

Rumpun Ilmu	: Teknik Elektro
Bidang Keahlian	: Electrical and Electronic Engineering
Jenis Riset	: Dasar

LAPORAN AKHIR  
SKEMA PENELITIAN UNGGULAN PROGRAM STUDI



DESAIN MPPT DENGAN METODE P&O PADA SISTEM SOLAR PV  
BERBASIS ARDUINO

TIM PENELITI :

Ketua : TOLE SUTIKNO, Dr., S.T., M.T.

Anggota : 1. Ahmad Raditya Cahya Baswara, S.T., M.Eng.

Mahasiswa Terlibat : 1. M. Ulud Risaldi (1800022054)

TEKNIK ELEKTRO  
TEKNOLOGI INDUSTRI  
UNIVERSITAS AHMAD DAHLAN  
NOVEMBER 2021

**COVER LETTER**  
**LAPORAN KEMAJUAN PENELITIAN TA. 2021/2022**

Ketua Peneliti : TOLE SUTIKNO, Dr., S.T., M.T.  
Judul Penelitian : Desain MPPT dengan metode P&O pada sistem solar PV berbasis Arduino  
Hari, Tanggal Review : Jumat, 26 November 2021

No.	Kriteria (Indikator Penilaian)	Komentar Reviewer	Isi Perbaikan
1.	A. Ringkasan penelitian berisi: (i) latar belakang penelitian, (ii) tujuan penelitian, (iii) tahapan metode penelitian, (iv) luaran yang ditargetkan, (v) uraian TKT penelitian yang ditargetkan serta (vi) hasil penelitian yang diperoleh sesuai dengan tahun pelaksanaan penelitian.	Luaran yang ditargetkan dan dan uraian TKT belum dinyatakan secara eksplisit	Luaran utama yang ditargetkan adalah Paper yang terbit di jurnal nasional maupun internasional bereputasi dengan TKT 3
2.	B. Kata kunci maksimal 5 kata kunci. Gunakan tanda baca titik koma (?) sebagai pemisah, dan ditulis sesuai urutan abjad.	sudah sesuai	terima kasih
3.	C. Hasil pelaksanaan penelitian berisi: (i) kemajuan pelaksanaan penelitian yang telah dicapai sesuai tahun pelaksanaan penelitian, (ii) data yang diperoleh, (iii) hasil analisis data yang telah dilakukan, (iv) pembahasan hasil penelitian, serta (v) luaran yang telah didapatkan. Seluruh hasil atau capaian yang dilaporkan harus berkaitan dengan tahapan pelaksanaan penelitian sebagaimana direncanakan pada proposal. Penyajian data dan hasil penelitian dapat berupa gambar, tabel, grafik, dan sejenisnya, serta pembahasan hasil penelitian didukung dengan sumber pustaka primer yang relevan dan terkini.	Hasil penelitian telah diuraikan, dapat ditambah/dilengkapi analisis pembahasan seperti draft paper yang sudah dibuat	Sudah dilengkapi di paper hasil penelitian
4.	D. Status luaran berisi identitas dan status ketercapaian setiap luaran wajib dan luaran tambahan (jika ada) yang dijanjikan. Jenis luaran dapat berupa publikasi, perolehan kekayaan intelektual, hasil pengujian atau luaran lainnya yang telah dijanjikan pada proposal. Uraian status luaran harus didukung dengan bukti kemajuan ketercapaian luaran sesuai dengan luaran yang dijanjikan. Lengkapi isian jenis luaran yang dijanjikan serta unggah bukti dokumen ketercapaian luaran wajib dan luaran tambahan melalui portal penelitian.	Ada yang draft, ada yang sudah tercapai	Untuk luaran utama berupa paper sudah dalam proses submission ke jurnal IJEECS
5.	E. Peran Mitra berupa realisasi kerjasama dan kontribusi Mitra baik in-kind maupun in-cash (untuk Penelitian Terapan dan Pengembangan). Bukti pendukung realisasi kerjasama dan realisasi kontribusi mitra dilaporkan sesuai dengan kondisi yang sebenarnya. Bukti dokumen realisasi kerjasama dengan Mitra unggah melalui portal penelitian.	sudah diuraikan	terima kasih

6.	F. Kendala Pelaksanaan Penelitian berisi kesulitan atau hambatan yang dihadapi selama melakukan penelitian dan mencapai luaran yang dijanjikan.	sudah diuraikan	terima kasih
7.	G. Rencana Tahapan Selanjutnya berisi tentang rencana penyelesaian penelitian dan rencana untuk mencapai luaran yang dijanjikan jika belum tercapai.	sudah diuraikan dengan baik	terima kasih
8.	H. Daftar Pustaka disusun dan ditulis berdasarkan sistem nomor sesuai dengan urutan pengutipan. Hanya pustaka yang disitasi/diacu pada laporan kemajuan saja yang dicantumkan dalam Daftar Pustaka.	Hanya 5, bisa ditambahkan dari draft paper yang sudah dibuat kemudian diacu dalam naskah	sudah dilampirkan pada laporan akhir

#### Penilaian/Review Luaran Penelitian

No.	Komponen	Kriteria	Komentar Reviewer
1.	Identitas Luaran	Lengkap / Tidak lengkap	informasi telah lengkap
2.	Status Luaran	Memenuhi / Tidak	syarat wajib draft, syarat tambahan memenuhi
3.	Bukti Status Luaran	Ada / Tidak	disertakan bukti status
4.	Bukti Luaran / File	Ada / Tidak	bukti luaran ada
5.	URL / Link Luaran	Dapat diakses menuju luaran/tidak	syarat wajib masih draft belum bisa diakses secara online

PENELITIAN DANA INTERNAL UAD  
TAHUN AKADEMIK 2021/2022

A. DATA PENELITIAN

1. Identitas Penelitian

- a. NIY/NIP : 60010310
- b. Nama Lengkap : Dr. TOLE SUTIKNO, S.T., M.T.
- c. Judul : Desain MPPT dengan metode P&O pada sistem solar PV berbasis Arduino
- d. Lokasi Penelitian : Lab Mikroprosesor & Sistem Embedded, Teknik Elektro
- e. Lama Penelitian : 7 Bulan
- f. Tanggal Mulai : 25 April 2021
- g. Tanggal Rencana Selesai : 25 November 2021

2. Skema Penelitian

- a. Skema Penelitian : Internal - Penelitian Unggulan Program Studi
- b. Jenis Riset : Dasar
- c. Tingkat Kesiapterapan Teknologi (TKT) : 2
- d. Tujuan Sosial Ekonomi (TSE) : 06.02-Renewable energy
- e. Bidang Kepekaran : Electrical and Electonic Engineering
- f. Bidang Fokus : Energi Terbarukan dan Lingkungan
- g. Tema Penelitian : Teknologi Konservasi Energi
- h. Topik Penelitian : Pengembangan teknologi kendali sel surya
- i. Renstra Penelitian : Universitas
- j. Rumpun Ilmu : Teknik Elektro

B. SUBSTANSI PENELITIAN

Data Mitra

- a. Nama Mitra :
- b. Alamat Mitra :

C. ANGGOTA PENELITIAN

1. Anggota Internal

- Nama Anggota Internal : 1. Ahmad Raditya Cahya Baswara, S.T., M.Eng.

2. Anggota Mahasiswa

- Nama Anggota Mahasiswa : 1. M. Ulud Risaldi (1800022054)

3. Anggota Eksternal

- Nama Anggota Eksternal : -

## LAPORAN AKHIR PENELITIAN

**Ringkasan penelitian** berisi: (i) latar belakang penelitian, (ii) tujuan penelitian, (iii) tahapan metode penelitian, (iv) luaran yang ditargetkan, (v) uraian TKT penelitian yang ditargetkan serta (vi) hasil penelitian yang diperoleh sesuai dengan tahun pelaksanaan penelitian.

### RINGKASAN

Sumber energi terbarukan menjadi sumber energi alternatif dengan sumber bahan primernya mudah didapatkan. Salah satu sumber energi yang mudah didapatkan berasal dari radiasi matahari yang dapat dikonversi menggunakan fotovoltaik (PV). Dalam decade ini, PV menjadi salah satu teknologi energi terbarukan yang tumbuh paling cepat. Lebih lanjut, PV menawarkan konversi dari sumber daya yang memberikan garansi ramah lingkungan, aman dan mudah dalam perawatan. Akan tetapi, sistem PV memiliki kelemahan seperti efisiensi konversi energi yang rendah, bersifat intermiten dan karakteristik non-liniernya yang bergantung pada kondisi iradiasi dan suhu. Untuk meningkatkan efisiensi dan untuk mempertahankan titik operasi pada maximum power point yang optimal dari sistem PV, sebuah teknik yang dikenal sebagai maximum power point tracking (MPPT) digunakan untuk melacak titik daya maksimum yang sesuai setiap kali ada variasi suhu atau iradiasi dan untuk menjaga titik ini pada nilai optimal. Dalam penelitian ini, diusulkan sebuah sistem pelacakan daya maksimum berbasis mikrokontroler untuk sistem PV menggunakan metode perturb and observe (P&O). Teknik MPPT ini bekerja dengan mengatur siklus kerja converter yang terletak di antara modul PV dan beban, untuk mentransfer daya maksimum sistem PV ke beban. Tahapan penelitian yang dilakukan pertama adalah pembuatan desain rangkaian untuk disimulasikan dengan menggunakan software MATLAB/Simulink, evaluasi desain dan pengambilan data. Tahap selanjutnya, melakukan desain rangkaian dengan menggunakan software Proteus untuk membuat jalur PCB, pemasangan komponen kemudian melakukan pengujian serta evaluasi pada alat dan tahap terakhir melakukan validasi pengambilan data pada alat tersebut.

**Kata kunci** maksimal 5 kata kunci. Gunakan tanda baca titik koma (;) sebagai pemisah dan ditulis sesuai urutan abjad.

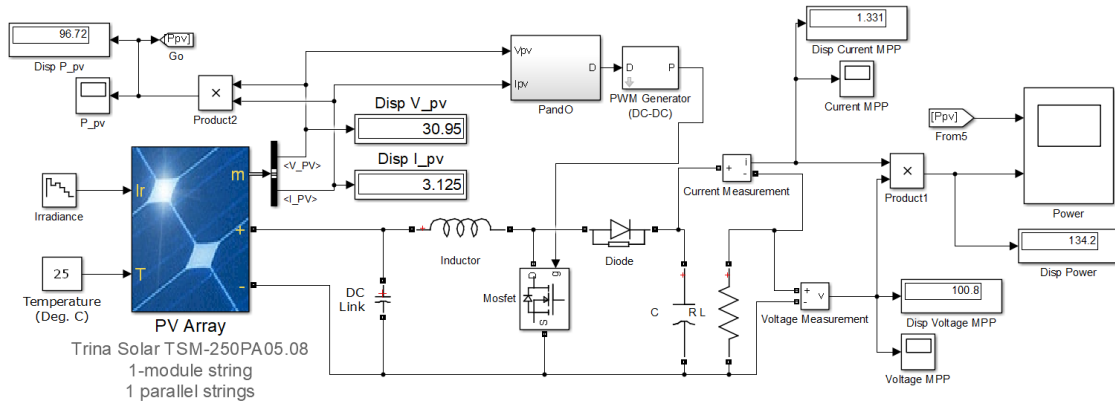
Arduino; MPPT; *Perturb and observe* (P&O); *Renewable energy*; Fotovoltaik (PV)

**Hasil pelaksanaan penelitian** berisi: (i) kemajuan pelaksanaan penelitian yang telah dicapai sesuai tahun pelaksanaan penelitian, (ii) data yang diperoleh, (iii) hasil analisis data yang telah dilakukan, (iv) pembahasan hasil penelitian, serta (v) luaran yang telah didapatkan. Seluruh hasil atau capaian yang dilaporkan harus berkaitan dengan tahapan pelaksanaan penelitian sebagaimana direncanakan pada proposal. **Penyajian data** dan **hasil penelitian** dapat berupa gambar, tabel, grafik, dan sejenisnya, serta **pembahasan hasil penelitian** didukung dengan sumber pustaka primer yang relevan dan terkini.

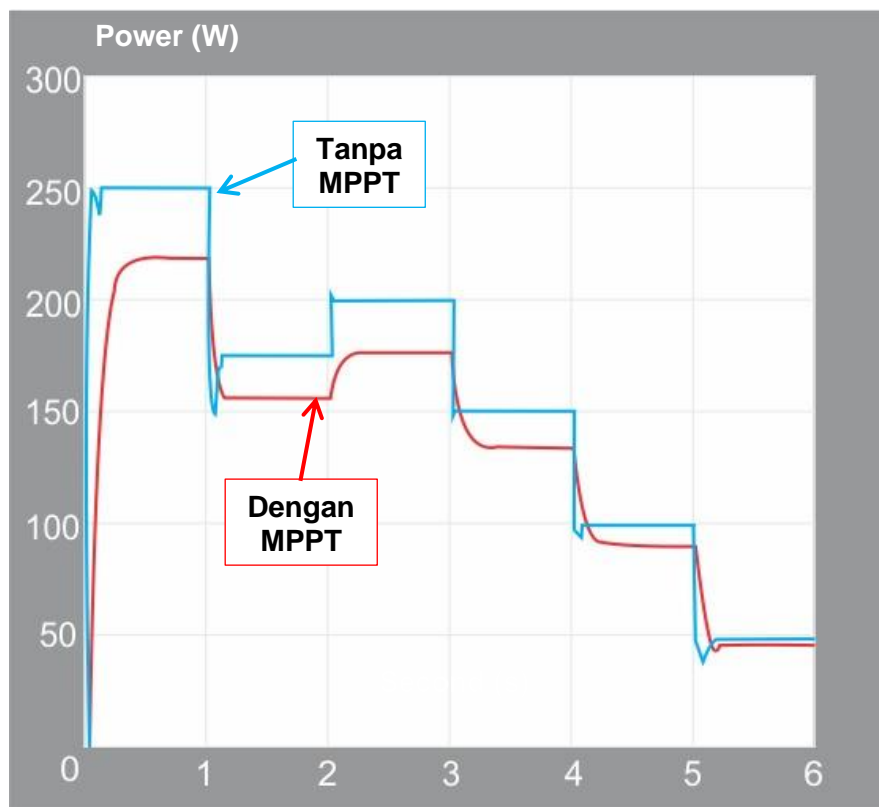
### HASIL PELAKSANAAN PENELITIAN

Tahap awal yang dilakukan dalam penelitian ini adalah membuat simulasi sistem PV lengkap dengan panel PV sebagai sumber utama, beban resistansi, dan rangkaian konverter boost yang dilengkapi dengan teknik MPPT, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Simulasi dilakukan menggunakan software MATLAB/Simulink untuk mengetahui performa metode P&O sebagai metode yang digunakan pada teknik MPPT. Hasil yang diperoleh dari simulasi ditunjukkan pada Tabel 1. Daya keluaran yang dihasilkan dari sistem MPPT berbanding dengan sistem yang tidak menggunakan MPPT

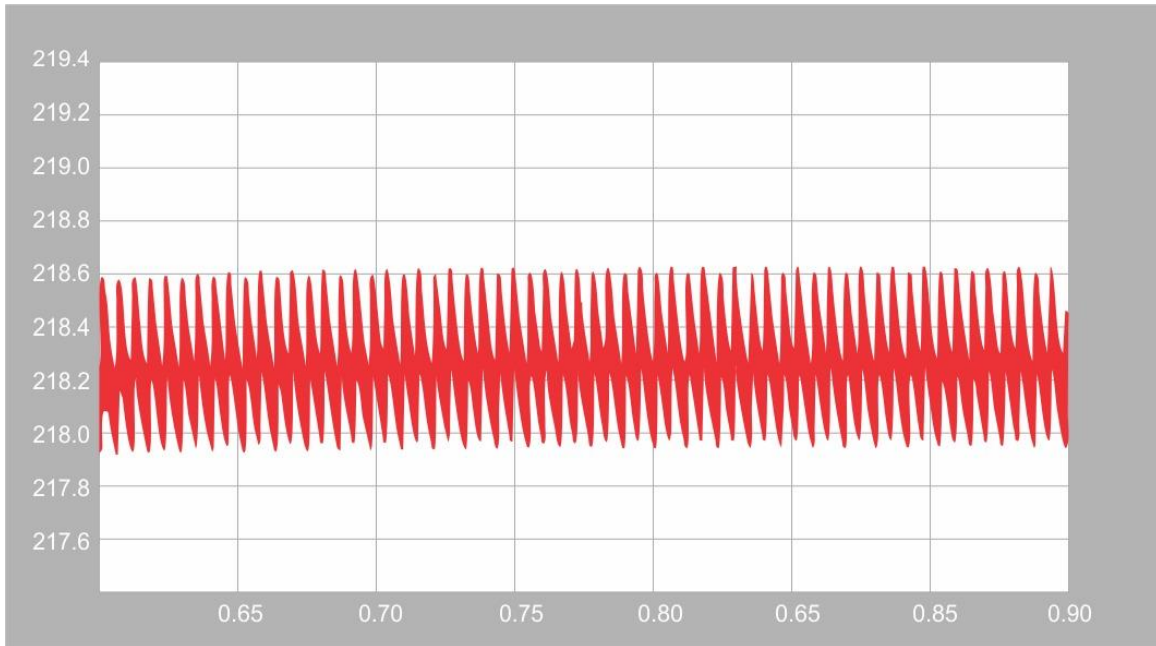
dalam variasi iradiasi matahari ditunjukkan pada Gambar 2. Sedangkan osilasi daya yang timbul pada keadaan tunak ditunjukkan pada Gambar 3. Parameter yang diamati adalah kecepatan pelacakan metode P&O dan osilasi daya pada kondisi tunak. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa metode P&O bekerja dengan baik dalam menemukan MPP pada teknik MPPT sistem PV dengan konverter boost.



Gambar 1. Simulasi sistem PV dengan MATLAB Simulink



Gambar 2. Perbandingan daya keluaran dengan sistem MPPT dan tanpa MPPT

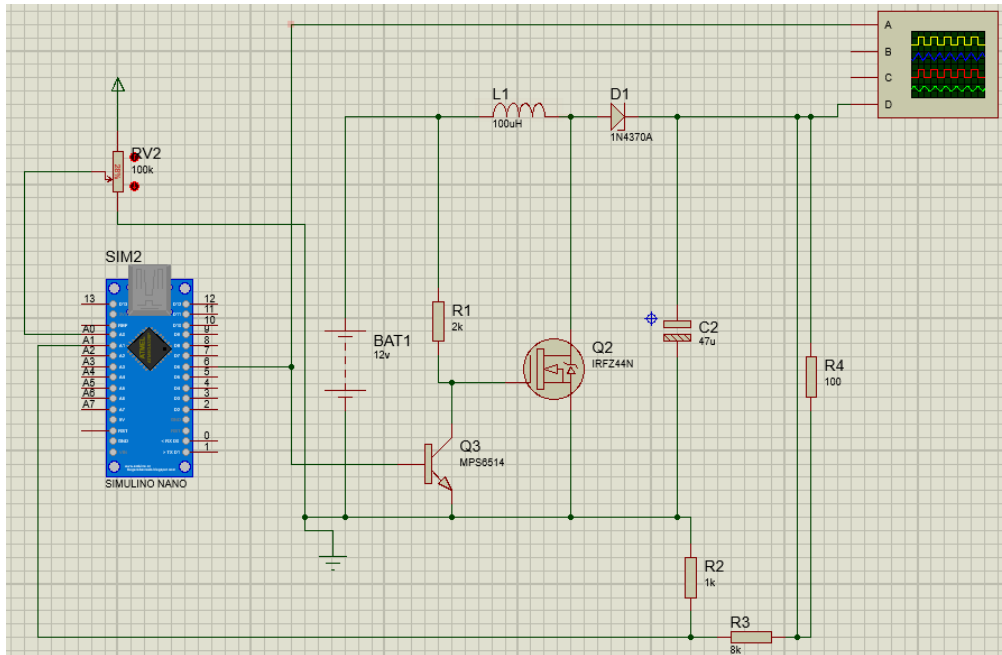


Gambar 3. Osilasi daya pada keadaan tunak

Tabel1. Hasil pengujian metode P&O

Perubahan Iradiasi ( $W/m^2$ )	Tracking Speed (s)	Osilasi Daya Steady-state (W)
0-1000	0,4	0,6
1000-700	0,125	0,6
700-800	0,2	0,15
800-600	0,35	0,5
600-400	0,3	0,45
400-200	0,25	0,28

Tahap selanjutnya yang dilakukan adalah membuat dan menganalisis rangkaian boost konverter dengan keluaran sinyal PWM (Pulse Width Modulation) menggunakan software Proteus. Dalam rangkaian ini menggunakan mikroprosesor Arduino Nano untuk membangkitkan sinyal PWM dengan software pemrogramannya yaitu Arduino IDE. Tujuan dari pembuatan rangkaian ini adalah untuk mengatur keluaran dari rangkaian agar sesuai dengan hasil yang diinginkan. Tampilan rangkaian pada software Proteus dapat dilihat pada Gambar 4 berikut:



Gambar 4. Rangkaian simulasi konverter boost sinyal PWM dengan Proteus

Port dalam mikroprocessor Arduino nano yang mendukung untuk keluaran sinyal PWM terdapat pada D3, D5, D6, D9, D10 dan D11. Dalam rangkaian ini pin yang digunakan sebagai keluaran PWM adalah pin D6, sedangkan pin A0 sebagai masukan dari potensiometer, dan A1 sebagai masukan dari feedback rangkaian. Untuk dapat membangkitkan PWM menggunakan mikroprocessor Arduino Nano maka dilakukan pemrograman pada software Arduino IDE. Tampilan listing program yang digunakan dalam rangkaian konverter boost sinyal PWM ini dapat dilihat dalam Gambar 5.

```

int potentiometer = A0; //The input from the potentiometer is A0
int feedback = A1; //The feedback input is A1
int PWM = 6; //Digital pin D3 por PWM signal
int pwm = 0; //Initial value of PWM width

void setup() {
  pinMode(potentiometer, INPUT);
  pinMode(feedback, INPUT);
  pinMode(PWM, OUTPUT);
  TCCR2B = TCCR2B & B11111000 | B00000001; // pin 3 and 11 PWM frequency of 31372.55 Hz
}

void loop() {
  float voltage = analogRead(potentiometer); //We read the value of the potentiometer, which is the desired value
  float output = analogRead(feedback); //We read the feedback, which is the real value

  //If the desired value is HIGHER than the real value, we increase PWM width
  if (voltage > output)
  {
    pwm = pwm+1;
    pwm = constrain(pwm, 1, 254);
  }

  //If the desired value is LOWER than the real value, we decrease PWM width
  if (voltage < output)
  {
    pwm = pwm-1;
    pwm = constrain(pwm, 1, 254);
  }

  analogWrite(PWM,pwm); //Finally, we create the PWM signal
}

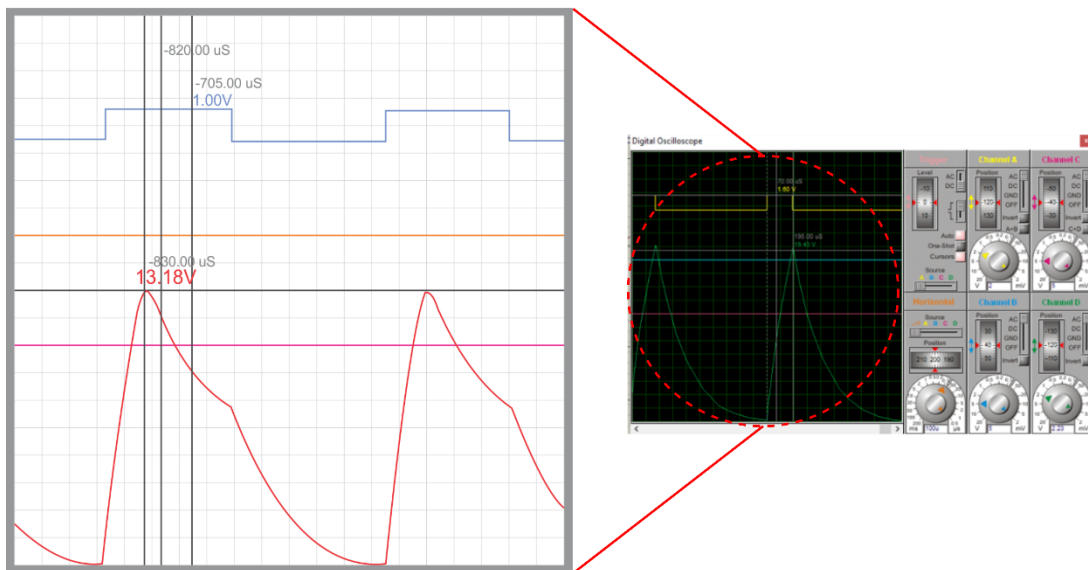
```

Gambar 5. Tampilan listing program

Karena menggunakan Arduino pada rangkaian simulasi menjadikan nilai masukan adalah sebesar 5volt dengan pengaturan nilai input dilakukan menggunakan potensiometer. Sinyal PWM dapat diamati dengan menggunakan osiloskop sehingga dapat mengamati nilai amplitudo dan lebar duty cyclenya. Dalam rangkaian simulasi pada Gambar 4, Chanel A osiloskop merupakan tampilan dari PWM untuk nilai awal dari rangkaian. Sedangkan



channel D sebagai tampilan keluaran dari PWM yang tegangannya sudah dinaikan. Sehingga tampilan gelombang pada osiloskop dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Tampilan hasil gelombang PWM osiloskop

Dari tampilan simulasi osiloskop diatas dapat dilihat bahwa terdapat kenaikan tegangan keluaran. Hal ini sudah sesuai dengan tujuan awal dari rangkaian yaitu untuk menaikkan tegangan input. Kendala yang ditemukan dalam simulasi rangkaian konverter boost sinyal PWM adalah fungsi potensio sebagai pengatur tegangan masukan tidak berfungsi, akan tetapi potensio dapat berfungsi sebagai pengatur siklus kerja.

**Status luaran** berisi **identitas** dan **status ketercapaian setiap luaran wajib** dan **luaran tambahan** (jika ada) yang dijanjikan. Jenis luaran dapat berupa publikasi, perolehan kekayaan intelektual, hasil pengujian atau luaran lainnya yang telah dijanjikan pada proposal. Uraian status luaran harus didukung dengan **bukti kemajuan** ketercapaian luaran sesuai dengan luaran yang dijanjikan. Lengkapi isian jenis luaran yang dijanjikan serta **lampirkan bukti dokumen** ketercapaian luaran wajib dan luaran tambahan.

## STATUS LUARAN

Luaran penelitian ini berupa artikel pada jurnal internasional bereputasi berstatus draft dengan judul “Power converter technologies for solar energy harvesting applications: A review” dan siap untuk disubmit. Sedangkan luaran tambahan berupa buku dengan judul “Trafo Daya: Konsep Dasar Magnetik, Material, Isolasi, Prinsip Desain dan Panduan Praktis” sudah mendapatkan ISBN.

**Peran Mitra** berupa **realisasi kerjasama** dan **kontribusi Mitra** baik *in-kind* maupun *in-cash* (untuk Penelitian Terapan dan Pengembangan). **Bukti pendukung** realisasi kerjasama dan realisasi kontribusi mitra **dilaporkan** sesuai dengan kondisi yang sebenarnya. **Lampirkan bukti dokumen** realisasi kerjasama dengan Mitra.

## PERAN MITRA

Mitra yang terlibat dalam penelitian ini adalah grup riset Embedded System and Power Electronics Research Group (ESPERG). Mitra berperan dalam membuat perangkat keras dan melakukan pengujian sistem.

**Kendala Pelaksanaan Penelitian** berisi **kesulitan** atau **hambatan** yang dihadapi selama melakukan penelitian dan mencapai luaran yang dijanjikan, termasuk **penjelasan jika** pelaksanaan penelitian dan luaran penelitian **tidak sesuai** dengan yang direncanakan atau dijanjikan.

## **KENDALA PELAKSANAAN PENELITIAN**

Kendala yang dihadapi pada penelitian ini adalah

1. Mendesain rangkaian MPPT yang sesuai dengan komponen-komponen yang digunakan memiliki efisiensi yang tinggi.
2. Menerapkan algoritma P&O pada mikrokontroler Arduino.

**Rencana Tindak Lanjut Penelitian** berisi uraian rencana tindak lanjut penelitian selanjutnya dengan melihat hasil penelitian yang telah diperoleh. Jika ada target yang belum diselesaikan pada akhir tahun pelaksanaan penelitian, pada bagian ini dapat dituliskan rencana penyelesaian target yang belum tercapai tersebut.

## **RENCANA TINDAK LANJUT PENELITIAN**

1. Membuat hardware MPPT, dengan menggunakan mikrokontroler Arduino.
2. Mengambil data hasil praktek sekala laboratorium
3. Merevisi dan submit paper ke jurnal internasional bereputasi

**Daftar Pustaka** disusun dan ditulis **berdasarkan sistem nomor** sesuai dengan urutan pengutipan. **Hanya pustaka yang disitasi/diacu** pada laporan kemajuan saja yang dicantumkan dalam Daftar Pustaka.

## **DAFTAR PUSTAKA**

1. Sutikno, T., Subrata, A. C., & Elkhateb, A. (2021). Evaluation of Fuzzy Membership Function Effects for Maximum Power Point Tracking Technique of Photovoltaic System. IEEE Access, 9, 109157-109165.
2. Subrata, A. C., Sutikno, T., Padmanaban, S., & Purnama, H. S. (2019, September). Maximum Power Point Tracking in PV Arrays with High Gain DC-DC Boost Converter. In 2019 6th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI) (pp. 358-362). IEEE.
3. Jusoh, A. B., Mohammed, O. J. E. I., & Sutikno, T. (2015). Variable step size Perturb and observe MPPT for PV solar applications. TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control), 13(1), 1-12.
4. Jusoh, A., Alik, R., Guan, T. K., & Sutikno, T. (2017). MPPT for PV system based on variable step size p&o algorithm. Telkomnika, 15(1), 79.
5. Jusoh, A., Sutikno, T., Guan, T. K., & Mekhilef, S. (2014). A Review on favourable maximum power point tracking systems in solar energy application. Telkomnika, 12(1), 6.

## **Lampiran-Lampiran**



SURAT PERJANJIAN PELAKSANAAN PENELITIAN  
Nomor : PUPS-297/SP3/LPPM-UAD/VI/2021

Pada hari ini, Selasa tanggal Satu bulan Juni tahun Dua ribu dua puluh satu (01-06-2021), kami yang bertandatangan di bawah ini :

1. Nama : Anton Yudhana, S.T., M.T., Ph.D.  
Jabatan : Kepala Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat Universitas Ahmad Dahlan (LPPM UAD), selanjutnya disebut sebagai PIHAK PERTAMA.
2. Nama : Dr. Tole Sutikno, S.T., M.T.  
Jabatan : Dosen/Peneliti pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri (FTI) Universitas Ahmad Dahlan (UAD), selaku Ketua Peneliti, selanjutnya disebut PIHAK KEDUA.

Kedua belah pihak menyatakan setuju dan mufakat untuk mengadakan perjanjian pelaksanaan penelitian untuk selanjutnya disebut Surat Perjanjian Pelaksanaan Penelitian (SP3) dengan ketentuan dan syarat-syarat sebagai berikut.

Pasal 1  
DASAR HUKUM

- (1) Hasil review/penilaian proposal yang dilakukan oleh Tim Reviewer Penelitian Internal UAD.
- (2) Surat Keputusan Kepala LPPM UAD Nomor: U12.3/316/V/2021 tanggal 29 Mei 2021 tentang Penetapan Hasil Seleksi Proposal Penelitian Dana UAD Tahun Akademik 2020/2021.

Pasal 2

RUANG LINGKUP DAN JANGKA WAKTU PENELITIAN

- (1) PIHAK PERTAMA memberikan pekerjaan kepada PIHAK KEDUA dan PIHAK KEDUA menyatakan menerima pekerjaan dari PIHAK PERTAMA berupa kegiatan penelitian sebagai berikut :
  - Skema : Penelitian Unggulan Program Studi
  - Judul penelitian : Desain MPPT dengan metode P&O pada sistem solar PV berbasis Arduino
  - Jenis Riset : Dasar, TKT : 2
  - Luaran Wajib : Artikel di jurnal Internasional
- (2) Jangka waktu pelaksanaan penelitian tersebut pada ayat (1) dimulai sejak ditandatanganinya SP3 ini sampai dengan batas akhir unggah Laporan Akhir Penelitian pada tanggal 31 Desember 2021

Pasal 3

PERSONALIA PELAKSANA PENELITIAN

Personalia pelaksana penelitian ini terdiri dari :

- Ketua Peneliti : Dr. Tole Sutikno, S.T., M.T.  
Pembimbing : -  
Anggota : 1. Ahmad Raditya Cahya Baswara, S.T., M.Eng.

Pasal 4

BIAYA PENELITIAN DAN CARA PEMBAYARAN

- (1) PIHAK PERTAMA menyediakan dana pelaksanaan penelitian kepada PIHAK KEDUA sejumlah Rp. 13.500.000,00 (Tiga Belas Juta Lima Ratus Ribu Rupiah) yang dibebankan pada Anggaran Pendapatan dan Belanja (APB) LPPM UAD Tahun Akademik 2020/2021 dibayarkan melalui rekening bank atas nama Ketua Peneliti oleh Biro Keuangan dan Anggaran UAD sebagai berikut :
- Nama : Dr. Tole Sutikno, S.T., M.T.  
Nama Bank : BPD DIY KONVENSIONAL  
Nomor Rekening : 001221007462
- (2) Tahap I sebesar  $70\% \times \text{Rp } 13.500.000,00 = \text{Rp } 9.450.000,00$  (sembilan juta empat ratus lima puluh ribu Rupiah), dibayarkan setelah SP3 ini ditandatangani oleh PARA PIHAK dan PIHAK KEDUA telah mengunggah file kontrak SP3 ini pada portal Penelitian UAD.
- (3) Tahap II sebesar  $30\% \times \text{Rp } 13.500.000,00 = \text{Rp } 4.050.000,00$  (empat juta lima puluh ribu Rupiah), dibayarkan setelah (a) PIHAK KEDUA mengunggah Laporan Akhir Penelitian dan (b) luaran wajib penelitian dinyatakan tercapai.
- (4) Jika sampai pada batas akhir penelitian PIHAK KEDUA hanya dapat mengunggah Laporan Akhir Penelitian dan TIDAK DAPAT merealisasikan luaran wajib, maka dana penelitian Tahap II hanya dapat dicairkan sebesar 15%.

Pasal 5

PELAKSANAAN PEMBIMBINGAN

- (1) Khusus skema Penelitian Dosen Pemula (PDP), peneliti wajib melakukan pembimbingan atau konsultasi dengan dosen pembimbing penelitian paling sedikit 4 (empat) kali pembimbingan.
- (2) Pembimbingan sebagaimana dimaksud dalam ayat (1) antara lain dalam hal-hal berikut.
- penyusunan angket/kuesioner dan atau teknik pengumpulan data lainnya;
  - analisis data dan interpretasinya;
  - penyusunan hasil penelitian, pembahasan, penarikan kesimpulan;
  - penyusunan luaran penelitian.
- (3) Pembimbingan sebagaimana dimaksud dalam ayat (1) dan ayat (2) dituliskan sesuai dengan template form pembimbingan yang tersedia.

Pasal 6  
JENIS LAPORAN PENELITIAN

- (1) PIHAK KEDUA wajib menyusun dan mengunggah laporan penelitian melalui portal Penelitian UAD yang terdiri atas :
  - a. Laporan Kemajuan
  - b. Laporan Akhir
- (2) Berkas Laporan Kemajuan digunakan sebagai bahan monitoring dan evaluasi (monev) internal, diunggah selambat-lambatnya tanggal 15 Oktober 2021.
- (3) Berkas Laporan Akhir digunakan sebagai acuan pencairan dana Tahap II dan bahan pertimbangan berlanjut atau tidaknya kontrak penelitian tahun jamak (multi years), diunggah selambat-lambatnya tanggal 31 Desember 2021.

Pasal 7  
LUARAN WAJIB PENELITIAN

- (1) PIHAK PERTAMA berkewajiban untuk merealisasikan luaran wajib penelitian sebagaimana yang dijanjikan dalam proposal.
- (2) Status minimal luaran wajib yang harus dicapai oleh PIHAK KEDUA adalah sebagai berikut. (i) accepted untuk jenis luaran artikel jurnal/seminar/konferensi, atau (ii) naik cetak untuk jenis luaran buku, atau (iii) diterima atau dibahas instansi pengguna untuk jenis luaran naskah akademik, atau (iv) telah terdaftar atau didaftarkan untuk jenis kekayaan intelektual (KI), atau (v) telah terwujud atau telah dilakukan uji laboratorium untuk jenis luaran purwarupa (prototipe), dan sejenisnya.

Pasal 8  
MONITORING DAN EVALUASI

- (1) PIHAK PERTAMA berhak untuk melakukan monitoring dan evaluasi (monev) pelaksanaan penelitian, baik secara administrasi maupun substansi.
- (2) Pemantauan kemajuan penelitian dilakukan oleh Tim Monev yang dibentuk oleh PIHAK PERTAMA.
- (3) Monev internal dilakukan terhadap dokumen Laporan Kemajuan yang diunggah oleh PIHAK KEDUA.
- (4) PIHAK PERTAMA berhak untuk menentukan lanjut atau putusnya kontrak penelitian tahun jamak (multi years) berdasarkan hasil dari monev tahap II terhadap Laporan Akhir dan capaian luaran penelitian tahun berjalan yang diunggah PIHAK KEDUA.

Pasal 9  
TANGGUNGAN PENELITIAN DAN LUARAN PENELITIAN

- (1) Peneliti dinyatakan memiliki tanggungan penelitian apabila sampai pada masa penerimaan proposal penelitian periode berikutnya belum menyelesaikan kewajiban unggah Laporan Akhir Penelitian.
- (2) Peneliti yang memiliki tanggungan penelitian sebagaimana dimaksud pada ayat (1) tidak diperkenankan mengajukan proposal penelitian pada periode tersebut.
- (3) Peneliti dinyatakan memiliki tanggungan luaran penelitian apabila sampai pada masa akhir unggah Laporan Akhir Penelitian, luaran wajib belum tercapai dengan status minimal seperti disebutkan pada Pasal 7 ayat (2).

- (4) Peneliti yang memiliki tanggungan luaran penelitian sebagaimana dimaksud pada ayat (3) masih diperkenankan mengajukan proposal penelitian pada periode terdekat.
- (5) Peneliti yang belum memenuhi luaran wajib sampai pada penerimaan proposal penelitian pada periode tahun berikutnya tidak diperkenankan mengajukan proposal pada periode tersebut.
- (6) Tanggungan penelitian dan/atau luaran wajib penelitian berlaku bagi Ketua dan Anggota peneliti dari Universitas Ahmad Dahlan.

#### Pasal 10

#### SANKSI DAN PEMUTUSAN PERJANJIAN PENELITIAN

- (1) PIHAK PERTAMA berhak memberikan peringatan dan atau teguran atas kelalaian dan atau pelanggaran yang dilakukan oleh PIHAK KEDUA yang mengakibatkan tidak dapat terpenuhinya kontrak penelitian ini.
- (2) PIHAK PERTAMA berhak melakukan pemutusan perjanjian penelitian, jika PIHAK KEDUA tidak mengindahkan peringatan yang diberikan oleh PIHAK PERTAMA.
- (3) Segala kerugian material maupun finansial yang disebabkan akibat kelalaian PIHAK KEDUA, maka sepenuhnya menjadi tanggungjawab PIHAK KEDUA.
- (4) Jenis sanksi yang diberikan dapat berupa :
  - (a) tidak diperkenankannya mengajukan proposal penelitian sebagaimana dimaksud pada Pasal 9 ayat (5) sampai kewajibannya terselesaikan; dan atau
  - (b) tidak dapat mencairkan dana Tahap II; dan atau
  - (c) mengembalikan dana yang telah diterima oleh PIHAK KEDUA.

#### Pasal 11

#### KEADAAN MEMAKSA (FORCE MAJEUR)

Ketentuan dalam Pasal 10 tersebut di atas tidak berlaku dalam keadaan sebagai berikut :

- a. Keadaan memaksa (force majeure)
- b. PIHAK PERTAMA menyetujui atas terjadinya keterlambatan yang didasarkan pada pemberitahuan sebelumnya oleh PIHAK KEDUA kepada PIHAK PERTAMA dengan Surat Pemberitahuan mengenai kemungkinan terjadinya keterlambatan dalam penyelesaian kegiatan penelitian sebagaimana dimaksud dalam Pasal 2; dan sebaliknya PIHAK KEDUA menyetujui terjadinya keterlambatan pembayaran sebagai akibat keterlambatan dalam penyelesaian perjanjian penelitian.

#### Pasal 12

- (1) Keadaan memaksa (force majeure) sebagaimana yang dimaksud dalam Pasal 11 ayat (1) adalah peristiwa-peristiwa yang secara langsung mempengaruhi pelaksanaan perjanjian serta terjadi di luar kekuasaan dan kemampuan PIHAK KEDUA ataupun PIHAK PERTAMA.
- (2) Peristiwa yang tergolong dalam keadaan memaksa (force majeure) antara lain berupa bencana alam, pemogokan, wabah penyakit, huru-hara, pemberontakan, perang, waktu kerja diperpendek oleh pemerintah, kebakaran dan atau peraturan pemerintah mengenai keadaan bahaya serta hal-hal lainnya yang dipersamakan dengan itu, sehingga PIHAK KEDUA ataupun PIHAK PERTAMA terpaksa tidak dapat memenuhi kewajibannya.



- (3) Peristiwa sebagaimana dimaksud pada ayat (2) tersebut di atas, wajib dibenarkan oleh penguasa setempat dan diberitahukan dengan surat pemberitahuan oleh PIHAK KEDUA kepada PIHAK PERTAMA atau PIHAK PERTAMA kepada PIHAK KEDUA yang menyebutkan telah terjadinya peristiwa yang dikategorikan sebagai keadaan memaksa (force majeure).
- (4) PIHAK PERTAMA memberikan kesempatan kepada PIHAK KEDUA untuk menyelesaikan perjanjian kontrak ini sampai pada batas waktu yang disepakati oleh PARA PIHAK jika keadaan force majeure dinyatakan telah selesai.

Pasal 13  
PENYELESAIAN PERSELISIHAN

- (1) Apabila dalam pelaksanaan perjanjian dan segala akibatnya timbul perbedaan pendapat atau perselisihan, PIHAK PERTAMA dan PIHAK KEDUA setuju untuk menyelesaikannya secara musyawarah untuk mencapai mufakat.
- (2) Apabila penyelesaian sebagaimana termaksud dalam ayat (1) di atas tidak tercapai, maka PIHAK PERTAMA dan PIHAK KEDUA sepakat menyerahkan perselisihan tersebut melalui mediasi dengan Rektor sebagai atasan langsung dari PIHAK PERTAMA yang putusannya bersifat final dan mengikat.

Pasal 14  
PENGUNDURAN DIRI

- (1) Apabila PIHAK KEDUA mengundurkan diri atau membatalkan SP3 ini, maka PIHAK KEDUA wajib mengajukan Surat Pengunduran Diri yang ditujukan kepada PIHAK PERTAMA.
- (2) Surat Pengunduran Diri sebagaimana dimaksud pada ayat (1) wajib disahkan oleh dekan fakultas ketua peneliti yang bersangkutan.
- (3) PIHAK KEDUA wajib mengembalikan dana yang telah diterima kepada PIHAK PERTAMA

Pasal 15  
LAIN-LAIN

- (1) Hal-hal yang dianggap belum cukup dan perubahan-perubahan perjanjian akan diatur kemudian atas dasar permufakatan kedua belah pihak yang akan dituangkan dalam bentuk Surat atau Perjanjian Tambahan (addendum), yang merupakan satu kesatuan dan bagian yang tidak terpisahkan dari perjanjian awal.
- (2) Surat Perjanjian Pelaksanaan Penelitian (SP3) ini berlaku sejak ditandatangani dan disetujui oleh PARA PIHAK.

PIHAK PERTAMA,



Anton Yudhana, S.T., M.T., Ph.D.  
NIP/NIY. 60010383

PIHAK KEDUA,



Dr. Tole Sutikno S.T., M.T.  
NIP/NIY. 60010310



## DC-DC converter technologies for solar energy harvesting applications: A review

Tole Sutikno<sup>1,2</sup>, Hendril Satrian Purnama<sup>2</sup>, Ahmad Raditya Cahya Baswara<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departement of Electrical Engineering, Ahmad Dahlan University

<sup>2</sup>Embedded System and Power Electronic Research Group (ESPERG)

---

### Article Info

#### Article history:

Received Jun 12, 201x

Revised Aug 20, 201x

Accepted Aug 26, 201x

---

#### Keyword:

DC-DC Converter

Energy Harvesting

Renewable Energy

Solar Photovoltaic

---

### ABSTRACT

The lack of clean energy and massive use of fossil fuel affected to environmental issue, make the renewable energy resources (RES) become very interesting solution day by day. Photovoltaic (PV) based power plants have become the most favorable RES among order, due to less maintenance and high reliability. One of the most important parts of a PV energy harvesting system is the power converter. The power converter which is the most important part is the DC-DC converter. The DC-DC converter works as a regulator of the output voltage from the PV to the voltage required by the load. DC-DC converters that have been developed today vary widely, depending on the needs of the power range and the intended use. In this paper, various topologies and types of DC-DC converters used in PV energy harvesting systems are briefly reviewed. At the end, the comparison between each converter is presented in the form of a table which refers to several parameters related that to performance, complexity, and cost.

*Copyright © 2022 Institute of Advanced Engineering and Science.*

*All rights reserved.*

---

### Corresponding Author:

Tole Sutikno,

Departement of Electrical Engineering,

Ahmad Dahlan University,

South Ringroad st., Kragilan, Tamanan, Banguntapan, Bantul Regency, Special Region of Yogyakarta

55191 Email: ts@ee.uad.ac.id

---

## 1. INTRODUCTION (10 PT)

In recent years, due to the lack of clean energy and massive use of fossil fuel that affect environmental issue, the renewable energy resources (RES) have become very interesting solutions. Among all Renewable Energy Sources (RES), Photovoltaic (PV) based power plants have become the most favorable because of their unique advantages such as longer life, environmental friendliness, less maintenance, higher mobile and portability, and the ability to produce more power to meet loads requirements. Thanks to the researchers that make the solar PV technologies has become more affordable and advance day by days [1].

Tracking the maximum power point of solar power has become a major problem due to the non-linear behaviour in the current-voltage (I-V) characteristics of PV panels operated using the maximum power point tracking (MPPT) algorithm. Because the power provided by the PV panels is highly dependent on the atmospheric conditions commonly referred to as solar radiation and the temperature of the accessible cell. These parameters are inconsistent and vary according to atmospheric conditions. Therefore, it is necessary to use the MPPT algorithm [2]. MPPT is an essential component in a solar PV system to draw maximum power. Furthermore, converters used with MPPT are expected to achieve load matching and provide maximum power from the PV panels [3].

The DC power converters has played the most important role on solar PV energy harvesting system due to the need of energy transfer matching from the solar PV harvesting systems to the loads. In recent years, the DC power converters is become more advance and suitable for solar PV systems, due to increasing efficiency and higher reliability. On the other hand, DC power converter topologies has continuously developed by many researchers in the world. This causes the development of power converter technology that is increasing rapidly and become more advanced, so that the choice of converters that suitable for various conversion applications becomes more and more varied.

In this paper, the discussion will focus on the DC-DC converter technology used for solar PV energy harvesting systems. Discussions related to the structure as well as the advantages and disadvantages of these converter topologies are provided. At the end of the section comparison of the discussed converters are provided in tabular form.

## 2. SOLAR ENERGY HARVESTING SYSTEM

Energy harvesting is the process of collecting and converting energy from available sources in the surrounding environment into useful electrical energy. Harvesting energy from sunlight is one of a good solution to overcome the world's energy needs which are increasing day by day.

The overall solar energy harvesting system is consisting of many devices and components, such as Solar PV array, MPPT controller, DC-DC converter, battery, load (AC/DC), inverter, etc. The complete block diagram of the solar energy harvesting system is shown in Figure1.

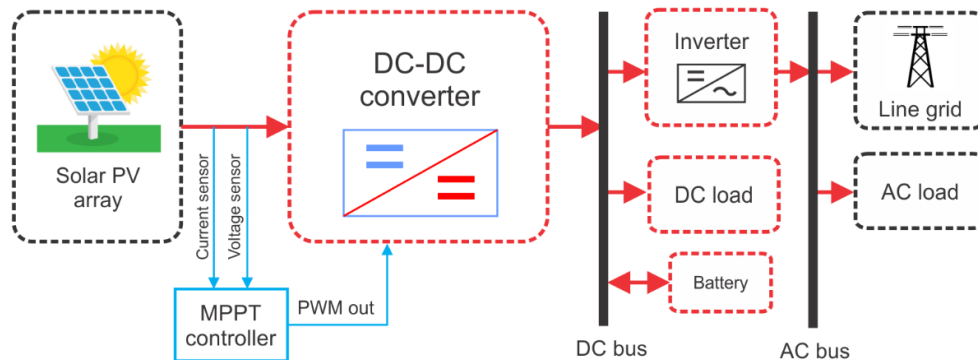


Figure 1. Block diagram of overall Solar PV energy harvesting systems

Solar PV array functions as a converter or harvester of solar energy and then converts it into electrical energy. Then the DC-DC converter functions as a converter of the variable DC voltage that generated by PV into a fixed voltage according to load requirements. On the other hand, there is also an MPPT controller that functions as a PWM controller for the DC-DC converter so that maximum power conversion results and minimum loss are obtained. After going through the DC-DC converter, the power will go to the load side which varies according to needs, for example DC Load, Battery, or inverter which will then convert DC electricity into AC electricity so that the system can be connected to the grid or supply an AC load.

## 3. OVERVIEW POWER CONVERTER TECHNOLOGIES FOR SOLAR ENERGY HARVESTING SYSTEM

The evolution of power electronics technology has brought significant changes to the development of power converter technologies, especially for renewable energy power harvesting applications. In this paper we will focus on reviewing the converter technology for solar photovoltaic energy harvesting application, which is the DC-DC converter topologies.

DC-DC converter topologies are basically categorized into isolated & non-isolated converters. The isolation refers to an electrical barrier between the input and output of the converter. Normally, the High-frequency transformers is act as the barrier. That barrier is also used as a high voltage conversion device. Furthermore, these isolated converters can be configured as positive or negative. But, in the other hand, the barrier on the power converter causes bulky and heavy in terms of the size of the converter, besides that the power losses caused by the barrier are also quite large.

In recent years, the usage of Isolated converter is started to replace with non-isolated converters, along with the rapid development of power electronics and converter technologies. Because, in non-isolated converters this barrier is absent. Thanks to the evolution of DC-DC converter technologies benefits on more advance systems, but also more affordable and efficient.

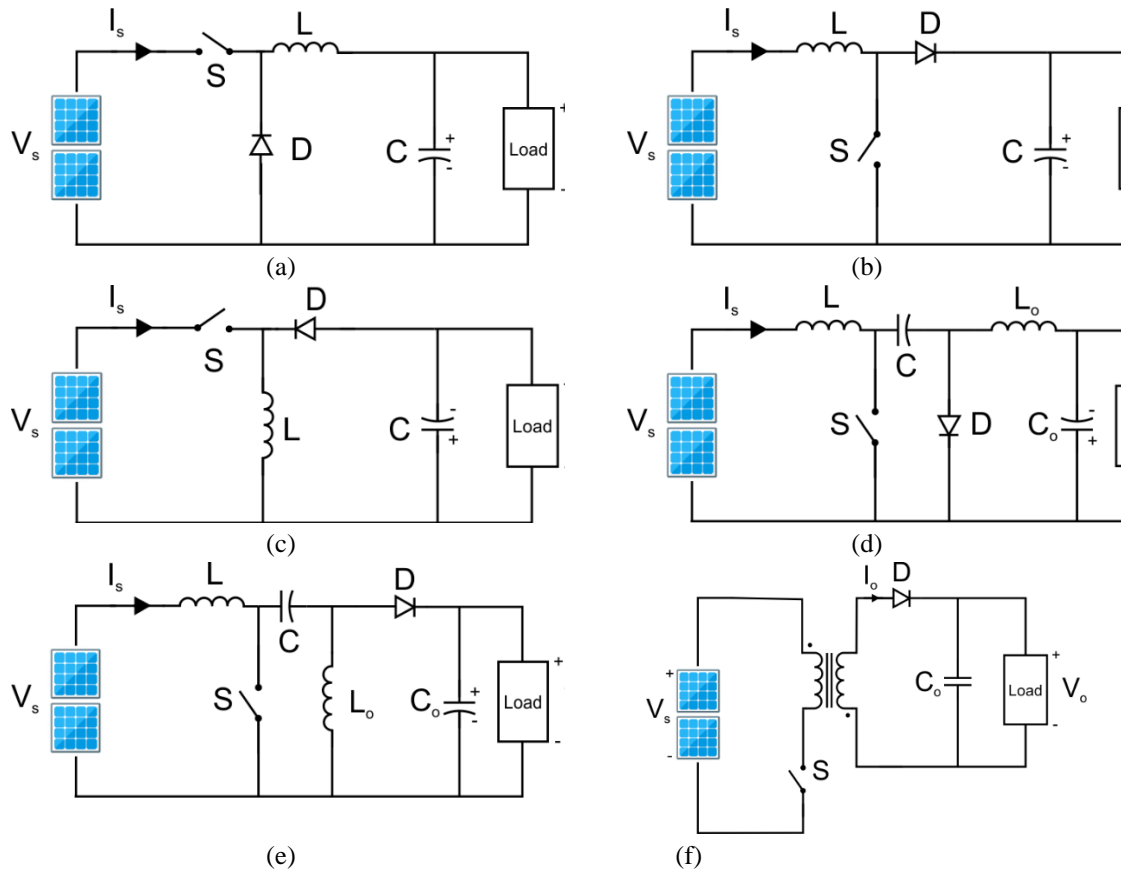


Figure 2. Circuit topology of DC-DC Converters for PV applications: (a) buck converter, (b) boost converter, (c) buck-boost converter, (d) CUK converter, (e) SEPIC converter, (f) Flyback converter.

#### 4. CURRENT POWER CONVERTER TECHNIQUES FOR SOLAR ENERGY HARVESTING SYSTEM

##### 4.1. Buck DC-DC Converter

A typical buck DC-DC converter is shown in Figure 2 (a). It consists of one power switches and one inductor. The buck converter operates in two phases and regulates output voltage that is higher than input voltage. The output voltage can be adjusted by changing the duty cycle  $D$  on the power switches. The relationship between input and output voltage can be calculated as follows:

$$V_{OUT} = DV_{IN}$$

The DC-DC buck converter is used in many applications in solar PV generation systems, such as in standalone solar PV pumping system for the water supply in rural areas, solar battery charger, grid-connected MPPT tracking, the off-grid PV systems, etc.

##### 4.2. Boost DC-DC Converter

Figure 2(a). shows the basic circuit topology of the DC-DC boost converter consisting of a switch (S), inductor (L), diode (D), capacitor (C), switching control and also the load (R). This topology can be used as an interface connection between the low voltage of the PV array to the high input voltage of the battery bank or with various types of DC loads [4]. The DC-DC boost converter will increase the output voltage to be greater than the input voltage [5], [6]. The controller will control the on and off switch to increase the voltage from the input to the required or desired output voltage value. When the switch is turned on, the diode will be in reverse bias and electrical energy will be stored in the inductor. Thus, the capacitor will supply current to the load. When the switch is turned off, the electrical energy stored in the inductor will be transferred to the capacitor and load. The DC-DC boost converter has two types of operation namely, continuous-conduction mode (CCM) and discontinuous-conduction mode (DCM). When the DC-DC boost converter operates in CCM mode, the current in the inductor will be always greater than zero. Meanwhile, during DCM mode, the inductor current will drop to zero shortly after the switching cycle [7]–[9]. Recent research trends for DC-DC boost converters with PV-based power quality management, among others, are related to harmonic elimination, zero voltage regulation, load balancing and power factor correction [10]–[12]

### 4.3. Buck-Boost DC-DC Converter

The circuit topology of the DC-DC buck-boost converter is similar to the DC-DC boost converter, the difference is the placement of the switching element, which is before the inductor (L) as shown in Figure 2 (b). A DC-DC buck-boost converter or what is known as a step-up/down converter can produce an output voltage that is lower or higher than its input voltage as an interface to connect the PV array voltage according to the DC load or battery voltage [4]. A DC-DC buck-boost converter is a multilevel connection of two basic converters namely a buck and a boost DC-DC converter. The output voltage of this converter can be controlled by changing the duty cycle (D). If the duty cycle is lower than 50%, the converter will operate in buck mode and the output voltage will be less than the input voltage. When the duty cycle is greater than 50%, the converter will operate in boost mode and the output voltage will be greater than the input voltage [7].

### 4.4. CUK DC-DC Converter

The basic construction of the Cuk converter, as shown in Figure 2(d), can be better understood by looking at the basic buck-boost converter which is replaced with a capacitor instead of an inductor used for energy storage and power transfer. On the other hand, the flyback DC-DC converter has a capacitive energy with a negative output [13]. The output voltage polarity of the choke converter should be reversed according to the input voltage. With the appropriate connections, the converter output is reversed resulting in a ripple-free output which can then be used for various load application requirements [14]–[16].

In the literature [17]–[21], various types of conventional Cuk converters are presented. The overall efficiency level of the modified Cuk converter is recommended for optimal bidirectional operation and aims to regulate voltage and current [22]. In closed loop system, there are various techniques such as proportional-integral (PI) and sliding mode control (SMC) which can be combined with fuzzy logic controller (FLC) to control the output voltage [23], [24]. In addition, the Cuk converter can also be used in BLDC motor drive circuits [13] and renewable energy applications such as PWM-based PV power generation systems [25]–[29]

### 4.5. SEPIC DC-DC Converter

The single-ended primary inductance converter (SEPIC) is shown in Figure 2 (c). commonly referred as a SEPIC converter. Basically, during switching period, the ON time is more than the OFF time to achieve a higher output voltage, due to more charging time for the inductor. Otherwise, the converter will stop providing the required output voltage. This is because the capacitor cannot be fully charged.

Several problems need to be considered when designing a converter. When the high-frequency transformer is operated with a conventional SEPIC converter, the ripple in the output voltage should be reduced. This arrangement benefits from key features such as continuous output current, minimized switching voltage, and output ripple [30]–[32]. During AC-DC conversion, certain harmonics are induced, which causes ripples in the AC current, which can ultimately result in a reduction in the power factor.

When the SEPIC converter is operating in boundary conduction mode (BCM), it can be used for power factor correction on AC lines [33]. In solar power plants, SEPIC can be widely applied to control DC voltage flicker. To increase robustness, there are various control methodologies applied such as PI control, sliding mode control, dP/dV feedback control, FLC is recommended to achieve maximum power [34]–[36]. The SEPIC converter is implemented for sensorless control of solar-powered DC motors which can extend its application to solar-based transport [37]. Soft switching is used to reduce losses during converter design, which can further be used to minimize output current ripple [13], [38].

### 4.6. Flyback DC-DC Converter

Flyback converters are generally applied in PV systems with very low power ranges [39]. When a high gain converter is required with a transformer, a commonly used solution is the use of a flyback converter. In high power applications, for the purpose of saving a lot of energy, transformers require relatively large air gaps. Since the large air gap results in a low magnetizing inductance, the flyback converter has a large flux leakage and poor power transfer efficiency. Although the Cuk converter is more efficient for high power applications, it has several disadvantages, such as the inverting output polarity and high current flow in the power switch and output diode [40].

Since the passive decoupling capacitor at the input is temperature sensitive, this can decrease the reliability and overall efficiency of the converter. This problem can be overcome by an active power decoupling method in which the decoupling capacitor is coupled with an inverter [41], [42] or by the using of additional DC power filtering circuit [43].

In the flyback converter, there is the possibility of a partial discharge in the magnetizing inductance of the transformer. This can cause the behavior of the inverter as an off-load voltage source. Therefore, flyback operations in CCM are not quite common [44]. A converter with a switch operating under BCM mode provides

higher power levels and a larger switching frequency bandwidth, but it is difficult to obtain a precise relationship between the module output current and standard current due to the variable switching frequency [45]. The efficiency of the flyback converter can be increased by ZVS operation [46]. Soft switching can be achieved by clamping circuits and resonance-based flyback inverters [47].

## 5. FUTURE POWER CONVERTER TECHNIQUES FOR SOLAR ENERGY HARVESTING SYSTEM

### 5.1. Voltage Multiplier Circuit (VMC)

The boost converter circuit with VMC topology consists of a multiplier cell circuit (VMC Cell) and the basic components that make up the boost converter circuit. There are several topological variants of the VMC cell which are a combination of passive components such as capacitors and inductors, and active semiconductor components such as diodes and switches. The combination of these components creates a multiplier circuit that has its own characteristics.

The main features of the VMC topology are modular with a simple structure and low voltage stress on the semiconductor components. But on the other hand, this type of converter has some disadvantages such as; (i) Limited voltage gain, (ii) The number of components tends to be more, and (iii) Poor voltage regulation [48].

Many researchers have developed and modified VMC-based DC-DC converters for renewable energy applications and smart grid applications [49]–[54]. This converter is very suitable for applications in PV systems because of its ability to increase the low voltage from PV to high voltage levels according to the needs of the system connected to the network.

### 5.2. Coupled Inductor & Switched Capacitor (CI & SC)

A wide voltage conversion range can be obtained by combining a coupled inductor and a switched capacitor [55], [56]. Meanwhile, the problem of reverse diode recovery and output is solved by leakage inductance of the coupled inductor. The ZCS ON switch can be used to reduce switching losses. With the inclusion of a lossless passive clamp circuit [57], the leaked energy can be recycled and the voltage ripple on the power switch can be reduced.

Se, et. al. [58] combines the advantages of switched capacitor, coupled inductor & VMC. The addition of a switched capacitor cell not only increases the voltage gain, but also reduces stress on the semiconductor components/devices. High voltage gain can be achieved by adding a coupled inductor circuit to determine the turns ratio. When this is coupled with a voltage multiplier circuit, the leakage energy from the coupled inductor is recirculated to the output terminals with lossless passive clamping performance. Coupled inductor (CI) and switched capacitor (SC) combinations are most widely adapted for high voltage gain. Its common feature is that the voltage conversion ratio can be controlled by PWM mode; at least active switches and magnetic components are used

### 5.3. Coupled Inductor (CI)

The coupled inductor is a valuable component of a non-isolated dc-dc converter that stores energy in one cycle and powers the load in the other. Since many applications do not require electrical isolation, the use of coupled inductors provides a useful alternative enhancement technique in dc-dc converters that can be achieved by tapping or simply combining inductors.

Coupled inductors are generally used to increase the voltage gain. This method can achieve high voltage gain and efficiency by changing the turns ratio of the coupled inductors and energy recovery from the leakage inductance. In addition, a low off-state voltage can be provided by this method for the main switch [59]. Most of these converters have high input current ripple and require a large input filter. As a result, the application of this method is limited. In addition, there is a delay in reverse diode recovery due to the leakage inductance of the coupled inductor; the increase in size and price is another drawback of this method [60].

### 5.4. Cascaded Topology

The multistage converter connection is the simplest approach to increasing the voltage gain. In this DC-DC converter topology, two or more boost converters can be connected in a cascaded form which can be called a quadratic group or several types of step-up converters connected in a cascaded form can be called a hybrid group [61].

Due to its ease of implementation and analysis, the multilevel DC-DC converter topology is a converter topology that is often used in various voltage amplification applications [62]. On the other hand, this converter has several drawbacks, such as the use of more components as the need for increased voltage increases. It can also increase power losses so that this converter becomes less efficient in certain applications.

### 5.5. Voltage Lift techniques

Voltage lift (VL) technique is a useful method widely used in DC-DC converters to increase the output voltage level [63]. This technique is based on charging the capacitor to a certain voltage (e.g. input voltage) and then increasing the output voltage (voltage lifting) with the voltage level of the charged capacitor. By repeating this operation with the inclusion of additional capacitors to create the so-called rebound, triple-lift, and quadruple-lift circuits, the output voltage level can be increased labia high.

The VL technique is one of the best techniques in terms of performance in increasing the voltage on the DC-DC converter, besides having high efficiency, the VL technique is also capable of operating over a wide power range, from low power applications to high power applications [64]. The performance of VL technique is based on energy storage elements (inductor and capacitor). High power density, high efficiency, simple structure, and cheapness compared to other techniques and small output voltage ripple, especially for high voltage values are the features of this technique

## 6. COMPARISON OF POWER CONVERTER TECHNIQUES FOR SOLAR ENERGY HARVESTING SYSTEM

Various types of power converters have been discussed in this paper. The focus of the discussion is related to the converter which is especially used in PV energy harvesting system applications, namely the DC-DC Converter. Each converter topology has its own power range character. Classification and comparison based on several parameters as a reference for readers to make decisions are provided in this paper. The classification of power converters for PV energy harvesting system applications is shown in Fig. 3. The comparison of each converter is presented in table 1.

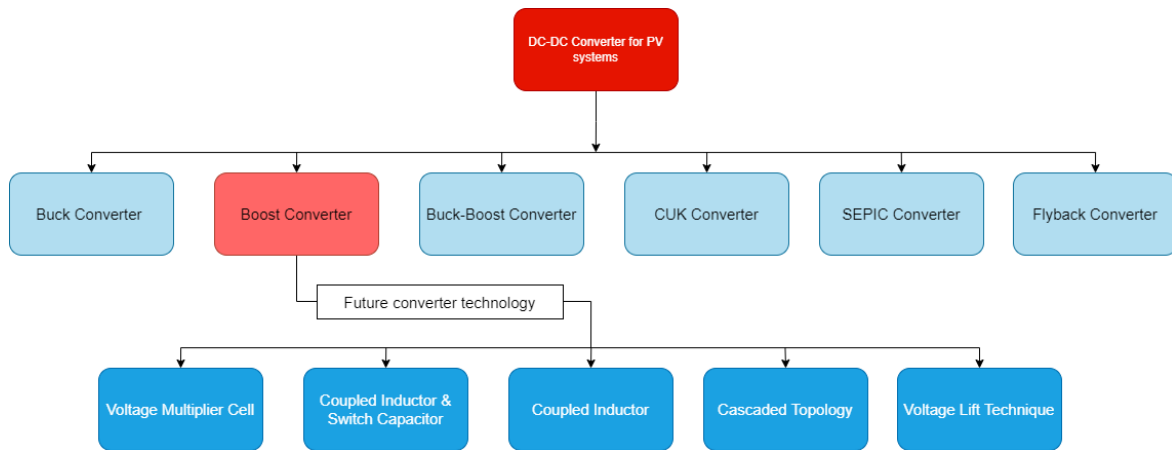


Figure 3. Classification of DC-DC converter topology for PV systems

The DC-DC Converter topology discussed in this paper is the most used topology in PV power generation system applications. Buck, Boost, and Buck-Boost are the most basic and simplest topologies of a DC-DC converter. CUK, SEPIC and Flyback are the results of the development of the basic topology of the DC-DC converter which is commonly used because it has advantages compared to other converter topologies for PV power generation system applications.

Research and development related to DC-DC converters for PV applications is mostly carried out in the high-voltage enhancement sector. This is related to the need for a voltage that is relatively much higher than the output voltage that can be produced by PV. Popular DC-DC Boost converter topologies from these modifications include VMC, CI & SC, CI, Cascaded Topology, and the VL technique. In general, these converter topologies have more advanced technology than conventional DC-DC converter topologies which are currently widely used in PV applications.

## 7. CONCLUSION

In this paper, various types of power converters commonly used for PV energy harvesting applications are reviewed and briefly discussed. The focus of the discussion is related to the DC-DC converter which is currently widely used for related applications. After that, the review also discussed the DC-DC converter technology which was modified from the basic boost converter topology to more advanced topologies specifically for the application of stepping up the output voltage from PV source. Each converter topology has its own advantages and disadvantages. In the end, a comparison of the rules of each converter has been presented to make it easier for readers to make decisions in the future.

Table 1. Comparison of DC-DC converter topology for PV systems

	Hardware Complexity	Cost	Tracking Efficiency	Efficiency of the converter	Power range
Buck	M	M	M	H	L to M
Boost	M	L	L	H	L to M
Buck-Boost	M	L	H	M	L
CUK	H	M	H	M	M to H
SEPIC	H	L	H	M	M
Flyback	H	M	H	M	L
VMC	L	M	M	M	L to M
CI & SC	H	H	H	H	L
CI	H	H	H	H	L
Cascaded Topology	L	M	M	L	L to M
VL Technique	M	M	H	H	L to H

\* H: High, M: Medium, L: Low

## ACKNOWLEDGEMENTS

This research is done due to the research grant from LPPM Universitas Ahmad Dahlan, Yogyakarta with contract number: PUPS-297/SP3/LPPM-UAD/VI/2021.

## REFERENCES

- [1] V. Khare, S. Nema, and P. Baredar, "Status of solar wind renewable energy in India," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013.
- [2] K. Zeb *et al.*, "Design of fuzzy-PI and fuzzy-sliding mode controllers for single-phase two-stages grid-connected transformerless photovoltaic inverter," *Electron.*, 2019.
- [3] K. Gaikwad and S. Lokhande, "Novel maximum power point tracking (MPPT) algorithm for solar tree application," in *International Conference on Energy Systems and Applications, ICESA 2015*, 2016.
- [4] M. H. Taghvaei, M. A. M. Radzi, S. M. Moosavain, H. Hizam, and M. Hamiruce Marhaban, "A current and future study on non-isolated DC-DC converters for photovoltaic applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 17, pp. 216–227, 2013.
- [5] M. J. Ebrahimi and A. H. Viki, "Interleaved high step-up DC-DC converter with diode-capacitor multiplier cell and ripple-free input current," *Int. J. Renew. Energy Res.*, 2015.
- [6] L. Fialho, R. Melicio, V. M. F. Mendes, S. Viana, C. Rodrigues, and A. Estantequeiro, "A simulation of integrated photovoltaic conversion into electric grid," *Sol. Energy*, 2014.
- [7] M. S. Ali, S. K. Kamarudin, M. S. Masdar, and A. Mohamed, "An overview of power electronics applications in fuel cell systems: DC and AC converters," *Sci. World J.*, 2014.
- [8] J. J. Brey, C. R. Bordallo, J. M. Carrasco, E. Galván, A. Jimenez, and E. Moreno, "Power conditioning of fuel cell systems in portable applications," *Int. J. Hydrogen Energy*, 2007.
- [9] L. Palma, M. H. Todorovic, and P. Enjeti, "Design considerations for a fuel cell powered DC-DC converter for portable applications," in *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, 2006.
- [10] V. Kamatchi Kannan and N. Rengarajan, "Investigating the performance of photovoltaic based DSTATCOM using  $i \cos \Phi$  algorithm," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 2014.
- [11] V. Kamatchi Kannan and N. Rengarajan, "Photovoltaic based distribution static compensator for power quality improvement," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 2012.
- [12] S. Deo, C. Jain, and B. Singh, "A PLL-less scheme for single-phase grid interfaced load compensating solar PV generation system," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, 2015.
- [13] M. S. Song, Y. D. Son, and K. H. Lee, "Non-isolated bidirectional soft-switching SEPIC/ZETA converter with reduced ripple currents," *J. Power Electron.*, 2014.
- [14] V. Bist and B. Singh, "PFC Cuk converter-fed BLDC motor drive," *IEEE Trans. Power Electron.*, 2015.
- [15] G. Spiazzi and P. Mattavelli, "Design criteria for power factor preregulators based on sepic and cuk converters in continuous conduction mode," in *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, 1994.
- [16] C. K. Tse, Y. M. Lai, and H. H. C. Lu, "Hopf bifurcation and chaos in a free-running current-controlled Ćuk switching regulator," *IEEE Trans. Circuits Syst. I Fundam. Theory Appl.*, 2000.
- [17] A. F. Moghaddam and A. Van den Bossche, "A Ćuk converter cell balancing technique by using coupled inductors for lithium-based batteries," *Energies*, 2019.
- [18] M. Zhu and F. L. Luo, "Enhanced self-lift Ćuk converter for negative-to-positive voltage conversion," *IEEE Trans. Power Electron.*, 2010.
- [19] B. Axelrod, Y. Berkovich, S. Tapuchi, and A. Ioinovici, "Steep Conversion ratio Ćuk, Zeta, and Sepic converters based on a switched coupled-inductor cell," in *PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, 2008.
- [20] A. A. Fardoun, E. H. Ismail, A. J. Sabzali, and M. A. Al-Saffar, "New efficient bridgeless cuk rectifiers for PFC applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, 2012.
- [21] B. R. Lin, J. J. Chen, and S. F. Shen, "Zero voltage switching double-ended converter," *IET Power Electron.*, 2010.
- [22] A. Darwish, A. M. Massoud, D. Holliday, S. Ahmed, and B. W. Williams, "Single-Stage Three-Phase Differential-

- Mode Buck-Boost Inverters with Continuous Input Current for PV Applications,” *IEEE Trans. Power Electron.*, 2016.
- [23] S.-W. Lee, S.-R. Lee, and C.-H. Jeon, “A New High Efficient Bi-directional DC/DC Converter in the Dual Voltage System,” *J. Electr. Eng. Technol.*, 2006.
- [24] Z. Chen, “PI and sliding mode control of a Cuk converter,” *IEEE Trans. Power Electron.*, 2012.
- [25] A. Elmelegi, M. Aly, and E. M. Ahmed, “Developing Phase-Shift PWM-Based Distributed MPPT Technique for Photovoltaic Systems,” in *Proceedings of 2019 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering, ITCE 2019*, 2019.
- [26] E. Durán, J. M. Andújar, F. Segura, and A. J. Barragán, “A high-flexibility DC load for fuel cell and solar arrays power sources based on DC-DC converters,” *Appl. Energy*, 2011.
- [27] M. Zhang, F. Wang, and J. H. Yang, “Novel Cuk circuit and its application in photovoltaic system,” in *2009 3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications, PESA 2009*, 2009.
- [28] P. A. Ortiz Valencia and C. A. Ramos-Paja, “Sliding-mode controller for maximum power point tracking in grid-connected photovoltaic systems,” *Energies*, 2015.
- [29] G. Jiménez-Castillo, F. J. Muñoz-Rodríguez, C. Rus-Casas, and P. Gómez-Vidal, “Improvements in performance analysis of photovoltaic systems: Array power monitoring in pulse width modulation charge controllers,” *Sensors (Switzerland)*, 2019.
- [30] B. K. Bose, “Power Electronics, Smart Grid, and Renewable Energy Systems,” *Proc. IEEE*, 2017.
- [31] S. J. Chiang, H. J. Shieh, and M. C. Chen, “Modeling and control of PV charger system with SEPIC converter,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2009.
- [32] M. A. Al-Saffar, E. H. Ismail, A. J. Sabzali, and A. A. Fardoun, “An improved topology of SEPIC converter with reduced output voltage ripple,” *IEEE Trans. Power Electron.*, 2008.
- [33] J. Chen and C. Chang, “Analysis and design of SEPIC converter in boundary conduction mode for universal-line power factor correction applications,” *PESC Rec. - IEEE Annu. Power Electron. Spec. Conf.*, 2001.
- [34] E. Mamarelis, G. Petrone, and G. Spagnuolo, “Design of a sliding-mode-controlled SEPIC for PV MPPT applications,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2014.
- [35] A. El Khateb, N. A. Rahim, J. Selvaraj, and M. N. Uddin, “Fuzzy-logic-controller-based SEPIC converter for maximum power point tracking,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2014.
- [36] H. E. Park and J. H. Song, “A dP/dV feedback-controlled MPPT method for photovoltaic power system using II-SEPIC,” *J. Power Electron.*, 2009.
- [37] J. Linares-Flores, H. Sira-Ramírez, E. F. Cuevas-López, and M. A. Contreras-Ordaz, “Sensorless passivity based control of a DC motor via a solar powered sepic converter-full bridge combination,” *J. Power Electron.*, 2011.
- [38] I. D. Kim, J. Y. Kim, E. C. Nho, and H. G. Kim, “Analysis and design of a soft-switched PWM Sepic DC-DC converter,” *J. Power Electron.*, 2010.
- [39] M. Gao, M. Chen, Q. Mo, Z. Qian, and Y. Luo, “Research on output current of interleaved-flyback in boundary conduction mode for photovoltaic AC module application,” in *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition: Energy Conversion Innovation for a Clean Energy Future, ECCE 2011, Proceedings*, 2011.
- [40] G. Thyagheese and Kavithabhaskar, “High static gain modified SEPIC converter with improved line regulation,” in *International Conference on Electrical, Electronics, Signals, Communication and Optimization, EESCO 2015*, 2015.
- [41] B. Tamyurek and B. Kirimer, “An interleaved high-power flyback inverter for photovoltaic applications,” *IEEE Trans. Power Electron.*, 2015.
- [42] J. J. Lee, J. M. Kwon, E. H. Kim, W. Y. Choi, and B. H. Kwon, “Single-stage single-switch PFC flyback converter using a synchronous rectifier,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2008.
- [43] J. W. Yang and H. L. Do, “Soft-Switching Dual-Flyback DC-DC Converter with Improved Efficiency and Reduced Output Ripple Current,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2017.
- [44] T. Shimizu, K. Wada, and N. Nakamura, “A flyback-type single phase utility interactive inverter with low-frequency ripple current reduction on the DC input for an AC photovoltaic module system,” in *PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, 2002.
- [45] A. C. Kyritsis, E. C. Tatakis, and N. P. Papanikolaou, “Optimum design of the current-source flyback inverter for decentralized grid-connected photovoltaic systems,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, 2008.
- [46] N. Sukesh, M. Pahlevaninezhad, and P. K. Jain, “Analysis and implementation of a single-stage flyback PV microinverter with soft switching,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2014.
- [47] M. H. Zare, M. Mohamadian, and R. Beiranvand, “A Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic Inverter Based on a Three-Switch Three-Port Flyback with Series Power Decoupling Circuit,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2017.
- [48] T. Nouri, E. Babaei, and S. H. Hosseini, “A generalized ultra step-up DC-DC converter for high voltage application with design considerations,” *Electr. Power Syst. Res.*, 2013.
- [49] B. Sri Revathi and M. Prabhakar, “Non isolated high gain DC-DC converter topologies for PV applications – A comprehensive review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 66, pp. 920–933, 2016.
- [50] V. Shrivastava, S. S. . -, and A. K. Gupta, “A Literature Review on High Gain dc-dc Boost Converter,” *Int. J. Res. Advent Technol.*, 2019.
- [51] K. C. Tseng and C. C. Huang, “High step-up high-efficiency interleaved converter with voltage multiplier module for renewable energy system,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2014.
- [52] N. Zhang, D. Sutanto, K. M. Muttaqi, B. Zhang, and D. Qiu, “High-voltage-gain quadratic boost converter with voltage multiplier,” *IET Power Electron.*, vol. 8, no. 12, pp. 2511–2519, 2015.
- [53] S.-M. Chen, T.-J. Liang, L.-S. Yang, J.-F. Chen, and K.-C. Juang, “A quadratic high step-up DC-DC converter with



- voltage multiplier,” in *2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 2011, pp. 1025–1029.
- [54] L. H. S. C. Barreto, P. P. Praça, G. A. L. Henn, R. N. A. L. Silva, and D. S. Oliveira, “Single stage high voltage gain boost converter with voltage multiplier cells for battery charging using photovoltaic panels,” in *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, 2012.
- [55] Y. P. Hsieh, J. F. Chen, T. J. Liang, and L. S. Yang, “Novel high step-Up DC-DC converter for distributed generation system,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2013.
- [56] Y. P. Hsieh, J. F. Chen, T. J. Liang, and L. S. Yang, “Novel high step-up DC-DC converter with coupled-inductor and switched-capacitor techniques,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2012.
- [57] Y. Zhao, W. Li, Y. Deng, and X. He, “High step-up boost converter with passive lossless clamp circuit for non-isolated high step-up applications,” *IET Power Electron.*, 2011.
- [58] S. W. Seo, J. H. Ryu, Y. Kim, and H. H. Choi, “Non-Isolated High Step-Up DC/DC Converter with Coupled Inductor and Switched Capacitor,” *IEEE Access*, 2020.
- [59] M. T. Zhang, Y. Jiang, F. C. Lee, and M. M. Jovanovic, “Single-phase three-level boost power factor correction converter,” in *Proceedings of 1995 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition-APEC’95*, 1995, vol. 1, pp. 434–439.
- [60] H. R. Karshenas, H. Daneshpajooh, A. Safaei, P. Jain, and A. Bakhshai, “Bidirectional dc-dc converters for energy storage systems,” *Energy storage Emerg. era smart grids*, vol. 18, 2011.
- [61] T.-F. Wu and T.-H. Yu, “Unified approach to developing single-stage power converters,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 34, no. 1, pp. 211–223, 1998.
- [62] A. Al Nabulsi, M. Al Sabbagh, R. Dhaouadi, and H. U. Rehman, “A 300 watt cascaded boost converter design for solar energy systems,” *2009 Int. Conf. Electr. Power Energy Convers. Syst. EPECS 2009*, pp. 3–6, 2009.
- [63] S. K. Changchien, T. J. Liang, J. F. Chen, and L. S. Yang, “Step-up DC-DC converter by coupled inductor and voltage-lift technique,” *IET Power Electron.*, vol. 3, no. 3, pp. 369–378, 2010.
- [64] Y. T. Chen, M. H. Tsai, and R. H. Liang, “DC-DC converter with high voltage gain and reduced switch stress,” *IET Power Electron.*, vol. 7, no. 10, pp. 2564–2571, 2014.

**Lampiran Bukti Luaran Tambahan**

**Trafo Daya: Konsep Dasar  
Magnetik, Material, Isolasi,  
Prinsip Desain dan Panduan  
Praktis**

Tole Sutikno

Tri Wahono



# **Trafo Daya: Konsep Dasar Magnetik, Material, Isolasi, Prinsip Desain dan Panduan Praktis**

## **Penulis**

Tole Sutikno, S.T., M.T., Ph.D., MIET  
Tri Wahono, S.T.

**ISBN: 978-623-97015-6-7**

## **Desain Sampul & Layout**

## **Penerbit**

Institute of Advanced Engineering and Science (IAES)

## **Redaksi**

D2, Griya Ngoto Asri, Bangunharjo, Sewon 55187  
Bantul, Yogyakarta, Indonesia,  
Telp: +62 274 4331796, 4534501, 2805750

Cetakan pertama, September 2021

Hak cipta seluruh isi buku dan sampul merupakan hak cipta  
Institute of Advanced Engineering and Science (IAES)

Hak Cipta dilindungi undang-undang

Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanis, termasuk memfotocopy, merekam atau dengan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis.

# KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT, Tuhan Yang Maha Esa, atas limpahan rahmat dan karuniaNya sehingga buku “**Trafo Daya: Konsep Dasar Magnetik, Material, Isolasi, Prinsip Desain dan Panduan Praktis**” ini telah diselesaikan. Buku ini disusun sebagai buku teks mahasiswa Strata 1 maupun Diploma jurusan Teknik Elektro. Namun juga dapat digunakan sebagai buku teks untuk mahasiswa jenjang Strata 2 serta sebagai bahan referensi untuk praktisi yang bekerja di lingkup teknik elektro. Buku ini disusun menjadi 7 bab yang menyajikan tentang bahan-bahan material, isolasi, serta dilengkapi dengan langkah-langkah desain transformator secara detail.

Transformator ditemukan di hampir semua sirkuit elektronik. Buku ini dapat dengan mudah digunakan untuk merancang transformator ruang angkasa frekuensi tinggi yang ringan atau transformator komersial frekuensi rendah. Oleh karena itu, ini adalah manual desain. Proses konversi dalam elektronika daya memerlukan penggunaan transformator, komponen yang sering kali merupakan item terberat dan paling besar dalam rangkaian konversi. Komponen transformator juga memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kinerja dan efisiensi sistem secara keseluruhan. Dengan demikian, desain transformator tersebut memiliki pengaruh penting pada berat sistem secara keseluruhan, efisiensi konversi daya, dan biaya. Karena saling ketergantungan dan interaksi parameter ini, pertukaran yang bijaksana diperlukan untuk mencapai optimasi desain.

Desainer telah menggunakan berbagai pendekatan dalam mencapai desain transformator dan induktor yang sesuai. Misalnya, dalam banyak kasus, aturan praktis yang digunakan untuk menangani kerapatan arus adalah tingkat kerja yang baik

adalah 1000 mil lingkaran per ampere. Ini memuaskan dalam banyak hal; namun, ukuran kawat yang digunakan untuk memenuhi persyaratan ini dapat menghasilkan induktor yang lebih berat dan lebih besar dari yang diinginkan atau dibutuhkan. Informasi yang disajikan di sini akan memungkinkan untuk menghindari penggunaan ini dan aturan praktis lainnya, dan untuk mengembangkan desain yang lebih ekonomis dan lebih baik

Materi dalam buku ini diatur sedemikian rupa sehingga mahasiswa insinyur atau teknisi yang memulai dari awal buku dan berlanjut hingga akhir – akan memperoleh pengetahuan yang komprehensif tentang keadaan seni dalam desain transformator dan induktor.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan buku ini, untuk itu kami sangat mengharapkan kritik dan saran terhadap penyempurnaan buku ini. Semoga dengan adanya buku ini dapat memberikan manfaat yang luas bagi pembaca.

Penulis



# DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	ii
DAFTAR ISI.....	iv
BAB 1 .....	1
DASAR-DASAR MAGNETIK.....	1
1.1    Sifat Magnetik di Ruang Hampa .....	1
1.2    Mengintensifkan Medan Magnet.....	3
1.3    Transformator Sederhana .....	7
1.4    Inti Magnetik .....	7
1.5    Karakteristik Dasar dari Inti Magnetik .....	9
1.6    Loop Histeresis (Loop B-H) .....	11
1.7    Permeabilitas .....	13
1.8    Gaya Gerak Magnet (ggl) dan Gaya Magnetisasi (H).. .....	17
1.9    Reluktansi.....	19
1.10   Celah Udara .....	21
1.11   Mengontrol Fluks dc dengan Celah Udara .....	24
1.12   Jenis Celah Udara.....	25
1.13   Fringing Fluks .....	26
1.14   Kedekatan Fringing Flux dan Coil .....	32
BAB 2 .....	36

BAHAN MAGNETIK DAN KARAKTERISTIKNYA .....	36
2.1 Saturasi (Titik Jenuh) .....	36
2.2 Remanen Flux, Br, dan Koersivitas Hc .....	37
2.3 Permeabilitas, $\mu$ .....	37
2.4 Kerugian Histeresis, Resistivitas, p, (kehilangan inti). .....	38
2.5 Pengantar Silicon Steel.....	39
2.6 Pengantar Paduan Nikel Pita Tipis.....	39
2.7 Pengantar Kaca Metalik.....	44
2.8 Pengantar Soft Ferits .....	47
2.9 Ferit Mangan-seng .....	49
2.10 Ferit Nikel-Seng.....	49
2.11 Pengantar Inti (core) Serbuk Molypermalloy .....	53
2.12 Pengantar Inti Serbuk Besi .....	54
2.13 Kerugian Inti .....	62
2.14 Persamaan Kerugian Inti .....	64
2.15 Operasi Khusus .....	68
2.16 Karakteristik Bahan.....	69
2.17 Definisi Saturasi Bahan Magnetik.....	72
2.18 Kondisi Tes.....	75
2.19 Teori Saturasi Material Magnetik.....	81
2.20 Pengaruh Celah Udara .....	83
2.21 Pengaruh Celah .....	83
2.22 Konfigurasi Inti Campuran.....	92
BAB 3.....	99
INTI MAGNETIK.....	99
3.1 Tipe Inti dan Konstruksi Tipe Shell.....	101
3.2 Tipe Bahan Inti .....	102



3.3	Isolasi dan Arus Eddy .....	102
3.4	Laminasi .....	104
3.5	Pemanasan Bahan dan Pelepasan Stres.....	105
3.6	Susun Laminasi dan Polaritas.....	106
3.7	Kedekatan Flux .....	108
3.8	Arus Eksitasi.....	108
3.9	Gulungan Pita C, EE, dan Inti Toroidal.....	110
3.10	Tape Inti Toroidal.....	113
3.11	Inti Serbuk, Toroidal .....	113
3.12	Faktor Penumpukan .....	114
3.13	Data Desain dan Dimensi untuk Laminasi EI .....	115
3.14	Desain dan Data Dimensi untuk Laminasi UI .....	116
3.15	Data Desain dan Dimensi untuk Laminasi LL .....	117
3.16	Data Desain dan Dimensi untuk Laminasi DU .....	118
3.17	Data Desain dan Dimensi untuk Laminasi Tiga Fasa . .....	120
3.18	Data Desain dan Dimensi untuk Tape Gulungan inti C .....	121
3.19	Skema Dimensi untuk Gulungan Inti EE .....	122
3.20	Desain dan Data Dimensi untuk Gulungan Inti Toroidal.....	124
3.21	Desain dan Data Dimensi untuk EE Inti Ferit.....	125
3.22	Data Desain dan Dimensi untuk EE dan EI Planar, Inti Ferit.....	126
3.23	Data Desain dan Dimensi untuk EC, Inti Ferit .....	128
3.24	Data Desain dan Dimensi untuk ETD, Inti Ferit....	129
3.25	Data Desain dan Dimensi untuk ETD/(profil rendah), Inti Ferit .....	130

3.26	Data Desain dan Dimensi untuk Inti Ferit ER, Perangkat Pemasangan Permukaan, SMD .....	131
3.27	Data Desain dan Dimensi untuk EFD, .....	132
3.28	Data Desain dan Dimensi untuk EPC, Perangkat Pemasangan Permukaan Inti Ferit, SMD .....	133
3.29	Desain dan Data Dimensi untuk PC, Inti Ferit .....	134
3.30	Data Desain dan Dimensi untuk EP, Inti Ferit .....	136
3.31	Data Desain dan Dimensi untuk PQ, Inti Ferit .....	137
3.32	Data Desain dan Dimensi untuk PQ/ (profil rendah), Inti Ferit .....	138
3.33	Data Desain dan Dimensi untuk RM, Inti Ferit .....	140
3.34	Data Desain dan Dimensi untuk RM/(profil rendah), Perangkat Pemasangan Permukaan Inti Ferit, SMD .....	141
3.35	Data Desain dan Dimensi untuk DS, Inti Ferit.....	143
3.36	Data Desain dan Dimensi untuk UUR, Inti Ferit ..	144
3.37	Data Desain dan Dimensi untuk UUS, Inti Ferit ...	145
3.38	Desain dan Data Dimensi untuk Toroidal, Inti Ferit ..	146
3.39	Desain dan Data Dimensi untuk Toroidal, Inti Serbuk MPP .....	148
3.40	Data Desain dan Dimensi untuk Toroidal, Inti Serbuk Besi.....	150
3.41	Data Desain dan Dimensi untuk Toroidal, Inti Serbuk Sendust.....	151
3.42	Desain dan Data Dimensi untuk Toroidal, Inti Serbuk Fluks Tinggi .....	153
3.43	Desain dan Data Dimensi untuk EE, Serbuk Inti Besi .....	155
3.44	Data Desain dan Dimensi untuk EE, Serbuk Inti Sendust.....	156

<b>BAB 4</b> .....	158
<b>WINDOW UTILIZATION (PEMANFAATAN JENDELA), KAWAT MAGNET, DAN ISOLASI</b> .....	158
4.1 Faktor Pemanfaatan Jendela ( <i>Window Utilization</i> ) $K_U$ .....	158
4.2 $S_1$ Isolasi Kawat (Wire Insulation).....	160
4.3 $S_2$ , Fill Faktor .....	161
4.4 $S_3$ , Jendela Efektif .....	166
4.5 $S_4$ , Faktor Isolasi .....	169
4.6 Faktor Pemanfaatan Jendela, $K_U$ untuk Bobbin Ferit. .....	171
4.7 Mil lingkaran dan Mil persegi.....	174
4.8 Kawat Magnetik.....	175
4.9 Kawat Magnet, Isolasi Film.....	175
4.10 Tabel Kawat .....	177
4.11 Isolasi yang Dapat Disolder .....	183
4.12 Kurangi Skin Effect di Transformers.....	183
4.13 Menghitung Skin Effect Induktor .....	185
4.14 Multi Untai Kawat Litz .....	188
<b>BAB 5</b> .....	190
<b>DESAIN TRANSFORMATOR</b> .....	190
5.1 Masalah Desain Umumnya .....	190
5.2 Kemampuan Penanganan Daya.....	192
5.2.1 Hubungan, $A_p$ , hingga Transformer Power Handling Capability .....	193
5.2.2 Produk Area Transformator, $A_p$ .....	194

5.2.3	Volume Transformer dan Produk Area, Ap.....	195
5.2.4	Berat Trafo dan Produk Area, Ap.....	198
5.2.5	Area Permukaan Transformer dan Produk Area, Ap .....	200
5.2.6	Kepadatan Arus Transformer, J, dan Produk Area, Ap .....	204
5.2.7	Transformator Inti Geometri, Kg, dan Produk Area, Ap.....	208
5.2.8	Regulasi Transformator versus Berat.....	210
BAB 6.....		212
PENGATURAN, EFISIENSI TRANSFORMATOR-INDUKTOR DAN KENAIKAN SUHU .....		212
6.1	Efisiensi Transformator .....	212
6.2	Maksimum Efisiensi.....	213
6.3	Disipasi Transformer, berdasarkan Radiasi dan Konveksi .....	214
6.4	Kenaikan Suhu vs. Luas Permukaan, Pada, Disipasi . .....	216
6.5	Luas Permukaan, At, Diperlukan untuk Pembuangan Panas .....	217
6.6	Kebutuhan Luas Permukaan, At.....	218
6.7	Regulasi Sebagai Fungsi Efisiensi .....	220
BAB 7.....		223
DESAIN TRANSFORMATOR DAYA.....		223
7.1	Masalah Desain Umumnya .....	223
7.2	Kemampuan Menangani Daya.....	225
7.3	Kemampuan Daya Keluaran P0, versus Daya Semu, Pt .....	226
7.4	Transformator dengan Banyak Keluaran.....	229
7.5	Regulasi .....	231

7.5.1	Hubungan, $K_g$ , dengan Kemampuan Regulasi Transformer Daya .....	233
7.5.2	Hubungan, $A_p$ , untuk Kemampuan Daya Transformator .....	234
7.5.3	Inti Yang Berbeda, Produk Area Yang Sama .....	234
7.6	Desain Transformator Isolasi 250 Watt menggunakan inti Geometri, $K_g$ .....	236
7.7	Desain Transformator 38Watt 100kHz, Menggunakan Pendekatan Inti Geometri, $K_g$ .....	241
DAFTAR PUSTAKA.....		254
Tentang Penulis .....		255

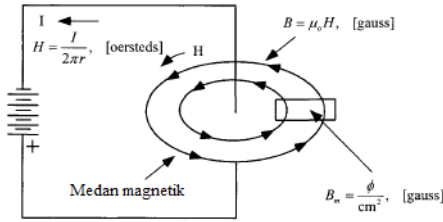
# BAB 1

## DASAR-DASAR MAGNETIK

Kesulitan yang cukup besar ditemui dalam menguasai bidang magnet karena penggunaan yang begitu banyak sistem satuan yang berbeda, sistem sentimeter-gram-sekon(cgs), sistem meter-kilogram-sekon (mks), dan sistem satuan bahasa Internasional campuran. Magnet dapat diolah dengan cara sederhana dengan menggunakan sistem cgs. Tampaknya selalu ada satu pengecualian untuk setiap aturan dan hal itu adalah permeabilitas.

### 1.1 Sifat Magnetik di Ruang Hampa

Panjang kawat dengan arus dc,  $I$ , mengalir melalui kawat tersebut menghasilkan gaya magnetisasi sirkulasi,  $H$  dan sebuah medan magnet  $B$ , disekitar konduktor seperti ditunjukkan pada Gambar 1-1, memiliki hubungan:



Gambar 1-1. Medan magnet yang dihasilkan oleh konduktor pembawa arus

Hukum Gauss,

$$B = \mu_0 H ,$$

dan

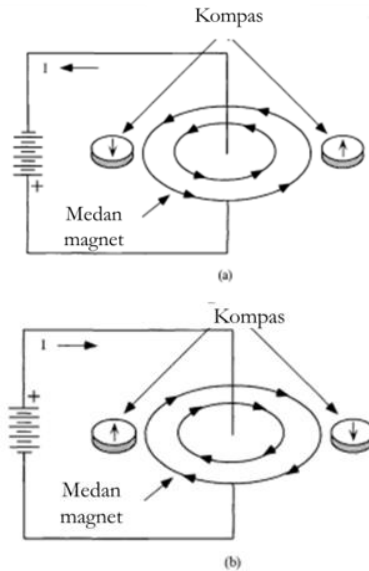
$$B_m = \frac{\phi}{cm^2} ,$$

Hukum oersteds,

$$H = \frac{I}{2\pi r} ,$$

Arah garis fluks disekitar konduktor lurus dapat ditentukan dengan menggunakan “aturan tangan kanan” sebagai berikut: saat konduktor digenggam dengan tangan kanan, sehingga ibu jari menunjukkan ke dalam arah aliran arus, jari-jari menunjukkan kearah garis gaya magnet. Hal ini berdasarkan pada apa yang disebut aliran arus konvensional, bukan aliran elektron.

Ketika arus melewati kawat dalam satu arah, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1-2a, jarum di kompas akan menunjukkan ke satu arah. Ketika arus dalam kawat dibalik, seperti Gambar 1-3b, pada jarum akan membalikkan arah. Hal ini menunjukkan bahwa medan magnet memiliki polaritas dan bila arus  $I$  dibalik, gaya magnetisasi  $H$  akan mengikuti pembalikan arus.

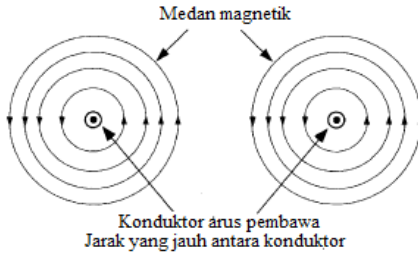


Gambar 1-2. Kompas mengilustrasikan bagaimana medan magnet merubah polaritas

## 1.2 Mengintensifkan Medan Magnet

Ketika arus melewati kawat, medan magnet dipadang di sekitar kawat. Jika konduktor ditunjukkan pada Gambar 1-3, membawa arus dalam arah yang sama dipisahkan oleh jarak yang relatif besar, yaitu medan magnet yang dihasilkan tidak akan saling mempengaruhi.

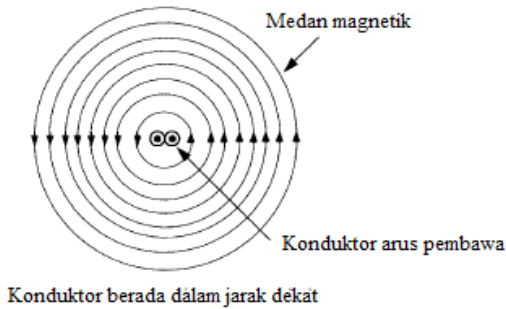




Gambar 1-3. Medan magnet yang dihasilkan disekitar konduktor berjarak

Jika dua konduktor yang sama ditempatkan dekat satu sama lainnya, seperti ditunjukkan pada Gambar 1-4 medan magnet bertambah, dan intensitas medan berlipat ganda seperti pada persamaan (4)

$$r = \frac{B^2}{8\pi\mu}, \text{ rapat energi} \quad [1-1]$$



Gambar 1-4. Medan magnet diproduksi di sekitar konduktor yang berdekatan.

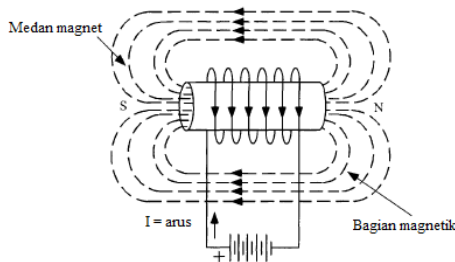
Jika kawat digulungani pada batang kayu, medan magnetnya sangat diintensifkan. Kumparan sebenarnya menunjukkan sebuah medan magnet persis seperti magnet batang ditunjukkan pada Gambar 1-5. Pada magnet batang, kumparan memiliki sebuah kutub utara dan wilayah tengah netral. Selain itu, polaritas dapat dibalikkan

dengan membalikkan arus  $I$ , melalui koil. Hal ini menunjukkan ketergantungan medan magnet pada arah arus.

Sirkuit magnet adalah ruang yang mana fluks bergerak mengelilingi kumparan. Besarnya fluks adalah ditentukan oleh produk arus,  $I$  dan jumlah putaran  $N$  dalam kumparan. Kekuatan,  $NI$ , dibutuhkan untuk menciptakan fluks adalah gaya gesek magnet (mmf). Hubungan antara kerapatan fluks  $B$ , dan magnetisasi gaya  $H$ , untuk kumparan inti udara ini ditunjukkan pada Gambar 1-6. Rasio  $B$  ke  $H$  disebut permeabilitas  $\mu$ , dan untuk kumparan inti udara ini rasionya adalah satu dalam sistem cgs, yang dinyatakan dalam satuan gauss per oersted, (gauss/oersteds).

$$\begin{aligned}\mu_0 &= 1 \\ B &= \mu_0 H\end{aligned}\quad [1-2]$$

Jika baterai, pada Gambar 1-5, diganti dengan sumber ac, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1-7 anatar  $B$  dan  $H$  akan memiliki karakteristik yang ditunjukkan Gambar 1-8. Linearitas hubungan anantara  $B$  dan  $H$  merupakan keuntungan utama dari kumparan inti udara. Karena hubungan linier, meningkat  $H$  meningkat  $B$ , dan oleh karena itu fluks dalam kumparan, dan dengan cara ini, medan yang sangat besar dapat dihasilkan



Gambar 1-5. Kumparan inti dengan eksitasi DC

Lampiran bukti dokumen realisasi kerjasama dengan mitra







