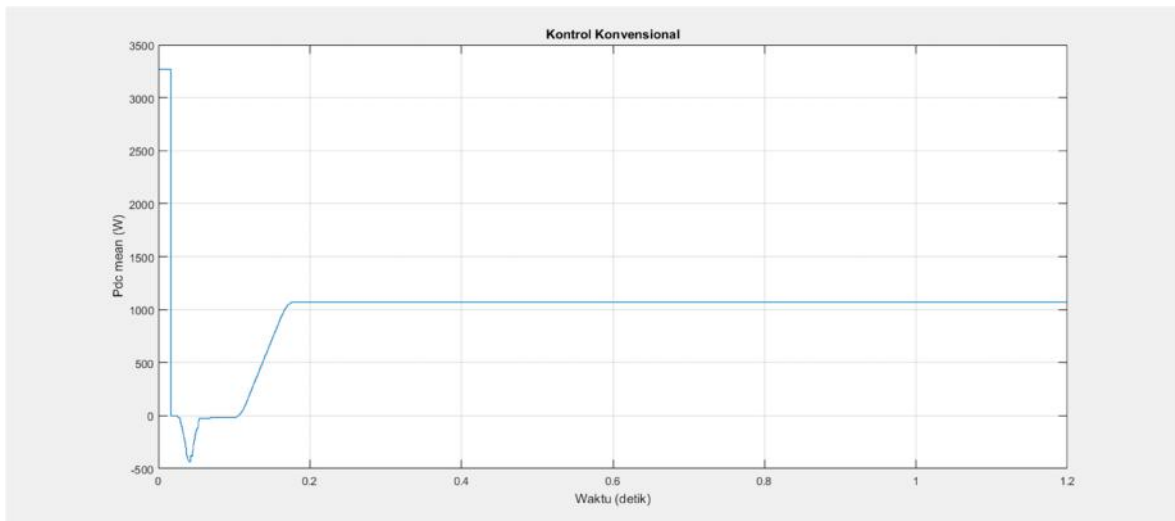
Untuk mengetahui kinerja MPPT, akan dilakukan pengujian dengan menggunakan beberapa metode kontrol, yaitu :

- ✓ Kontrol konvensional
- ✓ Kontrol PID
- ✓ Kontrol fuzzy
- ✓ Kontrol fuzzy-PID

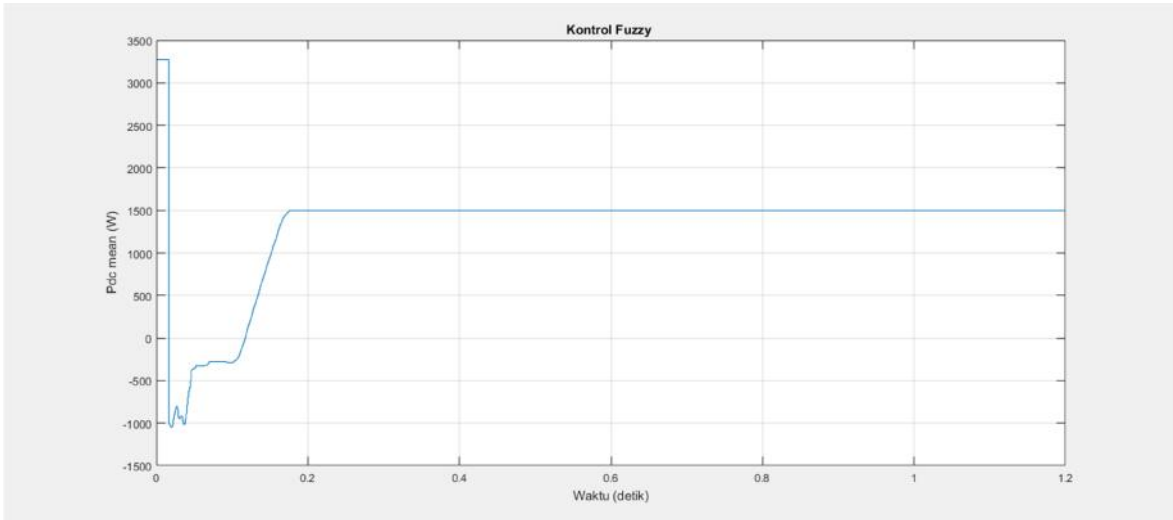
Pengujian tersebut meliputi pengujian daya keluaran PV dan tegangan keluaran *boost converter*. Pengujian tersebut diperlihatkan pada gambar di bawah ini.



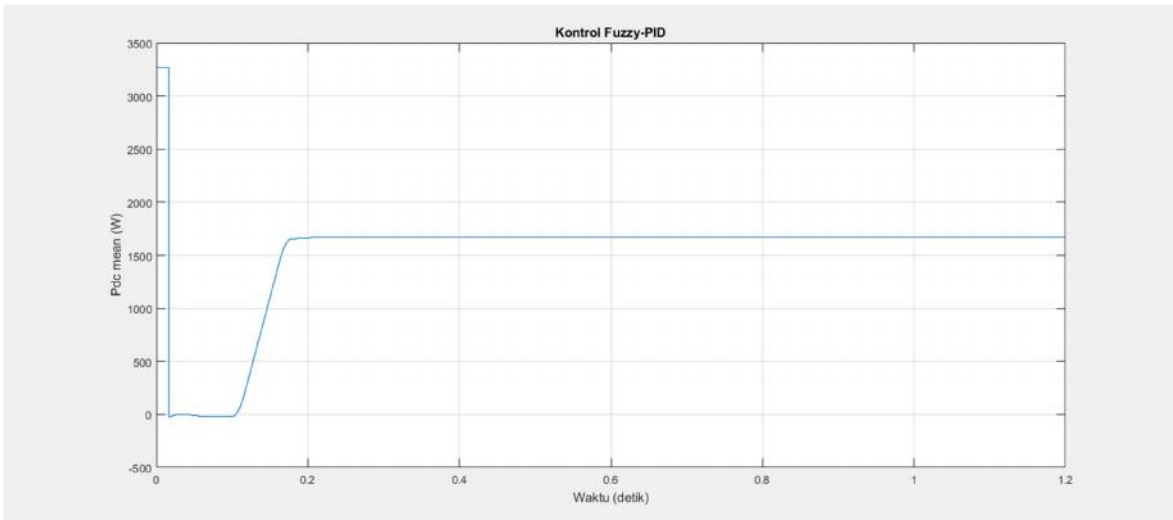
Gambar 4.11 Daya keluaran konverter dengan kontrol PID.



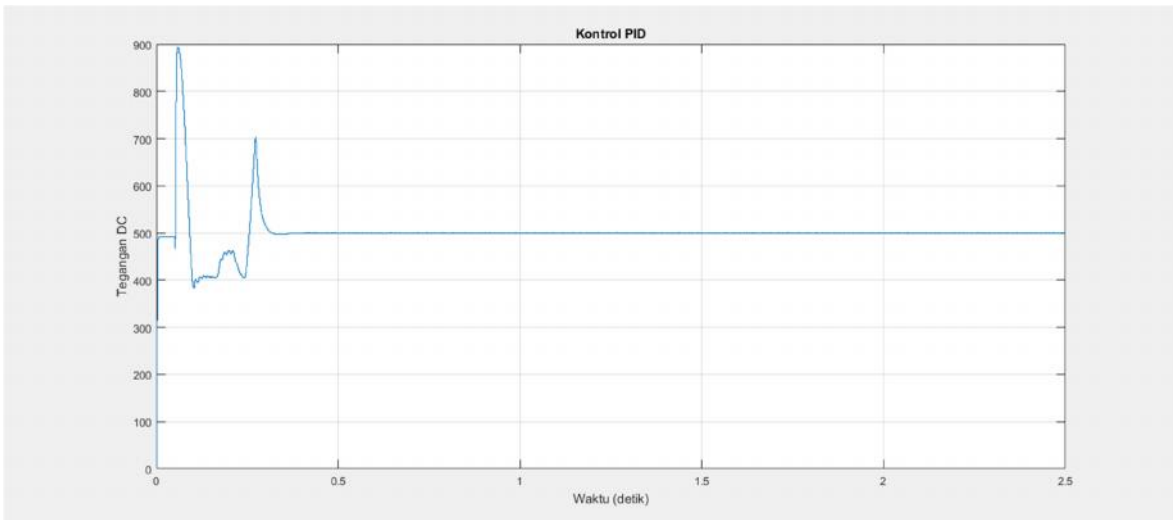
Gambar 4.12 Daya keluaran konverter dengan kontrol konvensional.



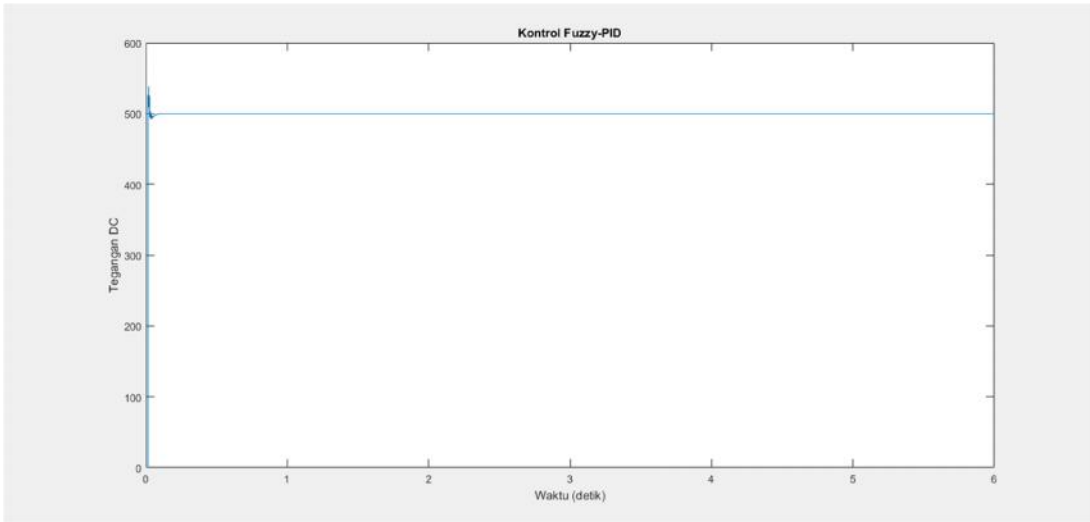
Gambar 4.13 Daya keluaran konverter dengan kontrol Fuzzy.



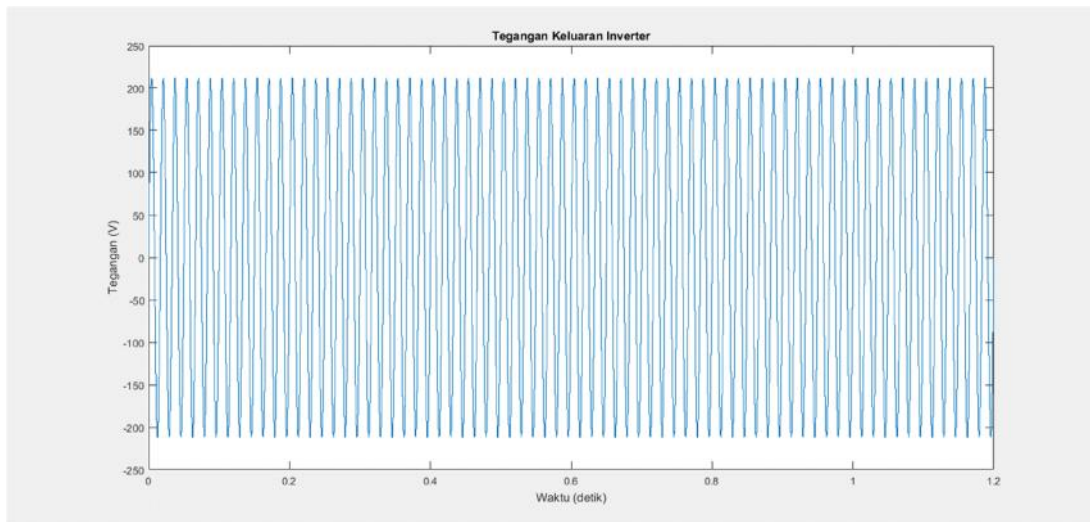
Gambar 4.14 Daya keluaran konverter dengan kontrol Fuzzy-PID.



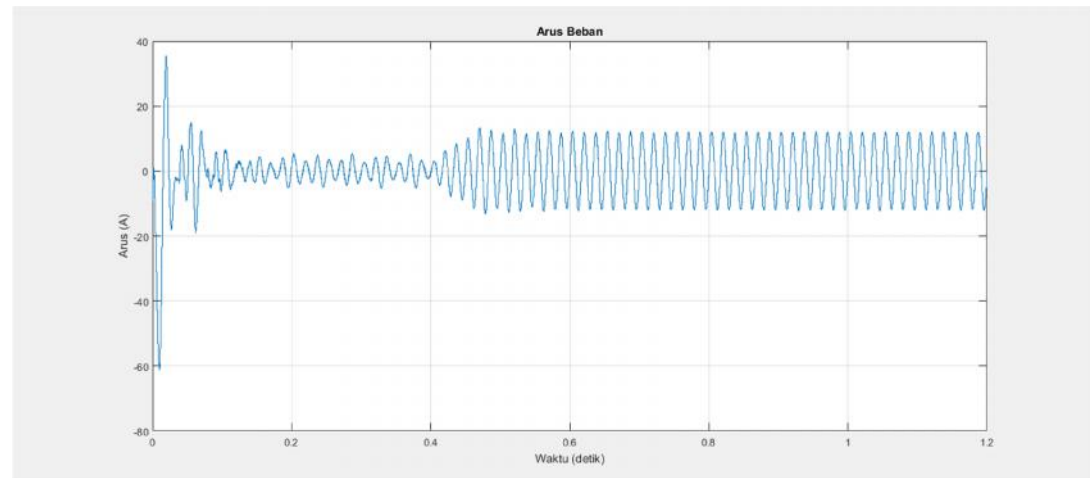
Gambar 4.15 Tegangan keluaran konverter dengan kontrol PID.



Gambar 4.16 Tegangan keluaran konverter dengan kontrol Fuzzy-PID.



Gambar 4.17 Tegangan keluaran inverter.



Gambar 4.18 Arus beban pada jaringan rumah tinggal.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Dalam rancangan penelitian ini digunakan daya listrik rumah tinggal sebesar 1.500 Watt atau konsumsi energi per-jam sebesar 1,5 KWh, dan beban listrik ini akan menyala pada jam 07.00 s/d 17.00. Untuk sistem penyimpanan energi listrik digunakan 3 baterai 12 Volt dengan kapasitas masing-masing 100 Ah, dan daya yang disediakan baterai = 1800 watt.
2. Dalam perancangan ini digunakan 2 buah panel surya 100 Wp (Watt peak) dengan tegangan keluaran 12 V DC. Keluaran daya panel surya 100 Wp dihasilkan pada kondisi temperatur 25 °C, tekanan 1,5 atm, dengan intensitas cahaya 1000 W/m² adalah 2 unit x 100 Wp = 200 Watt per satu jam pemanasan pada puncak pemanasan. Dalam sehari, kurang lebih bisa menghasilkan listrik sebesar 200 Wp x 10 jam Pemanasan = 2.000 Wh.
3. Dalam rancangan model simulasi terlihat bahwa penggunaan kontrol Fuzzy-PID pada *boost converter* mampu menghasilkan daya keluaran yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan metode kontrol yang lainnya. Selain itu *overshoot* tegangan keluaran kontrol Fuzzy-PID lebih rendah terhadap *overshoot* kontrol yang lainnya.

5.2 Saran

1. Untuk mengetahui kinerja MPPT, baik menggunakan algoritma Fuzzy, PID, maupun Fuzzy-PID sebaiknya dilakukan implementasi berdasarkan hasil simulasi menggunakan FPGA atau mikrokontroler.
2. Penggunaan PV dalam sistem mikro grid dapat dilakukan secara *standalone* atau dengan grid *connected*, tergantung kebutuhan masing-masing pelanggan listrik.
3. Untuk mengatasi keterbatasan energi matahari ketika energi matahari mulai turun setelah siang hari, dapat dilakukan dengan merancang baterai sebagai sumber energi cadangan. Oleh karena itu sebaiknya dalam rumah tinggal, dalam penggunaan PV dapat digunakan dua cara (*standalone* dan grid *connected*) secara bergantian.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad Faizal.Bagus Setyaji, Desain Maximum Power Point Tracking (MPPT) pada Panel Surya Menggunakan Metode Sliding Mode Control, *Jurnal Sains, Teknologi dan Industri*, Vol. 14, No. 1, Desember 2016, pp.22 – 31.
- Ali Maknouninejad, Zhihua Qu, Frank L. Lewis, *Fellow*, Ali Davoudi. 2014. Optimal, Nonlinear, and Distributed Designs of Droop Controls for DC Microgrids. *IEEE Transactions On Smart Grid*, Vol. 5, No. 5, pp.2508-2516.
- A. K. Verma, B. Singh, and D. T. Shahani, 2012, “Fuzzy-logic based MPPT control of grid interfaced PV generating system with improved power quality,” *2012 IEEE 5th Power India Conf. PICONF*.
- A. D. Martin and J. R. Vazquez, 2015, “MPPT algorithms comparison in PV systems: P&O, PI, neuro-fuzzy and backstepping controls,” *Proc. IEEE Int. Conf. Ind. Technol.*, vol. 2015–June, no. June, pp. 2841–2847.
- A. I. Dounis, S. Stavrinidis, P. Kofinas, and D. Tseles, 2015, “Fuzzy-PID controller for MPPT of PV system optimized by Big Bang-Big Crunch algorithm,” *IEEE Int. Conf. Fuzzy Syst.*
- Bayu Prima Juliansyah Putra. Aulia Siti Aisjah. dan Syamsul Arifin, Rancang Bangun Maximum Power Point Tracking pada Panel Photovoltaic Berbasis Logika Fuzzy di Buoy Weather Station, *Jurnal Teknik POMITS* Vol. 2, No. 2, (2013) ISSN: 2337-3539 (2301-9271 Print).
- C. S. Chin, Y. K. Chin, B. L. Chua, A. Kiring, and K. T. K. Teo, 2013, “Fuzzy logic based MPPT for pv array under partially shaded conditions,” *Proc. - 2012 Int. Conf. Adv. Comput. Sci. Appl. Technol. ACSAT 2012*, pp. 133–138.
- Dewan Riset Nasional, 2013, Riset Untuk Keunggulan & Daya Saing Bangsa, Perpustakaan Nasional, Jakarta.
- F.Gonzalez-Longatt, B.S.Rajpurohit, J.L.Rueda Torres, S.N.Singh. 2016. Simulation Platform for Autonomous Smart Multiterminal DC Micro-Grid. *IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT-Asia)*, Australia, pp. 630-635.
- G. Chujia, Z. Aimin, Z. Hang, Z. Chao, and B. Yunfei, 2015, “A Fuzzy MPPT Method for PV Array in power system,” pp. 5085–5089.
- Iwan Setiawan, 2008, Kontrol PID Untuk Proses Industri, PT Elex Media Komputindo, Surabaya.
- L. Piegari and R. Rizzo , “Adaptive perturb and observe algorithm for photovoltaic maximum power point tracking,” *Renewable Power Generation, IET*, vol. 4, no. 4, pp. 317-328, 2010.
- Machmud Effendy. Nur Alif Mardiyah. Khusnul Hidayat, Implementasi Maximum Power Point Tracking pada Photovoltaic Berbasis P&O-Fuzzy, *JNTETI*, Vol. 6, No. 1, Februari 2017.
- Mochamad Firman Salam, Simulasi Maximum Power Point Tracking (MPPT) Panel Surya Menggunakan Perturb and Observe Sebagai Kontrol Buck-Boost Converter, *Jurnal Teknik Elektro*. Volume 06. Nomor 01 Tahun 2017, 57-64.
- M. S. Hamad, A. M. Fahmy, and M. Abdel-Geliel, 2013, “Power quality improvement of a single-phase grid-connected PV system with fuzzy MPPT controller,” *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, pp. 1839–1844, 2013.
- M. Sheraz and M. A. Abido, 2014, “An Efficient Approach for Parameter Estimation of PV Model Using DE and Fuzzy Based MPPT Controller.”
- P. Jaiswal and A.Mahor, “Review on MPPT Techniques in Solar Photovoltaic System,” *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science*. Volume No.02, Issue No. 07, July 2014.

- Prof. Martin Djamin, et.all, 2012, Teknologi Smart Grid Untuk Smart City, Pusat Tekonologi Konversi dan Konservasi Energi (PTKKE) - BPPT, Jakarta
- R. K. Chauhan and B. S. Rajpurohit, 2017, "Design and Analysis of PID and Fuzzy-PID Controller for Voltage Control of DC Microgrid."
- R. B. Roy, E. Basher, and R. Yasmin, 2014, "Fuzzy Logic Based MPPT Approach In A Grid Connected Photovoltaic System," vol. 1, no. 1.
- R. K. Pachauri and Y. K. Chauhan, 2014, "Fuzzy logic controlled MPPT assisted PV-FC power generation for motor driven water pumping system," *2014 IEEE Students' Conf. Electr. Electron. Comput. Sci. SCEECS 2014*.
- S.Hadjammar, F.Bouchafaa, 2016, "Performandes of PV system conected to the grid with MPPT controlled by fuzzy control," vol. 1.
- S. Amara, A. Bouallegue and A.Khedher, "Theoretical and Practical Study of a Photovoltaic MPPT Algorithm Applied to Voltage Battery Regulation," *International Journal of Renewable Energy Research Vol.4, No 1, 2014*.
- Sri Utami, Implementasi Algoritma Perturb and Observe untuk Mengoptimasi Daya Keluaran Solar Cell Menggunakan MPPT, *Jurnal Infotel, Vol.9 No.1, Februari 2017*.
- Selva S., Modeling and Simulation of Incremental Conductance MPPT Algorithm for Photovoltaic Applications, *International Journal of Scientific Engineering and Technology, vol. 2, pp. 681684, 2013*.
- Rusminto Tjatur Widodo.Rugianto.Asmuniv dan Purnomo Sejati, Maximum Power Point Tracker Sel Surya Menggunakan Algoritma Perturb And Observe, *Politeknik Elektronika Negeri Surabaya-ITS, Surabaya, 2010*.
- Rayjansof Chairi. Fitria Hidayanti. Idris Kusuma, Perancangan Sistem Kendali Cascade pada Deaerator Berbasis Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS), *Jurnal Ilmiah GIGA, Volume 18 (2). Pp.94-101, November 2015*
- "Trends in photovoltaic applications. Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2009," *International Energy Agency, Report IEA-PVPS Task 1 T1-19:2010*.
- Wahyudi Budi Pramono, Simulasi Maximum Power Point Tracking pada Panel Surya Menggunakan Simulink MATLAB, *Seminar Nasional ke – 9: Rekayasa Teknologi Industri dan Informasi. 2010*.
- Z. Xiaoe, W. Jinmei, and L. Jinsong, 2013, "Simulation Research on the MPPT of the PV Cells Based on Fuzzy Control," *2013 Fourth Int. Conf. Intell. Syst. Des. Eng. Appl.*, pp. 561–564.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Biodata Ketua dan Anggota Peneliti

Ketua

1. NamaLengkap : Adhi Kusmanto, ST, MT
2. Tempat/ TanggalLahir : Semarang/ 19 April 1973
3. Alamat/No.Telp.Rumah/HP : Jl. Taman Borobudur Timur V/8 Semarang
(024) 7600855/ 085641390783
4. Email : adhiteknik@gmail.com
5. JenisKelamin : Laki - laki
6. Jurusan : Teknik Elektro
7. NPP /Golongan/ Pangkat : 147301432/ III c/ Penata Muda
8. Jabatan Fungsional : Lektor
9. Bidang Keahlian : Energi Listrik
10. Pengalaman Penelitian :

NO	JUDUL PENELITIAN	BIAYA	TAHUN
1	Perancangan inverter dengan PWM analog	USM	2001
2	Pengendali pompa dengan VB dan mikrokontroler AT89S51	Dikti	2005
3	Perancangan filter aktif pada penyearah jembatan dioda	USM	2006
4	Pengendalian inverter dengan PPI 8255	USM	2006
5	Perancangan pengendali pompa banjir dengan PLC CPM2A	USM	2007
6	Pengendali ATS AMF Genset 50 KVA dengan Zelio Logic	UKRIDA	2010
7	Perancangan PLTMH Jantur Tabalas	PGM	2012
8	Pemakaian infrared thermography pada elektrikal gedung	Sendiri	2013
9	Identifikasi kualitas daya listrik gedung Universitas PGRI Semarang	UPGRIS	2014
10	Penyearah Terkendali Berumpan Balik Dengan Perubahan Gain Pengendali PI (Proporsional Integral)	Sendiri	2015
11	Perancangan Pengendali Fuzzy Logic Pada Pompa Submersible Untuk Penghematan Energi Listrik	UPGRIS	2016
12	Desain Sistem Hybrid Sumber Listrik Satu Fasa Pada Rumah Tinggal	UPGRIS	2017
13	Rancang Bangun Soft Starter Pompa Satu Fasa Berbasis PID Menggunakan Energi Matahari Untuk Rumah Tinggal	Kemristek Dikti	2017

Semarang, 15 Juli 2019
Ketua Pengusul



Adhi Kusmanto, ST, MT
NPP. 147301432

Anggota 1

1. NamaLengkap : Margono, ST, M.Eng
2. Tempat/ TanggalLahir : Jakarta, 27 april 1961
3. Alamat/No.Telp.Rumah/HP : Perum. Villa Payung Indah E-208 RT/RW : 04/10
Semarang/ 081325012497
4. Email : margono.27@gmail.com
5. JenisKelamin : Laki - laki
6. Jurusan : Teknik Elektro
7. NPP/Golongan/ Pangkat : 136101383/ III B/Penata Muda TK.I
8. Jabatan Fungsional : Asisten Ahli
9. BidangKeahlian : Energi Listrik
10. Pengalaman Penelitian :

NO	JUDUL PENELITIAN	BIAYA	TAHUN
1	Sistem Kontrol Suhu dan Laju Pemanasan Alat Pirolisis	Mandiri	2012
2	Sistem Kendali Peralatan On/Off via Web	UPGRIS	2014
3	Perbaikan Sistem Konversi Tenaga Genset menggunakan Saklar Energi Pemulih Magnetik	Dikti	2014
4	DC TO DC Converter untuk Sistem Charger Accumulator Otomatis bersumber Solar Cell	Dikti	2017

Semarang, 15 Juli 2019
Anggota Peneliti



Margono, ST, M.Eng
NPP. 136101383

Anggota 2

1. NamaLengkap : Muhammad Amiruddin, ST. M.Eng
2. Tempat/ TanggalLahir : Semarang/ 21 Juli 1984
3. Alamat/No.TelpRumah/HP : Jalan Jati Raya 1A RT/RW 03/06 Banyumanik
Semarang/ 085725828631
4. Email : amiruddin.muhammad@yahoo.com
5. JenisKelamin : Laki - laki
6. Jurusan : Teknik Elektro
7. NPP/Golongan/ Pangkat : 138401392/ IIIb / Penata Muda TK.I
8. Jabatan Fungsional : Pengajar
9. Bidang Keahlian : Elektronika
10. Pengalaman Penelitian :

NO	JUDUL PENELITIAN	BIAYA	TAHUN
1	Sistem Kontrol Suhu dan Laju Pemanasan Alat Pirolisis	Mandiri	2012
2	Sistem Kendali Peralatan On/Off via Web	UPGRIS	2014
3	Perbaikan Sistem Konversi Tenaga Genset menggunakan Saklar Energi Pemulih Magnetik	Dikti	2014
4	DC TO DC Converter untuk Sistem Charger Accumulator Otomatis bersumber Solar Cell	Dikti	2017

Semarang, 15 Juli 2019
Anggota Pengusul



Muhammad Amiruddin, ST. M.Eng
NPP. 138401392



LEMBAGA PENELITIAN DAN PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT UNIVERSITAS PGRI SEMARANG

Jl. Dr. Cipto - Lontar No. 1 Semarang - Indonesia Telp. (024) 8451279, 8451824 Faks. 8451279
Email : lppmupgrismg@gmail.com Website : lppm.upgris.ac.id

SURAT TUGAS


Nomor : 267.D/ST/LPPM-UPGRIS/III/2019

Dengan ini Ketua LPPM Universitas PGRI Semarang memberi tugas kepada :

Nama : Adhi Kusmantoro, ST, MT.
NPP : 147301432
Pangkat/Golongan : Penata/ IIIc
Jabatan Fungsional : Lektor
Pekerjaan : Dosen FTI Universitas PGRI Semarang
Pada hari / tgl : Maret s.d Juni 2019
Tempat : Lab. Teknik Elektro Universitas PGRI Semarang
Keperluan : Kegiatan Penelitian dengan judul Peningkatan Kinerja MPPT pada
DC House dengan Fuzzy-PID dalam Sistem DC Mikro Grid

Demikian agar tugas ini dilaksanakan dengan sebaik-baiknya dan setelah selesai harap melaporkan hasilnya.

Mengetahui,
Telah melaksanakan tugas


Muhammad Aminuddin ST, M.Eng.
NPP.138401392

Semarang, 19 Maret 2019
Plt. Ketua LPPM,



Dr. Rasiman, M.Pd.
NIP. 195602181986031001



LEMBAGA PENELITIAN DAN PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT UNIVERSITAS PGRI SEMARANG

Jl. Dr. Cipto - Lontar No. 1 Semarang - Indonesia Telp. (024) 8451279, 8451824 Faks. 8451279
Email : lppmupgrismg@gmail.com Website : lppm.upgris.ac.id

SURAT TUGAS


Nomor : 267.D/ST/LPPM-UPGRIS/III/2019

Dengan ini Ketua LPPM Universitas PGRI Semarang memberi tugas kepada :

Nama : Margono, ST, M. Eng.
NPP : 136101383
Pangkat/Golongan : Penata Muda Tk.I/ IIIb
Jabatan Fungsional : Asisten Ahli
Pekerjaan : Dosen FTI Universitas PGRI Semarang
Pada hari / tgl : Maret s.d Juni 2019
Tempat : Lab. Teknik Elektro Universitas PGRI Semarang
Keperluan : Kegiatan Penelitian dengan judul Peningkatan Kinerja MPPT pada
DC House dengan Fuzzy-PID dalam Sistem DC Mikro Grid

Demikian agar tugas ini dilaksanakan dengan sebaik-baiknya dan setelah selesai harap melaporkan hasilnya.

Mengetahui,
Telah melaksanakan tugas


Muhammad Anindhi ST, M. Eng.
NPP. 118401392

Semarang, 19 Maret 2019
Plt. Ketua LPPM,



Dr. Rasiman, M.Pd.
NIP. 195602181986031001



LEMBAGA PENELITIAN DAN PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT UNIVERSITAS PGRI SEMARANG

Jl. Dr. Cipto - Lontar No. 1 Semarang - Indonesia Telp. (024) 8451279, 8451824 Faks. 8451279
Email : lppmupgrismg@gmail.com Website : lppm.upgris.ac.id

SURAT TUGAS


Nomor : 267.D/ST/LPPM-UPGRIS/III/2019

Dengan ini Ketua LPPM Universitas PGRI Semarang memberi tugas kepada :

Nama : Muhammad Amiruddin, ST, M.Eng..
NPP : 138401392
Pangkat/Golongan : Penata Muda Tk.I/ IIIb
Jabatan Fungsional : Asisten Ahli
Pekerjaan : Dosen FTI Universitas PGRI Semarang
Pada hari / tgl : Maret s.d Juni 2019
Tempat : Lab. Teknik Elektro Universitas PGRI Semarang
Keperluan : Kegiatan Penelitian dengan judul Peningkatan Kinerja MPPT pada
DC House dengan Fuzzy-PID dalam Sistem DC Mikro Grid

Demikian agar tugas ini dilaksanakan dengan sebaik-baiknya dan setelah selesai harap melaporkan hasilnya.

Mengetahui,
Telah melaksanakan tugas


Muhammad Amiruddin ST, M.Eng.
NPP. 138401392

Semarang, 19 Maret 2019
Plt. Ketua LPPM,



Dr. Rasiman, M.Pd.
NIP. 195602181986031001

LAMPIRAN

SUNNY TRIPOWER 60

STP 60-10



Efficient

- Maximum efficiency of 98.8%
- Superior power density:
60 kW with only 75 kg of weight

Reliable

- Superior PV system availability with 60-kW units
- SMA Inverter Manager as central control unit

Flexible

- DC input voltage of up to 1000 V
- Flexible DC solutions with customer-specific PV array combiner boxes

Innovative

- Cutting-edge system design

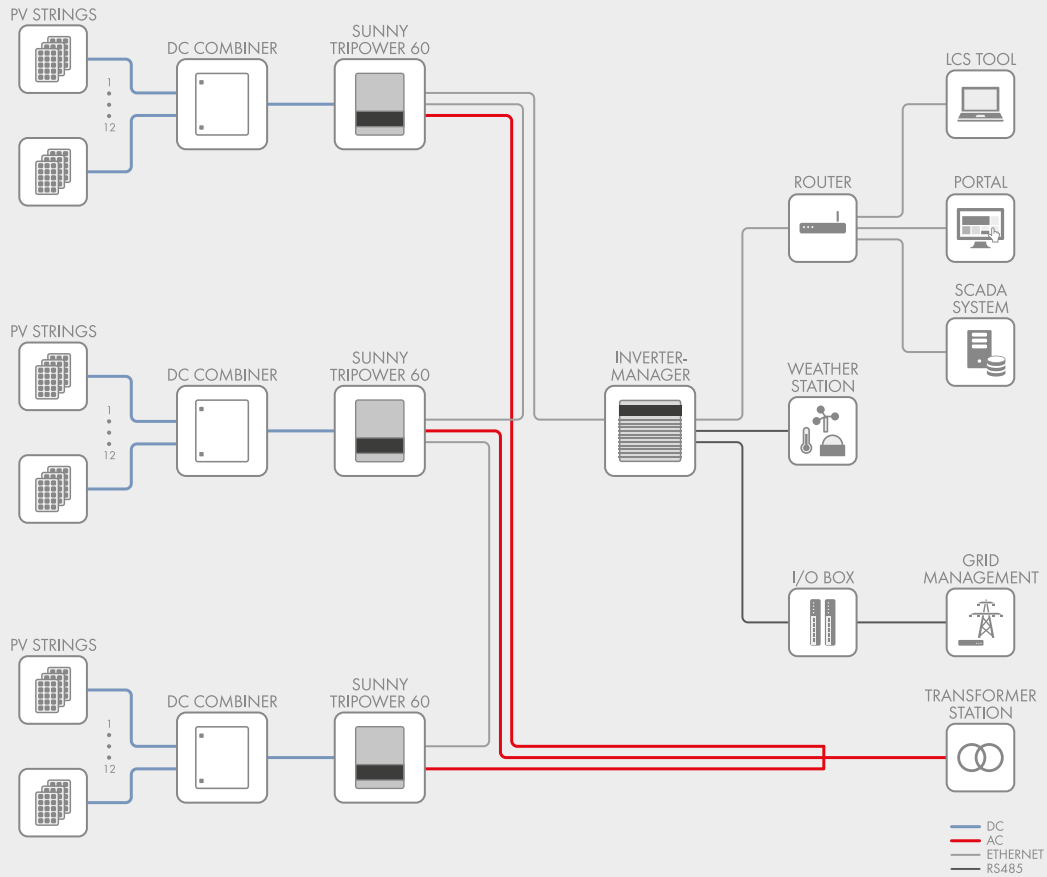
SUNNY TRIPOWER 60

The Best of Two Worlds

The new Sunny Tripower 60 is part of an innovative global system solution for commercial and industrial PV systems. This solution combines the advantages of a decentralized system layout with the benefits of centralized inverter designs in order to get the best of two worlds. High efficiency, flexible system design, easy installation, simple commissioning and low maintenance requirements contribute decisively to reducing the operating costs for the entire system.

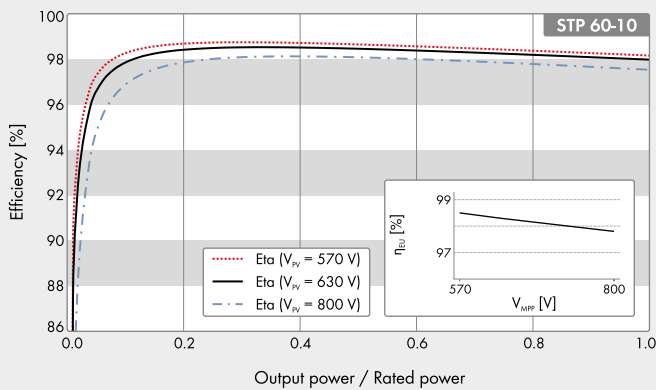
SUNNY TRIPOWER 60

SYSTEM DIAGRAM



Technical Data	SMA Inverter Manager
Voltage supply	
Input voltage	9 to 36 Vdc
Power consumption	< 20 W
General data	
Dimensions (W/H/D)	160 / 125 / 49 mm (6.3 / 4.9 / 1.9 inches)
Weight	940 g (2 lbs)
Maximum allowed number of inverters	42
Degree of protection	IP21
Mounting	DIN top-hat rails or wall mounting
Operating temperature range	-40 °C to +85 °C (-40° F to +185° F)
Relative humidity (non-condensing)	5 % to 95 %
Interfaces	
PC user interface	LCS tool
Sensor interface / protocol	RS485 / Modbus RTU for SunSpec Alliance compatible weather station
Interface to inverter	1 Ethernet port (RJ45)
Interface for external network / protocol	1 Ethernet port (RJ45) / Modbus TCP, SunSpec Alliance
Interface to remote control	6 x DI via external SMA Digital I/O Box
Certificates and approvals (more available upon request)	UL 508, UL 60950-1, CSA C22.2 No. 60950-1-07, EN 60950-1, EN 55022 Class A, EN 61000-3-2 Class D, EN 61000-3-3, EN 61000-6-4, EN 55024, FCC Part 15, Sub-part B Class A
SMA Inverter Manager type designation	IM-20
SMA Digital I/O Box type designation	IM-DIO-10

Efficiency Curve



● Standard features ○ Optional – Not available
Data at nominal conditions
Last revision: May 2017

Technical Data

Input (DC)

Max. generator power
Rated power (DC)
Max. input voltage
MPP voltage range (at 400 Vac / 480 Vac)
Min. input voltage (at 400 Vac / 480 Vac)
Start input voltage (at 400 Vac / 480 Vac)
Max. input current / max. short-circuit current
Number of independent MPP inputs/strings per MPP input
Rated DC input voltage (at 400 Vac / 480 Vac)

Output (AC)

Rated power at nominal voltage
Max. apparent AC power
Max. reactive power
Nominal AC voltage
AC voltage range
AC power frequency/range
Rated power frequency/rated grid voltage
Max. output current (at 400 Vac / 480 Vac) / rated output current
Power factor at rated power / displacement power factor adjustable
THD
Feed-in phases/connection phases

Efficiency

Max. efficiency / Euro-eta / CEC at 400 Vac / CEC at 480 Vac

Protective devices

Input-side disconnection point
Ground fault monitoring/grid monitoring
Integrable DC surge arrester / AC surge arrester
AC short-circuit current capability / galvanically isolated
All-pole sensitive residual-current monitoring unit
Protection class (as per IEC 62109-1) / overvoltage category (as per IEC 62109-1)

General data

Dimensions (W/H/D)
Weight
Operating temperature range
Noise emission, typical
Self-consumption (at night)
Topology / cooling concept
Degree of protection (according to IEC 60529 / UL 50E)
Climatic category (as per IEC 60721-3-4)
Max. permissible value for relative humidity (non-condensing)

Features / function / accessories

DC connection / AC connection
Display
Data interface
Off-grid capable / PV-diesel capable
Warranty: 5 / 10 / 15 / 20 years
Certificates and approvals (more available upon request)

* Does not apply to all national annexes of EN 50438
** Restricted (Note Manufacturer's Declaration)

Type designation

Sunny Tripower 60

90000 Wp
61240 W
1000 V
570 V to 800 V / 685 V to 800 V
565 V / 680 V
600 V / 720 V
110 A / 150 A
1/1 (split up in external combiner box)
630 V / 710 V

60000 W
60000 VA
60000 Var
3 / PE, 400 V to 480 V, ±10 %
360 V to 530 V
50 Hz / 44 Hz to 55 Hz
60 Hz / 54 Hz to 65 Hz
50 Hz / 400 V
87 A / 72 A / 87 A
1 / 0 overexcited to 0 underexcited
≤ 1 %
3 / 3

98.8 % / 98.3 % / 98.0 % / 98.5 %

●
● / ●
Type II / type II + III (combined)
● / –
●
I / AC: III; DC: II

570 / 740 / 300 mm (22.4 / 29.1 / 11.8 inches)
75 kg (165.3 lb)
-25 °C to +60 °C (-13 °F to +140 °F)
58 dB(A)
< 3 W
Transformerless / active
IP65 / NEMA 3R
4K4H/4Z4/4B2/4S3/4M2/4C2
95 %

Screw terminal / screw terminal
Graphical
SunSpec Modbus TCP (via external SMA Inverter Manager)
– / ●
● / ○ / ○ / ○

ANRE 30, AS 4777, BDEW 2008, C10/11:2012**, CEI 0-16, DEWA 2015, EN 50438*, G59/3, IEC 60068-2-x, IEC 61727, IEC 62109-1/2, IEC 62116, LEY N° 20751, NBR16149, NEN EN 50438, NRS 097-2-1, PEA 2015, R.D.661/2007, Res. n°7:2013, SI4777, TORD4**, UTE C15-712-1, VDE 0126-1-1, VDE-AR-N 4105**, VFR 2014

STP 60-10

FLEXIBLE SYSTEM DESIGN

With Maximum Efficiency

The new SMA system solution consists of four components: highly efficient inverters, the flexible combiner boxes, the central SMA Inverter Manager and the LCS commissioning tool. It is precisely this systemized approach that makes the Sunny Tripower 60 so unique and guarantees a high level of performance along with maximum flexibility in system planning and design.

Sunny Tripower 60 inverters with impressive design

No other inverter weighing only 75 kg with an output of 60 kW offers this. With its compact design, the Sunny Tripower 60 requires little space, reduces on-site preparation work, simplifies installation and lowers maintenance costs.

Innovative system management with the SMA Inverter Manager

The SMA Inverter Manager is the central communications component and sole interface for controlling the entire system. It handles all the important inverter and system management functions for up to 42 inverters in one system (up to 2.5 MW). Based on Modbus TCP (SunSpec Alliance) Communication, it can be easily integrated into a larger communication system. Moreover, the SMA Inverter Manager provides grid management functions and exchanges data with the grid operator.

Easy commissioning with the LCS commissioning tool

The specially developed LCS tool (Local Commissioning and Service) makes commissioning easy, saves time and reduces costs. The inverter is configured by simply selecting the system-specific configuration files and then transmitting them to all inverters. Furthermore, by reading the status, current values and incidents at the inverter level can make troubleshooting and bug-fixing considerably easier.

External combiner box for flexible system design

The module strings are connected to the inverters using the external combiner boxes.* This allows the system to flexibly adapt to various regional standards and the generator configuration. This new design decisively contributes to reducing system costs.

*Different configurations can be delivered upon request