

Studi Pengaruh Implementasi PLTS dan BESS terhadap Kestabilan Sistem Jaringan Terisolasi di Indonesia

Ihsan Irfanto^{1*}, Budi Sudiarto¹

¹Universitas Indonesia

*Corresponding author, e-mail: ihsan.irfanto@ui.ac.id

Abstrak

Saat ini, listrik sudah menjadi suatu kebutuhan bagi kehidupan manusia. Namun dalam kenyataannya, masih banyak sistem tenaga listrik di Indonesia yang masih belum dapat menyalurkan listrik kepada seluruh penduduk Indonesia. Hal tersebut dapat dibuktikan dari rasio elektrifikasi nasional yaitu masih berada di angka 99,45% pada akhir tahun 2021 dan menargetkan di angka 100% pada tahun 2022. Bahan bakar fosil masih menjadi pilihan terbesar sebagai sumber pembangkitan energi listrik di Indonesia. Salah satu usaha penghematan bahan bakar fosil tersebut ialah dengan memaksimalkan penggunaan EBT sebagai sumber pembangkitan energi listrik. Selain itu, target untuk tercapainya *net zero emission* tahun 2060 menjadikan pembangkit EBT akan terus ditingkatkan dimana bauran EBT di tahun 2025 mencapai 23% sesuai dengan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2021 – 2060. Tujuan dari penelitian ini adalah studi pengaruh implementasi PLTS dan BESS terhadap kestabilan suatu sistem terisolasi di Indonesia sebagai usaha mengurangi penggunaan pembangkit listrik berbahan bakar fosil dan peningkatan penetrasi pembangkit EBT. Penelitian ini dilakukan menggunakan perangkat lunak DIGSILENT PowerFactory. Hasil analisis aliran daya dan kestabilan sistem menunjukkan bahwa pemasangan PLTS dan BESS pada sistem jaringan terisolasi di Indonesia beroperasi pada tegangan yang aman baik pada waktu beban puncak siang hari ataupun malam hari atau berada pada batas aturan jaringan di Indonesia yaitu $\pm 10\%$ dari tegangan nominalnya. Selain itu sistem pun mampu menjaga nilai frekuensi dan tegangan sistem ketika terjadi gangguan hingga dilakukan tindakan penanggulangan yang ditunjukkan pada nilai tegangan yang berada pada batas nilai tegangan $\pm 10\%$ dari tegangan nominalnya dan nilai frekuensi $50 \text{ Hz} \pm 2,5\%$. Berdasarkan hasil analisis aliran daya dan stabilitas, rencana pemasangan PLTS dengan BESS pada sistem jaringan terisolasi di Indonesia dapat dilaksanakan dan layak untuk diimplementasikan

Kata Kunci: PLTS, BESS, aliran daya, kestabilan, jaringan terisolasi

Abstract

In this era, electricity has become a necessity for human life. But there are still many electric power systems in Indonesia that are still unable to deliver electricity to the entire Indonesian population. This can be proven from the national electrification ratio, which is still at 99.45% at the end of 2021 and targets 100% in 2022. Fossil fuels are still the largest choice as a source of electricity generation in Indonesia. One of the efforts to save fossil fuels is to maximize the use of EBT as a source of electricity generation. In addition, the target to achieve net zero emissions in 2060 makes NRE plants will continue to be increased where the NRE mix in 2025 reaches 23% in accordance with the 2021 – 2060 Electricity Supply Business Plan (RUPTL). The purpose of this study is to study the effect of the implementation of PLTS and BESS on the stability of an isolated system in Indonesia as an effort to reduce the use of fossil fuel power plants and increase the penetration of NRE plants. This research was conducted using DIGSILENT PowerFactory software. The results of the analysis of power flow and system stability show that the installation of PLTS and BESS in isolated electrical systems in Indonesia operates at a safe voltage either during peak loads during the day or night or is within the limit of network rules in Indonesia, which is $\pm 10\%$ of the nominal voltage. In addition, the system is also able to maintain the frequency and voltage values of the system when there is a disturbance until countermeasures are taken which are shown in the voltage value which is at the limit of the voltage value of $\pm 10\%$ of the nominal voltage and the frequency value of $50 \text{ Hz} \pm 2.5\%$. Based on the results of power flow and stability analysis, the plan to install PLTS with BESS in an isolated network system in Indonesia can be implemented and is feasible to be implemented

Keywords: SPP, BESS, load flow, stability, isolated grid

PENDAHULUAN

Saat ini, listrik sudah menjadi suatu kebutuhan bagi kehidupan manusia. Namun dalam kenyataannya, masih banyak sistem tenaga listrik di Indonesia yang masih belum dapat menyalurkan listrik kepada seluruh penduduk Indonesia yang dibuktikan dari rasio elektrifikasi nasional masih berada di angka 99,45% pada akhir tahun 2021 dan menargetkan di angka 100% pada tahun 2022 [1], [2].

Hingga saat ini, bahan bakar fosil masih mendominasi sebagai sumber energi pembangkitan listrik di Indonesia dan dianggap sebagai energi yang kurang bersih serta dapat menimbulkan masalah dalam jangka yang panjang [3]. Pemanfaatan EBT sebagai energi yang bersih dapat menjadi salah satu usaha dalam mengatasi permasalahan tersebut sehingga dapat mengurangi penggunaan bahan bakar fosil. Salah satu EBT berpotensi di Indonesia adalah energi matahari dan energi tersebut dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi pembangkit listrik atau biasa disebut dengan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) [4].

Namun, pemanfaatan EBT sebagai sumber energi pembangkitan listrik menimbulkan permasalahan akibat sifat intermitensinya yang dapat menyebabkan penurunan kualitas daya dan terganggunya stabilitas pada sistem tenaga listrik [5]. Dalam mengatasi permasalahan tersebut, *Battery Energy Storage System* (BESS) dapat menjadi salah satu solusi. BESS dapat melakukan fungsi *ancillary service*, dengan mempertahankan nilai tegangan dan frekuensi sesuai dengan peraturan yang telah ditetapkan [6]. Serta, BESS juga dapat berfungsi sebagai cadangan energi dalam keadaan darurat seperti saat pemadaman generator dan fluktuasi daya keluaran dari pembangkit EBT.

PLTS dan BESS dapat digunakan pada sistem jaringan terisolasi untuk membantu memenuhi kebutuhan beban dan mengurangi kebutuhan energi listrik dari sistem jaringan utama PLN sehingga berpotensi mengurangi penggunaan bahan bakar fosil [4], [7]. Selain itu, implementasi PLTS dan BESS ini berpotensi membantu mencapai target rasio elektrifikasi di angka 100% pada tahun 2022 terutama untuk daerah yang terisolasi dan sulit dijangkau.

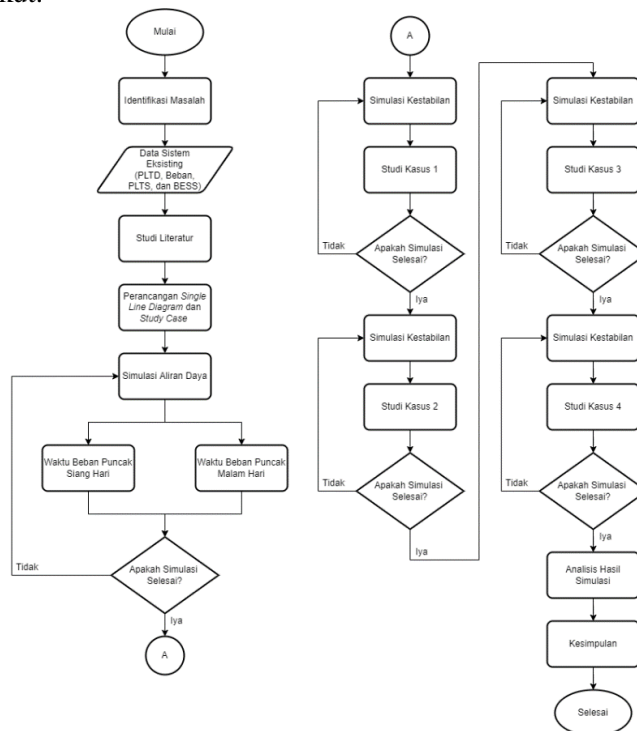
Penelitian [6] membahas tentang pengaruh pemasangan BESS terhadap kestabilan sistem jaringan terisolasi di Pulau Timor akibat peningkatan penetrasi PLTS dengan menggunakan perangkat lunak DIGSILENT Power Factory. Penelitian [8] membahas tentang dampak meningkatnya penetrasi PV pada kestabilan transien sistem tenaga listrik besar di interkoneksi Amerika Serikat bagian barat. Penelitian [9] membahas tentang dampak dari meningkatnya penetrasi PV pada stabilitas frekuensi sistem tenaga listrik dan mengusulkan *sizing* BESS untuk mengurangi dampak tersebut. Penelitian [10] membahas tentang pengaruh pembangkitan Solar PV terhadap kestabilan tegangan jangka panjang dari sistem tenaga listrik. Penelitian ini berfokus pada simulasi kestabilan sistem eksisting jaringan terisolasi di Indonesia untuk menganalisis dampak dari pengimplementasian PLTS dan BESS. Metode simulasi kestabilan sistem dilakukan dengan 4 studi kasus dan parameter yang diperhatikan serta dijadikan dasar analisis adalah respon sistem berupa perubahan tegangan dan frekuensi sistem eksisting tersebut.

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah bagaimana pengaruh implementasi PLTS dan BESS terhadap kestabilan sistem terisolasi di Indonesia. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh implementasi PLTS dan BESS terhadap kestabilan suatu sistem terisolasi di Indonesia. Dengan dilakukannya studi implementasi ini, diharapkan dapat membuktikan bahwa implementasi PLTS dan BESS tidak mengganggu stabilitas sistem eksisting. Dengan begitu, penetrasi PLTS dan BESS pada sistem jaringan terisolasi di Indonesia dapat ditingkatkan dan menjadi solusi dalam pengurangan penggunaan pembangkitan listrik tenaga fosil serta membantu meningkatkan rasio elektrifikasi Indonesia menuju 100%.

METODE

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan hasil analisis pengaruh pemasangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan *Battery Energy Storage System* (BESS) pada sistem sistem jaringan terisolasi 20 kV di Indonesia. Penelitian dimulai dengan mencari studi literatur sebagai dasar teori dari pelaksanaan studi ini yang bersumber dari buku, *e – book*, jurnal, internet, dan konsultasi dengan dosen pembimbing. Selanjutnya, dilakukan pengumpulan data – data yang diperlukan untuk membuat *single line diagram*. Data – data yang dibutuhkan berupa data generator, transformator, kabel transmisi, beban dan data dari PLTS dan BESS. Setelah mendapatkan data yang dibutuhkan, akan dilakukan pembuatan atau perancangan dari *Single Line Diagram* (SLD) serta *Study Case* yang akan dilakukan. Perancangan SLD ini dimodifikasi dengan

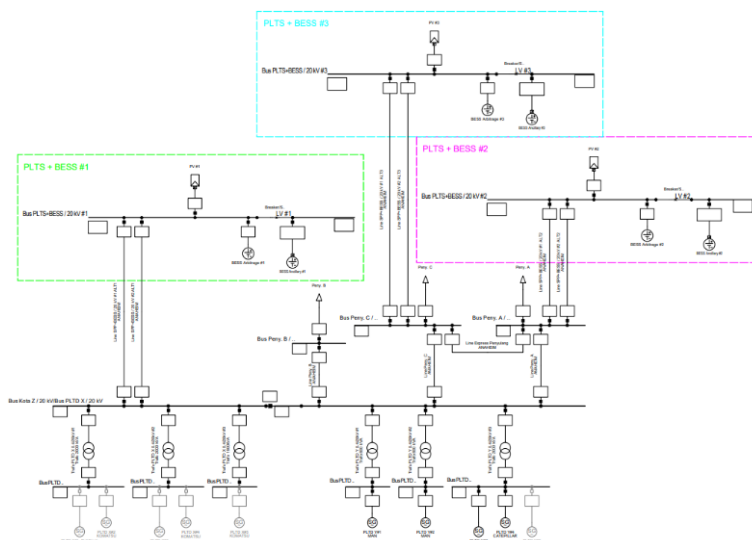
membagi jumlah PV dan BESS menjadi 3 bagian dengan kapasitas yang rata di 3 lokasi yang berbeda agar mendapatkan hasil simulasi dan analisis yang lebih akurat. Setelah dilakukan pemodelan SLD dengan perangkat lunak DIgSILENT PowerFactory, dilakukan simulasi aliran daya dan hasil dari simulasi pun akan dicatat dan dilampirkan dalam bentuk tabel. Setelah selesai melakukan simulasi aliran daya, dilakukan simulasi kestabilan dengan skenario gangguan yang akan digunakan untuk melihat respon sistem ketika dilakukan implementasi PLTS dan BESS ke sistem tersebut. Hasil perancangan dan simulasi kemudian akan dianalisis terhadap *Grid Code* Indonesia yang digunakan pada penelitian ini. Diagram alir penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Kondisi Sistem Jaringan Terisolasi di Indonesia

Single Line Diagram (SLD) atau diagram satu garis merupakan pemodelan menggunakan komponen-komponen yang tersedia dengan tujuan untuk membuat simulasi sistem tenaga listrik. Penelitian ini menggunakan perangkat lunak DIgSILENT PowerFactory untuk membuat pemodelan SLD dan ditunjukkan pada Gambar 2 di bawah ini.



Gambar 2. Single Line Diagram Sistem Jaringan Terisolasi di Indonesia

Simulasi dilakukan pada keadaan beban puncak di siang hari dan malam hari. Lokasi dari penelitian ini memiliki beban puncak sebesar 3,375 MW pada malam hari dan 1,875 MW pada siang hari. Selanjutnya, pada Tabel 1 ditunjukkan data pembebanan dan pembangkitan pada lokasi tersebut mulai dari data beban, pembangkitan, serta *dispatch* dari PV dan BESS yang digunakan pada sistem terisolasi tersebut

Tabel 1. Profil Pembebanan dan Pembangkitan pada Sistem Terisolasi 20 kV di Indonesia

No	Komponen	Tipe	Beban Siang Hari (kW)	Beban Malam Hari (kW)
1	Peny. C	Beban	1875	3375
2	Peny. B	Beban	1875	2250
3	Peny. A	Beban	1500	1875
4	PLTD X	Pembangkit	0	0
5	PLTD Y	Pembangkit	1281,4	1390
6	PV #1	Pembangkit	15213	-
7	BESS #1	Storage	-10968	6850

DIgSILENT PowerFactory merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk menganalisis sistem tenaga listrik mulai dari pembangkitan, transmisi, distribusi, dan industri [11]. Pada penelitian ini, dilakukan 2 (dua) jenis simulasi, yaitu aliran daya dan kestabilan transien.

Analisa dan Simulasi Aliran Daya

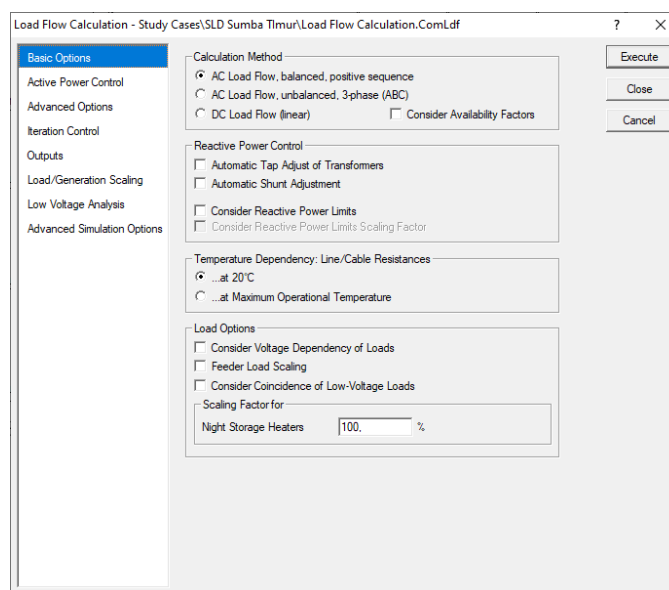
Pada perangkat lunak DIgSILENT PowerFactory, simulasi aliran daya pada sistem tenaga listrik dilakukan dengan menggunakan metode Newton-Raphson. Analisis aliran daya merupakan metode yang dilakukan untuk melihat aliran daya listrik dari sumber pembangkitan hingga beban pada kondisi tunak (*steady state*) [12] dan pada penelitian ini aliran daya dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui kondisi eksisting sistem tenaga listrik sesudah dilakukannya pemasangan PLTS dan BESS. Pada penelitian ini, terdapat 2 skenario pelaksanaan simulasi aliran daya pada sistem eksisting, yaitu:

1. Skenario 1: Simulasi aliran daya pada waktu beban puncak siang hari
2. Skenario 2: Simulasi aliran daya pada waktu beban puncak malam hari

Gambar 3 dan Gambar 4 menunjukkan simbol serta beberapa menu pengaturan saat melakukan simulasi aliran daya dan merupakan langkah – langkah untuk melakukan simulasi aliran daya [13].



Gambar 3. Simbol Simulasi Aliran Daya



Gambar 4. Menu Pengaturan Simulasi Aliran Daya

Analisa dan Simulasi Kestabilan

Kestabilan pada sistem tenaga listrik ialah kondisi dimana sistem dapat mempertahankan keadaan ekuilibrium (setimbang) dan dapat kembali ke kondisi normal saat terjadi gangguan. Secara umum, Kestabilan sistem tenaga listrik dapat diklasifikasikan menjadi tiga bagian utama, yaitu kestabilan sudut rotor, kestabilan tegangan, dan kestabilan frekuensi [14].

Perangkat lunak DIgSILENT PowerFactory menyediakan opsi simulasi kestabilan yang dapat dijalankan dengan memilih *RMS/EMT Simulation* pada *toolbox* bagian atas tampilan perangkat lunak. Simulasi ini dapat digunakan untuk menganalisis efek transien baik pada keadaan seimbang maupun tidak seimbang [15].

Simulasi kestabilan digunakan untuk mengetahui respon sistem apabila mengalami gangguan atau kejadian lainnya. Parameter yang diamati pada analisis kestabilan di dalam penelitian ini adalah tegangan, frekuensi, serta keluaran dari PV, BESS, dan pembangkit yang digunakan dalam sistem. Analisa kestabilan akan disimulasikan dalam 4 (empat) studi kasus pada sistem jaringan terisolasi 20 kV di Indonesia untuk menganalisis respon sistem terhadap gangguan tersebut. Tabel 2 menampilkan 4 (empat) studi kasus yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 2. Studi Kasus Simulasi Stabilitas Sistem Tenaga Listrik

No	Studi Kasus	Waktu Pelaksanaan	Deskripsi Studi Kasus
1	Kasus 1	Siang Hari	PV Drop 100% pada kondisi beban puncak di siang hari
2	Kasus 2	Siang Hari	Gangguan pada salah satu saluran dan <i>clearance</i> dalam waktu 700 ms pada kondisi beban puncak di siang hari
3	Kasus 3	Malam Hari	Gangguan pada BESS
4	Kasus 4	Malam Hari	Gangguan pada salah satu saluran dan <i>clearance</i> dalam waktu 700 ms pada kondisi beban puncak di malam hari

Aturan Jaringan Batas Rentang Tegangan dan Frekuensi Sistem jaringan di Indonesia

Indonesia memiliki aturan jaringan untuk sistem kelistrikannya dalam rangka menjaga kemandirian, keandalan, dan efisiensi dari penyaluran tenaga listrik bagi konsumennya. Oleh karena itu, salah satu langkah untuk mengatur dan menjaga hal tersebut, sistem kelistrikan Indonesia dibagi menjadi 5 sistem besar yang meliputi [16]:

1. Sistem Jawa, Madura, dan Bali (JAMALI)
2. Sistem Sumatera
3. Sistem Sulawesi
4. Sistem Kalimantan
5. Sistem Nusa Tenggara, Maluku, dan Papua

Pada penelitian ini, sistem terisolasi yang akan diuji merupakan sistem tegangan menengah 20 kV dan dapat berlokasi pada kelima sistem kelistrikan tersebut. Berikut merupakan beberapa parameter yang diatur untuk pemenuhan fungsi dari aturan jaringan [17]:

Tabel 3. Batas Rentang Variasi Tegangan

No	Tegangan Nominal	Rentang	Deskripsi
1	20 kV	+5% dan -10%	Kondisi Normal

Tabel 4. Batas Rentang Variasi Frekuensi

No	Frekuensi Nominal	Rentang	Deskripsi
1	50 Hz	49,5 Hz – 50,5 Hz	Kondisi Normal

Tabel 5. Batas Rentang Frekuensi Operasi

No	Rentang Frekuensi	Rentang Waktu Operasi
1	51,50 Hz < f ≤ 52,00 Hz	Beroperasi selama paling singkat 15 menit
2	51,00 Hz < f ≤ 51,50 Hz	Beroperasi selama paling singkat 90 menit
3	49,00 Hz < f ≤ 51,00 Hz	Beroperasi secara terus - menerus
4	47,50 Hz < f ≤ 49,00 Hz	Beroperasi selama paling singkat 90 menit
5	47,00 Hz < f ≤ 47,50 Hz	Beroperasi selama paling singkat 6 menit

Pada Tabel 3, disajikan batas rentang variasi tegangan pada sistem kelistrikan dimana perubahan tegangan pada jaringan harus dipertahankan sesuai dengan besaran yang terdapat pada tabel tersebut. Selanjutnya pada Tabel 4 dan Tabel 5 ditampilkan batas rentang variasi frekuensi serta waktu operasinya dalam sistem kelistrikan, sistem pun harus mampu mempertahankan dalam batasan tersebut, dan desain unit pembangkit dan peralatan harus dapat beroperasi sesuai batas tersebut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi dan Analisa Aliran Daya Waktu Beban Puncak Siang Hari

Analisa aliran daya dilakukan pada beban puncak siang hari untuk mengetahui kondisi sistem ketika interkoneksi PLTS dan BESS dengan jaringan eksisting dioperasikan secara bersamaan. Dalam skenario ini, PLTS diasumsikan menyuplai daya secara maksimum dan BESS diasumsikan dalam keadaan *charging* yang maksimum.

Tabel 6. Kondisi Tegangan Bus Skenario Interkoneksi PLTS dan BESS Waktu Beban Puncak Siang Hari

No	Bus	Tegangan Nominal (kV)	Tegangan (p.u.)
1	Bus PLTD X / 20 kV	20	1,00
2	Bus PLTD X#1	0,4	1,00
3	Bus PLTD X#2	0,4	1,00
4	Bus PLTD X#3	0,4	1,00
5	Bus PLTD Y / 20 kV	20	1,00
6	Bus PLTD Y#1	0,4	1,00
7	Bus PLTD Y#2	0,4	1,01
8	Bus PLTD Y#3	0,4	1,01
9	Bus PLTS+BESS / 20 kV #1	20	1,00
10	Bus PLTS+BESS / 20 kV #2	20	1,00
11	Bus PLTS+BESS / 20 kV #3	20	1,00
12	Bus Peny. A / 20 kV	20	1,00
13	Bus Peny. B / 20 kV	20	0,97
14	Bus Peny. C / 20 kV	20	1,00

Nilai tegangan hasil simulasi aliran daya pada waktu beban puncak siang hari dapat dilihat pada Tabel 6. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai tegangan pada sistem berada pada kondisi yang aman atau dalam batas toleransi *Grid Code* PLN yaitu $\pm 10\%$ dari tegangan nominal dengan tegangan tertinggi bernilai 1,01 p.u. pada Bus PLTD Y#2 dan Bus PLTD Y#3 dan tegangan terendah berada pada Bus Peny. B dengan nilai 0,97 p.u..

Tabel 7. Kondisi Pembebanan Penghantar Skenario Interkoneksi PLTS dan BESS Waktu Beban Puncak Siang

No	Dari	Ke	Pembebanan (%)
1	Bus Peny. C / 20 kV	Bus Peny. A / 20 kV	2,09
2	Bus Peny. A / 20 kV	Bus PLTD Y / 20 kV	4,76
3	Bus Peny. B / 20 kV	Bus PLTD Y / 20 kV	23,63
4	Bus Peny. C / 20 kV	Bus PLTD Y / 20 kV	0,86
5	Bus PLTS+BESS / 20 kV #1	Bus PLTD X / 20 kV	7,04
6	Bus PLTS+BESS / 20 kV #2	Bus Peny. A / 20 kV	11,06
7	Bus PLTS+BESS / 20 kV #3	Bus Peny. C / 20 kV	11,07
8	Bus PLTS+BESS / 20 kV #1	Bus PLTD X / 20 kV	7,04
9	Bus PLTS+BESS / 20 kV #2	Bus Peny. A / 20 kV	11,06
10	Bus PLTS+BESS / 20 kV #3	Bus Peny. C / 20 kV	11,07

Tabel 7 menampilkan persentase pembebanan penghantar ketika melakukan simulasi aliran daya pada beban puncak siang hari dengan interkoneksi PLTS dan BESS. Pembebanan terbesar berada pada saluran penghubung antara Bus Peny. B dengan Bus PLTD Y sebesar 23,63% dan pembebanan terkecil berada pada saluran penghubung antara Bus Peny. C dengan Bus PLTD Y sebesar 0,86%. Kondisi pembebanan penghantar yang digunakan berada pada kondisi atau batas yang sesuai.

Tabel 8. Kondisi Pembebanan Transformator Skenario Interkoneksi PLTS dan BESS Waktu Beban Puncak Siang

No	ID Transformator	Kapasitas (MVA)	Pembebanan (%)
1	Trafo PLTD X#1	2	-
2	Trafo PLTD X#2	2	-
3	Trafo PLTD X#3	1,6	-
4	Trafo PLTD Y#1	0,8	23,17
5	Trafo PLTD Y#2	0,8	49,38
6	Trafo PLTD Y#3	0,8	37,25

Persentase pembebanan transformator yang digunakan ketika dilakukan simulasi aliran daya pada beban puncak siang hari dapat dilihat pada Tabel 8. Kondisi pembebanan pada transformator sistem eksisting berada pada batas optimal pembebanan transformator, yaitu 80% [18]. Sehingga dapat dikatakan bahwa pembebanan transformator masih dalam batas aman untuk pengoperasiannya.

Simulasi dan Analisa Aliran Daya Waktu Beban Puncak Malam Hari

Analisa aliran daya dilakukan pada beban puncak malam hari untuk mengetahui kondisi sistem ketika beroperasinya BESS dengan jaringan eksisting secara bersamaan. Dalam skenario ini, BESS merupakan komponen suplai utama dengan melakukan *discharging* secara maksimal dan generator hanya beroperasi sebagai *peaker*.

Tabel 9. Kondisi Tegangan Bus Skenario Interkoneksi PLTS dan BESS Waktu Beban Puncak Malam Hari

No	Bus	Tegangan Nominal (kV)	Tegangan (p.u.)
1	Bus PLTD X / 20 kV	20	1,00
2	Bus PLTD X#1	0,4	1,00
3	Bus PLTD X#2	0,4	1,00
4	Bus PLTD X#3	0,4	1,00
5	Bus PLTD Y / 20 kV	20	1,00
6	Bus PLTD Y#1	0,4	1,00
7	Bus PLTD Y#2	0,4	1,01
8	Bus PLTD Y#3	0,4	1,01
9	Bus PLTS+BESS / 20 kV #1	20	1,00
10	Bus PLTS+BESS / 20 kV #2	20	1,00
11	Bus PLTS+BESS / 20 kV #3	20	1,00
12	Bus Peny. A / 20 kV	20	1,00
13	Bus Peny. B / 20 kV	20	0,96
14	Bus Peny. C / 20 kV	20	1,00

Nilai tegangan hasil simulasi aliran daya pada waktu beban puncak malam hari dapat dilihat pada Tabel 9. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai tegangan pada sistem berada pada kondisi yang aman atau dalam batas toleransi *Grid Code* PLN yaitu $\pm 10\%$ dari tegangan nominal dengan tegangan tertinggi bernilai 1,01 p.u. pada Bus PLTD Y#2 dan Bus PLTD Y#3 dan tegangan terendah berada pada Bus Peny. B dengan nilai 0,96 pu.

Tabel 10. Kondisi Pembebanan Penghantar Skenario Interkoneksi PLTS dan BESS Waktu Beban Puncak Malam Hari

No	Dari	Ke	Pembebanan (%)
1	Bus Peny. C / 20 kV	Bus Peny. A / 20 kV	7,29
2	Bus Peny. A / 20 kV	Bus PLTD Y / 20 kV	7,55
3	Bus Peny. B / 20 kV	Bus PLTD Y / 20 kV	28,57
4	Bus Peny. C / 20 kV	Bus PLTD Y / 20 kV	1,54
5	Bus PLTS+BESS / 20 kV #1	Bus PLTD X / 20 kV	17,34
6	Bus PLTS+BESS / 20 kV #2	Bus Peny. A / 20 kV	12,39
7	Bus PLTS+BESS / 20 kV #3	Bus Peny. C / 20 kV	12,39
8	Bus PLTS+BESS / 20 kV #1	Bus PLTD X / 20 kV	17,34
9	Bus PLTS+BESS / 20 kV #2	Bus Peny. A / 20 kV	12,39
10	Bus PLTS+BESS / 20 kV #3	Bus Peny. C / 20 kV	12,39

Tabel 10 menampilkan persentase pembebanan penghantar ketika melakukan simulasi aliran daya pada beban puncak siang hari dengan interkoneksi PLTS dan BESS. Pembebanan terbesar berada pada saluran penghubung antara Bus Peny. B dengan Bus PLTD Y sebesar 28,57% dan pembebanan terkecil berada pada saluran penghubung antara Bus Peny. C dengan Bus PLTD Y sebesar 1,54%. Kondisi pembebanan penghantar yang digunakan berada pada kondisi atau batas yang sesuai.

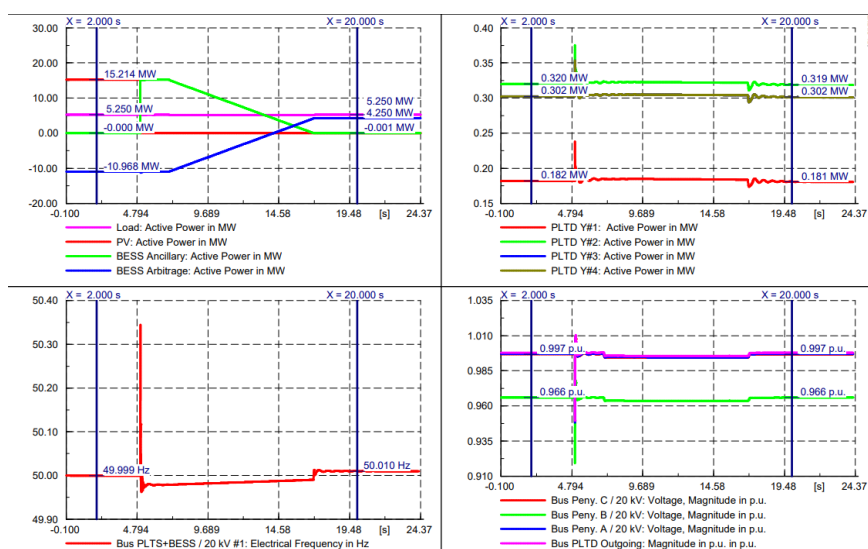
Tabel 11. Kondisi Pembebanan Transformator Skenario Interkoneksi PLTS dan BESS Waktu Beban Puncak Malam Hari

No	ID Transformator	Kapasitas (MVA)	Pembebanan (%)
1	Trafo PLTD X#1	2	-
2	Trafo PLTD X#2	2	-
3	Trafo PLTD X#3	1,6	-
4	Trafo PLTD Y#1	0,8	14,49
5	Trafo PLTD Y#2	0,8	49,41
6	Trafo PLTD Y#3	0,8	37,27

Persentase pembebanan transformator yang digunakan ketika dilakukan simulasi aliran daya pada beban puncak malam hari dapat dilihat pada Tabel 11. Kondisi pembebanan pada transformator sistem eksisting berada pada batas optimal pembebanan transformator, yaitu 80% [18]. Sehingga dapat dikatakan bahwa pembebanan transformator masih dalam batas aman untuk pengoperasiannya.

Simulasi dan Analisa Stabilitas Kasus 1: PV Drop 100% saat Waktu Beban Puncak Siang Hari

Pada studi kasus ini, sistem akan disimulasikan pada beban puncak siang hari dan akan terjadi gangguan dimana PLTS akan trip dari sistem.

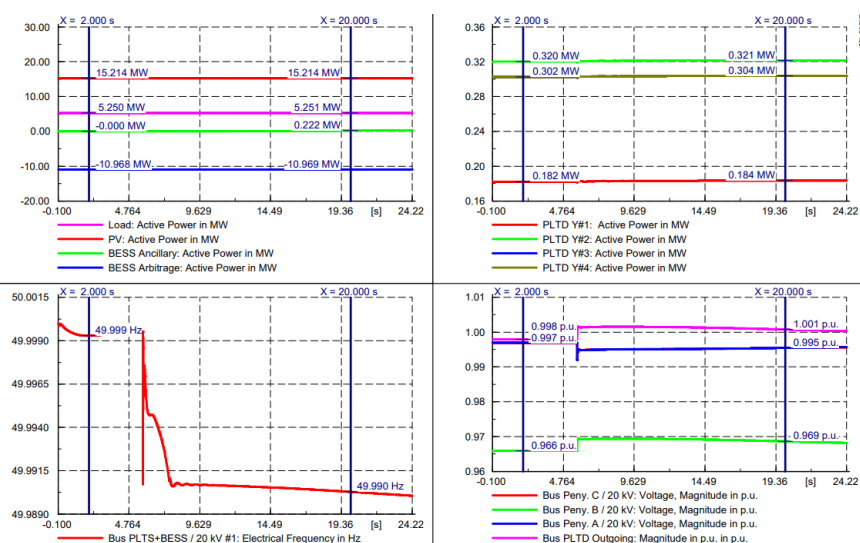


Gambar 5. Hasil Studi Stabilitas Case 1

Frekuensi sistem berhasil kembali stabil pada nilai 50,01 Hz dimana masih dalam batas toleransi frekuensi sistem yaitu $50 \pm 2,5\%$. Selanjutnya, tegangan pada bus yang diamati mengalami penurunan pada waktu yang singkat ketika gangguan terjadi, namun dapat kembali ke kondisi stabil yang diizinkan atau sesuai dengan batas pada *Grid Code* yaitu $\pm 10\%$ dari tegangan nominal. Hasil dari simulasi menunjukkan bahwa sistem jaringan di daerah terisolasi di Indonesia dengan pemasangan PLTS dan BESS tetap berada pada kondisi stabil ketika terjadi gangguan pada PLTS yang mengakibatkan PLTS *trip* dari sistem.

Simulasi dan Analisa Stabilitas Kasus 2: Gangguan pada Line dan 700 ms Waktu Clearance saat Waktu Beban Puncak Siang Hari

Pada studi kasus ini, sistem akan disimulasikan pada beban puncak siang hari dan akan terjadi gangguan dimana terjadi gangguan arus hubung singkat pada salah satu saluran yang berada pada sistem sehingga berdampak pada terputusnya beberapa permintaan beban dan arus yang meningkat pada sistem.

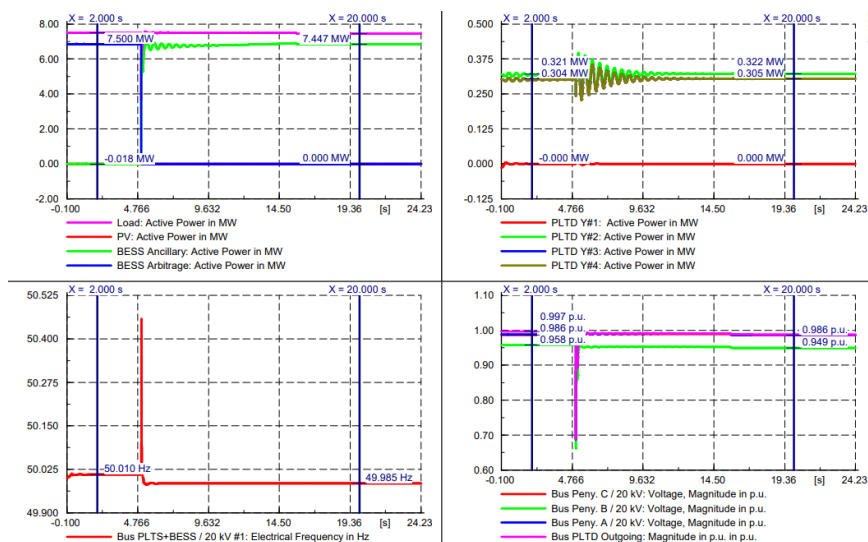


Gambar 6. Hasil Studi Stabilitas Case 2

Frekuensi sistem berhasil dan mengalami penurunan menjadi 49,99 Hz yang berarti masih dalam batas toleransi frekuensi sistem yaitu $50 \pm 2,5\%$ dan kondisi tegangan pada semua Bus yang ada pada sistem masih berada pada batas toleransi aturan tegangan di daerah Indonesia yaitu $\pm 10\%$ dari tegangan nominal. Hasil dari studi kasus ke - 2 (dua) ini menunjukkan bahwa sistem jaringan di daerah terisolasi di Indonesia dengan pemasangan PLTS dan BESS tetap berada pada kondisi stabil ketika terjadi gangguan pada salah satu saluran yang berada pada sistem.

Simulasi dan Analisa Stabilitas Kasus 3: BESS Drop 100% saat Waktu Beban Puncak Malam Hari

Pada studi kasus ini, sistem akan disimulasikan pada beban puncak malam hari dan akan terjadi gangguan dimana terjadi gangguan pada komponen BESS yang menyebabkan lepasnya BESS pada sistem.



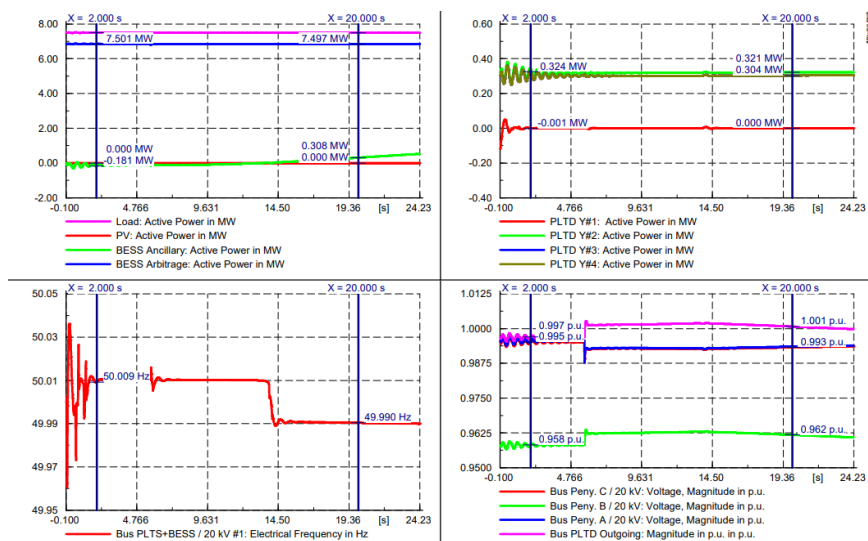
Gambar 7. Hasil Studi Stabilitas Case 3

Frekuensi sistem berhasil saat terjadi gangguan dan kemudian stabil pada 49,985 Hz dan masih dalam batas toleransi aturan frekuensi pada sistem kelistrikan di Indonesia yaitu $50 \pm 2,5\%$. Untuk tegangan sistem, dapat dilihat pada hasil simulasi tegangan terendah berada pada Bus Peny. B dengan 0,949 p.u. dan tegangan tertinggi berada pada Bus PLTD Outgoing dengan 0.986 p.u. yang berarti masih dalam batas aman atau sesuai dengan batas toleransi aturan pada *grid code* di Indonesia bagian timur yaitu $\pm 10\%$ dari tegangan nominal. Hasil dari studi kasus ke - 3 (tiga) ini menunjukkan bahwa sistem jaringan di daerah terisolasi di

Indonesia dengan pemasangan PLTS dan BESS tetap berada pada kondisi stabil ketika terjadi gangguan berupa lepasnya BESS Arbitrage yang merupakan suplai terbesar pada sistem.

Simulasi dan Analisa Stabilitas Kasus 4: Gangguan pada Line dan 700 ms Waktu Clearance saat Waktu Beban Puncak Malam Hari

Pada studi kasus ini, sistem akan disimulasikan pada beban puncak malam hari dan akan terjadi gangguan dimana terjadi gangguan arus hubung singkat pada salah satu saluran yang berada pada sistem sehingga berdampak pada terputusnya beberapa permintaan beban dan arus yang meningkat pada sistem.



Gambar 8. Hasil Studi Stabilitas Case 4

Frekuensi sistem beresiliasi saat terjadi gangguan dan kemudian stabil pada 49,990 Hz dan masih dalam batas toleransi aturan frekuensi pada sistem kelistrikan di Indonesia. Untuk tegangan sistem, dapat dilihat pada hasil simulasi tegangan terendah berada pada Bus Peny. B dengan 0,962 p.u. dan tegangan tertinggi berada pada Bus PLTD Outgoing dengan 1,001 p.u. yang berarti masih dalam batas aman atau sesuai dengan batas toleransi aturan pada *grid code* di Indonesia bagian timur yaitu $\pm 10\%$ dari tegangan nominal. Hasil dari studi kasus ke - 4 (empat) ini menunjukkan bahwa sistem jaringan di daerah terisolasi di Indonesia dengan pemasangan PLTS dan BESS tetap berada pada kondisi stabil ketika terjadi gangguan pada salah satu saluran yang berada pada sistem

PENUTUP

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis dari studi pemasangan PLTS dan BESS pada jaringan terisolasi di Indonesia menggunakan *software* DIGSILENT maka dapat disimpulkan, aliran daya pada sistem jaringan terisolasi di Indonesia beroperasi dengan nilai tegangan yang aman atau berada pada batas toleransi aturan jaringan di Indonesia, baik pada waktu beban puncak siang hari ataupun malam hari yaitu $\pm 10\%$ dari tegangan nominal. Tegangan terendah pada sistem berada pada Bus Peny. B dengan 0,97 p.u. dan tegangan tertinggi pada Bus PLTD Y#2 dan Bus PLTD Y#3 dengan nilai 1,01 p.u.. Selanjutnya pada simulasi stabilitas sistem menunjukkan bahwa pemasangan PLTS dan BESS pada sistem jaringan terisolasi di Indonesia tidak mengganggu stabilitas sistem yang ditunjukkan oleh 4 (empat) hasil studi kasus kestabilan yaitu sistem mampu menjaga atau kembali pada kondisi semula baik pada nilai tegangan dan frekuensi ketika terjadi gangguan hingga dilakukan tindakan penanggulangan. Hasil seluruh skenario stabilitas berada dalam nilai tegangan $\pm 10\%$ dan nilai frekuensi tidak melebihi $50 \pm 2,5\%$. Berdasarkan hasil kesimpulan analisis aliran daya dan analisis stabilitas, rencana pemasangan PLTS dan BESS pada sistem jaringan terisolasi di Indonesia dapat dilaksanakan dan layak untuk diimplementasikan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, “Capaian Kinerja 2019 dan Program 2020,” Jakarta, Jan. 2020. Accessed: May 06, 2022. [Online]. Available: www.esdm.go.id
- [2] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, “Capaian Kinerja Sektor ESDM Tahun 2021 & Rencana 2022,” Jan. 2022. Accessed: May 06, 2022. [Online]. Available: www.esdm.go.id
- [3] M. Steen, “Greenhouse Gas Emission from Fossil Fuel Fired Power Generation Systems.” Accessed: May 10, 2023. [Online]. Available: <http://www.jrc.nl>
- [4] A. Qolbi, “The Emergence of Solar Photovoltaic Technology in Indonesia: Winners and Losers,” in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, Sep. 2020. doi: 10.1051/e3sconf/202019101001.
- [5] M. F. Ramadhan, R. M. Azmi, E. Supriyadi, W. Agustiawan, and F. Sastrowijoyo, “PV Intermittent Smoothing with BESS: A Case Study in Selayar Island Electrical Grid,” in *ICPERE 2022 - 5th International Conference on Power Engineering and Renewable Energy, Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/ICPERE56870.2022.10037559.
- [6] B. P. Nababan, K. F. Sutrisna, M. Pratama, and S. W. Nainggolan, “Influence of battery energy storage system on system stability in isolated power system,” in *ICT-PEP 2021 - International Conference on Technology and Policy in Energy and Electric Power: Emerging Energy Sustainability, Smart Grid, and Microgrid Technologies for Future Power System, Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021, pp. 22–27. doi: 10.1109/ICT-PEP53949.2021.9600986.
- [7] I. P. G. I. Dwipayana, I. N. S. Kumara, and I. N. Setiawan, “Status of Battery in Indonesia to Support Application of Solar PV with Energy Storage,” *Journal of Electrical, Electronics and Informatics*, vol. 5, no. 1, p. 29, Feb. 2021, doi: 10.24843/jeei.2021.v05.i01.p06.
- [8] S. Eftekharijad, V. Vittal, G. T. Heydt, B. Keel, and J. Loehr, “Impact of increased penetration of photovoltaic generation on power systems,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 893–901, 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2216294.
- [9] E. Munkhchuluun, L. Meegahapola, and A. Vahidnia, “Optimal battery sizing for large-scale solar-PV generation to improve frequency stability,” in *2019 29th Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC 2019*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Nov. 2019. doi: 10.1109/AUPEC48547.2019.214526.
- [10] E. Munkhchuluun and L. Meegahapola, “Impact of the solar photovoltaic (PV) generation on long-term voltage stability of a power network,” in *2017 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT-Asia)*, Auckland: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Dec. 2017. doi: 10.1109/ISGT-Asia.2017.8378456.
- [11] DIgSILENT Power System Solutions, “PowerFactory Applications.” <https://www.digsilent.de/en/powerfactory.html> (accessed May 02, 2022).
- [12] X.-F. Wang, Y. Song, and M. Irving, *Modern Power Systems Analysis*. 2008.
- [13] DIgSILENT Power System Solutions, “Load Flow Analysis.” <https://www.digsilent.de/en/load-flow-analysis.html> (accessed May 02, 2022).
- [14] P. Kundur *et al.*, “Definition and classification of power system stability,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 3, pp. 1387–1401, Aug. 2004, doi: 10.1109/TPWRS.2004.825981.
- [15] DIgSILENT Power System Solutions, “Stability Analysis Functions (RMS).” <https://www.digsilent.de/en/stability-analysis.html> (accessed May 02, 2022).
- [16] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, “Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik (Grid Code),” 2020. Accessed: Mar. 26, 2023. [Online]. Available: <https://jdih.esdm.go.id/storage/document/PM%20ESDM%20No%202020%20Tahun%202020.pdf>
- [17] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, “Aturan Distribusi Tenaga Listrik,” 2009. Accessed: Mar. 26, 2023. [Online]. Available: <https://jdih.esdm.go.id/peraturan/permen-esdm-04-2009.pdf>
- [18] PT PLN (Persero), “Metode Pemeliharaan Trafo Distribusi Berbasis Kaidah Manajemen Aset,” 2014.

Biodata Penulis

Ihsan Irfanto, lahir di Jakarta, 24 Februari 2000. Mahasiswa Pascasarjana (S2) program studi Tenaga Listrik dan Sistem Cerdas di jurusan Teknik Elektro FT UI tahun 2022. Tahun 2022 memperoleh gelar Sarjana Teknik di jurusan Teknik Elektro dengan bidang konsentrasi Tenaga Listrik.

Budi Sudiarto, lahir 31 Juli 1979. Menyelesaikan S1 pada jurusan Teknik Elektro Universitas Indonesia tahun 2002 dan menyelesaikan Pascasarjana (S2) di Universitas Indonesia tahun 2005. Tahun 2017 menyelesaikan S3 di Universitas Duisburg Essen dan sejak tahun 2008 menjadi staf pengajar di jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia.