Pemodelan Saluran Udara untuk Menghitung Impedansi Urutan dengan Metode Carson pada Penyulang Katu Gardu Induk Menggala PT. PLN (Persero) Distribusi Lampung

Rifqi Annora Mulya[1], Lukmanul Hakim[2], Dikpride Despa[3]

Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung, Bandar Lampung
Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro No.1 Bandar Lampung 35145
[1]rifqiannora@gmail.com
[2]plgsekip@eng.unila.ac.id
[3]despa@eng.unila.ac.id

Intisari---**Impedansi urutan saluran merupakan data masukan penting dalam analisa aliran daya tiga fasa. Berbagai metode telah dikembangkan untuk memodelkan saluran udara tegangan menengah dan menentukan impedansi urutannya. Dalam penelitian ini, Metode Modified Carson digunakan untuk menghitung impedansi urutan pada Penyulang Katu GI Menggala PT. PLN (PERSERO) Distribusi Lampung. Hasil perhitungan kemudian dibandingkan dengan data impedansi urutan sesuai SPLN yang dimasukkan di dalam perangkat lunak ETAP. Untuk mengetahui urutan impedansi pada suatu saluran atau penyulang, diperlukan data data diantaranya adalah : resistivitas tanah, resistansi penghantar, GMR, frekuensi, dan jarak antar konduktor. Saluran udara tegangan menengah 20 kV PLN di Penyulang Katu menggunakan konduktor AAAC dengan variasi luas penampang 35 mm2, 70 mm2, dan 150 mm2. Berdasarkan perhitungan dengan Metode Modified Carson diperoleh impedansi urutan nolnya adalah 1,0697+j1,6178 Ω/Km (35 mm2), 0,6088+j1,644 Ω/Km (70 mm2), 0,3642+j1,6178 Ω/Km (150 mm2). Untuk impedansi urutan positifnya adalah 0,9217+j0,3305 Ω/Km (35 mm2), 0,4608+j0,3572 Ω/Km (70 mm2), 0,2162+j0,3789 Ω/Km (150 mm2). Jika dibandingkan dengan data SPLN di perangkat lunak ETAP, maka terdapat selisih pada luas penampang 35 mm2 berturut turut; R urutan nol 3,328% dan X urutan nol 0,15%. Pada hasil selisih impedansi urutan positif pada ETAP dengan Python: R urutan positif 3,63% dan X urutan positif 0,19%. Pada luas penampang 70 mm2, selisih impedansi R urutan nol sebesar 2,582% dan X urutan nol sebesar 2,52%, pada impedansi R urutan positif 2,28% dan pada X urutan positif 2,504%. Pada luas penampang 150 mm2, selisih impedansi R urutan nol 0,93% dan X urutan nol 2,94%, pada impedansi R urutan positif 0,62% dan X urutan positif 2,905%. Dari prosentase selisih nilai urutan yang diperoleh antara 0.19% sampai dengan 3,63% (kecil dari 5%), dapat disimpulkan bahwa metode Carson dapat digunakan untuk menghitung impedansi urutan pada Penyulang Katu, Gardu Induk Manggala, PT. PLN (PERSERO) Distribusi Lampung.**
Kata kunci---**sistem distribusi, kabel, impedansi urutan, metode Carson, Penyulang Katu**

Abstract---**Sequnce impedance is an important input data in three-phase power flow analysis. Various methods have been developed to model the overhead medium voltage and determine the sequence impedance. In this undergraduate thesis, Carson Modified Method used to calculate the sequence impedance on feeder Katu GI Menggala PT. PLN (Persero) Distribution Lampung. The calculation result is then compared with the corresponding sequence impedance data SPLN entered in the software ETAP. Soil resistivity, the resistance conductor, GMR, frequency, and spacing between conductors are required in calculating the sequence impedance for the overhead medium voltage line. The studied overhead medium voltage 20 kV line uses AAAC conductors with a variation of cross-sectional area 35 mm2, 70 mm2 and 150 mm2. The obtained zero sequence impedances are 1.0697 + j1,6178 Ω / Km (35 mm2), 0.6088 + j1,644 Ω / Km (70 mm2), 0.3642 + j1,6178 Ω / km (150 mm2) from the Modified Carson Method. The positive sequence impedances are 0.9217 + j0,3305 Ω / Km (35 mm2), 0.4608 + j0,3572 Ω / Km (70 mm2), 0.2162 + j0,3789 Ω / Km (150 mm2). Comparison with those**

impedances of SPLN as entered in ETAP, the following differences are observed. For 35 mm2 conductor, about 3.328% of differences for zero sequence resistance and about 0.15% difference for zero sequence reactance are observed. About similar differences are also observed for the positive sequence impedances. For 70 mm2 conductor, zero sequence resistance yields about 2.582% difference and 2.52% for the reactance. Interestingly, the positive sequence resistance shows 2,28% difference and 2.504% difference for positive sequence reactance. For the 150 mm2 conductor, the differences between the zero sequence impedance are 0.93% and 2.94%, and the positive sequence impedance shows differences of 0.62% and 2.905%. These percentage differences are observed to within the range of 12.19% to 3.63%. It can be concluded that Carson method can be used to calculate the impedance of the order of the feeder Katu, GI Mangala, PT. PLN (Persero) Distribution Lampung.
Keywords---**distribution system, cable, sequence impedance, Carson method, feeders Katu**

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Pada sistem tenaga listrik, diperlukan media penghantar untuk menyalurkan energi listrik dari pembangkit atau gardu induk menuju beban. Untuk menyalurkan energi listrik perlu menggunakan kabel sebagai media penghantarnya. Pusat beban terletak sangat jauh dari pembangkit ataupun gardu induk, maka diperlukan media kabel sebagai penghantarnya. Kabel sebagai media penghantar energi listrik sangat penting dalam komponen sistem tenaga listrik adalah merupakan komponen penting untuk menyalurkan energi listrik baik dalam saluran transmisi maupun saluran distribusi. Untuk melakukan perhitungan impedansi seri pada saluran udara adalah tahap penting sebelum melakukan analisis aliran daya. Impedansi seri pada sistem distribusi terdiri dari resistansi konduktor dan reaktansi yang dihasilkan dari medan magnet yang mengelilingi konduktor.

B. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1) Untuk melakukan permodelan saluran udara pada sistem distribusi.
2) Untuk mengetahui impedansi kabel atau penghantar.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. *Kajian Pustaka*

1) Sistem Distribusi

Sistem distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik, yang berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya listrik besar (*Bulk Power Source*) sampai ke konsumen [1]. Jadi fungsi distribusi tenaga listrik adalah sebagai pembagian atau penyaluran tenaga listrik ke beberapa tempat (pelanggan), dan merupakan sub sistem tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan pelanggan, karena catu daya pada pusat-pusat beban (pelanggan) dilayani langsung melalui jaringan distribusi [2].
Sistem distribusi terbagi 2 bagian :

- ✓ Sistem Distribusi Tegangan Menengah
- ✓ Sistem Distribusi Tegangan Rendah

Sistem distribusi tegangan menengah mempunyai tegangan kerja di atas 1 kV dan setinggi-tingginya 35 kV. Sistem distribusi tegangan rendah mempunyai tegangan kerja setinggi-tingginya 1 kV. Jaringan distribusi tegangan menengah berawal dari Gardu Induk/Pusat Listrik pada sistem terpisah atau *isolated*. Pada beberapa tempat berawal dari pembangkit listrik. Bentuk jaringan dapat berbentuk *radial* atau tertutup (*radial open loop*). Jaringan distribusi tegangan rendah berbentuk radial murni. Sambungan tenaga listrik adalah bagian paling hilir dari

sistem distribusi tenaga listrik. Pada sambungan tenaga listrik tersambung Alat Pembatas dan Pengukur (APP) yang selanjutnya menyalurkan tenaga listrik kepada pemanfaat. Konstruksi sistem distribusi dapat berupa saluran udara atau saluran bawah tanah disesuaikan dengan kebijakan manajemen, masalah kontinuitas pelayanan, jenis pelanggan, pada beban atas permintaan khusus dan masalah biaya investasi. Berdasarkan sistem penyalurannya, jaringan distribusi dapat dibedakan menjadi dua macam, yaitu :

- ✓ Saluran udara (*overhead line*)
- ✓ Saluran bawah tanah (*underground cable*)

Saluran udara merupakan sistem penyaluran tenaga listrik melalui kawat penghantar yang ditopang pada tiang listrik. Sedangkan saluran bawah tanah merupakan sistem penyaluran tenaga listrik melalui kabel yang ditanam di dalam tanah.

a. Saluran Udara (*Overhead Line*)
   Keuntungannya :
   - ✓ Lebih fleksibel dan leluasa dalam upaya untuk perluasan beban
   - ✓ Dapat digunakan untuk penyaluran tenaga listrik pada tegangan diatas 66 kV
   - ✓ Lebih mudah dalam pemasangannya
   - ✓ Bila terjadi gangguan hubung singkat, mudah diatasi dan dideteksi

   Kerugiannya :
   - ✓ Mudah terpengaruh oleh cuaca buruk, bahaya petir, badai, tertimpa pohon, dsb
   - ✓ Untuk wilayah penuh bangunan tinggi, sulit untuk menempatkan saluran.
   - ✓ Masalah efek kulit, induktansi, dan kapasitansi yang terjadi akan mengakbatkan tegangan drop lebih tinggi
   - ✓ Ongkos pemeliharaan lebih mahal, karena perlu jadwal pengecatan dan penggantian material listrik bila terjadi kerusakan.

b. Saluran Bawah Tanah (*Underground Line*)
   Keuntungannya :
   - ✓ Tidak terpengaruh oleh cuaca buruk, bahaya petir, badai, tertimpa pohon, dsb
   - ✓ Tidak mengganggu pemandangan, bila adanya bangunan yang tinggi
   - ✓ Dari segi keindahan, saluran bawah tanah lebih sempurna dan lebih indah dipandang
   - ✓ Mempunyai batas umur pakai dua kali lipat dari saluran udara
   - ✓ Ongkos pemeliharaan lebih murah, karena tidak perlu adanya pengecatan
   - ✓ Tegangan drop lebih rendah karena masalah induktansi bisa diabaikan

   Kerugiannya :
   - ✓ Biaya investasi pembangunan lebih mahal dibandingkan dengan saluran udara
   - ✓ Saat terjadi gangguan hubung singkat, usaha pencarian gangguan tidak mudah
   - ✓ Perlu pertimbangan teknis yang mendalam di dalam perencanaan, khususnya untuk kondisi tanah yang dilalui
   - ✓ Tidak dapat menghindari bila terjadi bencana banjir, desakan akar pohon dan ketidakstabilan tanah

2) Komponen Simetris

Metode komponen simetris digunakan dalam perhitungan yang berhubungan dengan keadaan yang tak seimbang pada perangkat listrik tiga fasa, dan secara khusus untuk perhitungan hubung singkat yang tidak seimbang pada perangkat listrik. Komponen-

komponen yang seimbang ini dinamakan menjadi tiga komponen urutan :

- ✓ Komponen urutan positif, yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya dan berbeda sudut fasanya 120˚ dan mempunyai urutan yang sama dengan fasa aslinya.
- ✓ Komponen urutan negatif, yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya dan berbeda sudut fasanya 120˚ dan mempunyai fasor urutan yang berlawanan dengan fasa aslinya.
- ✓ Komponen urutan nol, yang terdiri dari tiga fasor yang sama simetris besarnya dan berbeda fasa nol derajat.

Impedansi urutan dapat didefinisikan sebagai suatu impedansi yang dirasakan oleh arus urutan bila tegangan urutannya dipasang pada peralatan atau sistem tersebut. Seperti juga tegangan dan arus di dalam metode komponen simetris dan tak simetris. Impedansi yang dikenal ada tiga macam yaitu :

- ✓ Impedansi urutan positif (Z_1), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh arus urutan positif.
- ✓ Impedansi urutan negatif (Z_2), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh arus urutan negatif.
- ✓ Impedansi urutan nol (Z_0), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh arus urutan nol.

3) Konstruksi SUTM (Saluran Udara Tegangan Menengah)

Dalam proses penyaluran tenaga listrik diperlukan media penghantar, merupakan media untuk menyalurkan tenaga listrik, biasanya berupa kabel. Material yang umum digunakan adalah tembaga, alumunium, baja, perak, nikel dan besi. Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) adalah sebagai konstruksi termurah untuk penyaluran tenaga listrik pada daya yang sama. Konstruksi ini terbanyak digunakan untuk konsumen jaringan Tegangan Menengah yang digunakan di Indonesia. Ciri utama jaringan ini adalah penggunaan penghantar telanjang yang ditopang dengan isolator pada tiang besi/beton. Penggunaan penghantar telanjang, dengan sendirinya harus diperhatikan faktor yang terkait dengan keselamatan ketenagalistrikan seperti jarak aman minimum yang harus dipenuhi penghantar bertegangan 20 kV tersebut antar Fase atau dengan bangunan atau dengan tanaman atau dengan jangkauan manusia.Untuk instalasi listrik, penyaluran arus listrik dari panel ke beban digunakan penghantar listrik yang sesuai dengan penggunaannya. Ada dua macam penghantar listrik yaitu [13] :

- ✓ Kawat penghantar tanpa isolasi (telanjang) yang dibuat dari Cu dan Al, seperti AAC (*All Alumunium Conductor*), AAAC (*All Alumunium Alloy Conductor*) dan ACSR (*Alumunium Conductor Steel Reinforced*).
- ✓ Kawat penghantar yang terbungkus isolasi, ada yang berinti tunggal atau banyak, ada yang kaku atau berserabut, ada yang dipasang di udara atau di dalam tanah dan masing-masing digunakan sesuai dengan kondisi pemasangannya. Sebagai contoh yaitu MVTIC (*Medium Voltage Twisted Insulated Cable*).

Komponen utama dalam konstruksi SUTM (Saluran Udara Tegangan Menengah) ada beberapa macam, diantaranya:

Penghantar

- ✓ Penghantar Telanjang (BC: *Bare Conductor*)

  Konduktor dengan bahan utama tembaga (Cu) atau alluminium (Al) yang di pilin bulat padat , sesuai SPLN 42 -10 : 1986

dan SPLN 74 : 1987. Pilihan konduktor penghantar telanjang yang memenuhi pada dekade ini adalah AAC atau AAAC. Sebagai akibat tingginya harga tembaga dunia, saat ini belum memungkinkan penggunaan penghantar berbahan tembaga sebagai pilihan yang baik.

- ✓ Penghantar Berisolasi Setengah AAAC-S (*half insulated single core*)
  Konduktor dengan bahan utama aluminium ini diisolasi dengan material XLPE (croslink polyetilene langsung), dengan batas tegangan 6 kV dan harus memenuhi SPLN No 43-5-6 tahun 1995.
- ✓ Peralatan Hubung (*Switching*)
  Pada percabangan atau pengalokasian seksi pada jaringan SUTM untuk maksud kemudahan operasional harus dipasang Pemutus Beban (*Load Break Switch* : LBS), selain LBS dapat juga dipasangkan *Fused Cut-Out* (FCO).
- ✓ Konektor
  Konektor adalah peralatan yang dipergunakan untuk menyambung kawat penghantar. Jenis konektor yang digunakan ada beberapa macam yaitu :
  Joint sleeve adalah jenis konektor yang digunakan untuk sambungan penghantar pada posisi lurus. *Tap connector* adalah jenis konektor yang digunakan untuk sambungan penghantar pada titik pencabangan. *Live Line* connector adalah jenis konektor yang digunakan untuk pekerjaan dalam keadaan bertegangan (PDKB).

Tiang

Tiang merupakan komponen penting karena tiang berfungsi sebagai penyangga penghantar/kabel dan tempat bertumpunya isolator. Ada 3 jenis tiang, yaitu :

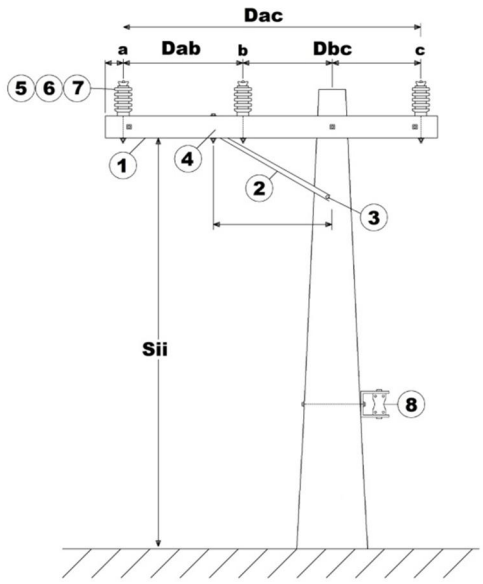
- ✓ Tiang Kayu
  SPLN 115 : 1995 berisikan tentang Tiang Kayu untuk jaringan distribusi, kekuatan, ketinggian dan pengawetan kayu sehingga pada beberapa wilayah pengusahaan PT PLN Persero bila suplai kayu memungkinkan, dapat digunakan sebagai tiang penopang penghantar penghantar SUTM.
- ✓ Tiang Besi
  Adalah jenis tiang terbuat dari pipa besi yang disambungkan hingga diperoleh kekuatan beban tertentu sesuai kebutuhan. Walaupun lebih mahal, pilihan tiang besi untuk area/wilayah tertentu masih diijinkan karena bobotnya lebih ringan dibandingkan dengan tiang beton. Pilihan utama juga dimungkinkan bilamana total biaya material dan transportasi lebih murah dibandingkan dengan tiang beton akibat diwilayah tersebut belum ada pabrik tiang beton.
- ✓ Tiang Beton
  Untuk kekuatan sama, pilihan tiang jenis ini dianjurkan digunakan di seluruh PLN karena lebih murah dibandingkan dengan jenis konstruksi tiang lainnya termasuk terhadap kemungkinan penggunaan konstruksi rangkaian besi profil.
- ✓ Isolator
  Pada jaringan SUTM, Isolator pengaman penghantar bertegangan dengan tiang penopang/*travers* dibedakan untuk jenis konstruksinya

Dalam saluran distribusi di Indonesia umumnya menggunakan saluran udara (*overhead line*) dan menggunakan tiang besi atau beton untuk penyangga penghantar yang akan digunakan. Penggunaan tiang disesuaikan dengan fungsi tiang (tiang awal/akhir, tiang sudut, tiang penyanggah, tiang peregang, tiang seksi). Tiang ditanam $\frac{1}{6}$ kali panjang tiang, dengan sudut kemiringan

tidak melebihi 5^0. Fondasi tiang dipakai untuk tiang awal, tiang akhir, Gardu Portal/Cantol, tiang sudut. Ukuran fondasi disesuaikan dengan besar/ kuat tarik tiang (daN) dan daya dukung jenis tanah. Konstruksi pada tiang (*Pole Top Construction*) dilakukan minimal 15 cm dibawah ujung tiang bagian atas. Jarak pendirian tiang (*pole staking*) atau antar-gawang diatur sebagai berikut:

- ✓ dalam kota : maksimum 40 meter
- ✓ luar kota : maksimum 50 meter
- ✓ listrik desa : maksimum 60 meter

Pemakaian panjang tiang adalah 11, 12, 13 dan 14 meter untuk Jaringan Tegangan Menengah dengan kekuatan beban kerja (*working load*) 200 daN, 350 daN, 500 daN dan 800 daN.



Gbr. 1. Konstruksi tiang SUTM

Keterangan :

1. *Cross arm*
2. *Arm brace*
3. *Boltnut double*
4. Isolator tumpu
5. *Bounding wire*
6. *Perormed tie*
7. *Alumunium tape*
8. Isolator ANSI

Gambar 1 merupakan gambar tiang konstruksi SUTM (Saluran Udara Tegangan Menengah). Tiang konstruksi SUTM memiliki beberapa komponen penting yang menunjang dalam proses penyaluran atau distribusi tenaga listrik dari proses pembangkitan hingga ke beban atau konsumen.

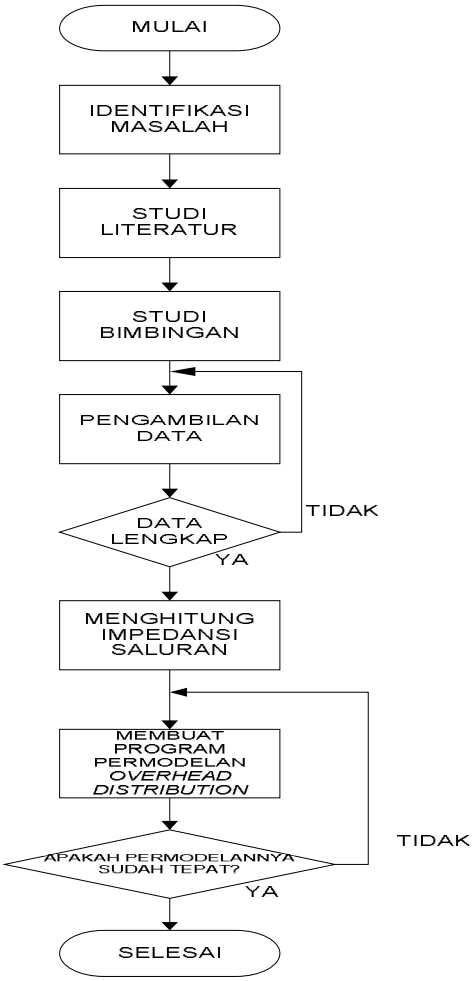
4) Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai permodelan saluran udara ini sudah diteliti oleh William H. Kersting dalam bukunya yang berjudul "*Distribution System Modeling and Analysis*, 2001" dan jurnal penelitiannya yang berjudul "*The Application of Carson's Equation to the Steady-State Analysis of Distribution Feeders*". Di dalam buku yang ditulis oleh William H. Kersting dipaparkan mengenai penjelasan tentang bagaimana memodelkan saluran udara pada sistem distribusi. Untuk melakukan perhitungan impedansi urutan pada saluran, pertama dengan menurunkan rumus dari persaman Carson dimana persamaan ini berguna untuk mengetahui impedansi sendiri (*self impedance*) dan impedansi bersama (*mutual impedance*) sebelum menentukan impedansi urutan [15]. Disini diperlukan juga data seperti jenis kabel yang diketahui, resistansi kabel, GMR (*Geometric Mean Radius*) dari kabel tersebut, resistivitas tanah dan frekuensi sistem kelistrikan.Dari kesempatan ini peneliti akan melakukan penelitian tentang "Permodelan Saluran Udara untuk Menghitung Impedansi Urutan pada Penyulang Katu Gardu Induk Menggala". Berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu, penulis menerapkannya untuk Penyulang Katu Gardu Induk Mengala dengan menyempurnakan bahasa pemrograman

Python yang sudah diselesaikan oleh Muhamad Wahidi, S.T. dengan menambahkan variabel-variabel yang mempengaruhi aliran daya yang akan diperhitungkan pada penelitian ini. Di dalam penelitian ini dilakukan permodelan saluran udara dengan menggunakan perangkat lunak Python yang mana penelitian ini juga melanjutkan penelitian dari Muhamad Wahidi, S.T. "Analisa Aliran Daya Tiga Fasa Tak Seimbang pada Penyulang Kangkung PT. PLN Distribusi Lampung" [16].

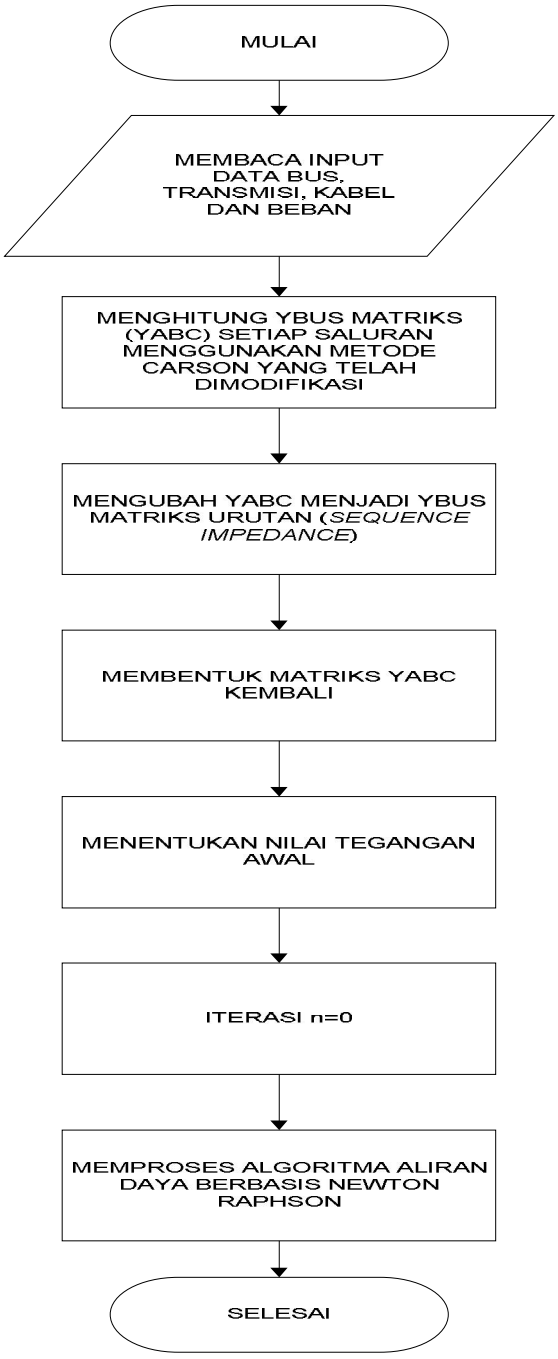
III. METODE PENELITIAN

Berikut pada gambar 2 merupakan gambar diagram alir dari penelitian yang dilakukan:



Gbr. 2. Gambar diagram alir penelitian

Berikut pada gambar 3 merupakan diagram alir dari program penelitian yang dilakukan :



Gbr. 3. Gambar diagram alir program

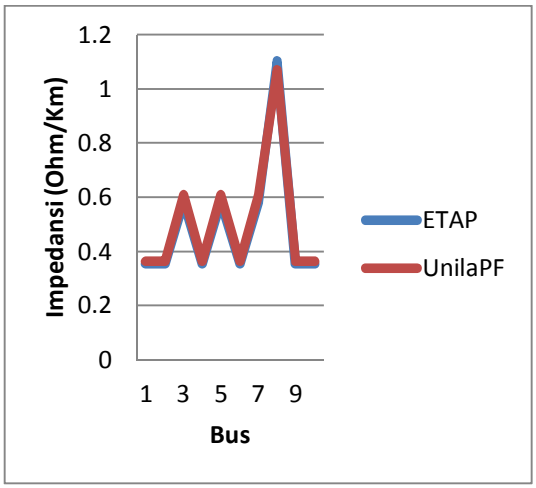
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menghitung impedansi urutan pada Penyulang Katu Gardu Induk Menggala. Penyulang katu ini terdiri dari 119 bus, yang terdiri dari 1 *slack* bus atau sumber

grid, 12 bus generator, 118 saluran dan 106 bus beban. Trafo distribusi di Penyulang Katu ini akan dianggap sebagai beban. Total daya beban untuk Penyulang Katu adalah 4,638 MW dan 2,819 MVar. Total rugi-rugi untuk Penyulang Katu adalah 1,2 MW dan 0,689 MVar.

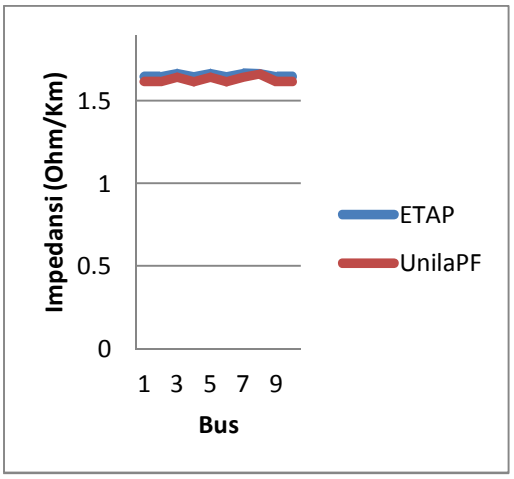
A. Hasil Simulasi dan Pembahasan

Setelah dilakukan simulasi terhadap kasus yang dijadikan sebagai objek studi maka didapatkan hasil. Hasil tersebut berupa impedansi urutan pada Penyulang Katu. Untuk mendapatkan nilai impedansi urutan diperlukan data yang diperlukan seperti resistansi penghantar, resistivitas tanah, GMR (*Geometric Mean Radius*), jarak antar konduktor, dll. Sebelum melakukan analisis terhadap kasus yang akan dibahas, disini terlebih dahulu akan dilakukan justifikasi apakah yang sudah dikerjakan sudah sesuai atau mendekati.



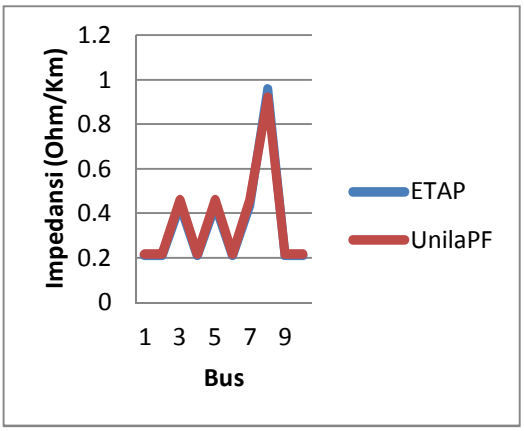
Gbr. 4. Grafik R0 Perbandingan ETAP dengan UnilaPF

Grafik pada gambar 4 merupakan perbandingan R urutan nol pada kasus 11 bus, dimana hasil yang diperoleh oleh ETAP pada kabel berukuran 35 mm^2 sebesar 1,10298, sedangkan pada UnilaPF sebesar 1,0697. Pada kabel berukuran 70 mm^2 dimana hasil yang diperoleh ETAP sebesar 0,58289 sedangkan pada UnilaPF sebesar 0,6088. Pada kabel berukuran 150 mm^2 dimana hasil yang diperoleh ETAP sebesar 0,35498 sedangkan pada UnilaPF sebesar 0,3642.



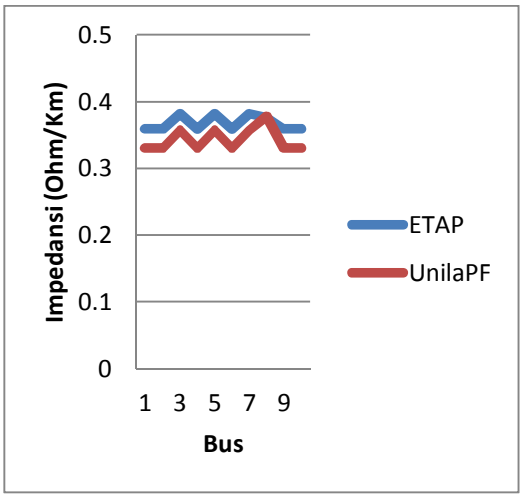
Gbr. 5. Grafik X0 Perbandingan ETAP dengan UnilaPF

Grafik gambar 5 merupakan perbandingan X urutan nol pada contoh kasus 11 bus, dimana hasil yang diperoleh oleh ETAP pada kabel berukuran 35 mm^2 sebesar 1,664727 , sedangkan pada UnilaPF sebesar 1,6178. Pada kabel berukuran 70 mm^2 dimana hasil yang diperoleh ETAP sebesar 1,66996 sedangkan pada UnilaPF sebesar 1,644. Pada kabel berukuran 150 mm^2 dimana hasil yang diperoleh ETAP sebesar 1,64727 sedangkan pada UnilaPF sebesar 1,6178.



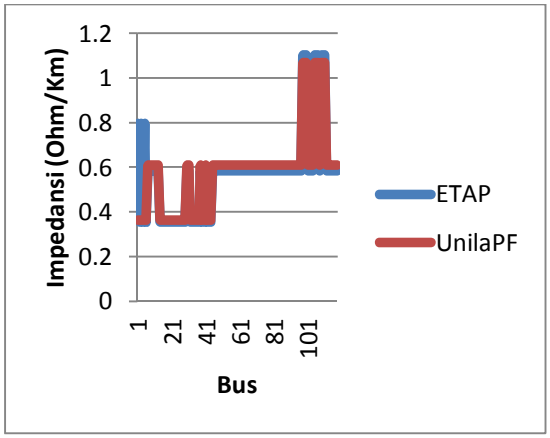
Gbr. 6. Grafik R1 Perbandingan ETAP dengan UnilaPF

Grafik gambar 6 merupakan perbandingan R urutan positif pada contoh kasus 11 bus, dimana hasil yang diperoleh oleh ETAP pada kabel berukuran 35 mm^2 sebesar 0,958 , sedangkan pada UnilaPF sebesar 0,9217. Pada kabel berukuran 70 mm^2 dimana hasil yang diperoleh ETAP sebesar 0,438 sedangkan pada UnilaPF sebesar 0,4608. Pada kabel berukuran 150 mm^2 dimana hasil yang diperoleh ETAP sebesar 0,21 sedangkan pada UnilaPF sebesar 0,2162.



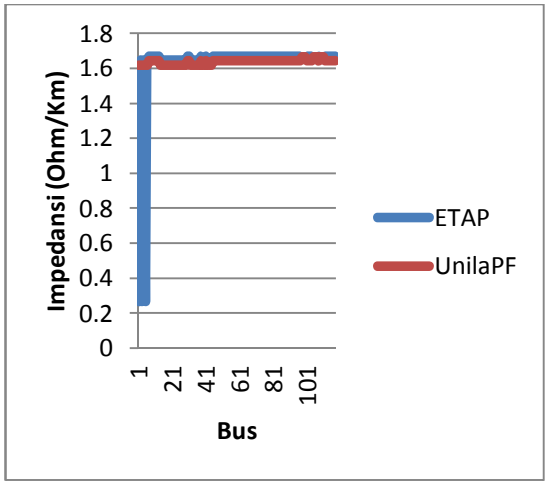
Gbr. 7. Grafik X1 Perbandingan ETAP dengan UnilaPF

Grafik pada gambar 7 merupakan perbandingan X urutan positif pada contoh kasus 11 bus, dimana hasil yang diperoleh oleh ETAP pada kabel berukuran 35 mm^2 sebesar 0,35955 , sedangkan pada UnilaPF sebesar 0,3305. Pada kabel berukuran 70 mm^2 dimana hasil yang diperoleh ETAP sebesar 0,38224 sedangkan pada UnilaPF sebesar 0,3572. Pada kabel berukuran 150 mm^2 dimana hasil yang diperoleh ETAP sebesar 0,377 sedangkan pada UnilaPF sebesar 0,3789.



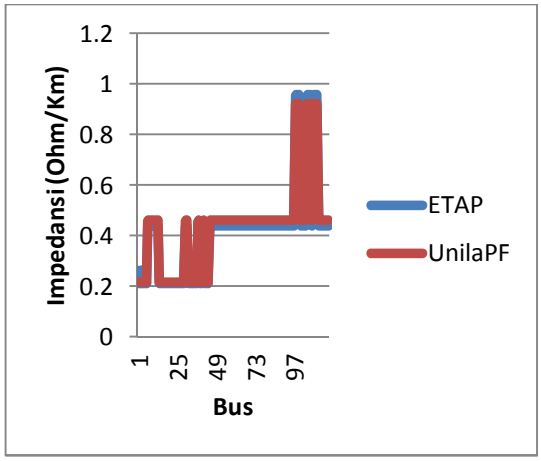
Gbr. 8. Grafik R0 Perbandingan ETAP dengan UnilaPF

Gambar 8 merupakan grafik perbandingan hasil data ETAP dengan program UnilaPF. Garis yang berwarna biru merupakan data ETAP dan garis yang berwarna merah merupakan hasil yang diperoleh UnilaPF. Dari bus 1-6 terdapat perbedaan begitu mencolok antara data ETAP dengan data yang diperoleh program UnilaPF, itu disebabkan karena pada ETAP bus 1-6 menggunakan kabel berpilin atau MVTIC (*Medium Voltage Twisted Insulated Cable*). Sedangkan dalam penelitian ini tidak membahas kabel berpilin atau MVTIC jadi tidak ada hasilnya dalam perhitungan program UnilaPF. Hasil yang didapat dari ETAP pada kabel ukuran 35 mm^2 yaitu 1,10298 sedangkan hasil program UnilaPF sebesar 1,0697. Kabel ukuran 70 mm^2 ETAP sebesar 0,58298 sedangkan hasil program UnilaPF sebesar 0,6088. Kabel ukuran 150 mm^2 ETAP sebesar 0,35498 sedangkan hasil program UnilaPF sebesar 0,3642.



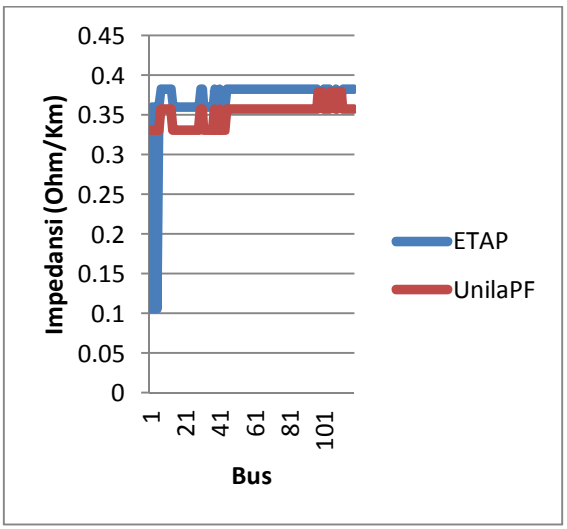
Gbr. 9. Grafik X0 Perbandingan ETAP dengan UnilaPF

Gambar 9 ini merupakan grafik perbandingan hasil data ETAP dengan program UnilaPF. Garis yang berwarna biru merupakan data ETAP dan garis yang berwarna merah merupakan hasil yang diperoleh UnilaPF. Masih sama dengan sebelumnya, dari bus 1-6 terdapat perbedaan begitu mencolok antara data ETAP dengan data yang diperoleh program UnilaPF, itu disebabkan karena pada ETAP bus 1-6 menggunakan kabel berpilin atau MVTIC (*Medium Voltage Twisted Insulated Cable*). Sedangkan dalam penelitian ini tidak membahas kabel berpilin atau MVTIC jadi tidak ada hasilnya dalam perhitungan program UnilaPF. Hasil yang didapat dari ETAP pada kabel ukuran 35 mm^2 yaitu 1,66472 sedangkan hasil program UnilaPF sebesar 1,6662. Kabel ukuran 70 mm^2 ETAP sebesar 1,66996 sedangkan hasil program UnilaPF sebesar 1,6444. Kabel ukuran 150 mm^2 ETAP sebesar 1,64727 sedangkan hasil program UnilaPF sebesar 1,6178.



Gbr. 10. Grafik R1 Perbandingan ETAP dengan UnilaPF

Gambar 10 merupakan perbandingan hasil ETAP dengan program UnilaPF. Hasil yang didapat dari ETAP pada kabel ukuran 35 mm^2 yaitu 0,958 sedangkan hasil program UnilaPF sebesar 0,9217. Kabel ukuran 70 mm^2 ETAP sebesar 0,438 sedangkan hasil program UnilaPF sebesar 0,4608. Kabel ukuran 150 mm^2 ETAP sebesar 0,21 sedangkan hasil program UnilaPF sebesar 0,2162.



Gbr. 11. Grafik X1 Perbandingan ETAP dengan UnilaPF

Gambar 11 merupakan perbandingan hasil ETAP dengan program Python. Hasil yang didapat dari ETAP pada kabel ukuran 35 mm^2 yaitu 0,377 sedangkan hasil program Python sebesar 0,3789. Kabel

ukuran 70 mm^2 ETAP sebesar 0,38224 sedangkan hasil program Python sebesar 0,3572. Kabel ukuran 150 mm^2 ETAP sebesar 0,35955 sedangkan hasil program Python sebesar 0,3305.

V. SIMPULAN DAN SARAN

A. Simpulan

Berdasarkan Analisis dan pembahasan dapat diambil simpulan sebagai berikut :

1) Penelitian ini merupakan permodelan saluran udara pada sistem distribusi untuk mengetahui impedansi kabel atau penghantar menggunakan simulasi yang dibuat dengan program ETAP dan UnilaPF.
2) Hasil yang diperoleh untuk hasil pada ETAP memerlukan waktu 4 detik dan untuk UnilaPF yaitu 5 detik.
3) Hasil simulasi 11 bus dengan 119 bus pada Penyulang Katu bahwa didapatkan selisih impedansi urutan nol pada ETAP dengan Python menggunakan konduktor AAAC ukuran 35 mm^2 pada R urutan nol sebesar 3,328% dan pada X urutan nol sebesar 0,15%. Pada konduktor AAAC ukuran 70 mm^2 didapatkan selisih impedansi urutan sebesar pada R urutan nol sebesar 2,582% dan pada X urutan nol sebesar 2,52%. Pada konduktor AAAC ukuran 150 mm^2 didapatkan selisih impedansi urutan sebesar pada R urutan nol sebesar 0,93% dan pada X urutan nol sebesar 2,94%.
4) Hasil simulasi 11 bus dengan 119 bus pada Penyulang Katu bahwa didapatkan selisih impedansi urutan positif pada ETAP dengan Python menggunakan konduktor AAAC ukuran 35 mm^2 pada R urutan positif sebesar 3,63% dan pada X urutan positif sebesar 0,19%. Pada konduktor AAAC ukuran 70 mm^2 didapatkan selisih impedansi urutan sebesar pada R urutan positif sebesar 2,28% dan pada X urutan positif sebesar 2,504%. Pada konduktor AAAC ukuran 150 mm^2 didapatkan selisih impedansi urutan sebesar pada R urutan positif sebesar 0,62% dan pada X urutan positif sebesar 2,905%.
5) Dengan mengikuti data kabel, data yang berhubungan dengan impedansi urutan dan persamaan Carson maka dapat diketahui impedansi urutannya.
6) Pada sistem distribusi tiga phasa, penggunaan metode Carson untuk mencari impedansi urutan dengan menggunakan UnilaPF telah diuji dengan data yang sudah ada (ETAP). Didapat bahwa pola grafik yang dihasilkan UnilaPF dan ETAP mendekati satu sama lain hal ini terjadi karena data yang sudah ada (ETAP) menggunakan konstanta tambahan pada hasil ETAP tersebut sehingga nilai-nilainya berbeda tapi memiliki pola grafik yang sama.
7) Karena di sistem distribusi bersifat tak seimbang maka analisis paling akurat pun tidak memberikan asumsi apapun terhadap konfigurasi konduktor atau kabel, maka di dalam penelitian ini diperlukan metode Carson untuk menentukan impedansi urutan.

B. Saran

Berdasarkan simulasi, pembahasan dan simpulan yang telah dilakukan, maka untuk pengembangan:

1) Analisis lebih lanjut mengenai kabel MVTIC (*Medium Voltage Twisted Insulated Cable*) dan kabel bawah tanah agar dapat menyempurnakan penelitian ini karena di dalam penelitian ini hanya membahas impedansi urutan pada saluran udara.

2) Perlu adanya *software* lain yang digunakan untuk membandingkan hasil yang telah dicapai.

REFERENSI

[1] Allen J.W. dan Bruce F.W. 1996. *Power Generation, Operation and Control*. John Wiley & Sons Inc, America.

[2] Arismunandar, A. Kuwahara,S. 1973. *Teknik Tenaga Listrik*. Jakarta.

[3] Arnold, T.P. dan Mercier, C.D.,*Power Cable Manual, 2nd ed*., Southwire Company, Carrollton, GA, 1997.

[4] Carson, John R., *Wave propagation in overhead wires with ground return*, Bell System Technical Journal, Vol. 5, New York, 1926.

[5] Glover, J.D. dan Sarma, M., *Power System Analysis and Design, 2nd edition*, PWS Publishing Co., Boston, 1994.

[6] Gonen T., "*Electric Power Transmission System Engineering, Analysis and Design*", John Wiley Sons, New York, USA, pp. 172-184, 1988.

[7] Grainger, J.J., Stevenson, W.D. 1994. *Power System Analysis*. Mc Graw-Hill. New York.

[8] Hakim, L. 2013. *Buku Ajar Mata Kuliah Analisa Sistem Tenaga*. Universitas Lampung. Bandar Lampung.

[9] Handoko, Trisno. 2014. *Visualisasi Aliran Daya Tiga Fasa Tak Seimbang pada Penyulang Kangkung PT. PLN (Persero) Distribusi Lampung Berbasis GIS (Geographic Information System)*. Skripsi Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung. Bandar Lampung.

[10] Kersting, W.H. *Distribution System Modeling and Analysis*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2007.

[11] Marsudi, Djiteng. 2006. *Operasi Sistem Tenaga Listrik*. Graha Ilmu. Yogyakarta.

[12] Milano, F. 2009. *Power System Modelling and Scripting*. Springer. London.

[13] PT. PLN (Persero). 2010. *Standar Konstruksi Jaringan Distribusi Jakarta Raya dan Tangerang PT. PLN Persero Buku I, II, III, IV, V*. Jakarta.

[14] PT. PLN (Persero). 2008. *Standar Konstruksi Jaringan Distribusi PT. PLN Persero Distribusi Jawa Tengah dan Jogjakarta*.

[15] Saadat, Hadi. 1999. *Power System Analysis 2nd Edition*. McGrow Hill. Ch.1.

[16] Stevenson, W.D. 1975. *Elements of Power System Analysis Third Edition*. McGraw-Hill. NewYork.

[17] W.H. Kersting dan R.K. Green. *The Application of Carson's Equation to the Steady State Analysis of Distribution Feeders*. CRC Press, Boca Raton, FL, 2007.

[18] Wahidi, M. 2014. *Studi Kasus Aliran Daya Tiga Fasa Tak Seimbang di PLN Distribusi Lampung Menggunakan Metode Newton-Raphson dalam Bentuk Rectangular*. Skripsi Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung. Bandar Lampung.

[19] Weedy, B.M., et al. 2012. *Electric Power System Fifth Edition*. John Wiley & Sons Ltd. West Sussex.