

Penerapan Standar IEEE 1547 dalam Interkoneksi PLTS pada Sistem Distribusi 20 kV

Muhammad Hakim Maarif^{*1}, M. Dzamar Fadhliansyah^{*1}

¹Program Studi Teknik Elektro, Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan, 35365 INDONESIA

*Penulis Korespondensi: muhammad.122130158@student.itera.ac.id, mdzamar.121130062@student.itera.ac.id

INFORMASI ARTIKEL

Diterima : 01 Agustus 2025
Direvisi : 01 September 2025
Tersedia online : 30 September 2025

KATA KUNCI

IEEE 1547, Pembangkit Terdistribusi, Rugi-rugi daya, Energi terbarukan, Interkoneksi.

KEYWORDS

IEEE 1547, Distributed Generation, Power losses, Renewable energy, Interconnection.

ABSTRAK

Penelitian ini membahas penerapan standar IEEE Std 1547-2018 dalam proses interkoneksi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) ke sistem distribusi 20 kV, dengan studi kasus menggunakan sistem uji IEEE 14-bus. Analisis dilakukan dengan pendekatan metode Newton-Raphson melalui perangkat lunak ETAP untuk mengevaluasi dampak integrasi PLTS terhadap tegangan, rugi-rugi daya, proteksi, kualitas daya, dan keamanan sistem. Simulasi awal menunjukkan bahwa kondisi *basecase* mengalami tegangan kritis di bus 13 dan 14. Setelah interkoneksi PLTS-DG 5 MW, terjadi perbaikan tegangan dan penurunan rugi daya. Sistem juga memenuhi batas teknis kualitas daya (THD, step voltage, dan DC injection) serta proteksi sesuai batas waktu trip yang ditetapkan standar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa interkoneksi PLTS dapat meningkatkan efisiensi dan stabilitas sistem distribusi jika dilakukan dengan perencanaan yang tepat, serta memenuhi semua kriteria teknis dalam IEEE Std 1547-2018.

ABSTRACT

This paper discusses the implementation of IEEE Std 1547-2018 for the interconnection of Solar Photovoltaic Power Plants (PLTS) into a 20 kV distribution system, using the IEEE 14-bus test system as a case study. The analysis was carried out using the Newton-Raphson power flow method through ETAP software to evaluate the impact of PLTS integration on voltage profiles, power losses, system protection, power quality, and overall operational security. Initial basecase simulation results indicated critical voltage conditions at bus 13 and 14. After interconnecting a 5 MW PLTS-DG, the voltage profile improved, and power losses were reduced. The system also fulfilled technical criteria for power quality (THD, step voltage, and DC injection) and protective response within the trip times specified by the standard. The results confirm that integrating PLTS into the distribution network can enhance system efficiency and stability, provided that technical planning aligns with the requirements of IEEE Std 1547-2018.

I PENDAHULUAN

Penggunaan energi terbarukan saat ini mulai berkembang dan mendapat perhatian di dunia. Tenaga surya dan angin menjadi energi terbarukan yang populer digunakan karena kebersihannya dalam mengurangi emisi dan polusi. Data yang dikumpulkan tentang penggunaan energi menunjukkan bahwa Indonesia masih bergantung pada energi fosil seperti gas alam, batubara, dan minyak bumi untuk memenuhi kebutuhan energinya. Namun, hasil dari upaya pemerintah untuk mewujudkan bauran energi terbarukan (ET) masih ada banyak hambatan. Kendala teknis dan non-teknis serta persaingan harga tarif dengan energi fosil yang cenderung lebih murah, membuat pembangunan ET terhambat dengan bauran energi baru sekitar 6,2% serta pertumbuhan 0,39% per tahun [1].

Untuk mendukung program pemerintah Indonesia dalam percepatan pengembangan energi terbarukan, penyedia layanan tenaga listrik harus berusaha memanfaatkan potensi energi terbarukan menjadi tenaga listrik [2]. Pembangkit Listrik Tenaga Surya-Distributed Generation (PLTS-DG) adalah pembangkit tenaga surya skala kecil berbasis surya yang terhubung langsung ke jaringan distribusi atau di lokasi meteran konsumen. Mereka juga ditempatkan lebih

dekat ke pusat beban, terlepas dari kapasitas dayanya. PLTS-DG dalam skala mikro, kecil, menengah, dan utilitas dapat memiliki kapasitas dari beberapa kilowatt hingga ratusan megawatt [3]. Injeksi unit pembangkit terdistribusi berbasis fotovoltaik pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya-Distributed Generation (PLTS-DG) ke dalam sistem distribusi listrik dapat menyebabkan pengurangan rugi-rugi, dukungan tegangan, peningkatan kualitas daya, dan peningkatan keandalan sistem [4]. Integrasi PLTS-DG ke dalam sistem distribusi akan memiliki dampak positif atau negatif tergantung pada fitur operasi sistem distribusi dan karakteristik PPLTS-DG. PLTS-DG dapat bernilai jika memenuhi setidaknya persyaratan dasar dari perspektif operasi sistem dan desain pengumpulan [5].

Meski memiliki manfaat yang signifikan, integrasi PLTS-DG ke sistem distribusi juga menimbulkan tantangan teknis seperti fluktuasi tegangan, harmonik, dan risiko islanding. Oleh karena itu, diperlukan standar teknis yang mengatur proses interkoneksi agar sistem berjalan aman dan andal. Salah satu standar yang digunakan secara internasional adalah IEEE Std 1547, yang menetapkan ketentuan teknis interkoneksi *Distributed Generation* dengan sistem distribusi listrik. IEEE Std 1547 digunakan sebagai acuan pada Interkoneksi *Distributed Generation* ke

Sistem Distribusi 20 kV yang mencakup aspek terkait sinkronisasi, proteksi, kualitas daya, dan keamanan sistem [6].

Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui bagaimana interkoneksi PLTS-DG berdampak pada tegangan dan rugi rugi daya pada saluran distribusi 20 kV melalui uji standar IEEE 1547 dengan 14-bus. Penelitian ini juga bertujuan untuk mengetahui bagaimana pemasangan PLTS-DG dapat meningkatkan kinerja sistem. *Software ETAP Power station 19.0.1* dan metode Newton-Raphson digunakan untuk melakukan analisis. Hasil yang diharapkan akan membuktikan bahwa interkoneksi PLTS-DG ke dalam sistem akan mengurangi rugi rugi daya dan akan ditinjau melalui IEEE 1547. Terdapat tiga PLTS yang berkapasitas 3 x 5 MWp yang digunakan dalam penelitian ini. PLTS ini interkoneksi dengan jaringan distribusi PLN Lombok di Nusa Tenggara Barat [3].

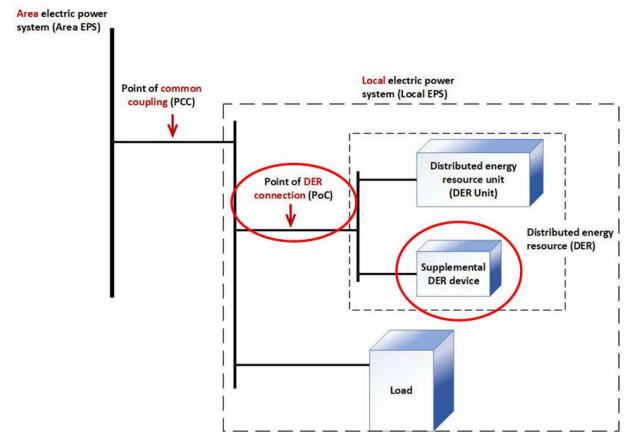
II DASAR TEORI

A. IEEE Std. 1547-2018.

IEEE Std. 1547-2018 merupakan Standar IEEE yang digunakan sebagai acuan untuk interkoneksi dan interoperabilitas sumber daya energi terdistribusi dengan antarmuka sistem tenaga listrik terkait. Penerapan standar ini pada penelitian salah satunya yaitu sinkronisasi. Berdasarkan IEEE 1547, PLTS-DG harus terhubung secara paralel dengan *electric power systems* (EPS). Untuk sistem tegangan menengah, tegangan harus tidak mengubah tegangan RMS di titik sambung pelanggan *point of common coupling* (PCC) lebih dari 3% dari tegangan nominal atau 5% dari tegangan nominal [6].

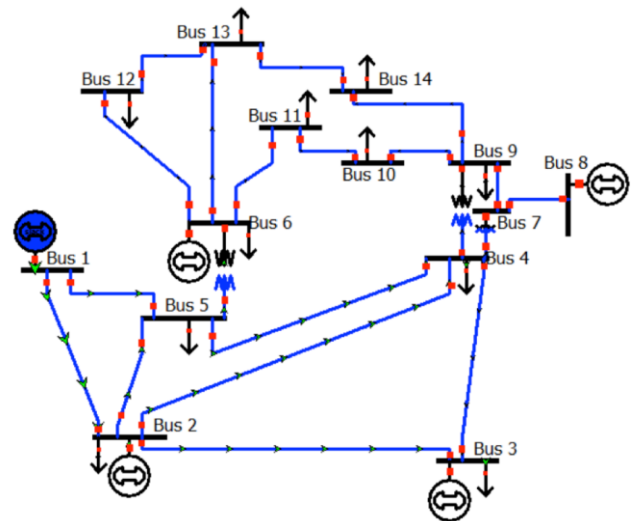
Seperti yang dapat dilihat pada gambar 1, gambar berikut menunjukkan arsitektur sistem yang menghubungkan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebagai bagian dari DER dengan sistem tenaga listrik distribusi 20 kV milik utilitas. Dalam standar IEEE 1547, sistem tenaga listrik area (EPS) dan Sistem Tenaga Listrik Lokal (*Local EPS*) dibagi menjadi dua wilayah utama sistem. Titik hubung antara keduanya disebut *Point of Common Coupling* (PCC). PCC adalah titik referensi penting untuk mengukur parameter teknis seperti frekuensi, tegangan, harmonik, dan proteksi sistem. IEEE Standard 1547-2018 menyatakan bahwa untuk memastikan keamanan operasi dan interoperabilitas, kesesuaian DER dengan sistem distribusi harus diuji di PCC [6].

Dalam hal interkoneksi PLTS ke sistem distribusi 20 kV, dua elemen penting yang dijelaskan dalam Standar IEEE 1547-2018 adalah Titik Koneksi DER (*Point of DER Connection/PoC*) dan Perangkat DER Tambahan (*Supplemental DER Device*). PoC didefinisikan sebagai titik di mana unit DER terhubung secara elektrik ke sistem tenaga listrik lokal (*Local EPS*), dan merupakan lokasi penerapan persyaratan standar IEEE 1547, tetapi tidak termasuk beban lain yang ada dalam sistem. Sebelum energi dari PLTS disalurkan ke jaringan distribusi atau ke beban lokal, semua pengaturan teknis seperti sinkronisasi tegangan, pengendalian frekuensi, dan pengaturan perlindungan harus dipastikan bekerja dengan baik.



Gambar 1 Sistem Interkoneksi DER

B. IEEE 14 Bus



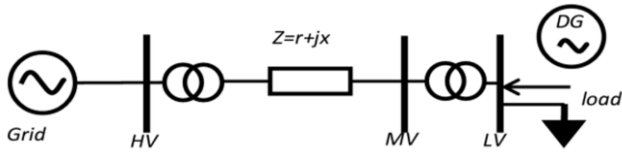
Gambar 2 IEEE 14 bus

Sistem uji IEEE 14 Bus merupakan representasi yang sangat sederhana dari jaringan listrik Amerika pada tahun 1962. Kasus uji klasik terdiri dari 5 generator, 11 beban, dan 14 bus [7]. Sistem ini menggunakan 14 bus sehingga disebut IEEE 14 bus. Penggunaan IEEE 14 busa pada penelitian ini mengacu pada penjabaran beberapa literatur terkait penggunaan IEEE 14 bus pada sistem energi terbarukan.

Telah dilakukan penelitian tentang dampak hibrida PV (Panel Surya) dan angin pada sistem bus IEEE 14. Analisis ini dilakukan untuk memverifikasi apakah pembangkit listrik hibrida mampu menahan pembangkit yang direncanakan. Setelah penelitian tersebut dilakukan, dilakukan analisis lain tentang stabilitas tegangan seluruh pembangkit. Terakhir, pengaruh sistem PV dan angin pada analisis stabilitas transien pada titik kopling dipelajari dengan menggunakan alat analisis stabilitas transien Analisis yang diterapkan telah menunjukkan bahwa pembangkit listrik yang dirancang berada dalam status baik dan profil tegangannya sehat. Operasi mandiri pembangkit listrik tenaga surya dan angin, menunjukkan kemampuan untuk mengurangi efek transien gangguan bus. Ini berarti

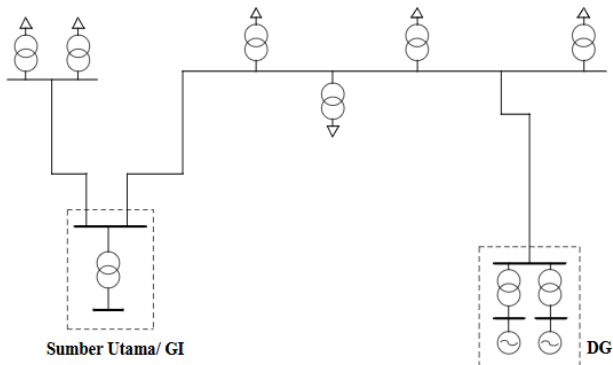
peningkatan stabilitas dibandingkan dengan transien tinggi ketika pembangkit listrik tenaga surya tidak terhubung [8].

C. Distributed Generation



Gambar 3 Aliran daya DG

Secara umum, *Distributed Generation* (DG) dapat didefinisikan sebagai pembangkitan daya listrik dalam jaringan distribusi atau di sisi pelanggan jaringan [9]. Panel surya dan gabungan panas dan listrik adalah beberapa teknologi yang menghasilkan listrik di sekitar atau di dekat lokasi penggunaan. Teknologi ini dikenal sebagai pembangkitan terdistribusi. Pembangkitan terdistribusi dapat melayani satu bangunan, seperti rumah atau bisnis, atau dapat menjadi bagian dari jaringan mikro, yaitu jaringan yang lebih kecil yang terhubung ke sistem pengiriman listrik yang lebih besar, seperti di fasilitas industri besar, pangkalan militer, atau kampus perguruan tinggi yang besar. Ketika terhubung ke jaringan distribusi tegangan rendah milik perusahaan listrik, pembangkitan terdistribusi dapat membantu pengiriman daya yang bersih dan andal ke pelanggan tambahan dan mengurangi kerugian listrik di sepanjang jaringan transmisi dan distribusi [10].



Gambar 4 Interkoneksi DG ke GI

D. Newton Raphson

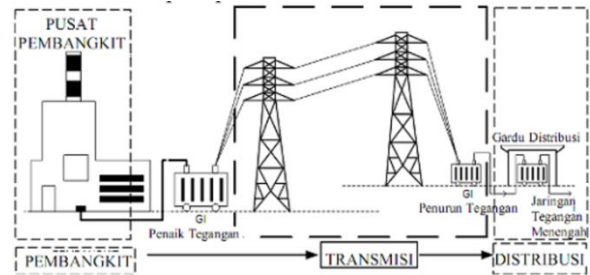
Metode Newton Raphson menetapkan besar dan sudut tegangan pada slack bus, jadi diabaikan dalam perhitungan iterasi untuk menghitung tegangan. Pada generator bus, hanya daya reaktif yang dihitung setiap iteration karena daya aktif dan magnitudo tegangan tetap. Analisis aliran daya memerlukan penyelesaian dua persamaan untuk setiap bus. Dalam penyelesaian iterasi metode Newton Raphson, nilai daya aktif (P_p) dan daya reaktif (Q_p) yang telah dihitung harus dibandingkan dengan nilai yang telah ditetapkan, dengan persamaan berikut digunakan.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_n \\ \dots \\ \Delta Q_1 \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_1}{\partial |V_1|} & \frac{\partial P_1}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial P_n}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_n}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial |V_1|} & \frac{\partial P_n}{\partial |V_n|} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_1|} & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_1|} & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_n \\ \dots \\ \frac{\Delta |V|}{|V_1|} \\ \frac{\Delta |V|}{|V_n|} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Sampai perubahan daya aktif (ΔP_p) dan perubahan daya reaktif (ΔQ_p) mencapai nilai konvergen (ϵ), yang biasanya berkisar antara 0,01 dan 0,0001. Matrik Jacobian terdiri dari turunan parsial dari P dan Q terhadap masing-masing variabel besar dan sudut fasa tegangan. Besar dan sudut fasa tegangan yang diasumsikan, serta daya aktif dan reaktif yang dihitung, digunakan untuk menghasilkan elemen elemen Jacobian [3].

E. Sistem Distribusi

Dibandingkan dengan sistem pembangkitan dan transmisi, sistem distribusi mendapat perhatian yang lebih besar daripada sistem pembangkitan karena paling dekat dengan beban atau pelanggan dalam sistem suplai energi listrik. Ini terutama dilakukan oleh pihak pelanggan [11].



Gambar 5 Sistem Distribusi

Ada berbagai jenis jaringan distribusi, termasuk:

- **Sistem Radial:** Sistem radial hanya menggunakan satu catu daya dan satu pengisi daya. Jika terjadi gangguan pada salah satu sumber daya, seperti hantaran listrik atau saluran lisatrik, seluruh beban jaringan akan dimatikan.
- **Sistem Loop/Ring:** Sistem ini banyak digunakan di jaringan publik institusi dan industri penting seperti rumah sakit dan pusat pemerintah. Ini adalah gabungan dari dua sistem radial dan memiliki dua sumber daya dan arah pengisian daya. Salah satu sistem ini dapat digunakan untuk sumber daya cadangan.
- **Sistem Spindle:** Ini adalah modifikasi dari sistem cincin, yang terdiri dari beberapa sistem radial.

- Sistem Gugus: Ini menggunakan pemutus arus beban dan pengisi daya cadangan. Selama pengisi daya darurat berfungsi, jika terjadi gangguan pada pengisi daya konsumen, pengisi daya darurat akan menggantikan pengisi daya konsumen [12].

F. Rugi-Rugi Daya

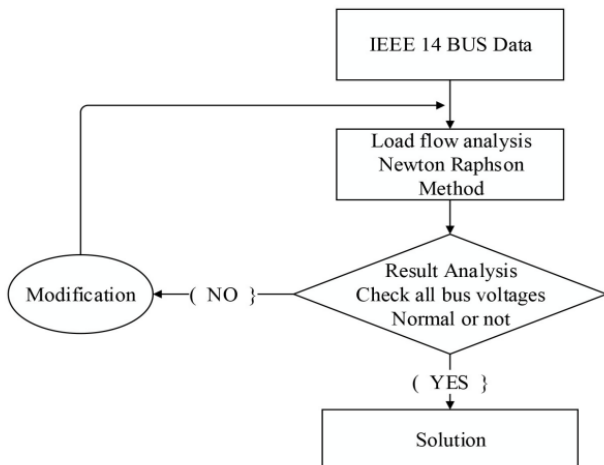
Adanya selisih daya dari pusat pembangkit ke beban karena proses penyaluran tenaga listrik disenut rugi – rugi daya atau *losses*. Kerugian terjadi karena energi yang disalurkan dari pembangkit ke beban memiliki selisih daya yang diterima dibandingkan daya yang dikirim. Akibatnya, energi yang dikirim tidak terjual sepenuhnya, dan pemasok energi listrik menyebabkan kerugian [13].

$$P_{Losses} = 3 \times I^2 \times R \times L \quad (2)$$

Penyusutan energi, yang terjadi selama proses penyaluran melalui jaringan, disebabkan oleh gesekan mekanis, kehilangan trafo, dan faktor cuaca, menurunkan efisiensi sistem. Letak antara pembangkit dan gardu induk biasanya sangat jauh, yang menyebabkan timbulnya rugi-rugi daya dan jatuh tegangan. Satu cara untuk mengurangi rugi-rugi daya selama proses penyaluran adalah dengan menggunakan tipe konduktor [14].

III METODOLOGI

A. Metode Newton Raphson



Gambar 6 IEEE-14 bus sistem dan metode *Newton Raphson*

Flowchart ini menjelaskan tahapan simulasi aliran daya menggunakan metode *Newton-Raphson* pada sistem distribusi IEEE 14-bus yang digunakan sebagai model uji dalam integrasi PLTS-DG. Proses ini dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem distribusi dalam memenuhi standar IEEE Std 1547-2018.

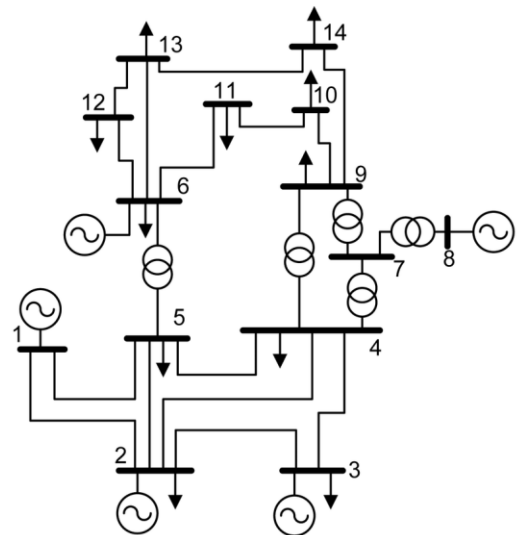
1. Input Data IEEE 14-Bus

Proses dimulai dengan memasukkan data sistem standar IEEE 14-bus yang mencakup konfigurasi jaringan, data beban, dan pembangkit.

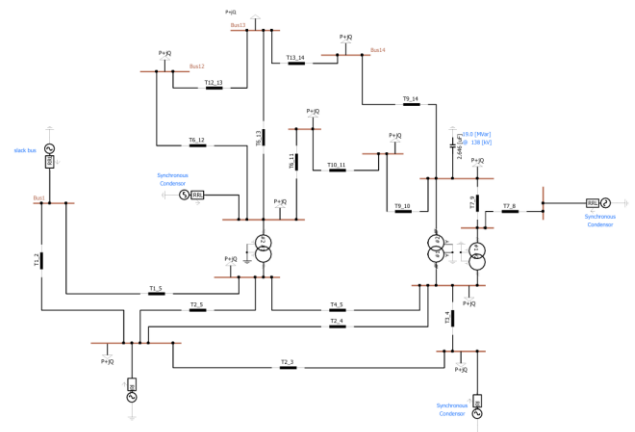
2. Analisis Aliran Daya (*Newton-Raphson*)
Metode *Newton-Raphson* digunakan untuk menghitung tegangan dan sudut fasa tiap bus secara iteratif, hingga konvergen.
3. Evaluasi Hasil
Hasil simulasi dievaluasi dengan memeriksa apakah tegangan semua bus berada dalam batas aman, yaitu antara 0,95pu hingga 1,05pu sesuai standar IEEE 1547.
4. Keputusan
 - Jika semua bus normal, sistem dianggap valid → Solusi diterima
 - Jika ada tegangan abnormal, dilakukan modifikasi sistem.
5. Modifikasi Sistem
Penyesuaian dilakukan, seperti mengubah kapasitas atau lokasi PLTS, lalu simulasi diulang sampai tegangan semua bus sesuai standar.

IV HASIL DAN PEMBAHASAN

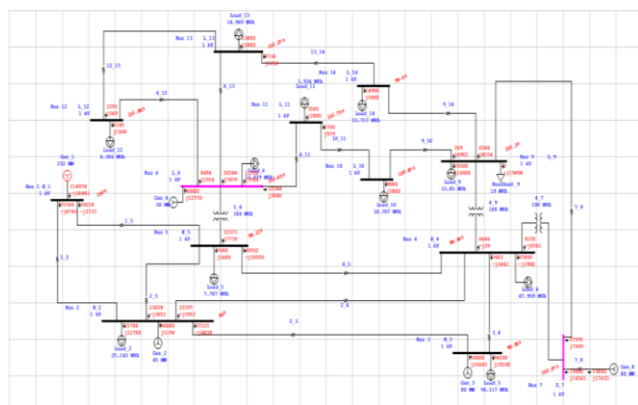
A. Uji Sistem IEEE 14 Bus



Gambar 7 Single line diagram IEEE 14-bus



Gambar 8 IEEE 14 Bus ETAP



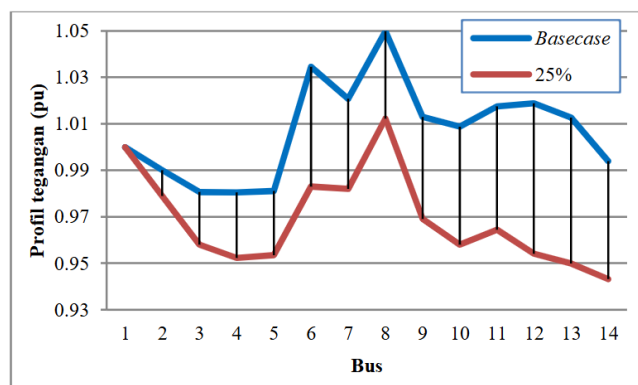
Gambar 9 Load flow 14 Bus

Sistem yang digunakan yaitu menggunakan IEEE 14 bus dengan *Software ETAP Power station 19.0.1* yang dapat dilihat pada gambar yaitu pada *single line diagram* dan *load flow* yang ada. Model ini dirancang untuk studi sistem tenaga (*power flow* dan stabilitas), sehingga dapat digunakan pada kali ini yaitu sebagai:

- Simulasi interkoneksi PLTS (*Distributed Generation*)
- Analisis dampak terhadap tegangan, frekuensi, dan kualitas daya
- Evaluasi proteksi dan respon gangguan sesuai IEEE Std 1547-2018

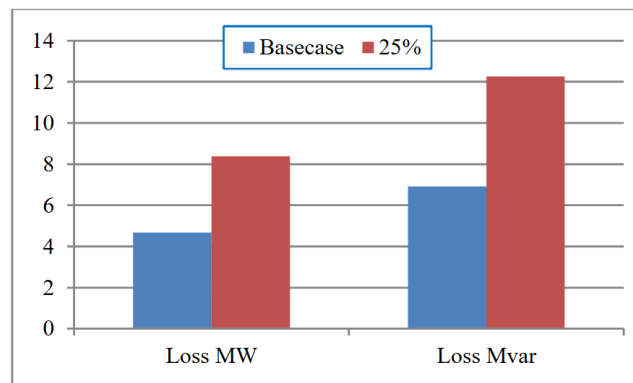
Sistem bus IEEE-14 dikembangkan dan dianalisis. Analisis aliran daya dilakukan melalui metode *Newton Raphson*. Selanjutnya, kondisi pengoperasian ditentukan [15].

B. Basecase



Gambar 10 Profil tegangan ketika *basecase*

Simulasi awal dilakukan untuk mengetahui profil tegangan dan rugi daya pada kondisi sistem tanpa interkoneksi PLTS (*basecase*). Pada bagian ini, beban sistem IEEE 14-bus dinaikkan sebesar 25% dari kondisi normal untuk menciptakan kondisi ekstrem yang di mana tegangan turun hingga melewati batas aman operasi. Berdasarkan simulasi tersebut, ditemukan bahwa Bus 13 dan Bus 14 mengalami penurunan tegangan hingga di bawah batas minimum aman yaitu 0,95 pu, yang dikategorikan sebagai kondisi tegangan kritis.

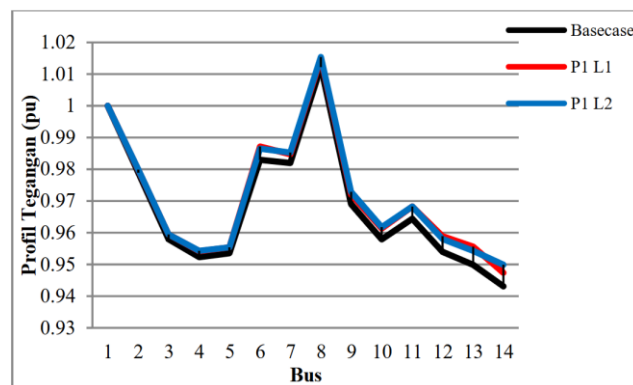


Gambar 11 Rugi-rugi daya setelah beban

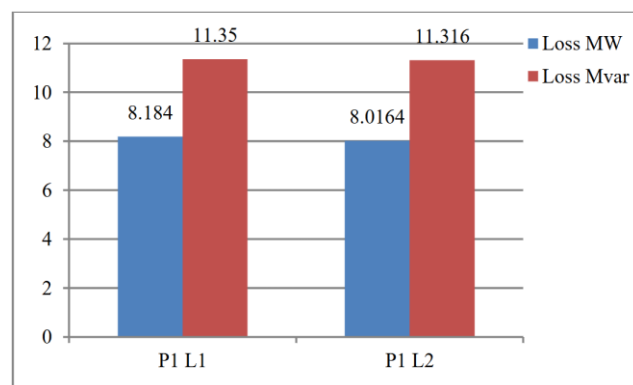
Kondisi ini apabila dikaitkan dalam konteks IEEE Std 1547 yang menetapkan bahwa sistem distribusi yang akan dihubungkan dengan PLTS harus mempertahankan tegangan operasi dalam rentang 0,88–1,10pu, dan lebih idealnya berada dalam zona nominal 0,95–1,05pu. Adanya bus dengan tegangan di bawah 0,95pu menunjukkan perlunya dukungan tegangan dari unit DER seperti PLTS.

Selain itu dapat dilihat pada grafik bahwa simulasi *basecase* mencatat rugi daya aktif sebesar 8,376 MW dan rugi daya reaktif sebesar 12,255 Mvar. Hal tersebut menggambarkan efisiensi sistem distribusi dalam kondisi beban tinggi tanpa dukungan pembangkit lokal. Nilai ini menjadi acuan penting untuk membandingkan pengaruh interkoneksi PLTS dalam menurunkan rugi-rugi sistem.

C. Setelah Interkoneksi PLTS-DG

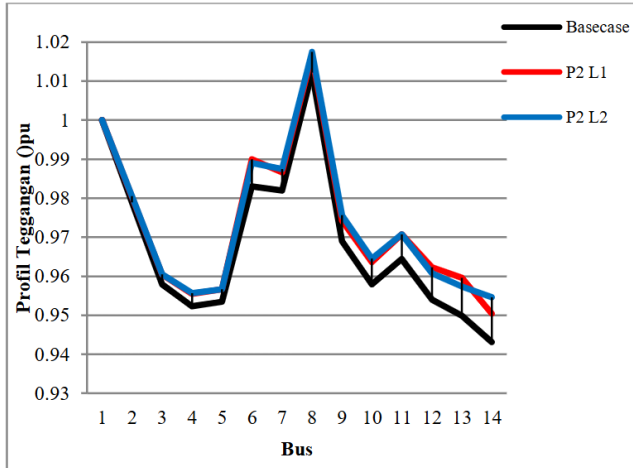


Gambar 12 Grafik profil tegangan PLTS-DG 2.5 MW

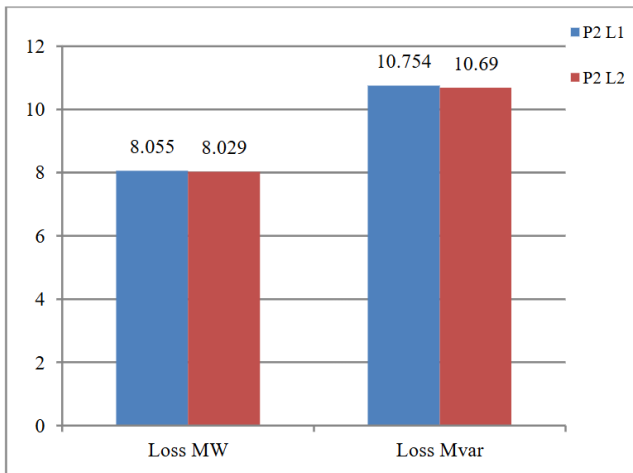


Gambar 13 Rugi-rugi daya PLTS-DG 2.5 MW

Simulasi integrasi PLTS-DG dimulai dengan interkoneksi kapasitas awal sebesar 2,5 MW secara bergantian ke bus-bus dengan tegangan rendah (bus 13 dan 14). Hasil simulasi menunjukkan bahwa kapasitas 2,5 MW belum mampu meningkatkan tegangan hingga melampaui batas aman 0,95pu yang ditetapkan oleh IEEE Standard 1547 sebagai ambang batas sinkronisasi dan operasi stabil.



Gambar 14 Grafik profil tegangan PLTS-DG 5 MW



Gambar 15 Rugi-rugi daya PLTS-DG 5 MW

Simulasi kedua dilakukan dengan meningkatkan kapasitas PLTS-DG menjadi 5 MW. Akan tetapi, integrasi di bus 13 masih belum cukup untuk meningkatkan tegangan menjadi 0,95pu. Namun, ketika dihubungkan ke bus 14, tegangan meningkat menjadi 0,9546pu, mendekati ambang batas aman. Ini menunjukkan bahwa dalam hal kestabilan tegangan, penentuan kapasitas dan lokasi interkoneksi sangat memengaruhi keberhasilan pemenuhan standar IEEE 1547.

Integrasi PLTS-DG berkapasitas 5 MW pada bus 14 juga memengaruhi efisiensi sistem. Sebagaimana ditekankan dalam standar IEEE 1547, rugi daya aktif turun dari 8,376 MW menjadi 8,029 MW, dan rugi daya reaktif turun dari 12,255 MVar menjadi 10,690 MVar. Penurunan ini menunjukkan bahwa kehadiran PLTS secara lokal membantu mengurangi beban aliran daya dari sisi suplai

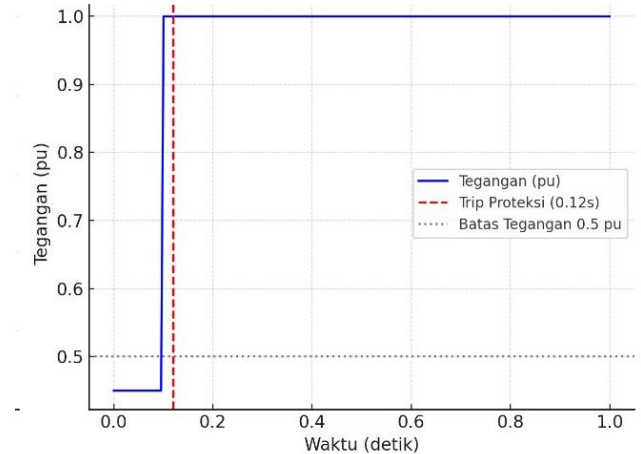
utama. Ini menunjukkan bahwa kehadiran PLTS membantu meningkatkan efisiensi distribusi dan keamanan sistem.

D. Sinkronisasi

Untuk menilai sinkronisasi, waktu koneksi inverter PLTS ke jaringan dan stabilisasi tegangan harus diamati. Berdasarkan simulasi, tegangan *output* inverter stabil pada 400 V dan frekuensi sinkronisasi dicapai dalam waktu kurang dari 0,2 detik. Selain itu, proses sinkronisasi inverter PLTS ke sistem distribusi berjalan dengan baik dan tidak menimbulkan gangguan tegangan, perubahan tegangan, atau *step voltage*. Pada saat koneksi dicatat sebesar 0,75% dari nilai nominal. Hal tersebut jauh di bawah batas maksimum IEEE Standard 1547 sebesar 3%.

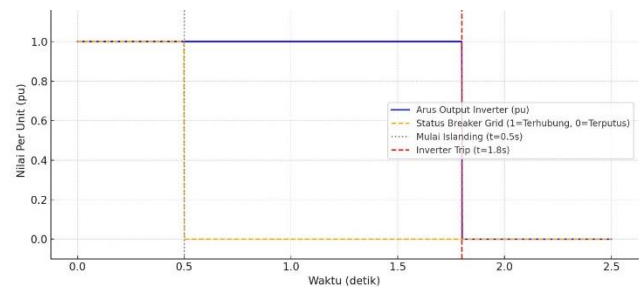
$$\begin{aligned} \text{Step Tegangan} &= \left| \frac{V_{\text{sesudah}} - V_{\text{sebelum}}}{V_{\text{nominal}}} \right| \times 100\% \\ &= \left| \frac{400 - 379}{400} \right| \times 100\% = 0,75\% \end{aligned}$$

E. Proteksi



Gambar 16 Respon proteksi PLTS terhadap undervoltage

Simulasi proteksi dilakukan dengan dua skenario: undervoltage dan islanding. Pada skenario pertama, ketika tegangan turun ke 0,45pu selama 0,2 detik, inverter PLTS memutuskan koneksi ke jaringan dalam waktu 0,12 detik. Batas waktu maksimum menurut IEEE Std 1547 adalah 0,16 detik untuk tegangan di bawah 0,5pu, sehingga sistem memenuhi standar.



Gambar 17 Simulasi respon islanding

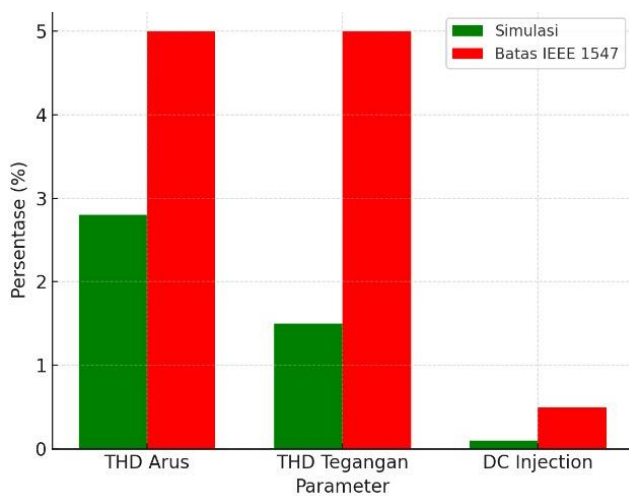
Pada skenario *islanding*, jaringan utama diputus pada $t = 0,5$ detik dan inverter tetap menyuplai beban lokal. Pada t

= 1,8 detik arus inverter turun menjadi nol, menunjukkan bahwa inverter trip setelah 1,3 detik. Waktu ini masih dalam batas maksimal IEEE 1547, yaitu 2 detik.

F. Kualitas Daya

Tabel 1 Evaluasi Kualitas Daya PLTS terhadap IEEE Std 1547

Parameter	Hasil Simulasi	Batas IEEE 1547	Keterangan
THD Arus	2,8%	$\leq 5\%$	Sesuai
THD Tegangan	1,5%	$\leq 5\%$	Sesuai
DC Injection	0,1%	$\leq 0.5\%$	Sesuai
Step Voltage	< 2%	$\leq 3\%$	Sesuai



Gambar 18 Kualitas daya PLTS

Total Harmonic Distortion (THD) pada simulasi ini diuji kualitas nya. Inverter PLTS menghasilkan arus dengan THD sebesar 2,8%, tegangan THD 1,5%, dan DC injection sebesar 0,1%, menurut simulasi. Nilai-nilai ini jauh di bawah batas maksimum IEEE Standard 1547, yaitu 5% untuk THD dan 0,5% untuk DC injection. Step tegangan saat inverter disambungkan juga dicatat kurang dari 2%, tetapi masih dalam batas aman 3%.

G. Keamanan Sistem

Efisiensi energi dan kestabilan tegangan adalah dua komponen yang digunakan untuk menilai keamanan sistem. Dalam sistem IEEE 14-bus, penggabungan PLTS-DG 5 MW menyebabkan peningkatan tegangan dari 0,9431 pu menjadi 0,9509 pu (mendekati batas aman 0,95 pu), dan penurunan rugi daya aktif dari 8,376 MW menjadi 8,029 MW dan rugi daya reaktif dari 12,255 MVar menjadi 10,690 MVar. Ini menunjukkan bahwa PLTS-DG meningkatkan efisiensi sistem dan membantu menjaga kestabilan tegangan.

H. Kesesuaian terhadap IEEE Std 1547

Tabel 2 Kesesuaian Simulasi terhadap Standar IEEE 1547

Parameter	Hasil Simulasi	Batas IEEE 1547	Keterangan
Tegangan (pu)	0,9509 pu	0,88 – 1,10 pu	Sesuai
Frekuensi sinkronisasi	< 0,2 detik	$\pm 1\%$ dari 50 Hz	Sesuai
THD Arus	2,8%	$\leq 5\%$	Sesuai
THD Tegangan	1,5%	$\leq 5\%$	Sesuai
DC Injection	0,1%	$\leq 0.5\%$	Sesuai
Step Tegangan saat sinkronisasi	< 2%	$\leq 3\%$	Sesuai
Respon undervoltage (trip)	0,12 detik	≤ 0.16 detik (untuk < 0.5 pu)	Sesuai
Respon islanding (trip)	1,3 detik	≤ 2 detik	Sesuai

Hasil simulasi menunjukkan bahwa integrasi PLTS skala kecil pada sistem distribusi radial dapat memenuhi standar IEEE Std 1547-2018 dalam hal sinkronisasi, perlindungan, kualitas daya, dan keamanan sistem dengan pengaturan yang tepat. Meskipun data berasal dari sistem yang saat ini diuji, model ini dapat diterapkan pada sistem distribusi lain di Indonesia. Penambahan skenario gangguan dan pengukuran kualitas daya menegaskan bahwa sistem PLTS-DG bekerja dengan aman dan stabil di jaringan distribusi 20 kV.

V KESIMPULAN

Adapun kesimpulan dari penelitian ini setelah dilakukannya simulasi dan percobaan yaitu:

1. Interkoneksi PLTS-DG sebesar 5 MW ke sistem distribusi mampu meningkatkan profil tegangan yang sebelumnya kritis pada bus 13 dan 14, mendekati batas aman yang disyaratkan oleh IEEE Std 1547-2018.
2. Interkoneksi PLTS juga secara signifikan mengurangi rugi-rugi daya aktif dan reaktif, sehingga meningkatkan efisiensi sistem distribusi listrik.
3. Sistem berhasil memenuhi semua kriteria teknis IEEE 1547, termasuk dalam hal: Sinkronisasi tegangan dan frekuensi; Respon proteksi terhadap undervoltage dan islanding; Kualitas daya (THD, DC injection, step voltage)
4. Pemilihan lokasi dan kapasitas interkoneksi PLTS sangat mempengaruhi keberhasilan dalam memenuhi standar teknis dan menjaga kestabilan sistem.
5. Metode Newton-Raphson yang diterapkan melalui perangkat lunak ETAP terbukti efektif dalam mengevaluasi dampak teknis interkoneksi PLTS terhadap sistem distribusi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Dean Corio, S.T., M.T. dan Bapak Syamsyarief Baqaruzi, S.T., M.T., atas arahan dan bimbingannya selama perkuliahan ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Program Studi Teknik Elektro ITERA yang telah memberikan dukungan dan fasilitas yang diperlukan selama proses penelitian dan simulasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. Adjikri, "Strategi Pengembangan Energi Terbarukan di Indonesia," Jurnal Online Mahasiswa (JOM) Bidang Teknik Elektro, vol. 1, no. 1, 2017.
- [2] Presiden Republik Indonesia, "Percepatan Pengembangan Energi Terbarukan untuk Penyediaan Tenaga Listrik," in Peraturan Presiden (Perpres) Nomor 112 Tahun 2022, Jakarta, 2022.
- [3] I. B Sulistiawati, I. Made Wartana, and C. Setiawan, "Analisis Performa Interkoneksi PLTS Pada Sistem Kelistrikan 20 kV Lombok Nusa Tenggara Barat," *Jurnal FORTECH*, vol. 4, no. 2, pp. 64–73, Dec. 2023.
- [4] Daud, Sa'adah & Abdul Kadir, A. F & Gan, Chin, "The impacts of distributed Photovoltaic generation on power distribution networks losses", 11-15. 10.1109/SCORED.2015.7449305, 2015.
- [5] Abdul Kadir, Aida F., et al. "Integrating Photovoltaic Systems in Power System: Power Quality Impacts and Optimal Planning Challenges." *International Journal of Photoenergy*, vol. 2014, no. 1, 2013, p. 321826, <https://doi.org/10.1155/2014/321826>. Accessed 1 Sept. 2025.
- [6] _"IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces," IEEE Std 1547-2018 (Revision of IEEE Std 1547-2003), pp. 1-138, 2018.
- [7] J. A. Boudreaux, Design, simulation, and construction of an IEEE 14-bus power system, Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College, 2018.
- [8] S. T. K. A.Subramaniya Siva, "Analysis of Stability in IEEE 14 Bus System using ETAP Software," in Proceedings of the Fourth International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC 2020), Seoul, 2020.
- [9] T. Ackermann, G. Andersson, and L. Söder, "Distributed generation: a definition," **Electric Power Systems Research**, vol. 57, no. 3, pp. 195–204, 2001, doi: 10.1016/S0378-7796(01)00101-8.
- [10] U.S. Environmental Protection Agency, "Distributed Generation of Electricity and its Environmental Impacts," U.S. Environmental Protection Agency, 2 April 2025. [Online]. Available: https://www.epa.gov/energy/distributed-generation-electricity-and-its-environmental-impacts?utm_source=
- [11] P. Doloksaribu, "Analisa Keandalan Sistem Distribusi Tenaga Listrik," Jurnal Teknik Elektro Univ. Cendrawasih, vol. 1, no. 1, pp. 20-25, 2010.
- [12] Y. Moa and I. B. S. Awan Uji Krismanto, "Analisis Pengaruh Integrasi PLTS On-Grid Terhadap Stabilitas Tegangan Sistem Distribusi Listrik Maumere Pada Penyulang Geliting," vol. 8, pp. 384–394, 2024.
- [13] B. A. Anggoro, S. B. Utomo, and I. Widiastuti, "Analisa Rugi-Rugi Daya Dan Jatuh Tegangan Pada Saluran Transmisi 150 kV GI Pati Bay GI Jekulo Menggunakan ETAP 12.6.0", *elektrika*, vol. 12, no. 2, pp. 80–85, Dec. 2020, doi: 10.26623/elektrika.v12i2.2828.
- [14] C. I. Cahyadi, K. Atmia, and A. Fitriani, "Analisis Pengaruh Rugi-Rugi Daya Pada Jaringan Transmisi 150 kV Menggunakan Software Etap 12.6," *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 126--130, 2022.
- [15] Muzzammel, R., Khail, I., Tariq, M.H., Asghar, A.M. and Hassan, A. "Design and Power Flow Analysis of Electrical System Using Electrical Transient and Program Software," *Energy and Power Engineering*, vol. 11, pp. 186-199, 2019.

BIODATA PENULIS



Saya, Muhammad Hakim Maarif, adalah mahasiswa Program Studi Teknik Elektro Institut Teknologi Sumatera (ITERA) angkatan tahun 2022. Saat ini saya sedang menempuh mata kuliah *Sistem Distribusi dan Transmisi Tenaga* sebagai bagian dari kurikulum program sarjana Teknik Elektro. Minat saya dalam bidang sistem tenaga listrik, khususnya distribusi dan transmisi energi, mendorong saya untuk aktif dalam kegiatan akademik dan proyek-proyek yang berkaitan dengan kelistrikan..



Saya M Dzamar Fadhliansyah adalah mahasiswa Program Studi Teknik Elektro Institut Teknologi Sumatera (ITERA) angkatan 2021. Saat ini saya sedang menempuh mata kuliah *Sistem Distribusi dan Transmisi Tenaga* sebagai bagian dari kurikulum program sarjana Teknik Elektro. Minat saya dalam bidang sistem tenaga listrik, khususnya distribusi dan transmisi energi.