

Analisis Penyebaran Harmonisa Pada Sistem Distribusi Radial Kota Bandar Lampung Menggunakan Metode *Forward Backward Sweep* dan *Harmonic Load Flow*

Muhira Dzar Faraby¹, Muhammad Daffa Cahyono Putra², Ontoseno Penangsang^{3*}, Rony Seto Wibowo⁴,
Dimas Fajar Uman Putra⁵, Mukhlisin⁶, Andi Fitriati⁷

^{1,2,3,4,5}Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

^{1,7}Departemen Teknik Mekatronika Politeknik Bosowa Makassar

⁶Departemen Teknik Listrik, Politeknik Bosowa Makassar

¹*muhira_faraby@yahoo.com*, ²*daffacahyonoputra@gmail.com*, ³*zenno_379@yahoo.com*, ⁴*ronyseto@ee.its.ac.id*

⁵*dimasfup@ee.its.ac.id*, ⁶*mukhlisin@politeknikbosowa.ac.id*, ⁷*andi.fitriati@bosowa.co.id*

Abstrak

Permintaan akan peningkatan kebutuhan energi listrik oleh konsumen merupakan sebuah tantangan tersendiri dalam menjaga kualitas daya sistem tenaga listrik. Penggunaan beban nonlinear berupa peralatan berbasis semikonduktor dapat membangkitkan penyebaran harmonisa yang dapat meningkatkan *losses* hingga rusaknya peralatan. Penelitian ini akan membahas tentang analisis dari efek penggunaan beban nonlinear terhadap penyebaran harmonisa pada sistem distribusi radial Kota Lampung Menggunakan metode *Forward Backward Sweep* dan *Harmonic Load Flow* menggunakan MATLAB 2020b. Hasil simulasi diperlihatkan peningkatan *losses* sebesar 32.3% dan %THDv diatas batas yang di izinkan dengan adanya injeksi arus harmonisa dari bean nonlinear.

Kata Kunci: *beban nonlinear, harmonisa, losses, forward backward sweep, harmonic load flow.*

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi untuk menunjang kehidupan dan peningkatan populasi manusia menyebabkan meningkatnya kebutuhan energi listrik. Peningkatan kebutuhan listrik tersebut memaksa terjadinya perubahan pada sistem jaringan listrik. Sistem berbentuk radial merupakan tipe jaringan yang paling sederhana sehingga umum digunakan pada sistem distribusi kelistrikan [1]. Secara sederhana bentuk sistem ini berupa sumber yang menyuplai beban-beban di bawahnya secara mengakar dan bercabang tanpa membentuk hubungan *loop* sehingga arus mengalir searah dari sumber searah menuju beban. Seiring dengan perkembangan sistem distribusi radial yang semakin besar dan luas maka timbul beberapa masalah utama dalam sistem distribusi radial yaitu rugi-rugi daya yang semakin besar dan profil tegangan yang memburuk [2-3].

Beban listrik terbagi menjadi dua yaitu beban listrik linear (resistor, kapasitor dan induktor) dan beban listrik nonlinear. Beban nonlinear yang dimaksud berupa peralatan elektronika daya, perangkat busur listrik, mesin mesin listrik dinamis, lampu *fluorescent* dan beban perumahan dengan catu daya *switchmode* seperti computer, printer dll [4-6]. Penggunaan beban listrik nonlinear menyebabkan adanya arus yang tidak sinusoidal meskipun gelombang tegangan yang dipakai gelombang tegangan sinusoidal murni. Gelombang ini menyebabkan terjadinya penyebaran harmonisa yang tinggi pada sistem kelistrikan distribusi yang berdampak kerugian dalam penyebaran energi listrik dan kerusakan pada peralatan. Harmonik dapat menyebabkan perangkat operasi tidak berfungsi [7], kerugian tambahan berupa penuaan (*aging*) pada kapasitor, transformator, saluran transmisi dan mesin yang berputar, peningkatan kebisingan pada motor,

gangguan telepon atau menyebabkan resonansi seri dan paralel [8].

Meninjau akibat yang ditimbulkan dari penyebaran harmonisa tersebut, maka analisis aliran daya harmonisa diperlukan untuk mengetahui dan menganalisa penyebaran dan besar harmonisa pada sistem. Penyebaran harmonisa dalam sistem distribusi radial dapat dianalisa dengan menggunakan metode analisis aliran daya *backward-forward sweep* pada sistem distribusi radial serta *harmonic load flow* (HLF) [9-11]. Analisis aliran daya *backward-forward sweep* digunakan untuk mendapatkan profil tegangan pada tiap bus serta rugi-rugi daya pada frekuensi fundamental, sedangkan HLF digunakan untuk mendapatkan profil tegangan harmonisa pada tiap bus tiap ordenya, serta rugi-rugi daya harmonisa yang disebabkan oleh pemasangan beban non-linear/sumber harmonisa [12-16].

Penelitian ini akan membahas analisis aliran daya harmonisa pada sistem distribusi radial Kota Lampung akibat adanya penetrasi dari injeksi arus harmonisa dari beban nonlinear dengan menggunakan metode *Forward Backward Sweep* dan *Harmonic Load Flow* bermasis MATLAB untuk melihat efek dari penyebaran distorsi harmonisa .

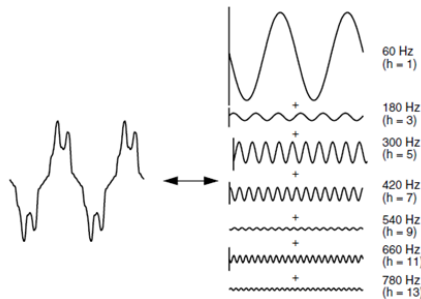
II. KAJIAN LITERATUR

A. Harmonisa

Harmonisa adalah gangguan akibat distorsi gelombang tegangan dan arus yang menyebabkan perubahan bentuk atau karakteristik yang menyebabkan gelombang terdistorsi. Distorsi harmonisa merupakan gelombang tegangan atau arus sinusoidal yang memiliki frekuensi kelipatan bulat dari frekuensi fundamentalnya.

Untuk menanalisa bentuk gelombang periodik harmonisa dapat dinyatakan dalam bentuk deret Fourier trigonometri [17].

Sumber Harmonisa dapat berasal dari beban non-linier dan peralatan elektronika daya yang banyak digunakan di zaman modern saat ini. Efek dari harmonisa dapat terjadi secara seketika ataupun jangka Panjang. Untuk efek seketika harmonisa mempengaruhi pengoperasian kontroler pada peralatan elektronika. Namun, pengaruh harmonisa yang sering terjadi merupakan pengaruh jangka panjang yang dapat menyebabkan pemanasan pada konduktor, pemanasan pada trafo, resonansi kapasitor, dan *overload* pada beban.



Gambar 1. Deret Fourier pada gelombang terdistorsi.

Standar yang digunakan untuk menganalisa Harmonisa berdasarkan IEEE Standard.519. Total Harmonic Distortion (THD) adalah rasio antara nilai rms dari seluruh komponen harmonisa dan nilai rms dari fundamental yang dinyatakan dalam persen (%). Sedangkan Individual Harmonic Distortion (IHD) adalah rasio antara nilai RMS dari masing-masing arus harmonisa dibandingkan dengan nilai RMS arus fundamental atau harmonisa pertama [18].

Tabel 1. Standar distorsi harmonisa IEEE Std 519-1992.

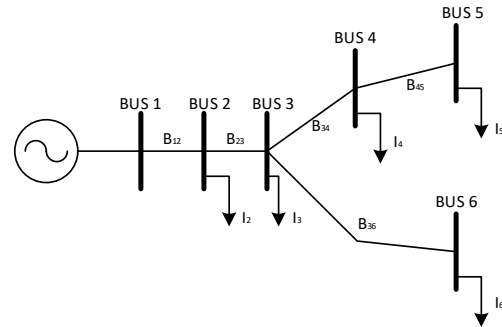
Bus Voltage	Individual Harmonic Distortion (%)	Total Harmonic Distortion (%)
< 69 kV	3	5
69 kV -161 kV	1,5	2,5
> 161 kV	1	1,5

B. Forward Backward Sweep

Analisis aliran daya merupakan konsep dasar pada studi dan analisis sistem tenaga. Analisis aliran daya digunakan dalam menganalisis operasi serta pendeteksian masalah yang timbul pada sistem tenaga. Selain itu analisis aliran daya dapat digunakan untuk mengetahui informasi mengenai kondisi sistem kelitrikan yang berupa daya tegangan, arus, daya aktif, daya reaktif, dan faktor daya dalam suatu jaringan listrik. Data tersebut dibutuhkan untuk perencanaan dan perencanaan sistem [9-16].

Metode *backward-forward sweep* dipergunakan untuk persamaan aliran daya yang didasarkan pada dua buah matrik yaitu BIBC (*Bus Injection to Branch Current*) dan BCBV (*Branch Current to Bus Voltage*). [BIBC] adalah matrik relasi antara arus injeksi pada bus dengan arus pada cabang, sedangkan [BCBV] adalah matrik relasi antara arus cabang dengan tegangan bus. Untuk

mempermudah perhitungan persamaan aliran daya dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Single line diagram IEEE 6-bus.

Penggunaan *Kirchhoff's law* (KCL) pada *backward sweep* dimulai dari bus ke 6 sampai dengan bus 1 pada Gambar 2 didapatkan arus injeksi [B] sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 B_{36} &= I_6 \\
 B_{45} &= I_5 \\
 B_{34} &= I_4 + I_5 \\
 B_{23} &= I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \\
 B_{12} &= I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6
 \end{aligned}$$

$$[B] = [BIBC] * [I] \quad (1)$$

Penggunaan KCL pada *forward sweep* didapatkan besar tegangan pada bus serta matrik relasi kedua. Dimulai dari bus 2-6 di dapatkan :

$$\begin{aligned}
 V_2 &= V_1 - B_{12} Z_{12} \\
 V_3 &= V_1 - B_{12} Z_{12} - B_{23} Z_{23} \\
 V_4 &= V_1 - B_{12} Z_{12} - B_{23} Z_{34} \\
 V_5 &= V_1 - B_{12} Z_{12} - B_{23} Z_{23} - B_{34} Z_{34} - B_{45} Z_{45} \\
 V_6 &= V_1 - B_{12} Z_{12} - B_{23} Z_{23} - B_{36} Z_{36}
 \end{aligned}$$

maka *drop* tegangan dapat ditulis sebagai berikut ;

$$\begin{aligned}
 V_1 - V_2 &= B_{12} Z_{12} \\
 V_1 - V_3 &= B_{12} Z_{12} + B_{23} Z_{23} \\
 V_1 - V_4 &= B_{12} Z_{12} + B_{23} Z_{23} + B_{34} Z_{34} \\
 V_1 - V_5 &= B_{12} Z_{12} + B_{23} Z_{23} + B_{34} Z_{34} + B_{45} Z_{45} \\
 V_1 - V_6 &= B_{12} Z_{12} + B_{23} Z_{23} + B_{36} Z_{36}
 \end{aligned}$$

$$[\Delta V] = [BCBV] * [B] \quad (2)$$

di mana [BCBV] adalah matrik relasi antara tegangan bus [ΔV] dengan [B]. Dengan mensubsidi persamaan (3-1) dan (3-2) didapatkan :

$$[\Delta V] = [BIBC] * [BCBV] * [I] \quad (3)$$

$$[\Delta V] = [DLF] * [I] \quad (4)$$

di mana [DLF] adalah matrik relasi antara *drop* tegangan dengan arus injeksi pada bus. Solusi aliran daya didapatkan dengan menggunakan proses iterasi, sehingga dapat ditulis sebagai berikut:

$$I_n = \left(\frac{P_n - jQ_n}{V_n} \right)^* \quad (5)$$

$$[\Delta V^{k+1}] = [DLV] * [I^k] \quad (6)$$

Nilai tegangan tiap bus dapat dihitung setelah dilakukan pembentukan matriks ΔV dengan komponen matriks BIBC dan BCBV menurut persamaan berikut :

$$[V^{k+1}] = [V_0] - [\Delta V^{k+1}] \quad (7)$$

di mana [V₀] merupakan nilai inisial tegangan bus. Proses iterasi berhenti ketika perbedaan mutlak antara injeksi arus

bus iterasi sebelumnya dan injeksi arus bus iterasi saat ini kurang dari atau sama dengan toleransi yang ditentukan ϵ .

$$|I_i^{k+1} - I_i^k| \leq \epsilon \quad (8)$$

Sehingga, total rugi-rugi daya real dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^{br} P_{loss_i} = \sum_{i=1}^{br} [B_i]^2 R \quad i = 1, 2, \dots, br \quad (9)$$

Persamaan rugi daya dapat dituliskan:

$$P_{Loss} = [R]^T * [BIBC] * [I]^2 \quad (10)$$

C. Harmonic Load Flow

Algoritma *backward sweep* pada HLF digunakan untuk mendapatkan matriks $[A]$ yang mewakili hubungan antara arus cabang dan arus injeksi bus untuk urutan harmonisa ke- h . Sedangkan *forward sweep* menghasilkan matriks $[HA]$ yang mewakili hubungan antara tegangan bus harmonisa dan arus injeksi harmonisa bus. Untuk lebih jelasnya, algoritma aliran daya harmonisa [17].

Untuk mendapatkan nilai arus yang mengalir pada cabang KCL digunakan pada *backward sweep* arus, sehingga:

$$\begin{aligned} B_{36}^{(h)} &= Ih_6^{(h)} \\ B_{45}^{(h)} &= Ih_5^{(h)} \\ B_{34}^{(h)} &= Ih_4^{(h)} + Ih_5^{(h)} \\ B_{23}^{(h)} &= Ih_3^{(h)} + Ih_4^{(h)} + Ih_5^{(h)} + Ih_6^{(h)} \\ B_{12}^{(h)} &= Ih_2^{(h)} + Ih_3^{(h)} + Ih_4^{(h)} + Ih_5^{(h)} + Ih_6^{(h)} \\ [B^{(h)}] &= [A^{(h)}] * [I^{(h)}] \end{aligned} \quad (11)$$

Arus cabang yang mengalir antara bus $i - j$ adalah :

$$[B_{ij}^{(h)}] = [A_{ij}^{(h)}][I^{(h)}] \quad (12)$$

di mana $[A_{ij}^{(h)}]$ koefisien harmonisa dari cabang $(i - j)$ terhadap adanya arus harmonisa pada beban yang mengalir melewati cabang $(i - j)$.

Sedangkan besar *drop* tegangan cabang (1-2) pada konteks arus dan impedansi harmonisa ke- h adalah :

$$V_{12}^{(h)} = Z_{12}^{(h)} * B_{12}^{(h)} \quad (13)$$

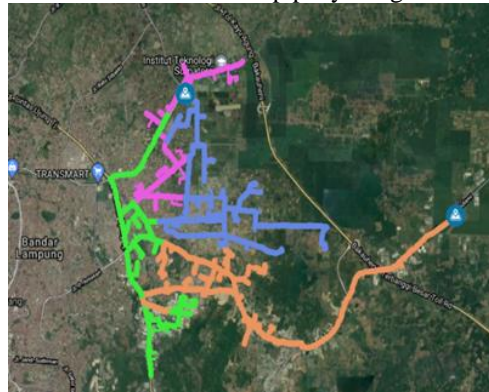
III. METODE PENELITIAN

A. Pemodelan Sistem Distribusi Lampung

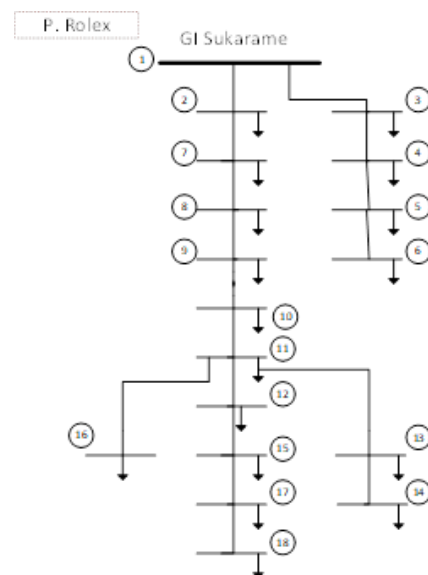
Pada penelitian ini digunakan sistem distribusi kota Bandar Lampung ULP Way Halim menggunakan 4 Penyulang dari 2 Gardu Induk. Penyulang tersebut adalah Penyulang Rolex (biru), Penyulang Bonia (hijau), Penyulang Bulova (ungu) pada Gardu Induk Sukarame serta Penyulang Perunggu (cokelat) pada Gardu Induk Sutami. Pemilihan penyulang tersebut dipilih karena memiliki jarak yang dekat, terdapat *tie switch* atau memungkinkan untuk dipasang *tie switch* serta saling terhubung satu sama lain.

Gardu Induk yang ada dimodelkan sebagai Generator Bus sedangkan gardu Distribusi dimodelkan sebagai Load Bus. Berikut merupakan gambar 4 Penyulang yang digunakan untuk tugas akhir dari ULLP Way Halim Kota Bandar Lampung. Gambar tersebut disajikan menggunakan web AMADIS V1.0 berdasarkan laporan master plan kelistrikan kota Bandar Lampung melalui

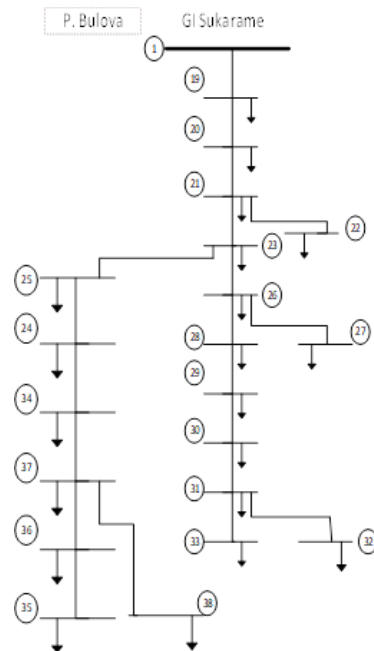
gambar satelit [18]. Terdapat perbedaan pewarnaan yang menandakan identitas warna tiap penyulang.



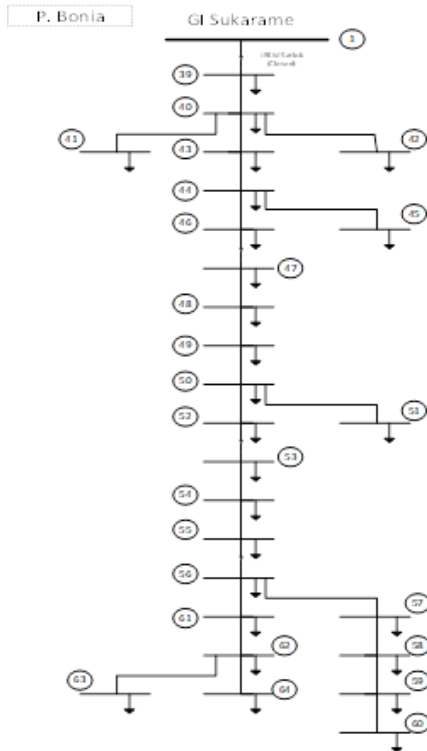
Gambar 3. Peta kelistrikan 4 penyulang ULP Way Halim



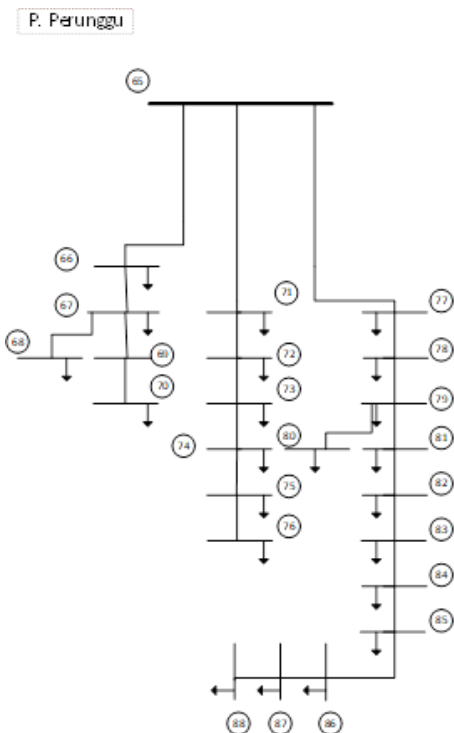
Gambar 4. Single line diagram Penyulang Rolex



Gambar 5. Single line diagram Penyulang Bulova



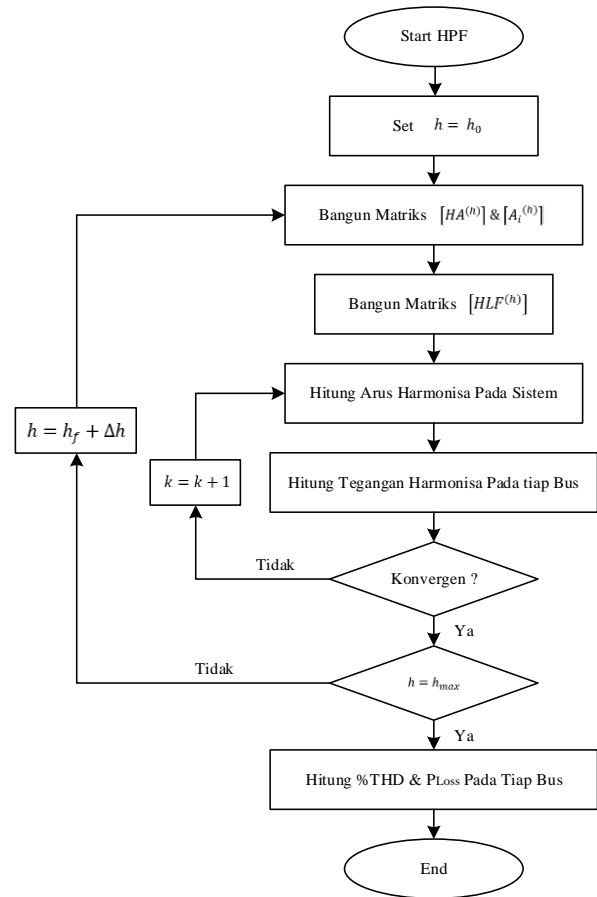
Gambar 6. Single line diagram Penyalang Bonia.



Gambar 7. Single line diagram Penyalang Perunggu

B. Tahapan Penelitian

Berikut merupakan alur dari uraian persamaan aliran daya harmonisa (HLF) yang digunakan pada penelitian ini;



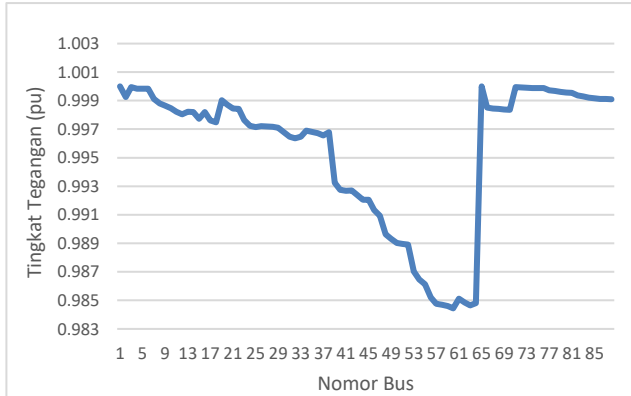
Gambar 8. Flowchart harmonic load flow - forward backward sweep

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

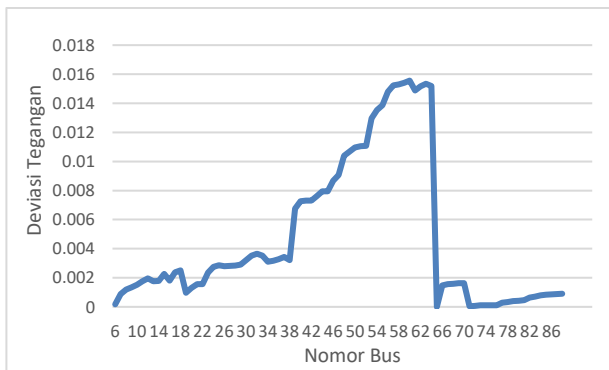
Pada penelitian ini dilakukan tahapan simulasi untuk mendapatkan hasil yang diinginkan. Kemudian dilakukan tahap analisis data berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan. Analisis aliran daya dilakukan menggunakan MATLAB dengan metode *Forward-Backward Sweep* pada sistem distribusi radial. Analisis aliran daya menggunakan metode *Forward Backward Sweep* pada kondisi awal sistem dilakukan untuk memperoleh data arus saluran, tegangan, rugi-rugi daya dan deviasi tegangan di frekuensi utama atau fundamental pada sistem distribusi 4 penyalang ULP Way Halim kota Bandar Lampung. Hasil simulasi pada kondisi frekuensi fundamental akan di tunjukkan pada Gambar 9 dan Gambar 10.

Gambar 9 diperlihatkan hasil simulasi aliran daya berupa nilai tingkat tegangan (pu) pada setiap bus dimana nilai rata-rata tingkat tegangan sebesar 0,9955 pu. Gambar 10 diperlihatkan nilai deviasi tegangan dimana nilai rata rata deviasi tegangan sebesar 0,0044. Total rugi daya mencapai sebesar 61,540 kW. Adanya injeksi arus harmonisa dari beban nonlinear yang diletakkan pada beberapa bus beban membangkitkan penyebaran harmonisa ke seluruh sistem distribusi Kota Lampung.

Metode *Harmonic Load Flow* digunakan untuk mengetahui penyebaran harmonisa pada orde 5th, 7th, 11th, 13th dan 17th. Adapun hasil simulasi berupa nilai %THDv dan rugi daya saluran yang didapatkan dapat dilihat pada Tabel 3 dan Gambar 11.



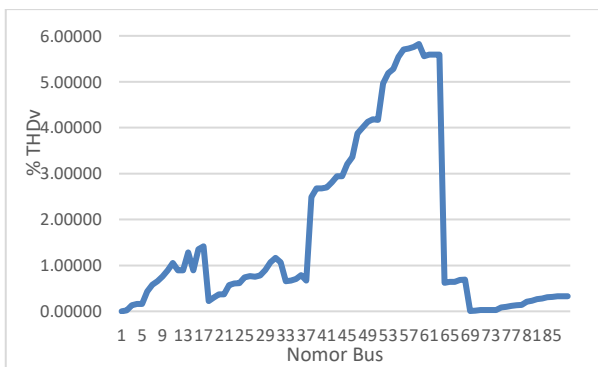
Gambar 9. Tingkat tegangan (pu) tiap bus Sistem Distribusi Kota Lampung



Gambar 10. Deviasi tegangan tiap bus pada Sistem Distribusi Kota Lampung

Tabel 3. Perbandingan rugi-rugi daya saluran sebelum dan setelah injeksi arus harmonisa

Kondisi	P_{Loss} total (kW)	Q_{Loss} total (kVAR)	Max THD (%)
Sebelum Injeksi Harmonisa	61.5403	121.406	0
Setelah Injeksi Harmonisa	81.44	341.36	5.822



Gambar 11. Nilai %THDv tiap bus pada sistem distribusi Kota Lampung

Berdasarkan Tabel 3 didapatkan hasil rugi-rugi daya aktif dan reaktif pada sistem serta nilai maksimal THD. Terlihat terdapat kenaikan rugi-rugi daya aktif yang signifikan mencapai 81.44 kW naik 32.3% dari keadaan sebelum adanya injeksi harmonisa. Selain itu, untuk nilai distorsi harmonisa maksimal mencapai 5,822% yang terdapat pada bus 62 dan nilai rata-rata THDv sebesar 1.641%.

V. KESIMPULAN

Penggunaan metode *Forward Backward Sweep* dan *Harmonic Load Flow* dinilai mampu meneghitung penyebaran harmonisa efek dari penggunaan beban nonlinear. Adanya injeksi arus harmonisa dari penggunaan beban nonlinear mampu membangkitkan penyebaran harmonisa dan menurunkan kualitas daya dari sistem distribusi Kota Lampung dimana terdapat bus yang nilai %THDv melebihi dari batas yang diizinkan.. Diperlukan perbaikan dan evaluasi terkait penyebaran harmonisa untuk meningkatkan kualitas daya dalam meningkatkan efisiensi mereduksi penyebaran harmonisa berupa penggunaan teknik optimasi yang akan di bahas pada penelitian selanjutnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada Kementerian Riset dan Teknologi atas bantuan pendanaan Penelitian Disertasi Doktor Tahun 2021 dan teman-teman mahasiswa S1, S2, S3 di Laboratorium Simulasi Sistem Tenaga (PSSL) Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

REFERENSI

- [1] M.D. Faraby, "Optimasi Penempatan SVC Pada Sistem Kelistrikan Sulselbar Dengan Menggunakan Algoritma Genetika (Tesis)," *Journal Universitas Hasanuddin*, Makassar, 2014
- [2] M.D. Faraby, O. Penangsang, "Studi Aliran Beban Interkoneksi Sistem Sulbansel hingga Tahun 2020 Berdasarkan RUPTL PT. PLN (Persero) 2017-2026," *Jurnal Sains Terapan*, Vol. 3, No. 1, 2017.
- [3] Suyanto, "Decision Support System (DSS)- CP Berbasis Advanced OPF HCT : Simulator Perencanaan, Operasi dan Optimasi Jaringan Sistem Distribusi Radial," *Disertation, Insitute Technology of Sepuluh Nopember*, Surabaya, Indonesia, 2018.
- [4] A. Rosyida, O. Penangsang, A. Soeprijanto, "Optimal Filter Placement and Sizing in Radial Distribution System Using Whale Optimization Algorithm", *International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*, 2017
- [5] M.D. Faraby, O. Penangsang., "Impact Optimal DG Placement Against Harmonic Distribution on Reconfiguration Distribution Network on Microgrid System", *IOP Conference Series: Material Science and Engineering*, Vol. 676, 2018.
- [6] .D. Faraby, O. Penangsang, "A Study of Harmonic Spreading Against Distribution Network Reconfiguration in Passive Radial Distribution System", *International Conference on Science and Technology*, 2018.

- [7] M.D. Faraby, A. Fitriati, Christiono, Usman, A. Muchtar, A.N. Putri, "Single Tuned Filter Planning to Mitigate Harmonic Polluted in Radial Distribution Network Using Particle Swarm Optimization", *2020 3rd International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI)*, pp. 418-422, 2020.
- [8] M.D. Faraby, O. Penangsang, R.S. Wibowo, "Optimization of Placement and Sizing DG and Capacitor Bank with Network Reconfiguration Considering Non Linear Load on Radial Distribution Network", *International Conference on Science and Technology*, 2020.
- [9] C. Sankaran, "Power Quality". United States of America: CRC, 2002.
- [10] J.H. Teng, C.Y. Chang, "Backward/Forward-Based Harmonic Analysis Method for Distribution System", *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 22, No. 3, 1665-1671, 2007.
- [11] E.F. Fauchs, M.A.S., 2008, "Power Quality in Power System and Electrical Mechine", Elsevier, 2008.
- [12] A. Arunagiri, B. Venkatesh, "Harmonic Load Flow for Radial Distribution Systems," *Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 6, No. 3, pp. 300-310, 2010.
- [13] S.H. Rayes, P. Salmeron, "Harmonic Disturbance Identification in Electric System with Capacitor Bank", *Elsevier Journal Electric Power and Electrical System*, Vol 82, Issues 1, 18-26, 2012.
- [14] A. Denyal, O. Penangsang, D.A. Asfani, "Modelling of Radial Distribution System for Three-Phase Harmonic Power Flow Studies", *Jurnal Teknik POMITS*, Vol. 1, No. 1, 1-6, 2013.
- [15] Yaidah Ch, S.K. Goswami, D. Chatterjee., "Effect of Network Reconfiguration on Power Quality of Distribution System," *Elsevier Electrical Power and Energy System*, Vol. 83, pp. 87-95, 2016.
- [16] M.D. Faraby, O. Penangsang, R.S. Wibowo, A. Sonita, "Improved Perfomance Network Reconfiguration in Coordinated Planning in Radial Distribution System Considering Harmonic Distortion", *International Review on Modelling and Simulations*, Vol. 14, No. 2, pp. 146-157, 2021.
- [17] M.D. Faraby, O. Penangsang, R.S. Wibowo, A. Fitriati, "Coordinated Planning in Improving Power Quality Considering the Use of Nonlinear Load in Radial Distribution Netwok", *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, Vol. 11, No. 6, 2021.
- [18] PLN UID Lampung, "Studi Masterplan Kelistrikan Kota Bandar Lampung 2020.