

ANALISIS INTEGRASI PLTB PADA STABILITAS FREKUENSI DALAM JARINGAN KELISTRIKAN SULBAGSEL BERDASARKAN RATE OF CHANGE OF FREQUENCY

Rizky Wahyu Adi Saputra¹⁾, dan Dedi Nugroho²⁾

^{1, 2)} Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung
Jl. Kaligawe Raya No.Km.4, Terboyo Kulon, Kec. Genuk, Kota Semarang, Jawa Tengah 50112
e-mail: 30602200244@std.unissula.ac.id¹⁾, dedi.nugroho@unissula.ac.id²⁾

ABSTRACT

The South Sulawesi electrical system, which is an interconnected network supplying electricity to South Sulawesi, West Sulawesi, Central Sulawesi, and Southeast Sulawesi, faces new challenges in integrating wind power plants (PLTB) into frequency stability. This study analyzes the impact of integrating wind power plants (PLTB) on the frequency stability of the Sulbagsel electrical system, focusing on the rate of change of frequency (RoCoF). Under normal conditions without PLTB, the system frequency remains stable at 50 Hz during both daytime and nighttime peak loads. Integration of PLTB causes the frequency to increase from 50 Hz to a maximum peak, ranging from 50.111 Hz to 50.978 Hz during the day and from 50.113 Hz to 50.613 Hz at night. A frequency decrease occurs when the PLTB is removed, with the frequency dropping from 50 Hz to a minimum value between 49.270 Hz and 49.884 Hz during the day and between 49.326 Hz and 49.884 Hz at night. These frequency fluctuations indicate the system's sensitivity to power variability from wind energy and the challenges in managing frequency drops due to the loss of PLTB. The system response varies during peak load periods in the day and night, with smaller frequency fluctuations during the day compared to nighttime, possibly due to differences in load demand profiles and generator composition. These findings provide insights into the impact of PLTB on frequency stability and power management in renewable energy-based electrical systems.

Keywords: WPP Integration, Frequency Stability, Rate of Change of Frequency (RoCoF).

ABSTRAK

Sistem kelistrikan Sulawesi Selatan, yang merupakan jaringan interkoneksi yang memasok energi listrik ke Sulawesi Selatan, Sulawesi Barat, Sulawesi Tengah, dan Sulawesi Tenggara, menghadapi tantangan baru dalam integrasi pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) terhadap stabilitas frekuensi. Penelitian ini menganalisis dampak integrasi pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) terhadap stabilitas frekuensi sistem kelistrikan Sulbagsel, dengan fokus pada rate of change of frequency (RoCoF). Dalam kondisi normal tanpa PLTB, frekuensi sistem tetap stabil pada 50 Hz baik pada beban puncak siang maupun malam. Integrasi PLTB menyebabkan frekuensi meningkat dari 50 Hz hingga puncak maksimum, yaitu antara 50,111 Hz hingga 50,978 Hz pada siang hari, dan antara 50,113 Hz hingga 50,613 Hz pada malam hari. Penurunan frekuensi terjadi ketika PLTB dihilangkan, dengan frekuensi turun dari 50 Hz ke nilai minimum antara 49,270 Hz hingga 49,884 Hz pada siang hari, dan antara 49,326 Hz hingga 49,884 Hz pada malam hari. Fluktuasi frekuensi menunjukkan sensitivitas sistem terhadap variabilitas daya dari energi angin dan tantangan dalam mengelola penurunan frekuensi akibat kehilangan PLTB. Respons sistem bervariasi pada periode beban puncak siang dan malam, dengan fluktuasi frekuensi lebih kecil pada siang hari dibandingkan malam hari, kemungkinan disebabkan oleh perbedaan profil permintaan beban dan komposisi pembangkit. Temuan ini memberikan wawasan mengenai pengaruh PLTB terhadap kestabilan frekuensi dan manajemen daya dalam sistem kelistrikan berbasis energi terbarukan.

Kata Kunci: Integrasi PLTB, Stabilitas Frekuensi, Rate of Change of Frequency (RoCoF).

I. PENDAHULUAN

SISTEM kelistrikan Sulawesi Selatan merupakan jaringan interkoneksi yang memasok energi listrik ke wilayah Sulawesi Selatan, Sulawesi Barat, Sulawesi Tengah (Palu, Poso), dan Sulawesi Tenggara daratan. Sistem ini umumnya terhubung melalui transmisi 150 kV yang mengintegrasikan berbagai pembangkit listrik dari berbagai sumber energi. Salah satu keistimewaan sistem Sulbagsel terletak pada kehadiran satu-satunya pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) yang merupakan terbesar di Indonesia. PLTB Sidrap, yang terletak di Kabupaten Sidenreng Rappang, merupakan proyek energi angin pertama dan terbesar di Indonesia, dengan kapasitas terpasang mencapai 75 MW yang mencakup 30 turbin angin, masing-masing dengan kapasitas 2,5 MW.

Dengan adanya PLTB Sidrap, kapasitas total sistem kelistrikan Sulbagsel mengalami peningkatan yang signifikan, mendukung kebutuhan listrik yang terus bertambah seiring dengan perkembangan ekonomi dan pertumbuhan penduduk di wilayah tersebut.

Namun, di balik potensi yang ada pada PLTB, masih terdapat permasalahan yang perlu diatasi dalam mengintegrasikan PLTB ke dalam sistem ketenagalistrikan. Salah satu permasalahan utama adalah fluktuasi dalam produksi energi PLTB yang disebabkan oleh faktor-faktor seperti kecepatan dan arah angin yang berubah-ubah. Fluktuasi ini dapat memengaruhi stabilitas frekuensi sistem kelistrikan Sulbagsel, di mana ketidakstabilan frekuensi dapat menimbulkan dampak serius pada peralatan listrik dan bahkan pemadaman listrik.

Penelitian ini, akan mengidentifikasi pengaruh integrasi PLTB terhadap stabilitas frekuensi, serta

dampak variabilitas PLTB terhadap stabilitas frekuensi dengan fokus pada *rate of change of frequency* (RoCoF). Penggunaan perangkat lunak *PowerFactory DigSilent* dalam analisis memungkinkan pendekatan yang terintegrasi dan akurat terhadap evaluasi stabilitas frekuensi, sehingga memberikan wawasan yang komprehensif bagi pengembangan infrastruktur kelistrikan yang lebih berkelanjutan di masa depan.

II. KAJIAN PUSTAKA

Kajian dengan judul “Analisis Pengaruh Integrasi Pembangkit Energi Baru Terbarukan Terhadap Kestabilan Frekuensi Pada Saluran Transmisi 150kv Bali” yang dilakukan oleh Abdurrohman Eko Saputra, Awan Uji Krismanto, dan Abraham Lomi. Integrasi PLTS ke dalam sistem tenaga listrik Bali mempengaruhi stabilitas frekuensi. Dalam studi ini, penambahan PV menyebabkan peningkatan tingkat perubahan frekuensi. Kestabilan frekuensi menjadi perhatian khusus karena perubahan nilai frekuensi dapat mengakibatkan gangguan pada sistem. Perubahan frekuensi tersebut dapat diamati melalui parameter RoCoF (*Rate of Change of Frequency*), yang mempengaruhi kemampuan sistem untuk mengembalikan keseimbangan antara pembangkitan dan beban. Studi kasus menunjukkan bahwa semakin banyak PV yang diintegrasikan, semakin besar dampaknya terhadap nilai frekuensi. Selain itu, waktu yang dibutuhkan untuk mencapai keseimbangan kembali setelah gangguan juga memperlihatkan perbedaan antara berbagai skenario integrasi PV [1].

Kajian dengan judul “Pengaruh PLTB Sidrap Terhadap Sistem Kelistrikan Sulawesi Selatan” yang dilakukan oleh I Putu Riasa, Rukmi Sari Hartati, Ida Bagus Gede Manuaba, dan Dewa Ayu Sri Santiari. Pada studi ini dilakukan analisis terhadap data mengenai kecepatan angin, daya yang dibangkitkan oleh PLTB Sidrap, serta beban sistem Sulawesi Selatan untuk periode April-Juli 2018. Hasil analisis menunjukkan bahwa PLTB Sidrap berkontribusi terhadap beban sistem Sulawesi Selatan. meningkat dari bulan ke bulan. Daya yang dibangkitkan oleh PLTB Sidrap menunjukkan pola yang tidak stabil, terutama pada bulan Juli 2018. Hal ini mengindikasikan bahwa komposisi intermiten PLTB Sidrap sangat berpengaruh terhadap stabilitas frekuensi yang terjadi pada sistem Sulawesi Selatan [2].

Kajian dengan judul “Analisis Kestabilan Frekuensi Akibat Pengintegrasian PLTS 20 MW Pada Sistem Kelistrikan Lombok” yang ditulis oleh Yohanes Latumahina, Abraham Lomi dan Awan Uji Krismanto. Studi ini menyoroti pentingnya analisis terhadap integrasi Pembangkit PLTS dalam sistem kelistrikan Lombok, terutama terkait dengan kestabilan frekuensi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa integrasi PLTS 20MW dapat mempengaruhi kestabilan frekuensi pada sistem kelistrikan Lombok. Meskipun demikian, dengan

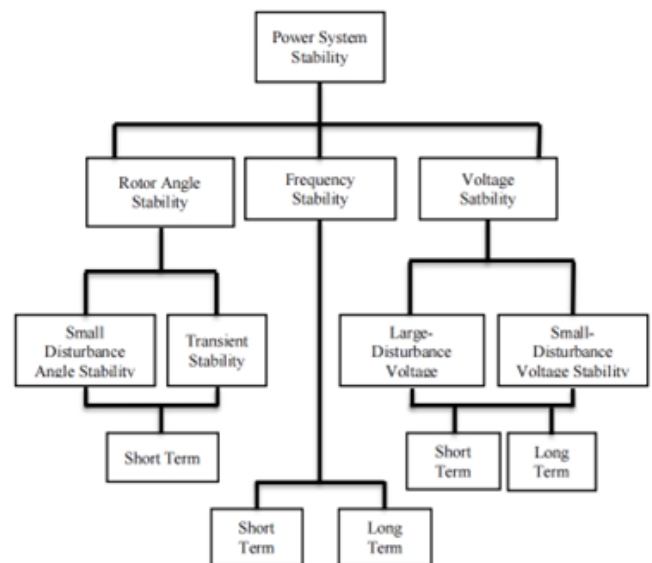
penggunaan relay ROCOF (*Rate of Change of Frequency*) dan penerapan Load Frequency Control (LFC), kemungkinan terjadinya gangguan dan fluktuasi frekuensi dapat diminimalkan [3].

Kajian dengan judul “Analisis Kestabilan Frekuensi Pada Sistem Sulbagsel Dengan Integrasi PLTA Bakaru II” yang dilakukan oleh Zaenab Muslimin, Firda Fajryani Kamil, dan Indar Chaerah Gunadin. Studi ini menggunakan perangkat lunak *Digsilent* untuk melakukan simulasi terhadap kestabilan frekuensi pada sistem Sulbagsel. Beberapa skema simulasi dilakukan, termasuk sebelum dan sesudah dilakukan integrasi PLTA Bakaru II pada sistem, serta saat PLTA Bakaru II kehilangan sinkronisasi atau ketika PLTB Sidrap mengalami fluktuasi daya. Hasil simulasi menunjukkan bahwa frekuensi sistem meningkat secara ksesluruhan pasca dilakukan integrasi PLTA Bakaru II. Meskipun terjadi fluktuasi dalam beberapa skenario, frekuensi sistem masih berada dalam batas toleransi yang dikenakan. Hal ini menunjukkan bahwa PLTA Bakaru II dapat menjadi solusi untuk mengurangi osilasi frekuensi yang disebabkan oleh daya PLTB sidrap yang fluktuatif [4].

A. Stabilitas Sistem Tenaga Listrik

Suatu sistem tenaga listrik dapat dikatakan baik jika memenuhi sebagai berikut:

1. Keandalan (*Reliability*) merujuk pada kemampuan sistem untuk menyediakan pasokan daya atau energi secara terus-menerus.
2. Kualitas (*Quality*) merujuk pada kemampuan sistem tenaga listrik untuk menghasilkan tegangan dan frekuensi sesuai dengan standar yang ditetapkan.
3. Kestabilan (*Stability*) merujuk pada kemampuan sistem untuk dapat kembali ke kondisi beroperasi secara normal setelah mengalami gangguan.



Gambar 1. Klasifikasi Stabilitas Sistem Tenaga Listrik

Kestabilan sistem kelistrikan merujuk pada kemampuan sebuah sistem tenaga listrik untuk dapat kembali

ke keadaan operasional yang seimbang setelah mengalami gangguan fisik, dengan semua variabel sistem tetap terkendali dan sistem tetap utuh. Gangguan pada sistem kelistrikan dapat menghasilkan fluktuasi tegangan, frekuensi, dan daya. Berbagai jenis stabilitas sistem kelistrikan diklasifikasikan dan dijelaskan secara lebih detail pada Gambar 1 [5].

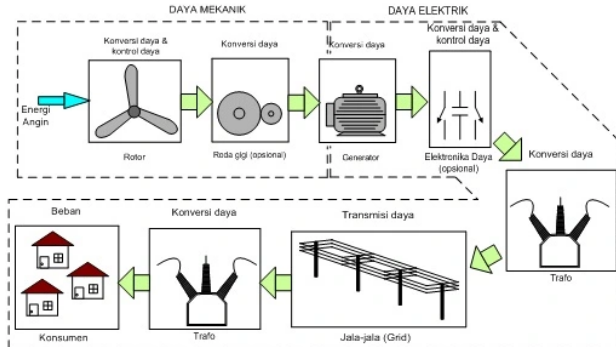
B. Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)



Gambar 2. Pembangkit Listrik Tenaga Bayu

Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) merupakan pembangkit listrik yang beroperasi dengan memanfaatkan energi kinetik dari angin. Hal ini terjadi dengan memutar baling-baling atau kincir angin, yang memungkinkan angin masuk ke dalam area efektif turbin. Energi putaran yang diterima oleh turbin ini kemudian dialirkan ke generator, yang nantinya akan dapat menghasilkan energi listrik [6]. Kriteria yang harus dipenuhi untuk mendapatkan daya adalah dilihat dari kecepatan angin yang standarnya adalah membutuhkan sekitar 2 sampai 17 meter/detik dan konstan, serta kestabilan angin. Jika angin terlalu pelan, daya yang dihasilkan akan sedikit bahkan turbin tidak dapat berputar dan jika angin terlalu kencang maka dapat merusak turbin [7].

C. Prinsip Kerja PLTB



Gambar 3. Ilustrasi Prinsip Kerja PLTB Umum

Berikut adalah cara kerja dari pembangkit listrik tenaga bayu antara lain:

1. Pembangkitan listrik tenaga angin berawal dengan energi angin memutar turbin angin. Turbin angin bekerja berkebalikan dengan kipas angin (bukan menggunakan listrik untuk menghasilkan listrik, namun menggunakan angin untuk menghasilkan listrik).

2. Putaran turbin itu terhubung dengan rotor di dalam generator yang akan ikut berputar seiring putaran turbin.
3. Generator kemudian akan mengkonversi energi gerak dari rotor tersebut menjadi energi listrik dengan memanfaatkan prinsip kerja induksi medan elektromagnetik yaitu poros pada generator dipasang dengan material feromagnetik permanen. Setelah itu, di sekeliling poros terdapat stator yang bentuk fisisnya adalah kumparan-kumparan kawat yang membentuk loop.
4. Arus listrik yang dihasilkan dari generator sebagian ada yang digunakan langsung, tetapi sebagian ada yang disimpan pada baterai untuk digunakan pada keadaan tertentu. Tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh generator ini berupa arus AC (alternating current) menggunakan inverter [8].

D. Komponen PLTB

Sistem pembangkit listrik tenaga bayu memiliki beberapa komponen utama dan komponen pendukung, sebagai berikut:

1. Turbin Angin

Turbin angin adalah alat yang dapat memanfaatkan energi kinetik dari angin dan kemudian mengubah energi kinetik menjadi energi mekanik. Jenis turbin angin terbagi menjadi dua yaitu turbin angin horizontal dan turbin angin vertikal.

2. Pitch Control

Komponen ini adalah komponen motor yang berfungsi untuk mengatur sudut derajat dari bilah-bilah turbin. Sehingga memungkinkan turbin untuk mendapatkan kualitas dan kekuatan angin yang paling baik.

3. Nacelle

Nacelle adalah komponen pelindung atau rumah bagi seluruh komponen yang ada didalam turbin dan generator PLTB. Di dalam nacelle terdapat beberapa komponen yaitu gearbox, generator, *low and high-speed shaft*, dan lain sebagainya.

4. Shaft

Shaft atau poros merupakan komponen mekanik yang berfungsi untuk menyalurkan tenaga mekanik dari satu tempat ke tempat yang lain. Di dalam PLTB poros terbagi menjadi dua yaitu poros utama dan poros sekunder.

5. Kincir Angin

Kincir angin sebagai fungsi dari kemampuannya untuk mengubah energi kinetik angin menjadi energi putar turbin untuk setiap kondisi kecepatan angin.

6. Gear Box

Gearbox atau transmisi merupakan komponen mekanik yang berfungsi untuk mengubah kecepatan putaran baik dari tinggi menuju putaran lambat maupun sebaliknya dengan satuan rasio.

7. Brake

Komponen Brake atau rem berfungsi untuk mengurangi atau menghentikan laju putaran turbin jika diperlukan.

8. Generator

Generator adalah komponen PLTB yang mengubah energi mekanik yang dihasilkan oleh turbin menjadi energi listrik.

9. Yaw Gear

Yaw Gear merupakan komponen yang dapat mengubah arah dari turbin PLTB sesuai dengan arah angin yang tersedia. Yaw Gear berfungsi untuk memaksimalkan potensi udara yang bisa didapat oleh PLTB.

10. Baterai

Baterai berfungsi untuk menyimpan energi listrik dikarenakan angin yang digunakan untuk membangkitkan energi listrik tidak selalu tersedia selama 24 jam.

11. Rectifier – Inverter

Rectifier merupakan perangkat yang dapat mengubah arus AC menjadi arus DC, sedangkan Inverter merupakan perangkat yang dapat rangkat yang dapat mengubah arus DC menjadi arus AC[9].

E. Rate of Change of Frequency

Tingkat penetrasi dari kecepatan turbin angin dapat mengakibatkan berbagai dampak teknis pada inersia dan RoCoF (*Rate of Change of Frequency*) ketika PLTB diintegrasikan ke dalam sistem (*on-grid*). Inersia dan RoCoF adalah parameter kunci yang bertanggung jawab dalam menjaga keseimbangan sistem daya. Keseimbangan antara konsumsi daya dan pembangkitan harus selalu terjaga. Ketidakseimbangan antara permintaan dan pasokan atau kurangnya kapasitas cadangan yang memadai dalam sistem daya dapat mengakibatkan terjadinya ketidakseimbangan yang bisa memicu pengoperasian pengaman frekuensi lebih/ kurang, kegagalan pada pembangkit dan beban, serta dalam kasus terburuk dapat menyebabkan pemadaman listrik pada sistem [1], [3].

Keseimbangan antara daya yang dihasilkan dengan daya yang dikonsumsi memiliki pengaruh besar terhadap frekuensi sistem tenaga. RoCoF sistem karena trip generator dapat dihitung menggunakan [1].

$$RoCoF = \frac{\Delta P \times F}{2 \times S_n \times H} \tag{1}$$

Keterangan:

ΔP = Total perubahan daya dari generator ke-n dalam sistem (MW)

F = Frekuensi sistem nominal (dalam Hz)

S_n = Total daya dalam sistem (MW)

H = Inersia konstan dari mesin/generator (dalam s)

RoCoF juga merupakan turunan waktu dari frekuensi sistem tenaga listrik (df/dt), ini merupakan besaran penting yang memenuhi syarat sebagai ketahanan jaringan listrik. Nilai awal df/dt adalah RoCoF sesaat sesaat setelah terjadi ketidakseimbangan daya dalam sistem tenaga listrik (yaitu pemutusan generator/terputusnya beban), sebelum tindakan pengendalian apa pun[10]. Dengan kata lain:

$$RoCoF = \frac{df}{dt} \tag{2}$$

Keterangan :

df (Hz) = F. awal – F. akhir

dt (detik) = t. awal – t. akhir

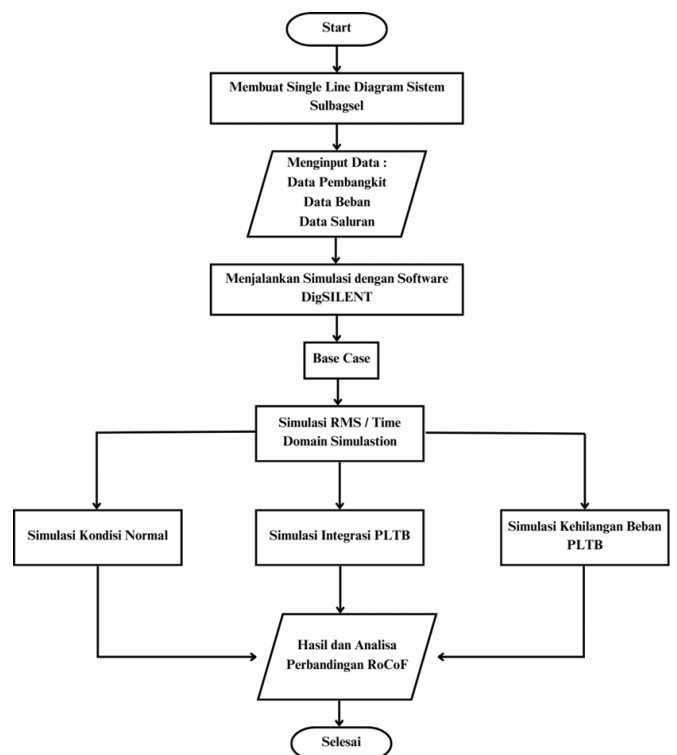
F. DigSILENT PowerFactory

DigSILENT “*DIGital SIMulation and Electrical NeTwork calculation program*” merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk melakukan pengkajian pada jaringan tenaga listrik. Perangkat ini mencakup berbagai fungsi mulai dari fitur standar hingga aplikasi yang sangat moderen mulai dari tenaga angin, generator terdistribusi, simulasi waktu nyata, dan pemantauan kinerja untuk pengujian dan pengawasan sistem. DigSILENT menggunakan metode Newton Rhapsod dalam proses perhitungannya [11].

III. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dan untuk model penelitian ini merupakan menggunakan *RMS/Time Domain Simulation* yang digunakan untuk menganalisis transien jangka menengah dan jangka panjang dalam kondisi seimbang dan tidak seimbang, dengan menggabungkan fitur pemindaian[12], simulasi menggunakan perangkat lunak DigSILENT PowerFactory 15.1.7 dan rancangan simulasi dalam penelitian ini hanya melibatkan simulasi stabilitas frekuensi ketika terjadi integrasi antara PLTB dengan Sistem Subgabel.

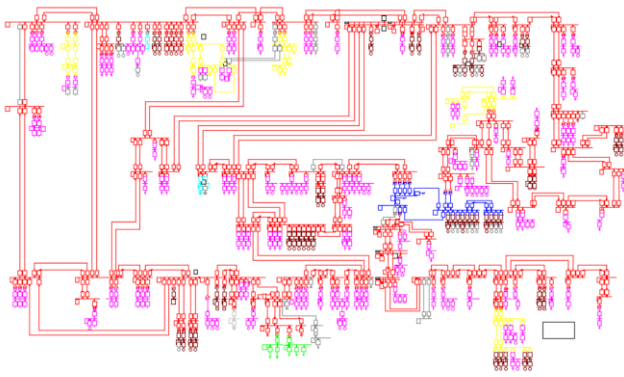
Flow Chart Penelitian



Gambar 4. Flow Chart Penelitian

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Single Line Diagram Jaringan Subbagse



Gambar 5. Single Line Diagram Jaringan Subbagse

B. Data Sistem Tenaga Listrik Subbagse

Data sistem kelistrikan Subbagse yang digunakan mengacu pada catatan harian (*logsheet*) pada tanggal 22 Juni 2024 yang memiliki beban puncak siang (Pukul 14.00 Wita) sebesar 1319,77 MW dan beban puncak malam (Pukul 19.00 Wita) sebesar 1561,41 MW. Sistem kelistrikan Subbagse memiliki komposisi pembangkit yang terdiri dari 62,6% pembangkit konvensional (PLTU, PLTD, PLTGU, PLTG) dan 37,4% pembangkit terbarukan (PLTA, PLTM, PLTB, PLTS) yang terhubung dengan jaringan transmisi tegangan 150 kV dan 275 kV serta terhubung dengan pusat-pusat beban (*gardu induk*).

C. Simulasi Sistem Tenaga Listrik

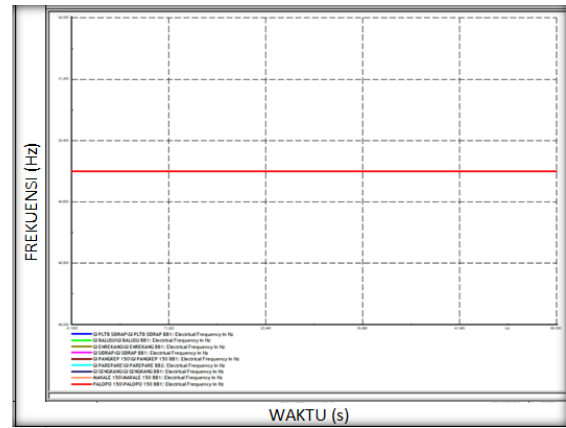
Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak *DIgSILENT* dengan pemodelan jenis *RMS/Time Domain Simulation* untuk menganalisis dampak integrasi Pembangkit Listrik Tenaga Bayu terhadap stabilitas frekuensi sistem. Fokus analisis akan mencakup respons sistem terhadap integrasi PLTB, osilasi frekuensi, penyimpangan frekuensi, dan tingkat perubahan frekuensi (*RoCoF*).

Adapun skema skenario yang akan disimulasikan sebagai berikut:

- Skenario I : kondisi normal pada periode beban puncak siang dan malam.
- Skenario II : integrasi PLTB pada beban puncak siang dan malam
- Skenario III : kehilangan beban PLTB pada beban puncak siang dan malam

Dalam skenario integrasi dan dis-integrasi dari PLTB akan menggunakan variabel pembebanan dari PLTB yaitu sebesar 10 MW, 20 MW, 30 MW, 40 MW, 50 MW, 55 MW dan 60 MW, 65 MW.

1. Kondisi Beban Puncak Siang Sebelum Integrasi PLTB

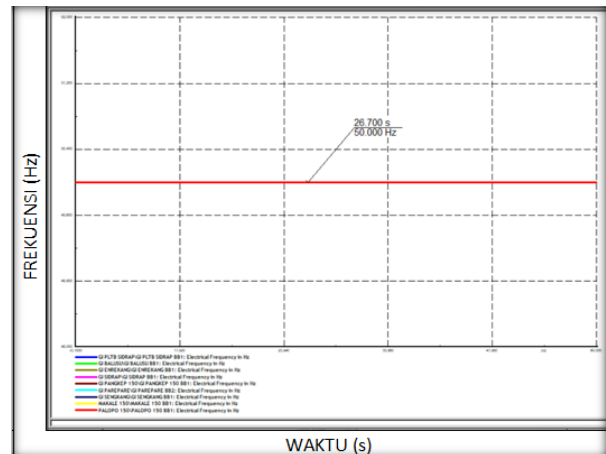


Gambar 6. Kondisi Beban Puncak Siang Sebelum Integrasi PLTB

TABEL I
ANALISA RoCoF DI KONDISI NORMAL PADA BEBAN PUNCAK SIANG

Skenario	Frekuensi		ΔP	Δt	Rocof
	Awal	Akhir			
Normal	50,000	50,000	0	60,00	0

2. Kondisi Beban Puncak Malam Sebelum Integrasi PLTB



Gambar 7. Kondisi Beban Puncak Malam Sebelum Integrasi PLTB

TABEL II
ANALISA RoCoF DI KONDISI NORMAL PADA BEBAN PUNCAK MALAM

Skenario	Frekuensi		ΔP	Δt	Rocof
	Awal	Akhir			
Normal	50,000	50,000	0	60,00	0

Dalam kondisi normal tanpa PLTB, tidak terdapat osilasi ataupun penyimpangan frekuensi dari sistem. Gambar 6 dan Gambar 7 menunjukkan bahwa frekuensi tetap stabil pada 50 Hz sepanjang periode pengujian, baik pada beban puncak siang maupun malam. Tidak adanya osilasi frekuensi yang signifikan menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan stabilitas frekuensi secara efektif di bawah beban yang bervariasi. Stabilitas ini dapat dikaitkan dengan pengelolaan beban dan produksi yang seimbang, serta kontrol sistem yang baik untuk memastikan bahwa perubahan beban tidak mengakibatkan fluktuasi frekuensi yang signifikan. Dapat diketahui melalui persamaan 2 didapatkan nilai *RoCoF*:

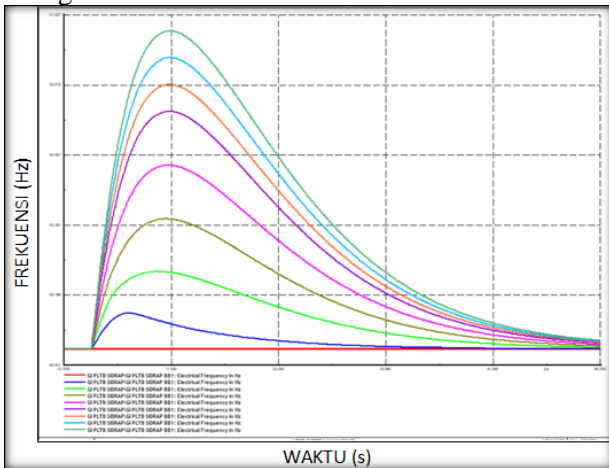
$$RoCoF = \frac{50,000 - 50,000}{60 - 0}$$

$$RoCoF = \frac{0}{60}$$

$$RoCoF = 0 \text{ Hz/s}$$

Berdasarkan Tabel 1 dan Tabel 2, RoCoF yang merupakan tolak ukur yang mengukur laju perubahan frekuensi, menunjukkan hasil tetap pada nilai nol (0) yang mengindikasikan bahwa tidak ada perubahan frekuensi yang terjadi dalam sistem. Ini menegaskan bahwa sistem tidak mengalami fluktuasi frekuensi yang memerlukan penyesuaian cepat atau tindakan pengendalian tambahan. Kemampuan sistem untuk menjaga RoCoF pada nilai nol menunjukkan kinerja yang sangat baik dalam hal stabilitas frekuensi.

3. Frekuensi pada Kondisi Beban Puncak Siang Setelah Integrasi PLTB



Gambar 8. Frekuensi pada Kondisi Beban Puncak Siang Setelah Integrasi PLTB

TABEL III

ANALISA ROCoF SETELAH INTEGRASI PLTB PADA BEBAN PUNCAK SIANG

Skenario (MW)	Frekuensi		ΔP	Δt	Rocof
	Awal	Akhir			
10	50,000	50,111	1,47	4,00	0,027750
20	50,000	50,238	1,19	7,10	0,033521
30	50,000	50,400	1,05	8,30	0,048193
40	50,000	50,565	1,05	8,70	0,064943
50	50,000	50,730	1,19	8,70	0,083908
55	50,000	50,813	1,32	8,70	0,093448
60	50,000	50,895	1,47	8,80	0,101705
65	50,000	50,978	1,67	8,80	0,111136

Dapat diketahui melalui persamaan 2 didapatkan nilai RoCoF :

- Integrasi PLTB : 10 MW

$$RoCoF = \frac{50,111 - 50,000}{4}$$

$$RoCoF = \frac{0,111}{4}$$

$$RoCoF = 0,02775 \text{ Hz/s}$$

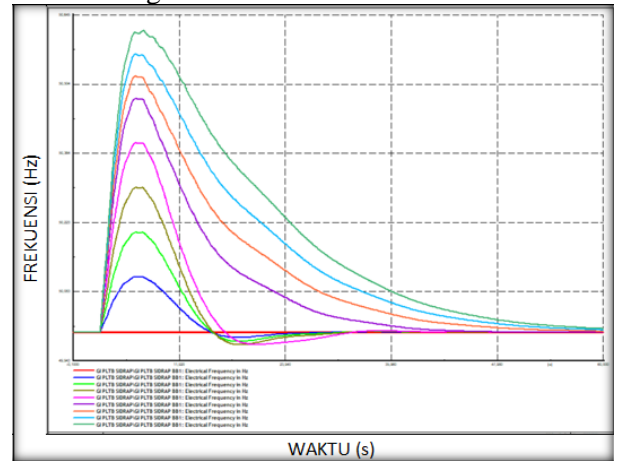
- Integrasi PLTB : 60 MW

$$RoCoF = \frac{50,978 - 50,000}{8,8}$$

$$RoCoF = \frac{0,978}{8,8}$$

$$RoCoF = 0,111136 \text{ Hz/s}$$

4. Frekuensi pada Kondisi Beban Puncak Malam Setelah Integrasi PLTB



Gambar 9. Frekuensi pada Kondisi Beban Puncak Malam Setelah Integrasi PLTB

TABEL IV

ANALISA ROCoF SETELAH INTEGRASI PLTB PADA BEBAN PUNCAK MALAM

Skenario (MW)	Frekuensi		ΔP	Δt	Rocof
	Awal	Akhir			
10	50,000	50,113	1,28	3,90	0,0289744
20	50,000	50,203	0,54	3,90	0,0520513
30	50,000	50,294	0,06	4,00	0,0735000
40	50,000	50,358	0,47	4,00	0,0895000
50	50,000	50,475	0,69	4,00	0,1187500
55	50,000	50,520	0,71	4,00	0,1300000
60	50,000	50,565	0,69	4,00	0,1412500
65	50,000	50,613	0,62	4,90	0,1251020

Dapat diketahui melalui persamaan 2 didapatkan nilai RoCoF:

- Integrasi PLTB : 10 MW

$$RoCoF = \frac{50,113 - 50,000}{3,9}$$

$$RoCoF = \frac{0,113}{3,9}$$

$$RoCoF = 0,0289744 \text{ Hz/s}$$

- Integrasi PLTB : 60 MW

$$RoCoF = \frac{50,613 - 50,000}{4,9}$$

$$RoCoF = \frac{0,613}{4,9}$$

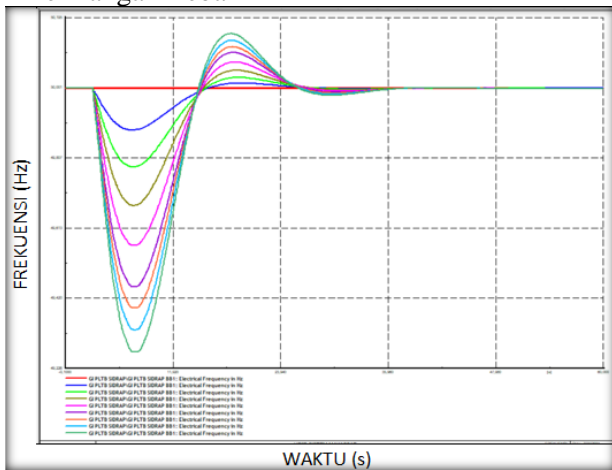
$$RoCoF = 0,1251020 \text{ Hz/s}$$

Gambar 8. dan Gambar 9. memperlihatkan respons frekuensi selama proses integrasi Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) terjadi respons transien yang signifikan pada gelombang frekuensi. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan osilasi terjadi seiring dengan adanya penambahan daya yang dilakukan di setiap skenario, yang mana memperlihatkan bahwa integrasi PLTB mempengaruhi kemampuan sistem untuk mempertahankan frekuensi nominalnya pada

periode beban puncak siang dan malam. Osilasi yang terjadi pada malam hari lebih sering terjadi dibandingkan dengan siang hari mungkin disebabkan oleh permintaan beban yang berbeda. Pada malam hari, beban seringkali lebih besar dibanding beban siang, sehingga komposisi pembangkit yang beroperasi juga berbeda antara beban siang dan beban malam.

Setelah integrasi Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) pada beban puncak siang dan malam, RoCoF menunjukkan peningkatan yang signifikan. Dapat diketahui pada Tabel 3 dan Tabel 4, pada beban puncak siang, RoCoF adalah 0,027750 Hz/detik pada beban 10 MW, meningkat secara bertahap hingga 0,111136 Hz/detik pada beban 65 MW. Sedangkan pada beban puncak malam, RoCoF adalah 0,0289744 Hz/detik pada beban 10 MW, meningkat menjadi 0,125102 Hz/detik pada beban 65 MW. Ini menunjukkan bahwa seiring dengan bertambahnya daya PLTB, sistem mengalami peningkatan laju perubahan frekuensi, dengan RoCoF pada beban puncak malam cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan siang hari. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem lebih sensitif terhadap fluktuasi frekuensi pada malam hari. Variabilitas dari PLTB menyebabkan frekuensi naik lebih cepat, dengan perubahan yang lebih ekstrem pada beban yang lebih tinggi, terutama di malam hari. Hal ini menekankan tantangan dalam pengelolaan sistem tenaga listrik ketika mengintegrasikan sumber energi yang variabel seperti PLTB.

5. Frekuensi pada Kondisi Beban Puncak Siang Setelah Kehilangan Beban PLTB



Gambar 10. Frekuensi pada Kondisi Beban Puncak Siang Setelah kehilangan Beban PLTB

TABEL V
ANALISA ROCoF SETELAH KEHILANGAN BEBAN PLTB PADA BEBAN PUNCAK SIANG

Skenario (MW)	Frekuensi		ΔP	Δt	Rocof
	Awal	Akhir			
10	50,000	49,884	1,52	4,50	0,0257778
20	50,000	49,782	1,24	4,30	0,0506977
30	50,000	49,675	0,99	4,40	0,0738636
40	50,000	49,565	0,87	4,50	0,0966667
50	50,000	49,451	0,91	4,50	0,1220000
55	50,000	49,392	0,86	4,60	0,1321739
60	50,000	49,332	1,09	4,80	0,1391667
65	50,000	49,270	1,37	4,70	0,1553191

Dapat diketahui melalui persamaan 2 didapatkan nilai RoCoF :

- Integrasi PLTB : 10 MW

$$RoCoF = \frac{49,884 - 50,000}{4,5}$$

$$RoCoF = \frac{-0,116}{4,5}$$

$$RoCoF = -0,0257778 \text{ Hz/s}$$

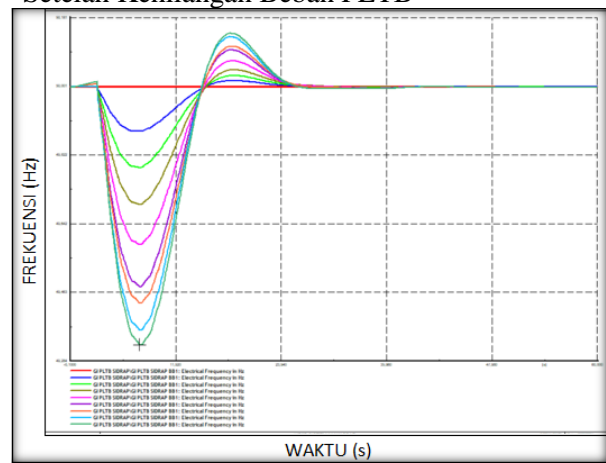
- Integrasi PLTB : 60 MW

$$RoCoF = \frac{49,270 - 50,000}{4,7}$$

$$RoCoF = \frac{-0,730}{4,7}$$

$$RoCoF = -0,1553191 \text{ Hz/s}$$

6. Frekuensi pada Kondisi Beban Puncak Malam Setelah Kehilangan Beban PLTB



Gambar 11. Frekuensi pada Kondisi Beban Puncak Malam Setelah kehilangan Beban PLTB

TABEL VI
ANALISA ROCoF SETELAH KEHILANGAN BEBAN PLTB PADA BEBAN PUNCAK MALAM

Skenario (MW)	Frekuensi		ΔP	Δt	Rocof
	Awal	Akhir			
10	50,000	49,884	1,29	4,60	0,0252174
20	50,000	49,789	0,57	4,90	0,0430612
30	50,000	49,692	0,07	4,90	0,0628571
40	50,000	49,587	0,19	4,90	0,0842857
50	50,000	49,478	0,97	5,00	0,1044000
55	50,000	49,434	1,15	4,90	0,1155102
60	50,000	49,362	1,19	4,90	0,1302041
65	50,000	49,326	1,37	4,80	0,1404167

Gambar 10 dan Gambar 11 menunjukkan respons frekuensi sistem selama proses kehilangan beban Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) pada beberapa skenario daya selama periode beban puncak siang dan malam. Sebelum skenario dilakukan, grafik frekuensi menunjukkan kondisi stabil tanpa fluktuasi signifikan. Namun, saat daya dari PLTB dihilangkan secara tiba-tiba, terjadi fluktuasi frekuensi yang signifikan, menunjukkan adanya respons transien. Peningkatan osilasi frekuensi yang terjadi seiring dengan pengurangan daya pada setiap skenario, mengindikasikan bahwa penghilangan PLTB

mempengaruhi kemampuan sistem untuk menjaga frekuensi nominalnya. Pada malam hari, osilasi frekuensi tampak lebih teratur dan sering dibandingkan dengan siang hari, yang mungkin disebabkan oleh profil beban yang berbeda. Beban malam yang lebih besar mungkin mengubah dinamika sistem, menghasilkan pola yang berbeda dibandingkan siang hari. Osilasi frekuensi yang terjadi pada setiap skenario disintegrasi PLTB berbeda-beda, terjadi karena sistem berusaha mencapai keseimbangan baru setelah kehilangan sumber daya yang signifikan. Osilasi ini dapat mengindikasikan ketidakstabilan sistem, terutama ketika fluktuasi frekuensi mencapai nilai yang lebih besar, mengharuskan sistem untuk memiliki kapasitas pengendalian yang efektif untuk mengurangi dampaknya.

Setelah kehilangan beban Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) pada beban puncak siang dan malam, dapat dilihat pada Tabel 5 dan Tabel 6 bahwa laju perubahan frekuensi atau *Rate of Change of Frequency* menunjukkan peningkatan yang signifikan. Pada beban puncak siang, RoCoF meningkat dari -0,025778 Hz/detik pada beban 10 MW menjadi -0,15532 Hz/detik pada beban 65 MW. Sementara itu, pada beban puncak malam, RoCoF juga meningkat dari -0,0252174 Hz/detik pada beban 10 MW menjadi -0,140417 Hz/detik pada beban 65 MW. Peningkatan ini menunjukkan bahwa meskipun beban malam cenderung lebih stabil, sistem tetap rentan terhadap fluktuasi frekuensi akibat penarikan daya PLTB. Hal ini menegaskan bahwa baik siang maupun malam, sistem tenaga listrik mengalami peningkatan sensitivitas terhadap perubahan frekuensi yang disebabkan oleh variabilitas daya angin, sehingga menyoroti tantangan dalam pengelolaan sistem tenaga listrik ketika ada fluktuasi mendadak dalam suplai energi terintegrasi.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan data dan analisis yang telah Anda sajikan mengenai analisis integrasi pembangkit listrik tenaga bayu pada stabilitas frekuensi dalam jaringan kelistrikan sulbagsel dengan memperhatikan rate of change of frequency antara lain:

1. Dalam kondisi normal tanpa integrasi PLTB, sistem ketenagalistrikan Sulbagsel menunjukkan stabilitas frekuensi yang baik, dengan frekuensi tetap stabil pada 50 Hz sepanjang periode pengujian baik pada beban puncak siang maupun malam. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mampu menjaga kestabilan frekuensi secara efektif tanpa adanya fluktuasi yang signifikan.
2. Integrasi PLTB mempengaruhi kestabilan frekuensi sistem. Selama periode beban puncak siang, frekuensi meningkat dari 50 Hz menuju puncak maksimum yang bervariasi antara 50,111 Hz hingga 50,978 Hz. Demikian pula, pada beban puncak

malam, frekuensi meningkat dari 50 Hz hingga puncak maksimum antara 50,113 Hz hingga 50,613 Hz. Peningkatan frekuensi dan RoCoF ini menunjukkan bahwa sistem menjadi lebih sensitif terhadap fluktuasi daya yang disebabkan oleh variabilitas sumber energi angin.

3. Ketika PLTB dihilangkan dari sistem, terjadi penurunan frekuensi yang cukup tajam. Pada beban puncak siang, frekuensi awal 50 Hz menurun ke minimum antara 49,884 Hz hingga 49,270 Hz. Pada beban puncak malam, penurunan frekuensi juga terjadi, dengan nilai minimum antara 49,884 Hz hingga 49,326 Hz. RoCoF yang negatif menunjukkan bahwa sistem menghadapi tantangan dalam mengelola penurunan frekuensi akibat kehilangan daya PLTB.
4. Sistem menunjukkan respons yang berbeda ketika terjadi integrasi ataupun kehilangan beban PLTB selama periode beban puncak siang dan malam. Pada siang hari, fluktuasi frekuensi lebih kecil dibandingkan dengan malam hari, kemungkinan karena perbedaan dalam profil permintaan beban dan komposisi pembangkit yang beroperasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. E. Saputra, A. U. Krismanto, dan A. Lomi, "Analisis Pengaruh Integrasi Pembangkit Energi Baru Terbarukan Terhadap Kestabilan Frekuensi pada Saluran Transmisi 150kV Bali," *Magn. J. Mhs. Tek. Elektro*, vol. 7, no. 2, hlm. 206–213, 2023.
- [2] I. P. Riasa, R. S. Hartati, I. B. G. Manuaba, dan D. A. S. Santiar, "Pengaruh PLTB Sidrap Terhadap Sistem Kelistrikan Sulawesi Selatan," *Maj. Ilm. Teknol. Elektro*, vol. 19, no. 1, hlm. 27, Oct. 2020, doi: 10.24843/MITE.2020.v19i01.P04.
- [3] Y. Latumahina, A. Lomi, dan A. U. Krismanto, "ANALISIS KESTABILAN FREKUENSI AKIBAT PENGINTEGRASIAN PLTS 20MW PADA SISTEM KELISTRIKAN LOMBOK," vol. 07, 2023.
- [4] F. F. Kamil, Z. Muslimin, dan I. C. Gunadin, "Analisis Kestabilan Frekuensi Pada Sistem Sulbagsel Dengan Integrasi PLTA Bakar II," *J. EKSITASI Dep. Tek. ELEKTRO*, vol. 2, no. 1, 2023.
- [5] M. F. Nur dan U. Hasanuddin, "Studi Optimalisasi Kinerja PLTB Melalui Pemilihan Type Generator Terhadap Stabilitas Sistem Tenaga Listrik (Stabilitas Frekuensi dan Tegangan) Sulbagsel," vol. 1, 2022.
- [6] M. Adam, P. Harahap, dan M. R. Nasution, "Analisa Pengaruh Perubahan Kecepatan Angin Pada Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTA) Terhadap Daya Yang Dihasilkan Generator Dc," *RELE Rekayasa Elektr. Dan Energi J. Tek. Elektro*, vol. 2, no. 1, hlm. 30–36, Jul. 2019, doi: 10.30596/rele.v2i1.3648.
- [7] A. Fuadi, "Karakterisasi Pembangkit Listrik Tenaga Angin Tipe Vertikal Darrieus Dengan Kapasitas 160 Watt," 2022.
- [8] P. Siagian dkk., *Energi Baru Terbarukan Sebagai Energi Alternatif*. Yayasan Kita Menulis, 2023.

- [9] N. Yuniarti dan I. W. Aji, "Modul Pembelajaran Pembangkit Tenaga Listrik," *Pendidik. Tek. Elektro FT UNY Yogyakarta.*, 2019.
- [10] ENTSO-E, "Inertia and Rate of Change of Frequency (RoCoF)," 2020.
- [11] A. Faradillah, "Analiis Kestabilan Tegangan Sistem Sulbagsel Terhadap Dinamika Pembangkit Besar Memperhatikan Intermitensi PLTB," 2020.
- [12] J. Alber dan M. E. Schemig, "DigSILENT Power System Solution." Di akses: Apr. 13, 2024. [Online]. Tersedia: <https://www.digsilent.de/en/stability-analysis.html>