Jurnal: Elektrika Borneo (JEB)
Vol. 12, No. 2, Oktober 2026, hlm. 140-145 p-ISSN 2443-0986
e-ISSN 2685-001X

# ANALISIS KONTINGENSI N-1 PADA SISTEM DISTRIBUSI 20 kV PT PLN (PERSERO) SEBATIK

Patria Julianto[1], Niko Juliansyah[2]

[1,2]*Tenknik Elektro, Universitas Borneo Tarakan, Tarakan, Kalimantan Utara, Indonesia*

[1]patria@borneo.ac.id
[2]njuliansyah94@gmail.com

***Abstract—This paper evaluates N-1 security of the 20 kV distribution system of PT PLN (Persero) Sebatik under generator and feeder-line outages. The network was modeled in ETAP PowerStation 19.0.1 and solved using Newton–Raphson load flow at peak-load conditions. Five source-side contingencies (Mitsubishi 1, Mitsubishi 2, Mitsubishi 3, MAN 8, and the GH Nunukan interconnection) and five feeder contingencies were simulated. The base case supplied approximately 4.061 MW and 2.620 MVAr of load with reported losses of 0.050 MW and 0.170 MVAr. Generator outages caused significant redistribution: the loss of Mitsubishi 1, Mitsubishi 2, and Mitsubishi 3 produced generator loadings of 154%, 164%, and 377%, respectively, whereas the MAN 8 outage did not produce a reported generator overload. The most critical voltage condition occurred when GH Nunukan was disconnected, with a minimum bus voltage of 17.86 kV (0.8934 p.u.). Feeder outages did not materially depress the energized-bus voltage profile but disconnected radial loads; the largest lost load occurred on feeder 1 (cable 28), reaching 575.2 kW. The results indicate that Sebatik N-1 vulnerability is dominated by limited generation reserve and radial feeder topology, so reinforcement should prioritize source reserve, critical feeder transfer capability, and alternative supply paths.***

***Keywords: Contingency Analysis, Distribution System, N-1 Security, ETAP, Undervoltage, Overload.***

**Intisari—Penelitian ini mengevaluasi keamanan N-1 pada sistem distribusi 20 kV PT PLN (Persero) Sebatik akibat lepasnya pembangkit dan saluran penyulang. Sistem dimodelkan pada ETAP PowerStation 19.0.1 dan dihitung menggunakan aliran daya Newton–Raphson pada kondisi beban puncak. Lima kontingensi sisi sumber (Mitsubishi 1, Mitsubishi 2, Mitsubishi 3, MAN 8, dan interkoneksi GH Nunukan) serta lima kontingensi penyulang disimulasikan. Pada kondisi normal, beban sistem sebesar sekitar 4,061 MW dan 2,620 MVAr dengan rugi-rugi yang dilaporkan sebesar 0,050 MW dan 0,170 MVAr. Pelepasan Mitsubishi 1, Mitsubishi 2, dan Mitsubishi 3 menimbulkan pembebanan generator masing-masing 154%, 164%, dan 377%, sedangkan pelepasan MAN 8 tidak menimbulkan overload generator yang dilaporkan. Kondisi tegangan paling kritis terjadi ketika GH Nunukan dilepas dengan tegangan minimum 17,86 kV (0,8934 p.u.). Kontingensi penyulang tidak menurunkan secara signifikan tegangan pada bagian sistem yang tetap bertegangan, tetapi memutus beban pada konfigurasi radial. Kehilangan beban terbesar terjadi pada feeder 1 (kabel 28) sebesar 575,2 kW. Hasil ini menunjukkan bahwa kerentanan N-1 sistem Sebatik terutama ditentukan oleh keterbatasan cadangan pembangkitan dan topologi penyulang radial, sehingga penguatan cadangan sumber, kemampuan transfer penyulang kritis, dan jalur suplai alternatif perlu diprioritaskan.**

**Kata Kunci: Analisis Kontingensi, Sistem Distribusi, Keamanan N-1, ETAP, Undervoltage, Overload.**

## I. PENDAHULUAN

Keandalan dan keamanan operasi merupakan aspek penting pada sistem tenaga listrik karena pelepasan satu elemen dapat mengubah aliran daya, profil tegangan, serta tingkat pembebanan peralatan. Pada jaringan distribusi, dampaknya dapat lebih langsung terhadap kontinuitas pelayanan, terutama pada penyulang radial dengan jalur suplai alternatif yang terbatas. Studi pada jaringan distribusi 20 kV ULP Cibitung menunjukkan bahwa kontingensi dapat dievaluasi melalui perubahan aliran daya, tegangan, dan performance index [1]. Kajian pada sistem Kalimantan 500 kV serta interkoneksi Sulawesi Utara–Gorontalo juga menunjukkan bahwa pelepasan elemen tunggal dapat menimbulkan overload dan undervoltage yang perlu diidentifikasi sebelum gangguan aktual terjadi [2], [3]. Pendekatan AC power flow dan performance index masih digunakan pada penelitian kontingensi terkini untuk mengurutkan tingkat keparahan gangguan [4].

Secara klasik, contingency analysis merupakan bagian inti dari static security assessment. Prosesnya mencakup pembentukan daftar kontingensi, simulasi kondisi pascagangguan, identifikasi pelanggaran batas operasi, serta pemeringkatan kejadian berdasarkan tingkat keparahan [5], [6]. Perkembangan kajian keamanan sistem menunjukkan dua arah utama, yaitu pendekatan deterministik dan berbasis risiko; untuk studi perencanaan dan operasi yang berfokus pada N-1, pendekatan deterministik tetap relevan karena mampu menunjukkan secara langsung konsekuensi hilangnya satu komponen [7]–[9]. Untuk sistem berskala besar, screening dapat dipercepat dengan line outage distribution factor dan pendekatan graf, sedangkan penyelesaian AC tetap dibutuhkan ketika perubahan tegangan dan daya reaktif menjadi perhatian [10]–[12].

Perhitungan aliran daya merupakan fondasi analisis kontingensi. Metode Newton–Raphson memiliki sifat konvergensi yang kuat dan telah lama digunakan pada studi aliran daya AC [13], sedangkan metode fast-decoupled dikembangkan untuk mempercepat kalkulasi berulang termasuk studi kontingensi [14]. Perangkat lunak analisis sistem tenaga modern mengimplementasikan formulasi aliran daya AC yang serupa untuk studi operasi tunak [15]. Pada jaringan distribusi radial atau weakly meshed, karakteristik rasio R/X dan struktur topologi juga mendorong pengembangan metode khusus seperti

compensation-based power flow, metode Haque, direct approach, dan three-phase power flow [16]–[19].

Karakteristik sistem distribusi, pemodelan saluran, regulasi tegangan, serta aspek keandalan dibahas secara komprehensif dalam literatur distribusi dan keandalan sistem tenaga [20]–[23]. Dari sisi operasi, cadangan pembangkitan, kendala aliran daya, dan respons sistem terhadap pelepasan unit juga menjadi bagian penting dari keamanan operasi [24], [25]. Pada konteks Indonesia, studi rugi-rugi jaringan distribusi menunjukkan bahwa impedansi penghantar dan kondisi pembebanan berpengaruh langsung terhadap rugi daya dan jatuh tegangan [26]-[31]. Untuk sistem yang diteliti, tegangan nominal 20 kV sesuai dengan tingkat tegangan standar distribusi menengah PLN [32].

Sistem kelistrikan Sebatik memiliki kombinasi pembangkit lokal, interkoneksi dengan sistem Nunukan, serta penyulang 20 kV yang melayani beban tersebar. Kondisi ini menjadikan pelepasan unit pembangkit atau penyulang sebagai skenario penting untuk diuji. Penelitian ini bertujuan: (1) mengevaluasi kondisi dasar sistem pada beban puncak; (2) menganalisis dampak kontingensi N-1 pembangkit dan saluran terhadap tegangan, pembebanan sumber, dan kehilangan beban; serta (3) memvalidasi sebagian hasil simulasi melalui perhitungan manual. Hasil setiap skenario dirangkum menggunakan indikator kritis yang seragam sehingga tingkat kerentanan sistem dapat dibandingkan secara langsung.

## II. METODE PENELITIAN

### A. Data Sistem dan Pemodelan

Data penelitian terdiri atas data pembangkit, saluran, beban, serta single-line diagram sistem distribusi 20 kV PT PLN (Persero) Sebatik. Model dibangun pada ETAP PowerStation 19.0.1. Analisis dilakukan pada kondisi steady-state beban puncak malam karena kondisi tersebut memberikan tekanan operasi terbesar pada sumber dan penyulang. Sumber yang dimodelkan mencakup Mitsubishi 1, Mitsubishi 2, Mitsubishi 3, MAN 8, serta suplai dari GH Nunukan. Lima penyulang utama dianalisis sebagai feeder 1 sampai feeder 5.

### B. Formulasi Aliran Daya dan Indikator

Untuk setiap kondisi operasi, keseimbangan daya kompleks pada bus i dinyatakan sebagai:

$$S_i = S_{Gi} - S_{Bi} - S_{Li} \quad (1)$$

dengan $S_i$ adalah injeksi daya kompleks bersih pada bus $i$, $S_{Gi}$ daya dari sumber, $S_{Bi}$ daya beban, dan $S_{Li}$ bagian rugi-rugi yang dialokasikan pada elemen terkait.
Dalam bentuk komponen aktif dan reaktif:

$$P_i + jQ_i = (P_{Gi} + jQ_{Gi}) - (P_{Bi} + jQ_{Bi}) - (P_{Li} + jQ_{Li}) \quad (2)$$

Aliran daya Newton–Raphson diselesaikan secara iteratif melalui hubungan mismatch daya dan koreksi variabel keadaan:

$$\begin{bmatrix}\Delta P \\ \Delta Q\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\delta \\ \Delta V\end{bmatrix} \quad (3)$$

Rugi daya aktif dan reaktif pada saluran tiga fasa dihitung menggunakan hubungan dasar berikut, dengan $R$ dan $X$ menyatakan parameter penghantar per satuan panjang, I arus saluran, dan ℓ panjang saluran dalam satuan yang konsisten:

$$P_{\text{loss}} = 3I^2R\ell \quad (4)$$

$$Q_{\text{loss}} = 3I^2X\ell \quad (5)$$

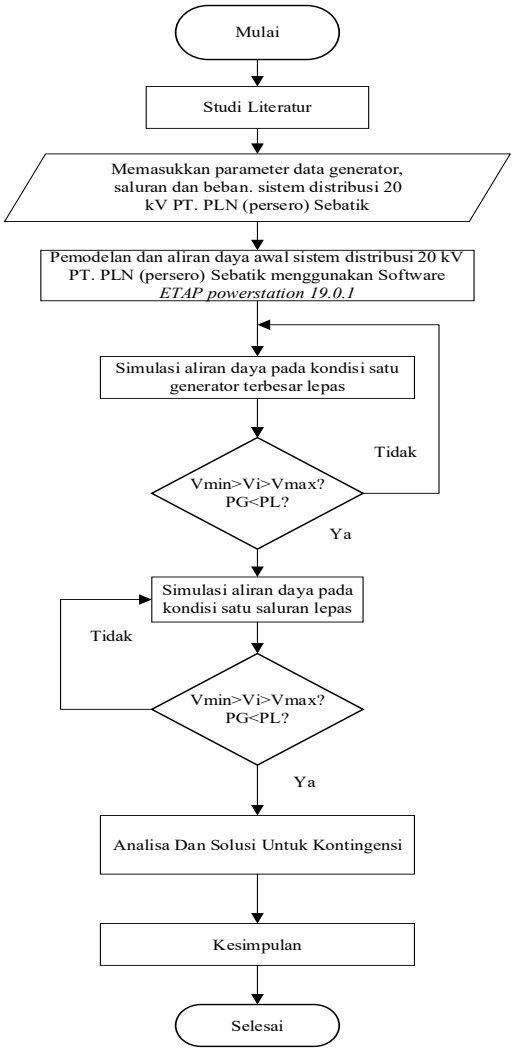
Jatuh tegangan dan persentasenya ditentukan dari tegangan sisi kirim V_s dan sisi terima V_r:

$$\Delta V = |V_s - V_r| \quad (6)$$

$$\Delta V_{\%} = \frac{|V_s - V_r|}{|V_s|} \times 100\% \quad (7)$$

Indikator yang dibandingkan untuk setiap skenario adalah tegangan minimum bus, pembebanan generator, rugi-rugi daya, dan beban yang terputus. Untuk screening penelitian ini digunakan batas evaluasi tegangan minimum 0,90 p.u.; nilai di bawah batas tersebut ditandai sebagai undervoltage untuk kebutuhan pembahasan hasil.

### C. Skenario Kontingensi N-1




Gambar 1. Diagram alir penelitian dan evaluasi kontingensi N-1.

Kontingensi sumber dilakukan dengan melepas secara bergantian Mitsubishi 1, Mitsubishi 2, Mitsubishi 3, MAN 8, dan GH Nunukan. Kontingensi saluran dilakukan dengan melepas satu elemen utama pada masing-masing feeder, yaitu cable 28 (feeder 1), cable 169 (feeder 2), cable 107 (feeder 3), cable 143 (feeder 4), dan cable 187 (feeder 5). Setiap skenario diselesaikan kembali menggunakan load flow sehingga perubahan kondisi pascagangguan dapat dibandingkan terhadap base case.

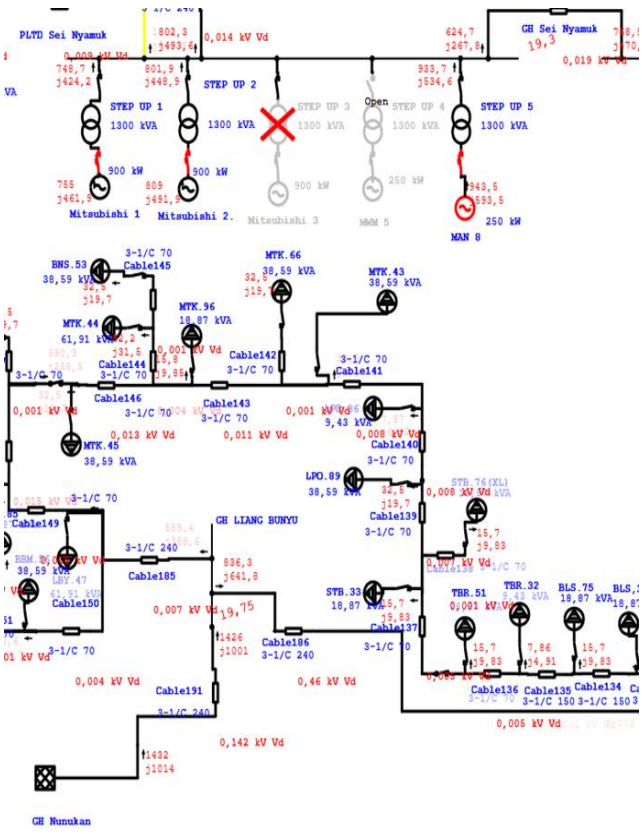
D. Validasi Perhitngan

Validasi dilakukan pada saluran terpilih dengan membandingkan hasil ETAP terhadap perhitungan manual rugi-rugi dan jatuh tegangan. Perbandingan menggunakan data arus, parameter saluran, serta tegangan sisi kirim dan terima yang sama. Karena keluaran laporan ETAP yang tersedia menampilkan tegangan bus dengan pembulatan satu desimal, perbedaan sangat kecil pada jatuh tegangan dapat muncul ketika perhitungan manual menggunakan angka yang telah dibulatkan.

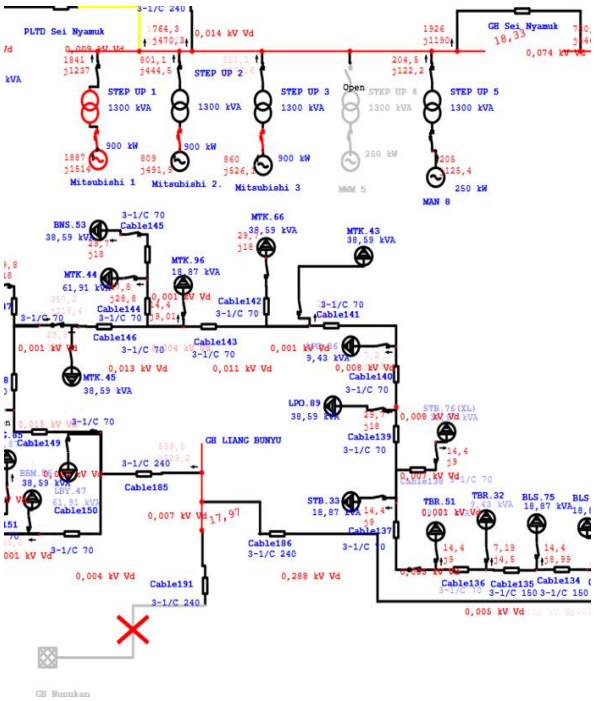
## III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kondisi Operasi Normal

Pada kondisi beban puncak, hasil simulasi base case menunjukkan total beban sebesar 4,061 MW dan 2,620 MVAr. Daya dari swing source dilaporkan sebesar 1,432 MW dan 1,014 MVAr, sedangkan sumber non-swing sebesar 2,639 MW dan 1,605 MVAr. Rugi-rugi total yang tercatat pada model adalah 0,050 MW dan 0,170 MVAr. Nilai tersebut digunakan sebagai acuan untuk menilai perubahan setelah kontingensi.




(a)




(b)

Gambar 2. Kondisi kontingensi sumber kritis: (a) Mitsubishi 3 dilepas; (b) GH Nunukan dilepas.

Tabel I
Ringkasan kondisi dasar sistem pada beban puncak

| Besaran | P (MW) | Q (MVAr) | Keterangan |
|---|---|---|---|
| Swing source | 1,432 | 1,014 | Base case |
| Sumber non-swing | 2,639 | 1,605 | Base case |
| Total beban | 4,061 | 2,620 | Beban puncak |
| Rugi-rugi sistem | 0,050 | 0,170 | Hasil ETAP |

B. Kontingensi Pembangkit dan Interkoneksi

Pelepasan unit pembangkit menyebabkan redistribusi daya yang besar pada unit yang tersisa. Tiga skenario pertama menimbulkan overload pada generator lain, yaitu 154% ketika Mitsubishi 1 dilepas, 164% ketika Mitsubishi 2 dilepas, dan 377% ketika Mitsubishi 3 dilepas. Kondisi ini memperlihatkan bahwa cadangan kapasitas sumber lokal belum cukup untuk memenuhi kriteria N-1 tanpa pelanggaran pembebanan pada sebagian skenario. Sebaliknya, pelepasan MAN 8 tidak menghasilkan overload generator yang dilaporkan.

Tabel II
Ringkasan hasil kontingensi sumber

| Elemen dilepas | Vmin (kV) | Vmin (p.u.) | Overload kritis |
|---|---|---|---|
| Mitsubishi 1 | 18,75 | 0,9374 | Mitsubishi 2 = 154% |
| Mitsubishi 2 | 18,67 | 0,9339 | Mitsubishi 3 = 164% |
| Mitsubishi 3 | 19,07 | 0,9537 | MAN 8 = 377% |
| MAN 8 | 19,09 | 0,9545 | Tidak dilaporkan |
| GH Nunukan | 17,86 | 0,8934 | Tidak dilaporkan |

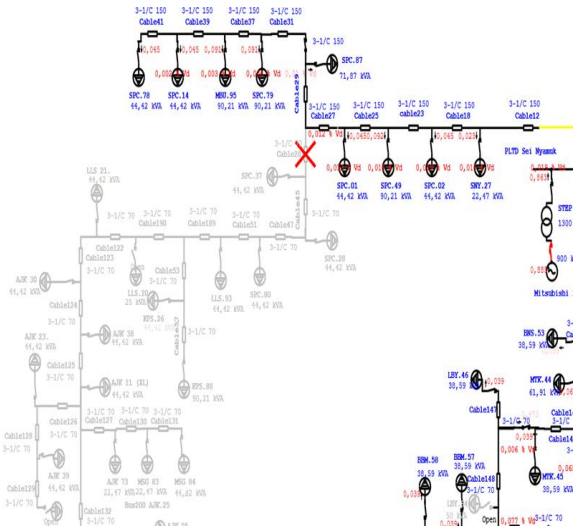
Dari sisi tegangan, pelepasan Mitsubishi 1, Mitsubishi 2, Mitsubishi 3, dan MAN 8 masih menghasilkan tegangan minimum di atas 0,90 p.u. untuk kriteria screening penelitian ini. Skenario yang paling kritis adalah pelepasan GH Nunukan karena tegangan minimum turun menjadi 17,86 kV atau 0,8934 p.u. Dengan demikian, skenario GH Nunukan merupakan kondisi sumber paling kritis dan menunjukkan indikasi undervoltage terhadap batas evaluasi 0,90 p.u.

C. Kontingensi Saluran Penyulang

Berbeda dengan kontingensi pembangkit, pelepasan saluran pada tiap feeder terutama berdampak pada hilangnya beban di bagian radial yang terisolasi. Pada bagian sistem yang tetap bertegangan, perubahan tegangan tidak dilaporkan signifikan. Dampak terbesar terjadi pada cable 28 feeder 1 dengan kehilangan beban 575,2 kW dan kehilangan daya generator 592,8 kW. Feeder 5 memberikan kehilangan beban paling kecil, yaitu 112,9 kW.

Tabel III
Dampak kontingensi saluran pada masing-masing feeder

| Feeder | Saluran | ΔP gen. (kW) | Beban lepas (kW) | Bus lepas |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Cable 28 | 592,8 | 575,2 | 16 |
| 2 | Cable 169 | 306,8 | 297,8 | 8 |
| 3 | Cable 107 | 351,0 | 337,0 | 10 |
| 4 | Cable 143 | 263,4 | 260,2 | 12 |
| 5 | Cable 187 | 117,3 | 112,9 | 4 |



Gambar 3. Contoh pelepasan cable 28 pada feeder 1 dan bagian jaringan yang terisolasi.

Jika tingkat keparahan dinyatakan berdasarkan beban terputus, urutan kritisnya adalah feeder 1, feeder 3, feeder 2, feeder 4, dan feeder 5. Pola ini menunjukkan bahwa topologi radial menyebabkan dampak kontingensi saluran lebih dominan sebagai loss of load daripada pelanggaran tegangan pada bagian sistem yang masih tersuplai. Oleh karena itu, intertie antar-feeder, sectionalizing yang tepat, atau jalur suplai alternatif dapat menjadi arah mitigasi teknis untuk mengurangi beban terputus.

D. Validasi Simulasi dan Perhitungan Manual

Validasi pada cable 12 memperlihatkan bahwa rugi-rugi manual mendekati hasil simulasi. Hasil ETAP menunjukkan rugi aktif sekitar 0,4 kW dan rugi reaktif 0,5 kVAr, sedangkan perhitungan manual menghasilkan 0,481652 kW dan 0,506282 kVAr. Selisih kecil pada Q menunjukkan konsistensi yang baik; selisih P terutama dipengaruhi pembulatan parameter penghantar, arus, dan panjang saluran yang ditampilkan pada laporan.

Tabel IV
Validasi rugi-rugi pada cable 12

| Besaran | ETAP | Manual | Selisih absolut |
|---|---|---|---|
| P_loss (kW) | 0,400000 | 0,481652 | 0,081652 |
| Q_loss (kVAr) | 0,500000 | 0,506282 | 0,006282 |

Untuk jatuh tegangan, tabel simulasi melaporkan sekitar 0,05% pada cable 12, sedangkan perhitungan manual menggunakan tegangan bus yang telah dibulatkan menjadi 99,7% pada kedua sisi sehingga menghasilkan 0,0%. Karena kedua angka masukan sudah dibulatkan satu desimal, hasil manual tersebut tidak cukup presisi untuk memverifikasi selisih 0,05%. Dengan demikian, validasi jatuh tegangan memerlukan data tegangan bus dengan presisi lebih tinggi (minimal tiga atau empat desimal) agar perbedaan yang kecil dapat dievaluasi secara memadai.

E. Implikasi Operasi

Dua jenis kerentanan terlihat jelas. Pertama, kontingensi pembangkit menyebabkan masalah kecukupan kapasitas dan redistribusi pembebanan; overload 154–377% menunjukkan bahwa pelepasan unit tertentu tidak dapat ditanggung sepenuhnya oleh unit tersisa. Kedua, kontingensi penyulang menimbulkan kehilangan beban akibat struktur radial. Dari sisi prioritas teknis, tindakan yang dapat dipertimbangkan meliputi penambahan reserve margin atau sumber cepat, penguatan interkoneksi GH Nunukan, evaluasi transfer antar-feeder, dan penyediaan titik manuver jaringan pada area dengan beban terputus terbesar. Rekomendasi tersebut merupakan implikasi dari hasil steady-state; studi koordinasi proteksi, hubung singkat, dan stabilitas dinamik masih diperlukan sebelum perubahan konfigurasi diterapkan di lapangan.

## IV. KESIMPULAN

Pemodelan sistem distribusi 20 kV PT PLN (Persero) Sebatik pada ETAP PowerStation 19.0.1 menunjukkan bahwa pada base case beban puncak sistem melayani sekitar 4,061 MW dan 2,620 MVAr dengan rugi-rugi yang dilaporkan sebesar 0,050 MW dan 0,170 MVAr. Pada kontingensi sumber, pelepasan Mitsubishi 1, Mitsubishi 2, dan Mitsubishi 3 menimbulkan overload pada generator lain masing-masing sebesar 154%, 164%, dan 377%, sedangkan pelepasan MAN 8 tidak menimbulkan overload generator yang dilaporkan. Pelepasan GH Nunukan menghasilkan kondisi tegangan paling kritis dengan nilai minimum 17,86 kV atau 0,8934 p.u., sehingga berada di

bawah batas screening 0,90 p.u. yang digunakan pada penelitian ini.

Pada kontingensi saluran, dampak utama berupa terputusnya beban pada feeder radial. Kehilangan beban terbesar terjadi pada feeder 1 saat cable 28 dilepas sebesar 575,2 kW, diikuti feeder 3 sebesar 337,0 kW, feeder 2 sebesar 297,8 kW, feeder 4 sebesar 260,2 kW, dan feeder 5 sebesar 112,9 kW. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penguatan keandalan Sebatik perlu diarahkan pada dua aspek sekaligus, yaitu kecukupan cadangan sumber untuk memenuhi kriteria N-1 dan peningkatan fleksibilitas topologi penyulang agar kehilangan satu saluran tidak langsung memutus kelompok beban yang besar.

Validasi manual rugi-rugi cable 12 menunjukkan hasil yang mendekati simulasi ETAP. Pada validasi jatuh tegangan, penggunaan nilai tegangan bus yang dibulatkan satu desimal tidak cukup sensitif untuk memverifikasi selisih sekitar 0,05%, sehingga evaluasi presisi membutuhkan keluaran tegangan bus dengan jumlah desimal yang lebih tinggi.

## REFERENSI


[1] N. R. A.S. and I. Ilyas, "Analisa Kontingensi Kinerja Sistem Kelistrikan Jaringan Distribusi 20 kV di PT. PLN ULP Cibitung," Sinusoida, vol. 25, no. 1, pp. 17–26, 2023, doi: 10.37277/s.v25i1.1666.

[2] S. Ma'ruf, "Analisis Kontingensi pada Perencanaan Sistem Kelistrikan Kalimantan 500 kV Tahun 2050," Undergraduate thesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2018.

[3] Ekoriskiyanto, Y. Mohammad, and E. H. Harun, "Analisis Kontingensi pada Sistem Tenaga Listrik Sulawesi Utara–Gorontalo," Foristek, vol. 9, no. 1, 2019, doi: 10.54757/fs.v9i1.69.

[4] K. A. R. Medapati, S. Mandal, R. Paul, A. Samanta, D. Bose, and A. Chakrabarti, "Assessment of Power System Security using Contingency Ranking Analysis," in Proc. 5th Int. Conf. Energy, Power and Environment (ICEPE), Shillong, India, 2023, pp. 439–444, doi: 10.1109/ICEPE57949.2023.10201584.

[5] G. C. Ejebe and B. F. Wollenberg, "Automatic contingency selection," IEEE Trans. Power Appar. Syst., vol. PAS-98, no. 1, pp. 97–109, 1979, doi: 10.1109/TPAS.1979.319518.

[6] B. Stott, O. Alsac, and A. J. Monticelli, "Security analysis and optimization," Proc. IEEE, vol. 75, no. 12, pp. 1623–1644, 1987, doi: 10.1109/PROC.1987.13931.

[7] M. Gholami, M. J. Sanjari, M. Safari, M. Akbari, and M. R. Kamali, "Static security assessment of power systems: A review," Int. Trans. Electr. Energy Syst., vol. 30, no. 9, e12432, 2020, doi: 10.1002/2050-7038.12432.

[8] K. Teeparthi and D. M. Vinod Kumar, "Power System Security Assessment and Enhancement: A Bibliographical Survey," J. Inst. Eng. India Ser. B, vol. 101, no. 2, pp. 163–176, 2020, doi: 10.1007/s40031-020-00440-1.

[9] M. Z. A. Bhuiyan, G. J. Anders, J. Philhower, and S. Du, "Review of static risk-based security assessment in power system," IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications, vol. 4, no. 3, pp. 233–239, 2019, doi: 10.1049/iet-cps.2018.5080.

[10] M. R. Narimani, H. Huang, A. Umunnakwe, Z. Mao, A. Sahu, S. Zonouz, and K. Davis, "Generalized Contingency Analysis Based on Graph Theory and Line Outage Distribution Factor," IEEE Syst. J., vol. 16, no. 1, pp. 626–636, 2022, doi: 10.1109/JSYST.2021.3089548.

[11] J. Guo, Y. Fu, Z. Li, and M. Shahidehpour, "Direct Calculation of Line Outage Distribution Factors," IEEE Trans. Power Syst., vol. 24, no. 3, pp. 1633–1634, 2009, doi: 10.1109/TPWRS.2009.2023273.

[12] Y.-C. Chang, W.-T. Yang, and C.-C. Liu, "Improvements on the line outage distribution factor for power system security analysis," Electr. Power Syst. Res., vol. 26, no. 3, pp. 231–236, 1993, doi: 10.1016/0378-7796(93)90018-A.

[13] W. F. Tinney and C. E. Hart, "Power Flow Solution by Newton's Method," IEEE Trans. Power Appar. Syst., vol. PAS-86, no. 11, pp. 1449–1460, 1967, doi: 10.1109/TPAS.1967.291823.

[14] B. Stott and O. Alsac, "Fast Decoupled Load Flow," IEEE Trans. Power Appar. Syst., vol. PAS-93, no. 3, pp. 859–869, 1974, doi: 10.1109/TPAS.1974.293985.

[15] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sánchez, and R. J. Thomas, "MATPOWER: Steady-State Operations, Planning, and Analysis Tools for Power Systems Research and Education," IEEE Trans. Power Syst., vol. 26, no. 1, pp. 12–19, 2011, doi: 10.1109/TPWRS.2010.2051168.

[16] D. Shirmohammadi, H. W. Hong, A. Semlyen, and G. X. Luo, "A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks," IEEE Trans. Power Syst., vol. 3, no. 2, pp. 753–762, 1988, doi: 10.1109/59.192932.

[17] M. H. Haque, "Efficient load flow method for distribution systems with radial or mesh configuration," IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., vol. 143, no. 1, pp. 33–38, 1996, doi: 10.1049/ip-gtd:19960045.

[18] J.-H. Teng, "A direct approach for distribution system load flow solutions," IEEE Trans. Power Del., vol. 18, no. 3, pp. 882–887, 2003, doi: 10.1109/TPWRD.2003.813818.

[19] C. S. Cheng and D. Shirmohammadi, "A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis," IEEE Trans. Power Syst., vol. 10, no. 2, pp. 671–679, 1995, doi: 10.1109/59.387902.

[20] W. H. Kersting, Distribution System Modeling and Analysis, 4th ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2018.

[21] T. A. Short, Electric Power Distribution Handbook, 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2014.

[22] R. Billinton and R. N. Allan, Reliability Evaluation of Power Systems, 2nd ed. New York, NY, USA: Springer, 1996.

[23] R. Billinton and R. N. Allan, "Basic power system reliability concepts," Reliab. Eng. Syst. Saf., vol. 27, no. 3, pp. 365–384, 1990, doi: 10.1016/0951-8320(90)90007-A.

[24] A. J. Wood, B. F. Wollenberg, and G. B. Sheblé, Power Generation, Operation, and Control, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2013.

[25] P. Kundur, Power System Stability and Control. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1994.

[26] N. J. Hontong, M. Tuegeh, and L. S. Patras, "Analisa Rugi-Rugi Daya pada Jaringan Distribusi di PT. PLN Palu," J. Tek. Elektro dan Komputer, vol. 4, no. 1, 2015, doi: 10.35793/jtek.v4i1.6739.

[27] D. Nirwana, A. F. Kuraisy, and A. Syarifuddin, "Analisis Rugi-Rugi Daya pada Jaringan Distribusi Penyulang Jentak di ULP Jeneponto PT PLN (Persero) Sulselrabar," LOGITECH, vol. 5, no. 2, 2022.

[28] P. Julianto dan Fitriani, "Modified Genetic Algorithm for Capacitive Compensation in Radial Distribution Systems," dalam Proc. 11th Int. Conf. on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI), 2024, pp. 659–665.

[29] P. Julianto, "Rekonfigurasi Jaringan pada Sistem Distribusi Radial untuk Mereduksi Rugi-rugi Daya Menggunakan Algoritma Genetika Adaptif," Jurnal Elektrika Borneo, vol. 9, no. 1, pp. 15–19, 2023.

[30] P. Julianto, "Kompensasi Kapasitif dengan Injeksi Daya Reaktif untuk Mereduksi Rugi-Rugi Daya Aktif pada

Sistem Distribusi Skala Besar," Jurnal Elektrika Borneo, vol. 9, no. 2, pp. 36–43, 2023.
[31] P. Julianto dan R. C. J. Manapa, "Rekonfigurasi Jaringan untuk Mereduksi Jatuh Tegangan dan Rugi-rugi Daya pada Sistem Distribusi 20 kV PT PLN Tarakan," *Buletin Profesi Insinyur*, vol. 7, no. 2, pp. 94–100, 2024.
[32] PT PLN (Persero), SPLN 1:1995, Tegangan-Tegangan Standar. Jakarta, Indonesia: PT PLN (Persero), 1995.