

## Skema Pertahanan dalam Kondisi Kontingensi N-2 Saluran Pemalang-Ungaran dan Depok-Tasikmalaya

<sup>1</sup> Kevin Rachman Firdaus, <sup>2</sup> Hadi Suyono, <sup>2</sup> Tri Nurwati, <sup>2</sup> Rini Nur Hasanah

<sup>1</sup> Sarjana Teknik Elektro, Universitas Brawijaya, Malang

<sup>2</sup> Dosen Teknik Elektro, Universitas Brawijaya, Malang

<sup>1</sup> [kevin.rachmanf@gmail.com](mailto:kevin.rachmanf@gmail.com), <sup>2</sup> [hadis@ub.ac.id](mailto:hadis@ub.ac.id), <sup>2</sup> [trinurti@ub.ac.id](mailto:trinurti@ub.ac.id), <sup>2</sup> [rini.hasanah@ub.ac.id](mailto:rini.hasanah@ub.ac.id)

**Abstract** – A fault of transmission lines in the process of transmitting electricity has a huge impact. One of the impacts of the disruption in August 2019 on the island of Java was the partial blackout in the Java-Bali electricity system due to contingency of the 500 kV Pemalang-Ungaran and Depok-Tasikmalaya transmission lines. Prevention of partial blackouts is required by devising defense schemes that can compensate for the impact of these contingency events. Defense schemes can be done by doing load shedding and generator tripping. Both methods are able to evacuate a large amount of power in a relatively fast time, so that it can improve the frequency value in a short time. The system frequency response has experienced recovery with an increase in frequency in the West Java Island and a decrease in the frequency in the East Java Island. The result of load shedding is the disconnection of 6 load buses in 5 main stages of the system and the result of generator tripping is the disconnection of 2-unit generators in 2 stages of the system.

**Keywords** —Transmission Line, Defense Scheme, Load Shedding, Generator Tripping, Partial Blackout

**Abstrak**—Gangguan saluran transmisi dalam proses penyaluran listrik memberikan dampak yang sangat besar. Salah satu dampak gangguan pada bulan Agustus tahun 2019 di pulau Jawa yaitu pemadaman listrik sebagian pada sistem kelistrikan Jawa-Bali akibat terjadinya kontingensi saluran transmisi 500 kV Pemalang-Ungaran dan Depok-Tasikmalaya. Pencegah terjadinya pemadaman skala besar diperlukan dengan menyusun skema pertahanan yang dapat mengompensasi dampak dari peristiwa kontingensi tersebut. Skema pertahanan dapat dilakukan dengan melakukan pelepasan beban dan generator tripping. Kedua metode tersebut mampu mengevakuasi daya dengan jumlah yang besar dalam waktu yang relatif cepat, sehingga dapat memperbaiki nilai frekuensi dalam waktu singkat. Respon frekuensi sistem mengalami pemulihan dengan kenaikan frekuensi pada pulau Jawa bagian Barat dan penurunan frekuensi pada pulau Jawa bagian Timur. Hasil dari pelepasan beban berupa pemutusan 6 bus beban dalam 5 tahap utama dari sistem dan hasil dari generator tripping berupa pemutusan 2-unit pembangkit dalam 2 tahap dari sistem.

**Kata Kunci**—Transmisi, Skema Pertahanan, Pelepasan Beban, Generator Tripping, Pemadaman Parsial

### I. PENDAHULUAN

Tingkat kebutuhan energi listrik berbanding lurus dengan bertambahnya jumlah manusia, sehingga kebutuhan akan energi listrik terus bertambah [1]. Guna dapat dimanfaatkan energi listrik harus dibangkitkan lalu disalurkan melalui saluran transmisi dan distribusi. Saluran transmisi pada sistem daya listrik menyalurkan energi listrik dengan nilai daya lebih besar dibandingkan saluran distribusi. Oleh karena itu, saluran transmisi memiliki peran yang sangat penting dalam penyaluran energi listrik dalam jumlah besar.

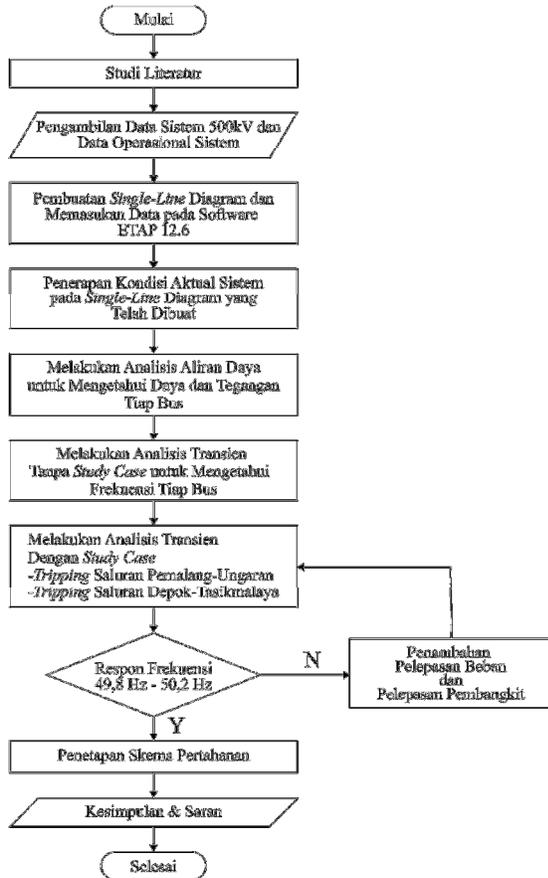
Jika terjadi gangguan pada saluran transmisi maka dapat mengakibatkan perubahan kestabilan yang cukup signifikan dalam sistem daya listrik, salah satunya kestabilan frekuensi. Ketidak-stabilan frekuensi, seperti penurunan dan kenaikan frekuensi yang drastis dapat menyebabkan sistem mengalami pemadaman total [2]. Salah satu contoh pemadaman listrik akibat ketidak-stabilan frekuensi adalah pemadaman listrik Jawa bagian Barat yang terjadi pada bulan Agustus tahun 2019. Pemadaman tersebut terjadi karena lepasnya saluran 2 saluran transmisi *double circuit* berupa saluran udara tegangan ekstra tinggi (SUTET) Pemalang-Ungaran dan Depok-Tasikmalaya, lepasnya kedua saluran tersebut dikategorikan sebagai peristiwa kontingensi N-2. Peristiwa kontingensi tersebut memicu pemadaman skala besar karena pada umumnya sistem daya listrik modern hanya memenuhi syarat keandalan sistem pada kondisi kontingensi N-1 [3].

Guna mencegah kembali terjadinya pemadaman listrik tersebut maka perlu dirancang suatu skema pertahanan yang dapat mengembalikan kestabilan sistem dengan cepat. Pelepasan beban dan generator tripping perlu dilakukan pada kasus ini karena memiliki fungsi untuk mengevakuasi daya beban dan pembangkit secara cepat [4]. Dalam rancangan skema pertahanan akan ditentukan berapa beban minimal yang harus dilepas serta berapa besar daya generator yang harus dilepas untuk menyesuaikan perubahan yang terjadi pada sistem. Sehingga dapat didapatkan hasil penelitian yang dapat digunakan sebagai rekomendasi rancangan skema pertahanan yang sebaiknya diterapkan pada sistem 500 kV Jawa-Bali.

## II. METODE PENELITIAN

### A. Diagram Alir Penelitian

Metode penelitian yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

### B. Pengambilan Data

Pengambilan data untuk penelitian ini dilakukan di PT. PLN (Persero) Unit Induk Pusat Pengaturan Beban (UIP2B) yang terletak di Gandul, Cinere, Depok, Jawa Barat. Pengambilan data meliputi single line diagram, data generator, data transformator, data saluran transmisi, data circuit breaker yang ada dalam jaringan Sistem 500kV Jawa-Bali serta data pembangkitan dan pembebanan rencana operasi bulan (ROB) Agustus tahun 2019. Data yang diambil akan digunakan untuk melakukan simulasi dalam software ETAP 12.6.

### C. Analisis Sistem Daya

Analisis ini bertujuan untuk mengetahui nilai tegangan tiap bus, nilai daya yang mengalir pada tiap saluran, nilai daya yang dibangkitkan generator dan nilai daya yang diserap oleh beban. Hasil dari analisis aliran daya akan digunakan sebagai

acuan untuk menjalankan analisis stabilitas transien. Berikut langkah-langkah untuk melakukan analisis aliran daya:

1. Membuka file baru pada software ETAP 12.6.
2. Menggambar single line diagram dari sistem 500 kV ketika circuit breaker saluran Pedan-Kediri dan Pedan-Kesugihan-Tasikmalaya
3. Memasukkan nilai tiap komponen sesuai data
4. Melakukan pengecekan error sistem
5. Melakukan simulasi aliran daya pada single line diagram yang telah dibuat

### D. Analisis Transien

Analisis stabilitas transien dilakukan dengan maksud mengetahui respon frekuensi dalam kondisi putusnya saluran double circuit Mandirancan-Ungaran dan Tasikmalaya-Kesugihan. Analisis ini dimaksudkan untuk mengetahui respon tegangan tiap bus dan frekuensi tiap bus pada kasus-kasus yang telah ditentukan. Berikut langkah-langkah untuk melakukan analisis transien:

1. Menentukan studi kasus, lama waktu simulasi yang akan dijalankan, dan rentang waktu perubahan transien.
2. Melakukan pemilihan perangkat yang akan digunakan untuk mengetahui grafik hasil analisis transien.
3. Menjalankan simulasi analisis transien.
4. Melakukan analisis terhadap hasil simulasi

Adapun kasus yang digunakan berupa replikasi kondisi dari pemadaman skala besar pada sistem Jawa-Bali bulan Agustus 2019, dengan rincian outages dua saluran double circuit Ungaran-Pemalang dan trip dua saluran double circuit Tasikmalaya-Depok.

### E. Pelepasan Beban dan Pelepasan Pembangkit

Pelepasan beban dimaksudkan untuk mengimbangi lepasnya kemampuan pembangkitan dari sisi timur yang menyuplai kebutuhan beban di sisi barat. Pelepasan beban didasarkan pada penurunan frekuensi dan tegangan yang terjadi. Pelepasan beban pada software ETAP 12.6.0 dilakukan dengan cara membuka circuit breaker pada sisi beban. Pelepasan beban yang dilakukan dengan nilai seminimal mungkin hingga tercapai batas minimal frekuensi operasi normal sebesar 49,8 Hz.

Pelepasan pembangkit dilakukan pada Jawa sisi timur yang memiliki kemungkinan lonjakan frekuensi karena lepasnya kebutuhan beban besar atau Jawa sisi barat. Pembangkit dengan tenaga gas dan dijadikan prioritas untuk dilakukan pemutusan, karena pembangkit ini memiliki kemampuan cold start lebih cepat dibandingkan dengan pembangkit dengan tenaga uap atau gas uap.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Simulasi Aliran Daya

Untuk mengetahui dan nilai daya yang mengalir pada tiap bus dalam keadaan normal atau tanpa gangguan maka dilakukan simulasi aliran daya menggunakan software ETAP 12.6. Simulasi aliran daya dilakukan dengan nilai pembangkitan dan nilai pembebanan didasarkan pada ROB Agustus 2019, dengan kondisi tidak aktifnya dua saluran karena perawatan yaitu: single circuit Pedan-Kediri dan single circuit Pedan-Kesugihan-Tasikmalaya.

TABEL 1. HASIL SIMULASI ALIRAN DAYA

	MW	MVar
<b>Total Pembangkitan</b>	13.592,658	1.105,289
<b>Total Pembebanan</b>	13.427,455	-1.733,261
<b>Total Demand</b>	13.592,650	1.105,289
<b>Rugi-rugi</b>	165,199	2.838,550

Dari hasil simulasi aliran daya didapatkan rugi-rugi sebesar 165,199 MW atau 1,22% dari total daya pembangkitan dan terdapat surplus pembangkitan sebesar 0,008 MW. Selain itu dari simulasi ini juga didapatkan total cadangan putar (spinning reserve) dari sistem.

TABEL 2. RINCIAN CADANGAN PUTAR

	Daya mampu	Daya terpasang	Cadangan Putar
<b>Barat</b>	11960,4	6969,655	4990,745
<b>Timur</b>	12392	6622,996	5769,004
<b>Total</b>	24352,4	13592,651	10759,749

Sistem 500kV Jawa-Bali memiliki cadangan putar total sebesar 10759,749 MW dimana terdapat 4990,745 MW pada bagian barat dan 10759,749 MW pada bagian timur.

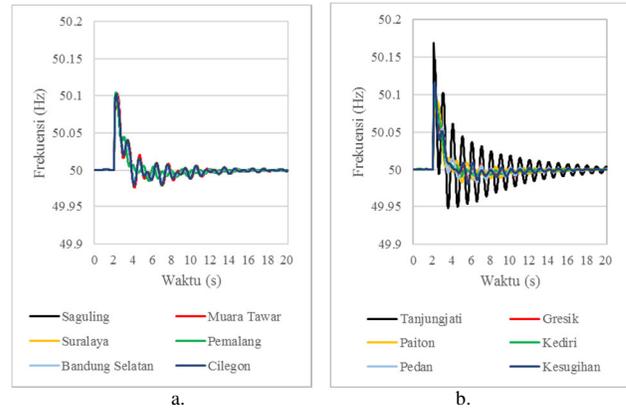
B. Hasil Simulasi Transien

Guna mengetahui respon sistem secara akurat simulasi transien akan diklasifikasikan menjadi dua tahap yaitu tahap pra-kontingensi dimana belum ada saluran yang lepas karena gangguan dan tahap kontingensi dimana terdapat saluran yang lepas dari sistem. Dan respon frekuensi sistem didapatkan dengan memilih bus pembangkit dan bus beban dengan kriteria terdekat, menengah dan terjauh dari titik kontingensi. Simulasi ini dilakukan berdasarkan laporan Gangguan SJB 20190804 tentang partial blackout sistem Jawa-Bali.

a) Pra-Kontingensi

Sebelum terjadi kontingensi yang menyebabkan partial blackout, saluran Pemalang-Ungaran mengalami gangguan tiga fasa ke tanah sebanyak tiga kali. Gangguan pertama terjadi pada pukul 11:45:26 WIB, pada gangguan ini gangguan berhasil dihilangkan dalam rentang waktu CCT (critical clearing time) yaitu kurang dari 90 milidetik.

Gambar 2a. dan Gambar 2b. mengilustrasikan waktu pukul 11:27:02 – 11:27:22 WIB. Pada grafik tersebut dapat dilihat Ketika gangguan terjadi frekuensi sistem mengalami fluktuasi namun sistem masih dapat mempertahankan frekuensi karena gangguan dapat dihilangkan. Gangguan kedua terjadi pada pukul 11:45:26 WIB, gangguan tersebut masih dapat dihilangkan dan diikuti dengan gangguan ketiga pada pukul 11:48:07 WIB. Gangguan ketiga tidak dapat dihilangkan dan menyebabkan pelepasan permanen saluran Pemalang-Ungaran serta pelepasan lanjutan saluran Depok-Tasikmalaya pada pukul 11:48:14 WIB.

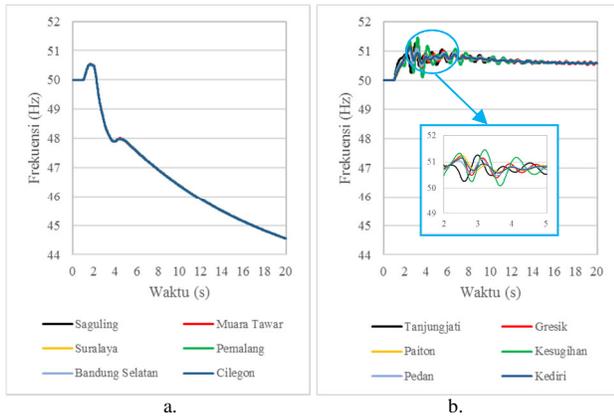


Gambar 2. a. Respon frekuensi gangguan pertama pada sisi Barat, b. Respon frekuensi gangguan pertama pada sisi Timur

b) Kontingensi Saluran

Lepasnya saluran double circuit Pemalang-Ungaran dan Depok-Tasikmalaya mengakibatkan sistem 500 kV Jawa-Bali terpisah menjadi dua island (bagian), yaitu island Jawa bagian Barat dan island Jawa bagian Timur. Simulasi dilakukan dengan gangguan pada 1 detik simulasi dan lepasnya saluran pada 2 detik simulasi.

Berdasarkan Gambar 3a. ketika terjadi kontingensi saluran, bus-bus yang terdapat pada island Jawa bagian Barat terus mengalami penurunan hingga akhir simulasi dengan kecepatan penurunan tertinggi pada bus Muara Tawar dengan laju penurunan frekuensi sebesar 0,2962 Hz/detik.



Gambar 3. a. Respon frekuensi Jawa bagian Barat ketika terjadi kontingensi saluran, b. Respon frekuensi Jawa bagian Timur ketika terjadi kontingensi saluran

Sedangkan pada Gambar 3b. yang menunjukkan respon island Jawa bagian Timur, terjadi fluktuasi hingga 51,4605 Hz dan island masih memiliki kemampuan untuk kembali ke kondisi tunak dengan nilai frekuensi 50,587 Hz. Maka kedua island tidak memenuhi standar frekuensi operasi normal dan untuk standar frekuensi darurat hanya dipenuhi oleh island Jawa bagian Timur.

**C. Pelepasan Beban Jawa Bagian Barat**

Untuk mengatasi penurunan frekuensi maka diperlukan scenario pelepasan beban. Beban yang akan dilepas dengan urutan dari terkecil ke terbesar untuk menghindari kelebihan pemutusan yang dapat memicu kegagalan bertingkat. Bus beban Priok dan Durikosambi menjadi prioritas. Kedua bus tersebut tidak akan masuk dalam skenario pelepasan karena menyuplai daya ke pusat pemerintahan dan bandara internasional Soekarno-Hatta.

**a) Pelepasan Beban Tahap Satu**

Simulasi pelepasan beban tahap satu menggunakan kasus kontingensi saluran sebagai acuan frekuensi dan waktu.

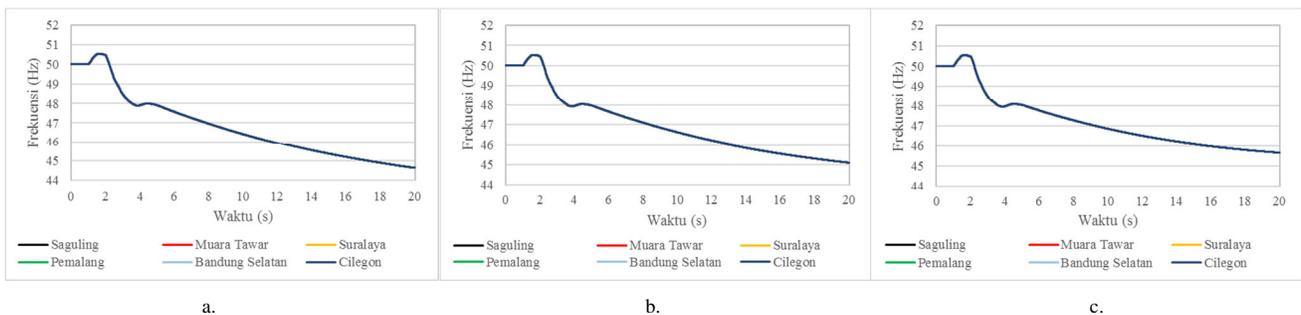
Simulasi dilakukan dengan menambah kasus pembukaan *circuit breaker* pada beban bus Mandirancan ketika frekuensi menyentuh 49,0 atau dalam waktu 2,661 detik simulasi. Setelah dilakukan pelepasan beban tahap satu, frekuensi sistem masih mengalami penurunan hingga akhir simulasi dengan rata-rata penurunan sebesar 0,2681 Hz/detik dan nilai frekuensi terendah sebesar 44,637 Hz. Sistem dinyatakan belum memenuhi standar frekuensi operasi normal atau darurat sehingga dibutuhkan pelepasan beban tahap dua.

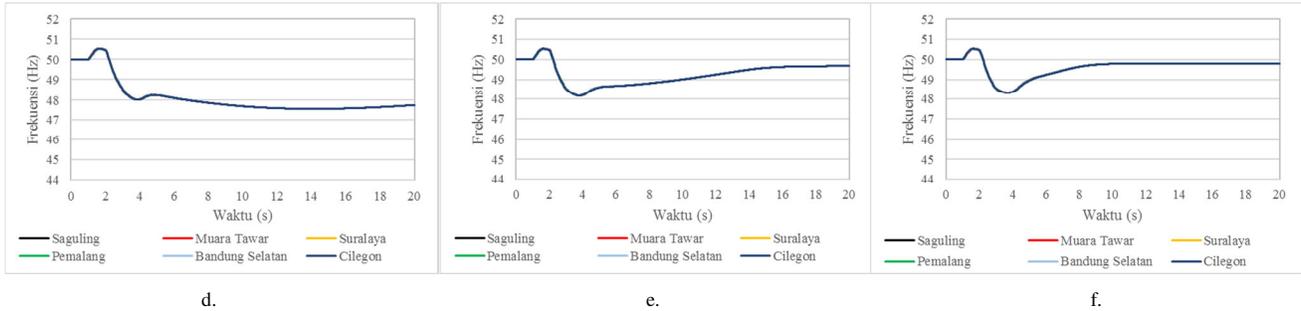
**b) Pelepasan Beban Tahap Dua**

Simulasi pelepasan beban tahap dua menggunakan kasus pelepasan beban tahap satu sebagai acuan frekuensi dan waktu. Simulasi dilakukan dengan menambah kasus pembukaan *circuit breaker* pada beban bus Suralaya ketika frekuensi menyentuh 48,9 atau dalam waktu 2,721 detik simulasi. Setelah dilakukan pelepasan beban tahap dua, frekuensi sistem masih mengalami penurunan hingga akhir simulasi dengan rata-rata penurunan sebesar 0,2449 Hz/detik dan nilai frekuensi terendah sebesar 45,102 Hz. Sistem dinyatakan belum memenuhi standar frekuensi operasi normal atau darurat sehingga dibutuhkan pelepasan beban tahap tiga.

**c) Pelepasan Beban Tahap Tiga**

Simulasi pelepasan beban tahap tiga menggunakan kasus pelepasan beban tahap dua sebagai acuan frekuensi dan waktu. Simulasi dilakukan dengan menambah kasus pembukaan *circuit breaker* pada beban bus Ujung Berung ketika frekuensi menyentuh 48,8 atau dalam waktu 2,781 detik simulasi. Setelah dilakukan pelepasan beban tahap tiga, frekuensi sistem masih mengalami penurunan hingga akhir simulasi dengan rata-rata penurunan sebesar 0,2169 Hz/detik dan nilai frekuensi terendah sebesar 45,6626 Hz. Sistem dinyatakan belum memenuhi standar frekuensi operasi normal atau darurat sehingga dibutuhkan pelepasan beban tahap tiga.





Gambar 4. Respon frekuensi Jawa bagian Barat: a. setelah pelepasan beban tahap satu, b. setelah pelepasan beban tahap dua, c. setelah pelepasan beban tahap tiga, d. setelah pelepasan beban tahap empat, e. setelah pelepasan beban tahap lima, f. setelah penambahan pelepasan beban tahap lima

*d) Pelepasan Beban Tahap Empat*

Simulasi pelepasan beban tahap empat menggunakan kasus pelepasan beban tahap tiga sebagai acuan frekuensi dan waktu. Simulasi dilakukan dengan menambah kasus pembukaan circuit breaker pada beban bus Deltamas ketika frekuensi menyentuh 48,7 atau dalam waktu 2,841 detik simulasi. Setelah dilakukan pelepasan beban tahap empat, frekuensi sistem mengalami penurunan hingga 13,621 detik dengan nilai frekuensi terendah sebesar 47,5649 Hz dan mengalami kenaikan hingga akhir simulasi dengan frekuensi sebesar 47,7585 Hz. Sistem dinyatakan sudah memenuhi standar frekuensi operasi darurat namun belum memenuhi standar frekuensi operasi normal sehingga dibutuhkan pelepasan beban tahap lima.

*e) Pelepasan Beban Tahap Lima*

Simulasi pelepasan beban tahap lima menggunakan kasus pelepasan beban tahap empat sebagai acuan frekuensi dan waktu. Simulasi dilakukan dengan menambah kasus pembukaan circuit breaker pada beban bus Lengkong ketika frekuensi menyentuh 48,6 atau dalam waktu 2,921 detik simulasi.

Setelah dilakukan pelepasan beban tahap lima, frekuensi sistem mengalami penurunan hingga 3,781 detik dengan nilai frekuensi terendah sebesar 48,1765 Hz dan mengalami kenaikan hingga kondisi tunak pada waktu 17,161 detik dengan frekuensi 49,66 Hz. Sistem dinyatakan sudah memenuhi standar frekuensi operasi darurat namun belum memenuhi standar frekuensi operasi normal untuk itu perlu dilakukan re-skenario berupa penambahan beban yang dilepas pada pelepasan tahap lima ini. Penambahan pelepasan dilakukan dilakukan dengan membuka circuit breaker beban bus Tambun pada waktu yang sama dengan bus Lengkong.

Setelah dilakukan penambahan pelepasan beban tahap lima, penurunan frekuensi terjadi hingga 3,701 detik dengan nilai frekuensi terendah sebesar 48,321 Hz dan mengalami kenaikan hingga kondisi tunak pada 15,081 detik dengan nilai frekuensi 49,81 Hz. Sistem dinyatakan sudah memenuhi standar frekuensi operasi normal.

*f) Penetapan Skenario Pelepasan Beban*

Dari pengujian yang telah dilakukan dengan melakukan pelepasan beban bertahap didapatkan skenario pelepasan beban yang dapat diterapkan untuk kasus kontingensi N-2 saluran Pemalang-Ungaran dan Depok-Tasikmalaya. Nilai beban yang dilepas dari sistem sudah dirancang seminimal mungkin untuk menghindari kegagalan bertingkat.

Terdapat tujuh tahap pada skenario tersebut dimana lima langkah pertama dilakukan secara instantaneous karena memiliki waktu tunda yang relatif cepat. Sedangkan langkah 6 dan 7 dilakukan untuk mengantisipasi penurunan lanjutan ketika terjadi gangguan tambahan.

*D. Pelepasan Pembangkit Jawa Bagian Timur*

Untuk mengatasi kenaikan frekuensi pada island Jawa bagian Timur maka diperlukan skenario pelepasan generator. Karena tidak terdapat generator bertenaga hidro maka generator yang akan dilepas dengan urutan terkecil ke terbesar untuk menghindari pemutusan berlebih yang dapat memicu kegagalan bertingkat.

TABEL 3. URUTAN NILAI PEMBANGKITAN

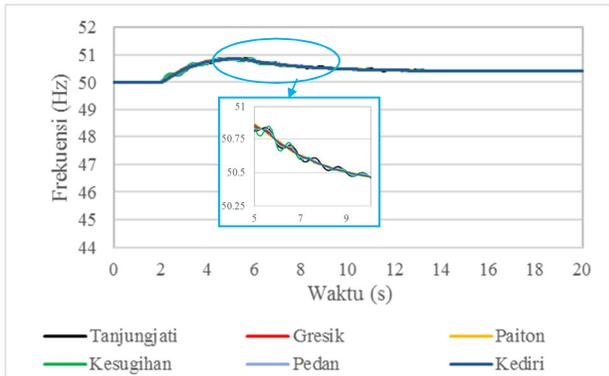
Pembangkitan	Daya	
	MW	MVA
Total Cilacap	598,65	748,31
Total Adipala	599,625	749,5313
Pembangkitan	Daya	
	MW	MVA
Total Gresik	672,25	840,3125
Total Grati	700	875
Total Tanjungjati	2617,706	2908,562
Total Paiton	4502,81	5628,513

Pelepasan Pembangkit akan disimulasikan menggunakan simulasi transien pada software ETAP 12.6. Simulasi ini menggambarkan kondisi island Jawa bagian Timur pada pukul 11:48:06 WIB hingga 11:48:26 WIB.

*a) Pelepasan Pembangkit Tahap Satu*

Simulasi pelepasan pembangkit tahap satu dilakukan dengan menimbang kemampuan sistem untuk kembali pada kondisi tunak, berdasarkan percobaan yang telah dilakukan, waktu 5,381 detik merupakan waktu pelepasan pembangkit tercepat dimana sistem menyentuh frekuensi 50,8 Hz dan

mampu kembali ke kondisi tunak. Setelah dilakukan pelepasan pembangkit sistem mengalami fluktuasi frekuensi hingga 9,001 detik dengan nilai frekuensi tertinggi sebesar 51,46 Hz. Lalu sistem kembali pada kondisi tunak dengan nilai frekuensi sebesar 50,40 Hz. Sistem dinyatakan telah memenuhi standar frekuensi operasi darurat namun belum memenuhi standar frekuensi operasi normal sehingga diperlukan pelepasan pembangkit tahap dua.



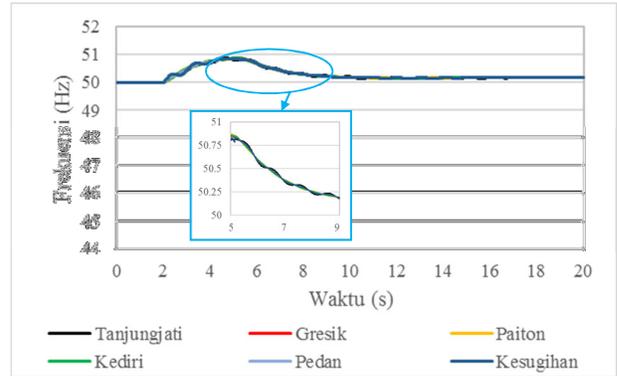
Gambar 5. Respon frekuensi Jawa bagian Timur setelah pelepasan pembangkit tahap satu

#### b) Pelepasan Pembangkit Tahap Dua

Simulasi pelepasan pembangkit tahap dua dilakukan dengan menimbang kemampuan sistem untuk kembali pada kondisi tunak, berdasarkan percobaan yang telah dilakukan, waktu 5,561 detik merupakan waktu pelepasan pembangkit tahap dua tercepat dimana sistem menyentuh frekuensi 50,9 Hz dan mampu kembali ke kondisi tunak. Setelah dilakukan pelepasan pembangkit sistem mengalami fluktuasi frekuensi hingga 8,961 detik dengan nilai frekuensi tertinggi sebesar 51,46 Hz. Selanjutnya, sistem kembali pada kondisi tunak dengan nilai frekuensi sebesar 50,17 Hz. Sistem dinyatakan telah memenuhi standar frekuensi operasi normal.

#### c) Penetapan Skenario Pelepasan Pembangkit

Dari pengujian yang telah dilakukan dengan melakukan pelepasan pembangkit bertahap didapatkan skenario pelepasan pembangkit yang dapat diterapkan untuk kasus kontingensi N-2 saluran Pemalang-Ungaran dan Depok-Tasikmalaya. Nilai pembangkitan yang dilepas dari sistem sudah dirancang seminimal mungkin untuk menghindari kegagalan bertingkat. Terdapat dua tahap pada skenario tersebut dengan waktu tunda masing-masing sebesar 2 detik dan bekerja pada frekuensi 50,4 Hz di pembangkit Cilacap dan 50,5 Hz di pembangkit Adipala.



Gambar 6. Respon frekuensi Jawa bagian Timur setelah pelepasan pembangkit tahap dua

### IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari simulasi dan analisis pada penelitian ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut;

1. Kondisi sistem 500kV Jawa-Bali terjadi *islanding* yang memisah sistem menjadi Jawa bagian Barat dan Jawa bagian Timur, Dimana tiap bagian mengalami respon yang berbeda Jawa bagian Barat mengalami penurunan frekuensi terus-menerus karena defisit pembangkitan hingga akhir simulasi dengan nilai frekuensi terendah. Jawa bagian Timur mengalami fluktuasi frekuensi namun dapat kembali ke kondisi tunak
2. Skema pertahanan dirancang dengan meminimalisir *outage* beban dan pembangkit. Pelepasan beban pada Jawa bagian Barat yang terdiri atas lima tingkat pelepasan utama dengan total 835,222 MW dan dua tingkat pelepasan cadangan sebesar 740,293 MW. Pelepasan pembangkit pada Jawa bagian Timur terdiri atas dua tingkat pelepasan 1.198,275 MW.
3. Setelah skema pertahanan diterapkan pada kasus kontingensi N-2 saluran Pemalang-Ungaran dan Depok-Tasikmalaya, Jawa bagian Barat mengalami perbaikan frekuensi berupa kenaikan hingga 49,81 Hz dan Jawa bagian Timur mengalami perbaikan frekuensi berupa penurunan hingga 50,17 Hz.

### V. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kelompok Keahlian Teknik Sistem Tenaga dan Manajemen Energi (PSeemRG) Universitas Brawijaya, Indonesia yang telah memungkinkan publikasi hasil penelitian ini.

### VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2018). Pengesahan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT Perusahaan Listrik Negara (Persero) Tahun 2018. Jakarta: ESDM.
- [2] Karim, K. Soeprijanto, A. & Purnomo, M. H. (2008). Pelepasan Beban Otomatis Menggunakan ANN-CBP-FLC pada Sistem Tenaga Listrik Industri Besar. Prosidin Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Informasi (SNATI) 2008: Bidang Ketenaga listrikan. Jogjakarta: UII

- 
- [3] Che, L. Liu, X. & Li, Z. (2018). Preventive Mitigation Strategy for the Hidden N-k Line Contingencies in Power System. *IEEE Transactions on Reliability*, 67(3), 1060-1070
- [4] PT. PLN (Persero) UIP3B (2015). *Defence Scheme Sistem Jawa-Bali 2015*. Jakarta: PLN
- [5] Noviyani, E. Junaidi. & Harjono, P. (2016). Studi Pelepasan Beban pada Skema Pertahanan (Defense Scheme) Jaringan Sistem Khatulistiwa. *Jurnal Teknik Elektro Tanjungpura*, 2(1), 1-7
- [6] Pimjaipong, W. Junrussameevilai, T. & Maneerat, N. (2005). Blackout Prevention Plan – The Stability, Reliability and Security Enhancement in Thailand Power Grid. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific*. Dalian, China
- [7] Elansari, A. S. Edrah, M. F. & Khaled, S. M. (2012). Improve Transient Frequency Response by Adjusting Generators Over Frequency Relay. *IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*. Sabah, Malaysia: 2-5 Desember 2012.
- [8] Salim, N.A. Zakaria, Z. M. & Aziz, M. A. A. (2017). Development of Graphical User Interface to Monitor the Power System Frequency Stability due to Cascading Failure. *2017 3<sup>rd</sup> International Conference on Power Systems and Renewable Energy Technology (PGSRET)*: 180-184. Johor Baru: IEEE
- [9] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2007). *Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik Jawa-Madura-Bali*. Jakarta: ESDM
- [10] Rachman, A. (2016). Analisis Kontingensi pada Sistem Jawa-Bali 500kV untuk Mendesain Keamanan Operasi. *Proceeding Seminar Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro FTI – ITS*. Surabaya: ITS