

**DETEKSI OBJEK BERBAHAYA DAN PEMODELAN 3D
JARINGAN KELISTRIKAN MENGGUNAKAN TEKNOLOGI LIDAR
Studi kasus: Koridor jaringan kelistrikan di Kabupaten Gowa,
Sulawesi Selatan, Indonesia**

Alfian Adi Atmaja, Yudo Prasetyo, Hani'ah^{*)}

Program Studi Teknik Geodesi, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudarto SH, Tembalang, Semarang, Telp. (024) 76480785, 76480788
E-mail: geodesi@undip.ac.id

ABSTRAK

Pada era modern seperti sekarang ini, energi listrik sudah menjadi kebutuhan primer dalam kehidupan sehari-hari masyarakat Indonesia. Saluran transmisi udara merupakan salah satu komponen penting dalam penyaluran energi listrik pada sistem tenaga listrik. Keamanan infrastruktur jaringan kelistrikan secara signifikan memberikan efek dalam kehidupan sehari-hari dan aktivitas industri. Ada banyak faktor dan objek yang mengancam keamanan jaringan kelistrikan yaitu vegetasi, pohon dan bangunan di sekitar jaringan kelistrikan; selain itu juga kerusakan pada infrastruktur jaringan kelistrikan itu sendiri, dan lain-lain. Pengawasan yang akurat secara terus-menerus terhadap jaringan kelistrikan tersebut dapat mencegah terjadinya situasi yang berbahaya seperti pemadaman listrik total.

Sekarang ini, perusahaan milik negara yang menangani masalah kelistrikan di Indonesia yaitu PT. PLN masih sangat bergantung pada petugas lapangan dalam pengawasan jaringan kelistrikan secara manual. Hal tersebut masih kurang efektif dan sangat mahal, pada sisi lain juga masih sangat berbahaya. Akhir-akhir ini, sistem LiDAR udara mulai digunakan dalam pengawasan jaringan kelistrikan dengan pemodelan secara 3D. Sistem ini dianggap dapat membuat biaya dan waktu pengawasan jadi lebih efisien karena dapat memetakan jaringan kelistrikan secara cepat dengan akurasi 30 titik/m². Dalam penelitian ini bertujuan untuk melakukan rekonstruksi model jaringan kelistrikan secara 3D dari data LiDAR udara pada koridor jaringan kelistrikan 150 KV (2000 m X 600 m) di Kabupaten Gowa, Provinsi Sulawesi Selatan, Indonesia.

Metode yang dilakukan terdiri dari 3 komponen utama, yaitu deteksi, ekstraksi, dan pemodelan. *Powerline* dideteksi secara otomatis dengan bentuk geometrik yang umum menggunakan satu set algoritma, termasuk *vertical spacing filtering* dan *density-based filtering*. *Powerline* secara lengkap selanjutnya diekstraksi menggunakan metode *Hough Transform*. Terakhir, merekonstruksi model jaringan kelistrikan secara 3D agar dapat digunakan untuk mendeteksi objek berbahaya di sepanjang koridor jaringan kelistrikan sesuai dengan SNI 04-6918-2002 tentang ruang bebas dan jarak bebas minimum pada Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) dan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET). Hasil dari penelitian ini membuktikan bahwa pemodelan jaringan kelistrikan secara 3D dapat dilakukan dan efektif untuk mendeteksi objek berbahaya di sepanjang koridor jaringan kelistrikan, sehingga dapat digunakan untuk mendukung manajemen dan pengawasan jaringan kelistrikan di Indonesia.

Kata kunci : 3D, Jaringan Kelistrikan, LiDAR, *Powerline*, Rekonstruksi

ABSTRACT

Nowadays in modern era, electric energy has been primary needed in our daily activities. Transmission powerline is important part to transmit electricity in powerline system. The safety of powerline infrastructure significantly affects to our everyday life and industrial activities. There are many factors and objects to threaten powerline safety, which includes encroaching vegetation, surrounding trees, surrounding building, structural faults of insulator, tower and so on. A timely and accurate monitoring of those keys, powerlines features enables to prevent causing possible dangerous situation such as blackout.

At present, most of utility firms such as PT.PLN heavily relies on men-centric and manual powerline monitoring methods which are time consuming and costly, moreover hazardous. Recently, airborne LiDAR system was introduced as a cost effective data acquisition tool which enables to rapidly capture 3D powerline scene with up to 30 points/m². This study aims at 3D reconstruction workflow for powerline extracted from airborne LiDAR data of 150 kV transmission line corridors (2000 m by 600 m) in Gowa, South Sulawesi Province, Indonesia.

The proposed workflow consists of three components: detection, extraction, and modelling. The powerlines are automatically detected with regular geometric shape using a set of algorithms, including Vertical Spacing Filtering and density-based filtering. The complete powerlines are then extracted using Hough Transform method. Finally, the 3D powerline are reconstructed to evaluate the proposed workflow for danger objects detection according to SNI 04-6918-2002 about the Indonesian standard rule for minimum distance in horizontal and vertical space in the powerline corridor. The results obtained demonstrate that powerlines can be reconstructed in 3D, which are useful in detection of danger objects to support powerline corridor management.

Keywords : 3D, LiDAR, *Powerline*, Reconstruction

**) Penulis penanggung jawab*

I. Pendahuluan

I.1. Latar Belakang

Perusahaan Listrik Negara (PLN) merupakan perusahaan yang bergerak dibidang ketenagalistrikan di Indonesia. Dalam upaya memenuhi kebutuhan tenaga listrik, maka dibangun sistem jaringan terpadu meliputi sistem interkoneksi pusat-pusat pembangkit tenaga listrik serta membangun sistem transmisi dari pusat pembangkit ke gardu induk. Jaringan kelistrikan Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) dan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) PT. PLN banyak terbentang melintasi berbagai peruntukan lahan, mulai dari lahan kosong, sawah, perkebunan, jalan, sampai pemukiman penduduk.

Persyaratan ruang bebas horisontal dan vertikal SUTET maupun SUTT telah ditetapkan oleh pemerintah dan telah dibuat standarisasinya dalam SNI 04-6918-2002 tentang ruang bebas dan jarak bebas minimum pada SUTT dan SUTET. Salah satu area yang telah diakuisisi oleh PT ASI Pudjiastuti Geosurvey di Makasar mempunyai spesifikasi SUTT 150 KV. Sesuai dengan standar SNI, maka jarak bebas vertikal dari andongan terendah di tengah gawang adalah 5 meter dari atap bangunan; 13,5 meter untuk jalan dan 9 meter dari ujung tanaman di perkebunan. Sedangkan total jarak bebas horisontal adalah sebesar 6 m. Area di luar jarak bebas vertikal dan jarak bebas horisontal adalah area yang boleh diperuntukkan untuk aktivitas sehari-hari.

Dengan bantuan citra satelit dan *point cloud* LiDAR (*Light Detection and Ranging*), akan terlihat tiang-tiang mana yang berada dekat pemukiman dan apakah obyek-obyek tersebut masuk ke ruang bebas horisontal dan vertikal. Karena pengukuran dapat langsung dilakukan di atas data LiDAR. Dewasa ini, penggunaan teknologi LiDAR untuk pengamatan jaringan kelistrikan mulai dilakukan di berbagai negara khususnya Canada, Amerika Serikat, dan Finlandia. Namun, di Indonesia sendiri belum menerapkan teknologi ini dalam mengamati dan mendeteksi objek berbahaya yang berada di sekitar jaringan kelistrikan.

Hasil pengukuran dengan teknologi LiDAR berupa titik-titik yang sangat banyak dan biasa disebut *point cloud*, titik-titik tersebut sudah mempunyai nilai koordinat geometri secara tiga dimensi dengan akurasi relatif untuk ketinggian 0,15–0,25 m dan planimetris 0,3–1 m pada ketinggian di bawah 2 kilometer. Koordinat *point clouds* diperoleh tidak hanya dari hasil pengukuran jarak sensor tetapi dikombinasikan dengan *Global Positioning System* (GPS) untuk informasi posisi pesawat saat merekam dan informasi orientasi yang diperoleh dari *Inertial Measurement Unit* (IMU), sehingga didapat akurasi titik yang tinggi dalam ruang tiga dimensi (Xiang, 2014). Dengan gabungan tiga teknologi ini, LiDAR mampu menghasilkan informasi permukaan bumi sampai dengan akurasi 15 – 20 cm, serta mampu mendeteksi kabel-kabel listrik di udara yang berukuran sentimeter bahkan millimeter.

Dengan adanya teknologi LiDAR yang digunakan dalam penelitian ini, potensi bahaya vegetasi liar, jarak kabel ke permukaan tanah, kondisi di sekitar

koridor dan lainnya dapat terukur secara akurat. Hal ini berguna untuk *monitoring* dan inspeksi jaringan kelistrikan bisa dilakukan dalam bentuk 3D. Selain itu, LiDAR mampu memberikan hasil yang baik untuk meningkatkan manajemen sistem kelistrikan dengan pembuatan basis data berbentuk sistem informasi geografis yang nantinya dapat memudahkan pengguna informasi. Misalkan, ketika terjadi kerusakan pada salah satu tiang di suatu kota, maka dari basis data akan langsung menampilkan informasi tiang, dimana posisi tiang tersebut, alamatnya, akses menuju lokasi, jalur yang saling menghubungkannya, dan foto tiang tersebut, sehingga tindakan perbaikan dapat dengan cepat dilakukan.

I.2. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimanakah hasil penapisan *point cloud* LiDAR dengan metode *vertical based filtering* dan *density based filtering*?
2. Bagaimanakah tingkat kualitas sambungan kabel *powerline* berdasarkan analisis gap pada jaringan kelistrikan dengan perangkat lunak *terrasolid*?
3. Bagaimanakah perbandingan akurasi ketelitian proses pemodelan 3D jaringan kelistrikan dari data LiDAR berdasarkan metode *Hough Transform* dengan metode manual dibandingkan dengan metode otomatis berdasarkan uji statistik dengan tingkat kepercayaan 95%?
4. Bagaimanakah hasil dari deteksi objek berbahaya yang berada di sekitar *tower* dan kabel listrik sesuai SNI 04-6918-2002 tentang ruang bebas dan jarak bebas minimum pada Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) dan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) dengan secara 3D *buffer* 10 meter dari kabel listrik dan secara horisontal *buffer* 6 meter dari sumbu vertikal tiang (*Tower String*)?

I.3. Batasan Penelitian

Untuk menjelaskan permasalahan yang akan dibahas dan agar tidak terlalu jauh dari kajian masalah, maka penelitian ini akan di batasi pada hal hal berikut:

1. Objek berbahaya yang menjadi standar perhitungan analisis adalah jaringan kelistrikan SUTT 150kV antara lain yaitu lapangan terbuka, bangunan, jembatan, tanaman atau tumbuhan, pohon, perkebunan, jalan atau jalan raya, rel kereta api, lapangan umum, kabel jaringan komunikasi, antena, jaringan kabel listrik kereta listrik, titik tertinggi tiang kapal pada kedudukan air pasang atau tertinggi pada lalulintas air.
2. Objek berbahaya dideteksi secara 3D dengan *buffer* 10 m dari kabel dan secara horisontal dengan *buffer* 6 m dan 20 m dari sumbu vertikal tiang pada jaringan kelistrikan yang telah dimodelkan.
3. Data referensi titik *powerline* secara manual dipilih dari data LIDAR udara dan citra satelit diunduh dari *Google Earth* terektifikasi menggunakan perangkat lunak *ArcGIS 10.2*.

4. Pemeriksaan visual (*visual check*) kualitatif digunakan untuk penilaian akurasi tematik pada ekstraksi titik *powerline*.
5. Proses pemodelan 3D jaringan kelistrikan dari data LiDAR tahun 2012 di Kabupaten Gowa yang diakuisisi oleh PT. APG menggunakan metode *Hough Transform* dan untuk memperkirakan parameter model menggunakan algoritma RANSAC dan *least square fitting*.
6. Data ketinggian tiang atau *tower* hanya berdasarkan interpretasi pengukuran dari *point cloud* data LiDAR dan belum dilakukan validasi pengukuran di lapangan.
7. Validasi *existing* posisi tiang dan objek berbahaya berdasarkan interpretasi citra digital.

I.4. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah:

1. Untuk mengetahui proses pemodelan jaringan kelistrikan secara 3D dan deteksi objek berbahaya dari data hasil akuisisi LiDAR dalam menghasilkan bentuk jaringan kelistrikan.
2. Untuk mengetahui perbandingan kualitas pemodelan *powerline* secara manual dan otomatis.

I.5. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini terdiri dari 2 aspek yaitu:

1. Aspek Keilmuan
Memberikan kontribusi dalam mengkaji lebih dalam mengenai proses pemodelan dan deteksi objek berbahaya dari data hasil akuisisi LiDAR dalam menghasilkan bentuk *powerline*.
2. Aspek Kerekayasaan
Turut serta dalam memberikan kontribusi untuk pendataan dan manajemen resiko jaringan kelistrikan di Kabupaten Gowa, Sumatera Selatan.

I.6. Data Penelitian

Tabel I.1. Data penelitian

No	Jenis Data	Tipe Data dan Tahun	Sumber Data
1	<i>Poin cloud</i> LiDAR wilayah Kabupaten Gowa	LAS file tahun 2012	PT. Asi Pudjiastuti Geosurvey
2	Citra Satelit dari <i>Digital Globe</i> wilayah Kabupaten Gowa	TIFF image tahun 2014	https://earth.google.com

II. Tinjauan Pustaka

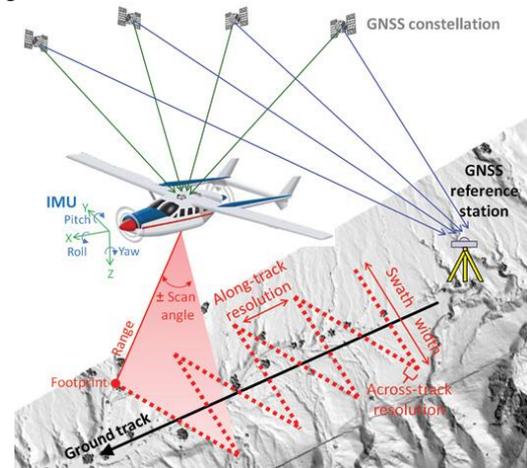
II.1. Aerial Laser Scanner (ALS)

II.1.1. Prinsip Kerja LiDAR

Prinsip kerja LiDAR secara umum adalah sensor memancarkan sinar laser pada target kemudian sinar tersebut dipantulkan kembali ke sensor. Berkas sinar yang ditangkap kemudian dianalisis oleh peralatan *detector*. Perubahan komposisi cahaya yang diterima dari sebuah target ditetapkan sebagai sebuah karakter

objek. Waktu perjalanan sinar saat dipancarkan dan diterima kembali diperlukan sebagai variabel penentu perhitungan jarak dari benda ke sensor.

Pada Gambar II.1 menjelaskan tentang proses penyiaran yang dilakukan dengan memasang laser scanner, GPS, dan IMU (*Inertial Measurement Unit*) pada wahana yang dipilih. Berdasarkan skala produk yang diinginkan dan luas cakupan, maka dapat ditentukan jalur terbang. Pada jalur terbang yang telah ditentukan tersebut wahana pesawat terbang melakukan penyiaran (*scanning*). Pada saat *laser scanner* melakukan penyiaran sepanjang jalur terbang, pada setiap interval waktu tertentu direkam posisinya dengan menggunakan GPS dan orientasinya dengan menggunakan IMU. Proses ini dilakukan sampai jalur yang disiam selesai.



Gambar II.1. Prinsip kerja ALS (Fernandez, 2011)

Pada LiDAR terdapat dua sensor yang berfungsi sebagai *transmitter* dan *receiver*, pada *transmitter* sensor memancarkan sinar laser ke obyek, selanjutnya sinar tersebut dipantulkan kembali setelah mengenai obyek dan *receiver* sensor merekam pantulan tersebut sebagai data jarak (Harnanto, 2012). Sensor laser melakukan pengukuran jarak antara sensor terhadap permukaan tanah. Pengukuran jarak ada yang menggunakan prinsip beda waktu dan Beda fase (Baltasvias, 1999). Pengukuran jarak dengan prinsip beda waktu seperti persamaan (2.1) berikut:

$$R = c \frac{T}{2} \dots \dots \dots (2.1)$$

Keterangan:

- R : Jarak antara sensor dengan titik yang di ukur (m)
- T : Waktu tempuh sinyal (det)
- C : Kecepatan cahaya (3×10^8 m/det).

GPS dalam sistem LiDAR dipakai sebagai sistem penentuan posisi wahana terbang secara 3D (X, Y, Z atau L, B, h) dan IMU akan memonitor akselerasi dan rotasi dari pesawat yaitu sumbu: X (*roll*), Y (*pitch*), dan Z (*yaw* atau *heading*). Sistem IMU ini nantinya akan menentukan orientasi 3D setiap pusat proyeksi LiDAR terhadap system referensi teretentu. GPS dan IMU berguna untuk penentuan posisi pusat proyeksi setiap citra yang dihasilkan dari LiDAR. Penentuan posisi pusat proyeksi LiDAR dapat dilakukan secara *differensial*. Penentuan posisi secara *differensial* dapat

digunakan untuk penentuan posisi obyek-obyek yang diam maupun bergerak.

Karena pengukuran posisinya dilakukan secara *real time* maka metode penentuan GPS itu dinamakan *Real Time Kinematics Differential GPS* (RTK-DGPS). Ketelitian tipikal posisi yang diperoleh adalah 2–5 cm. Data GPS yang dihasilkan, digabungkan dengan data IMU sehingga diperoleh koordinat terdefinisi secara geografis.

II.2. Format data LAS

ASPRS menyusun format data LAS untuk ALS (ASPRS, 2010) menjadi beberapa *platform* perangkat lunak dan menjadi standar dalam industri ALS. Format data LAS merupakan format umum yang digunakan untuk membaca dan mentransfer data antar pengguna data 3D *point cloud*. Format data LAS berisi data biner yang terdiri dari *Header Block*, *Variable Length Record*, *Point Data*.

Public Header Block berisi data umum seperti nomor titik dan koordinatnya. *Variable Length Record* berisi jenis variabel data termasuk informasi proyeksi, metadata, dan data pengguna aplikasi. *Point Data* mencatat koordinat X, Y, dan Z secara 3D, intensitas, *laser return* dan informasi atribut lainnya (ASPRS *Standards Committee*, 2003).

Ketiga bagian ini saling berhubungan dan terkait erat. Contohnya, *Public Header Block* mencatat posisi awal dan jumlah total titik untuk data titik, dan mengatur panjang dan format untuk setiap data titik. *Public Header Blok* berisi beberapa *Variable Length Records*, Sementara *Variable Length Records* menyimpan catatan informasi tambahan dalam data titik seperti informasi metadata, informasi referensi geografis dan informasi proyeksi.

II.3. Penapisan (Filtering)

Point cloud biasanya ditapis untuk menghilangkan titik yang tidak perlu, seperti titik akibat awan dan burung, atau dalam kasus peneliiian ini, permukaan tanah di bawah kabel listrik dan vegetasi yang berbahaya. Penapisan juga biasa dilakukan untuk mengurangi ukuran file dari data *point cloud* karena *full dataset* membutuhkan daya komputasi yang tinggi dan memori penyimpanan data yang besar. Biasanya, penapisan dianggap sebagai ekstraksi dari DTM dari DSM.

Klasifikasi dianggap sebagai objek pembeda yang membedakan vegetasi, bangunan, jalan, kabel listrik, dan lain-lain dari data *point cloud* LiDAR. Selain penentuan permukaan tanah, ekstraksi bangunan, vegetasi dan fitur penting lainnya di atas tanah juga akan ditentukan.

II.4. Deteksi dan ekstraksi *powerline*

II.4.1. Hough Transform

Hough Transform adalah metode yang umum dan efisien yang digunakan dalam deteksi dan ekstraksi *powerline* (Melzer dan Briese, 2004; Liu dkk., 2009). Metode *Hough Transform* adalah metode klasik dalam menganalisis objek dari data spasial yang merupakan algoritma deteksi linear yang umum digunakan.

Hough Transform adalah jenis skema voting, yang memungkinkan setiap fitur pemilihan kompatibel dengan semua model. Sebuah garis dalam gambar koordinat X Y didefinisikan sebagai berikut:

$$y = mx + b \dots\dots\dots (2.2)$$

Keterangan:

- m = Kemiringan atau gradien
- b = Garis yang memotong sumbu Y

Sehingga sebuah garis pada bidang XY didefinisikan sebagai berikut:

$$b = -xm + y \dots\dots\dots (2.3)$$

Sesuai dengan titik (m, b) pada bidang m-b karena garis 2D memiliki total dua derajat kebebasan (*Degree of Freedom*), dapat dijelaskan oleh model dua-parametrik atau model dengan lebih dari dua parameter dan parameter tambahan (Kappa dan Groll, 2006). Garis pada bidang gambar juga dapat digambarkan dalam bentuk polar (*Hessian normal form*):

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \dots\dots\dots (2.4)$$

Keterangan:

- ρ = Jarak antara titik (0, 0) dan garis
- θ = Sudut normal dengan garis sumbu X

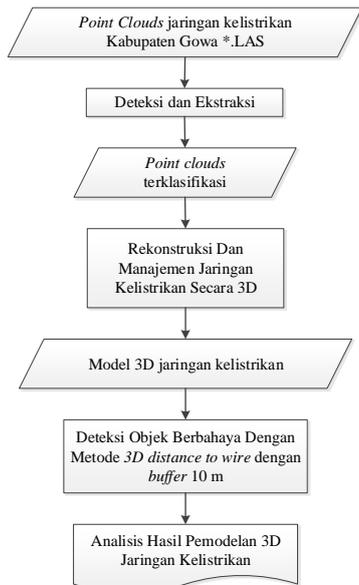
II.5. Isolasi Udara (*Ground Clearance*) di Sekitar Kawat Penghantar

Isolasi udara berfungsi untuk mengisolasi antara bagian yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan atau *ground* dan antar fasa yang bertegangan secara elektrik. Kegagalan fungsi isolasi udara disebabkan karena *breakdown voltage* yang terlampaui (jarak yang tidak sesuai, perubahan nilai tahanan udara atau tegangan lebih), dan isolasi udara (*ground clearance*) mempunyai jarak bebas minimum yaitu jarak terpendek antara penghantar SUTT atau SUTET dengan permukaan tanah, benda-benda dan kegiatan lain disekitarnya, yang mutlak tidak boleh lebih pendek dari yang telah ditetapkan demi keselamatan manusia dan makhluk hidup lainnya serta juga keamanan operasi SUTT atau SUTET (Peraturan Menteri Pertambangan dan Energi No. 01.P/47/MPE/1992 tanggal 7 Februari 1992, pasal 1 ayat 9 dan SNI 04-6918-2002).

III. Pengolahan Data LiDAR *Point Cloud* untuk Pembentukan Jaringan Kelistrikan dan Deteksi Objek Berbahaya

III.1. Tahapan Pengolahan Data

Gambar III.1 menjelaskan langkah kerja dan metodologi rekonstruksi pemodelan secara 3D jaringan kelistrikan dari pengolahan data LiDAR udara yaitu *point cloud*. Pertama-tama; area studi, kumpulan data, perangkat lunak, dan *platform* pemrograman diperkenalkan. Kedua; langkah kerja untuk membuat pemodelan dan mendeteksi objek berbahaya disajikan dengan penjelasan yang spesifik, termasuk bagaimana mendeteksi, mengekstraksi dan memodelkan secara 3D jaringan kelistrikan dengan *point cloud*. Selanjutnya, melakukan perhitungan untuk analisis ketelitian. Terakhir, menampilkan pemodelan 3D jaringan kelistrikan dan mendeteksi objek berbahaya di sekitar jaringan kelistrikan tersebut.

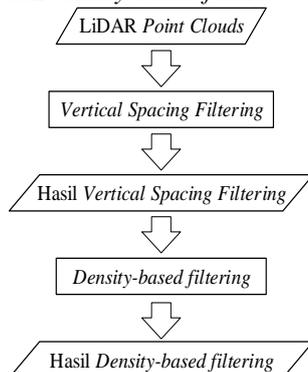


Gambar III.1 Diagram alir metodologi pelaksanaan

III.2. Proses Penapisan (Filtering)

Penapisan adalah kunci penting dalam penelitian ini. Proses penapisan merupakan proses dasar dalam melakukan ekstraksi, deteksi dan rekonstruksi yang akan dilakukan pada tahap selanjutnya. Proses penapisan dan klasifikasi biasanya dilakukan dengan prosedur yang sama. Sebelum melakukan proses penapisan, *point cloud* ditampilkan dalam tampilan 2D dengan koordinat X dan Y dengan *grid* (1 m x 1 m). Dalam setiap *grid*, tiap titik memiliki nilai ketinggian masing masing (Xiang, 2014).

Pada Gambar III.2 menjelaskan proses penapisan *point cloud* pada jaringan kelistrikan. Ada dua langkah penting dalam proses penapisan ini, yaitu *vertical spacing filter* dan *density-based filter*.

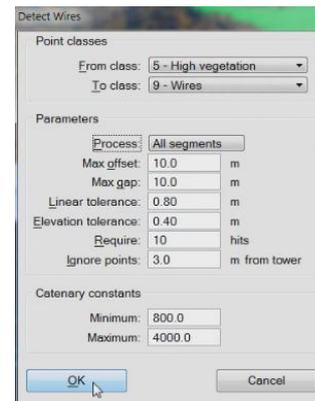


Gambar III.2. Diagram alir proses penapisan

III.3. Deteksi dan Ekstraksi Point Cloud untuk Kabel Konduktor Jaringan Kelistrikan

Metode *Hough transform* dalam penelitian ini dilakukan pada perangkat lunak *Terrasolid V15* dalam *Microstation V8* dengan algoritma probabilitas garis *Hough transform*. Menurut Xing (2014) probabilitas garis *Hough transform* adalah implementasi pendeteksian garis yang paling efisien daripada yang lain dalam kasus pendeteksian garis *powerline*, bahwa area berisi beberapa segmen *linear* yang panjang dengan output ekstrem dari garis terdeteksi (x0, y0, x1,

y1).Kemudian melakukan *Hough transform* ke tepi gambar 2D untuk menemukan garis-garis lurus.

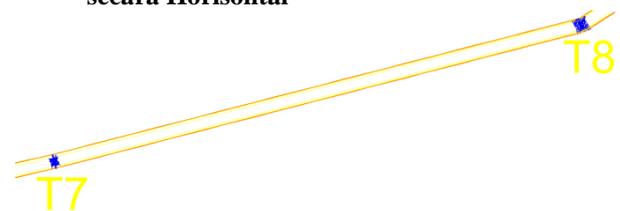


Gambar III.3. Parameter dalam melakukan deteksi titik garis dalam perangkat lunak *terrasolid V8*

Gambar III.3 menunjukkan *detect wires tool* dalam menemukan *point cloud* yang membentuk kurva melengkung (*catenary curve*). Perintah ini menarik kabel terdeteksi sebagai garis vektor dalam berkas desain dan mengklasifikasikan titik yang sesuai pada kelas tertentu. Lebih lanjut, perintah ini juga mencari titik yang membentuk garis lurus dan juga sesuai dengan ketinggian kurva melengkung. Proses ini juga menggunakan perhitungan *least squares fitting* untuk kedua persamaan garis xy dan persamaan ketinggian kurva.

Deteksi biasanya dimulai dengan *maximum gap* yang kecil agar semua kabel konduktor terdeteksi dengan benar. Seandainya tidak semua kabel konduktor terdeteksi, ini berarti pada segmen tersebut terdapat sedikit *point cloud* yang mengenai kabel konduktor, maka dapat dilakukan deteksi secara manual, yang akan di jelaskan dalam sub bab selanjutnya.

III.4. Rekonstruksi Kabel Jaringan Kelistrikan secara Horizontal



Gambar III.4. Garis vektor kabel konduktor pada *powerline* (horizontal)

Dari Gambar III.4 mengacu pada persamaan (2.5), garis dapat digambarkan dalam format $\rho = x \cos \theta + y \sin \theta$ (2.4) pada bidang XY. Jika (x_i, y_i) adalah titik yang dipilih secara acak,

$$\theta = \arccos\left(\frac{\xi_1}{\sqrt{\xi_1^2 + \xi_2^2}}\right) \dots\dots\dots (3.1)$$

$$\rho = -\frac{\xi_1}{\sqrt{\xi_1^2 + \xi_2^2}} \dots\dots\dots (3.2)$$

Keterangan:

- ρ = Jarak antara titik (0, 0) dan garis
- ξ = Vektor eigen dari matriks S
- θ = Sudut normal ke garis dari sumbu X

III.5. Deteksi Objek Berbahaya Disekitar Kabel Jaringan Kelistrikan

Menurut buku panduan dan tutorial *terrasolid V15* bagian panduan manual *terrascan*, terdapat tiga metode yang berbeda tentang bagaimana mendefinisikan objek berbahaya:

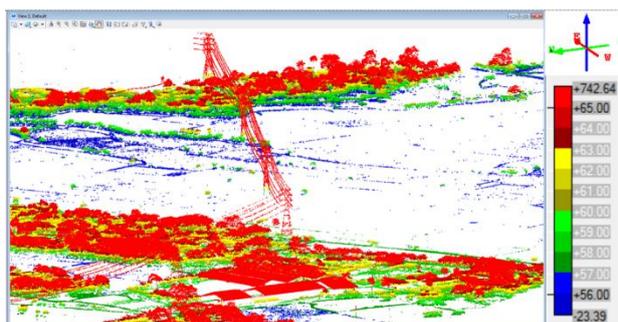
1. *Vertical distance to wire* (jarak vertikal dari kabel): titik-titik berbahaya dicari dengan radius 3D sekeliling kabel, namun yang dicatat hanya jarak secara vertikal dari kabel ke arah bawah.
2. *3D distance to wire* (jarak 3D disekitar kabel) : titik-titik berbahaya dicari dengan radius 3D sekeliling setiap kabel.
3. *Falling tree logic* (logika tumbangya pohon): setiap titik vegetasi yang terlalu dekat dengan *powerline* dapat dianggap sebagai pohon yang dapat tumbang dan mengenai *powerline*. Perhitungan pohon tumbang (*falling tree computation treat*) dilakukan pada setiap titik vegetasi yang bisa sebagai ujung dari pohon yang merupakan sebuah cabang dari batang pohon dengan koordinat XY.

IV. Analisis Hasil Pemodelan 3D dan Deteksi Objek Berbahaya di Sepanjang Koridor Jaringan Kelistrikan

IV.1. Analisis Hasil Deteksi dan Ekstraksi Jaringan Kelistrikan

IV.1.1. Vertical Spacing Filtering

Gambar IV.1 menunjukkan sudut pandangan dari *point cloud* setelah penapisan berdasarkan jarak vertikal dengan 10.350.515 titik. Dengan melihat *Gambar IV.1*, jelas menunjukkan bahwa titik-titik pada tanah di bawah *powerline* dan vegetasi rendah (*low vegetation*) di bidang vertikal telah diseleksi. Titik-titik tersebut sekarang berjumlah 2.174.898 titik, atau sekitar 17,36% dari jumlah total titik dari *point cloud* awal.

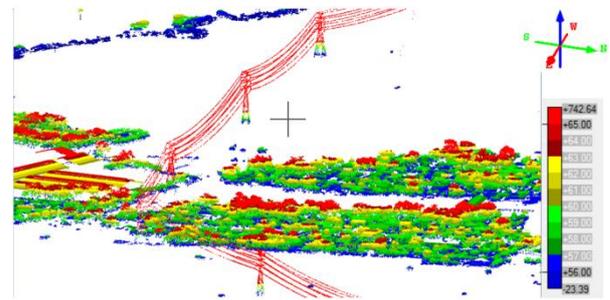


Gambar IV.1. Hasil penapisan berdasarkan jarak vertikal dengan menghilangkan titik-titik tanah dan vegetasi rendah

IV.1.2. Density-based Filtering

Dalam penelitian ini, penapisan berbasis kerapatan titik dilakukan dengan memperbesar jangkauan pencarian dari tetangga. Pengaturan ambang batas pada algoritma penapisan berbasis kerapatan titik merupakan langkah penting dalam seluruh proses. Kerapatan titik vegetasi dan bangunan menjadi menipis sedangkan titik-titik calon *powerline* di sepanjang

koridor tetap ada. Pada *Gambar IV.2* dengan jelas menunjukkan bahwa titik calon *powerline* memiliki kerapatan titik yang lebih baik dibandingkan dengan vegetasi dan bangunan, yang memiliki titik-titik yang jarang.



Gambar IV.2. Hasil penapisan berdasarkan kerapatan titik (tampak depan)

Pada *Gambar IV.2* menunjukkan hasil *point cloud* setelah penapisan berdasarkan kerapatan titik berjumlah 12.499.972 titik. Dibandingkan dengan penapisan berdasarkan jarak vertikal *point cloud* berjumlah 2.149.457 titik, sekitar 82,84% titik telah diseleksi. Setelah selesai penapisan, 25.441 titik, sekitar 99,797% dari total titik pada *point cloud* awal diseleksi pada langkah penapisan ini. Dengan kesimpulan, penapisan berdasarkan kepadatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah lebih baik daripada penapisan berdasarkan jarak vertikal karena membuat lebih banyak titik *powerline* yang tersisa, terutama pada seleksi titik untuk kable dan tiang yang tersisa, namun penapisan berdasarkan kerapatan titik akan sulit dilakukan jika penapisan berdasarkan jarak vertikal tidak dilakukan terlebih dahulu.

IV.2. Hasil Rekontruksi Sambungan Kabel Konduktor Antar Segmen Powerline dari Analisis Statistik Gap yang Telah Diketahui

Perangkat lunak *terrascan* dapat mencari posisi kabel yang belum tersambung pada setiap segmen dengan menggunakan aplikasi *check catenary attachment*, dengan memperhitungkan antara kabel yang datang dan kabel yang keluar dari posisi tiang X, Y, Z dan *shift* (pergeseran tiang). Dari hasil statistik gap awal dapat diketahui kualitas data hasil pembuatan vektor garis *powerline* pada setiap segmen.

Batas toeransi ini di ambil dari buku panduan manual perangkat lunak *terrasolid V15*. Dimana untuk batas gap X dan Y adalah 30 cm, Z adalah 20 cm dan *shift* 100 cm. Adanya gap tidak dapat tersambung kerana 2 alasan. Alasan tersebut yaitu: pertama, secara logika komputasi tiga komponen gap telah melebihi batas toleransi. Kedua, khusus untuk *tower* 1 dan 8 adalah ujung tepi dari koridor area studi sehingga tidak mendapatkan sambungan kabel.

Gambar IV.3 menunjukkan nilai maksimum gap X dan Y sebesar 101,6 cm dan nilai maksimum gap Z sebesar 35,5 cm. jika melihat nilai maksimum gap yang ada, dapat di evaluasi bahwa pada tiang ke-5 dan ke-6 yang paling buruk kualitas sambungannya. Hal ini di sebabkan karena posisi tiang ke-5 berada pada posisi *point cloud* yang kerapatan titiknya rendah akibat

overlap antar jalur terbang ketika akuisisi data. Namun jika dilihat dari nilai rata-rata gap yang terdeteksi, hasil ini cukup bagus karena nilai rata-rata tersebut berada di bawah nilai toleransi. Yaitu rata-rata nilai gap X dan Y adalah 24,3 cm masih di bawah toleransi (30 cm) dan Z adalah 7,7 cm masih di bawah toleransi (20 cm).

Attachment Statistics	
Attachments:	38
Loose ends:	36
Average xy gap:	24.3 cm
Average z gap:	7.7 cm
Maximum xy gap:	101.6 cm
Maximum z gap:	35.5 cm

Gambar IV.3. Hasil analisis statistik gap awal sebelum dilakukan penyambungan gap

Gambar IV.4 merupakan hasil analisis statistik akhir dari koreksi gap untuk sambungan kabel konduktor dalam pemodelan *powerline*. Nilai rata-rata dan maksimum gap menjadi 0 cm, hal ini menunjukkan bahwa semua sambungan kabel telah tersambung dengan sempurna sehingga siap untuk dianalisis lebih lanjut untuk pembuatan model tiang dan deteksi objek berbahaya.

Attachment merupakan jumlah kabel yang tersambung, sedangkan *loose ends* adalah jumlah kabel yang berada di ujung-ujung koridor sehingga tidak memiliki sambungan. Pada setiap segmen terdapat 8 bentangan kabel konduktor sehingga logis jika terdapat 64 sambungan kabel dari 8 segmen yang ada.

Attachment Statistics	
Attachments:	64
Loose ends:	16
Average xy gap:	0.0 cm
Average z gap:	0.0 cm
Maximum xy gap:	0.0 cm
Maximum z gap:	0.0 cm

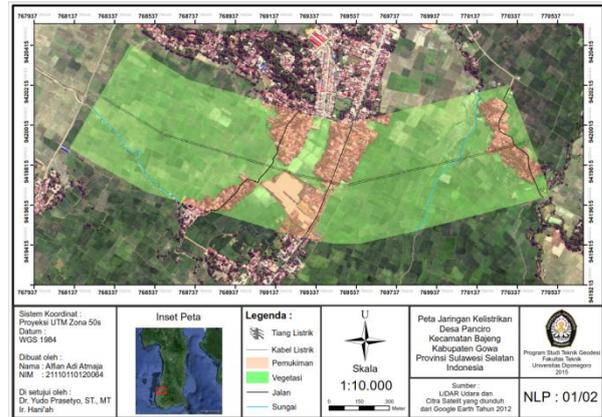
Gambar IV.4. Hasil statistik gap akhir setelah dilakukan koreksi penyambungan gap

IV.3. Analisis Hasil Pemodelan 3D Jaringan Kelistrikan

Gambar IV.5 dan Gambar IV.6 merupakan Hasil pemodelan 3D jaringan kelistrikan dengan menyajikan hasil yang sudah dilakukan pemodelan tiang listrik dengan perangkat lunak *Terrascan* dan pewarnaan *point cloud* sesuai keadaan di lapangan yang merupakan hasil proses dari fusi citra satelit dengan perangkat lunak *Terraphoto*.



Gambar IV.5. Hasil pemodelan jaringan kelistrikan secara 3D



Gambar IV.6 Hasil pemodelan jaringan kelistrikan secara 3D tampilan dari atas

Dari titik-titik LiDAR yang dikenal dengan nama *point cloud* di sepanjang koridor memperlihatkan bentangan kabel konduktor dan lokasi tiang-tiang listrik yang saling menghubungkannya. Adapun panjang koridor jaringan kelistrikan adalah 2168,5351 m yang terbagi menjadi 7 segmen yang di dalamnya terdapat 8 tiang yang telah dianalisis. Tiap tiang Memiliki 4 *Cross Arm* atau lebar lengan dengan tiap lengan menopang 2 kabel listrik.

IV.4. Analisis Ketelitian Pemodelan Kabel Powerline

Bagian ini membahas perbandingan ketelitian pemodelan kabel *powerline*, baik secara manual dan otomatis. pengukuran tersebut menggunakan perangkat lunak *Terrascan*. Adapun yang di ukur adalah jarak secara 3D titik-titik pada kelas *wire* yang berada disekitar kabel *powerline*. Agar lebih jelas dapat dilihat pada Gambar IV.7.



Gambar IV.7. Sketsa pengukuran jarak secara 3D titik-titik pada kelas wire yang berada disekitar kabel *powerline*

Sebagai sampel dari analisis ketelitian pemodelan kabel maka dipilih kabel ke-4 pada segmen 7-8, kerana pada bentangan kabel tersebut memiliki rata-rata kerapatan titik yang cukup baik dan merata yaitu antara 0,5 m–1 m. Dari hasil deteksi jarak titik secara 3D di sekitar bentangan kabel pada segmen tersebut terdapat 467 titik yang terdeteksi pada metode manual dan 469 titik pada metode otomatis. **Error! Reference source not found.** merupakan sampel data perbandingan jarak titik ke kabel yang terdeteksi, diambil 163 sampel dari seluruh titik yang terdeteksi yang selanjutnya akan digunakan untuk analisis statistika yaitu uji normalitas menggunakan tes *Kolmogorov-Smirnov*, lalu uji korelasi dan uji perbandingan dengan *paired samples T-test*.

Tabel IV.1. Sampel data perbandingan jarak titik ke kabel secara 3D antara metode manual dan otomatis

No	Koordinat Titik		Jarak titik Ke kabel			Δ	No titik
	X	Y	Z	Manual	Otomatis		
1	770062,76	9419844,14	95,82	0,07	0,06	0,01	1
2	770062,91	9419844,18	95,72	0,11	0,10	0,01	2
3	770063,28	9419844,04	95,8	0,16	0,17	0,01	3
4	770064,17	9419844,49	95,73	0,07	0,08	0,01	4
5	770064,20	9419844,54	95,79	0,14	0,15	0,01	5
6	770064,55	9419844,37	95,67	0,16	0,17	0,01	6
7	770065,16	9419844,78	95,5	0,11	0,11	0,00	7
8	770065,38	9419844,76	95,39	0,17	0,16	0,01	9
9	770065,51	9419844,81	95,56	0,03	0,03	0,00	10
10	770066,44	9419845,08	95,44	0,05	0,05	0,00	12
11	770066,76	9419845,21	95,32	0,14	0,13	0,01	13
12	770067,69	9419845,42	95,32	0,07	0,06	0,01	14
13	770071,08	9419846,08	95,05	0,15	0,16	0,01	20
14	770071,51	9419846,38	94,96	0,04	0,04	0,00	21
15	770071,74	9419846,52	94,91	0,12	0,11	0,01	22
16	770072,81	9419846,54	94,87	0,14	0,14	0,00	24
17	770073,00	9419846,78	94,82	0,05	0,05	0,00	26
18	770073,67	9419846,85	94,86	0,11	0,12	0,01	27
19	770074,21	9419847,06	94,74	0,04	0,05	0,01	28
...
...
163	770263,16	9419895,94	87,92	0,10	0,09	0,01	467

Dari data perbandingan Tabel IV.1 (ukuran dalam meter), maka dapat dihitung nilai:

- Jumlah |Δ| = 1,13 m
- Minimum |Δ| = 0,00 m
- Rata-rata |Δ| = 0,01 m
- Maksimum |Δ| = 0,02 m
- Nilai RMS |Δ| = 0,00862 m

IV.5. Analisis Statistika Uji Signifikansi Perbandingan Ketelitian Pemodelan Kabel Powerline

Subbab ini dilakukan analisis uji statistika dengan menggunakan teknik uji *paired samples T-test*. Uji statistika yang dilakukan didasarkan atas uji signifikansi terhadap dua metode pemodelan kabel *powerline* (Manual dan Otomatis). Agar lebih jelas, uji statistika dapat diuraikan sebagai berikut:

IV.5.1. Tes satu sampel Kolmogorov-Semirnov

Setelah dilakukan pengujian dengan SPSS berdasarkan pada uji *Kolmogorov-Semirnov* dengan tingkat kepercayaan 95%, maka data hasil pengukuran jarak titik ke kabel secara 3D antara metode manual dan otomatis terdistribusi normal (H_0). Hal ini di buktikan dengan nilai *Asymp. Sig. (2-tailed)* berturut-turut data manual dan otomatis adalah 0,200 dan 0,087 yang keduanya lebih besar dari 0,05 (batas kepercayaan).

IV.5.2. Tes korelasi dengan *paired samples*

Berdasarkan uji *paired samples correlations* dengan tingkat kepercayaan 95%, maka data hasil pengukuran jarak titik ke kabel secara 3D antara metode manual dan otomatis ada hubungan erat (H_0). Hal ini di buktikan dengan nilai *correlation* sebesar 0,974 (mendekati nilai 1) yang artinya data ini berkorelasi dengan cukup baik. Untuk nilai *Sig.* sebesar 0,000 lebih kecil dari 0,05 (batas kepercayaan) yang berarti ada hubungan erat antara data hasil pengukuran jarak titik ke kabel secara 3D antara metode manual dan otomatis. Maksud dari hubungan erat yaitu metode manual dan

otomatis dapat saling menggantikan dalam melakukan pemodelan kabel *powerline* secara 3D.

IV.5.3. Tes *paired samples*

Setelah dilakukan pengujian dengan SPSS, berdasarkan pada *paired samples test* (dengan tingkat kepercayaan 95%, maka data hasil pengukuran jarak titik ke kabel secara 3D antara metode manual dan otomatis tidak ada perbedaan signifikan (H_A). Hal ini di buktikan dengan nilai *Sig. (2-tailed)* atau nilai signifikansi sebesar 0,084 lebih besar dari 0,05 (batas kepercayaan), yang berarti tidak ada perbedaan signifikan dari kedua data hasil pengukuran jarak titik ke kabel secara 3D antara metode manual dan otomatis.

IV.5.4. Uji hipotesis perbandingan

Untuk tahapan terakhir dilakukan pengujian statistika dengan metode uji *Hipotesis perbandingan antara 2 variansi populasi*. Pengujian dengan SPSS berdasarkan pada *paired samples test* satu sisi dengan tingkat kepercayaan 95%, maka data hasil pengukuran jarak titik ke kabel secara 3D antara metode manual lebih teliti di banding dengan metode otomatis ($H_A = \frac{S_1^2}{S_2^2} > 1$). Hal ini di buktikan dengan nilai $H_A = 1,026$ atau nilai H_A sebesar 1,026 lebih besar dari 1, yang berarti rekonstruksi garis kabel *powerline* dengan metode manual secara statistik lebih baik daripada rekonstruksi garis kabel *powerline* dengan metode otomatis.

IV.6. Analisis Hasil Objek Berbahaya yang Telah Terdeteksi

Persyaratan ruang bebas horisontal dan vertikal SUTET maupun SUTT telah ditetapkan oleh pemerintah dan telah dibuat standarisasinya dalam SNI 04-6918-2002 tentang ruang bebas dan jarak bebas minimum pada SUTT dan SUTET. Salah satu area yang telah diakuisisi oleh PT. ASI Pudjiastuti Gesourvey di Kabupaten Gowa Provinsi Sulawesi Selatan mempunyai spesifikasi SUTT 150 Kv. Sesuai dengan standar SNI, maka jarak bebas vertikal dari lengkungan kabel terendah di tengah segmen adalah 5 m dari atap bangunan; 13,5 m untuk jalan dan 9 m dari ujung tanaman di perkebunan. Sedangkan total jarak bebas horisontal adalah sebesar 10 m.

IV.6.1. Objek Berbahaya yang Terdeteksi Dengan Metode 3D Distance to Wire



Gambar IV.8. Objek berbahaya yang terdeteksi di sepanjang koridor jaringan kelistrikan dengan *buffer* 10 meter dari kabel pada segmen T7-T8

LiDAR mempunyai kemampuan untuk bisa melihat pandangan dari samping atau *cross section* dan memanjang atau *long section*. Karena *point cloud* LiDAR semuanya berkoordinat 3D, maka bisa dilakukan pengukuran horisontal dan vertikal untuk mengetahui objek berbahaya disekitarnya. Dari hasil pengamatan dan pengolahan data disepanjang koridor jaringan kelistrikan yang diakuisisi di kabupaten Gowa Makassar pada bulan Mei 2012, *Gambar IV.8* menunjukkan bahwa dari semua segmen tidak ada objek berbahaya terdeteksi. Sedangkan pada segmen T7-T8 ada sedikit obyek berbahaya yang terdeteksi, ditunjukkan dengan lingkaran berwarna merah. Objek berbahaya tersebut merupakan vegetasi yang ketinggiannya melebihi batas toleransi yang ditentukan yaitu 10 m. Dalam klasifikasi *point cloud* pada kelas *danger object*, objek ini berjumlah 379 titik dengan tinggi minimum 69,39 m dan tinggi maksimum 73,13 m dari MSL.



Gambar IV.9. Objek berbahaya yang terdeteksi di sekitar kabel dengan *buffer* 10 meter dari kabel pada segmen T7-T8 tampak dari atas



Gambar IV.10. Penampang memanjang objek berbahaya yang terdeteksi di sekitar kabel dengan *buffer* 10 meter dari kabel pada segmen T7-T8



Gambar IV.11. Penampang melintang objek berbahaya yang terdeteksi di sekitar kabel dengan *buffer* 10 meter dari kabel pada segmen T7-T8

Untuk lebih jelas dapat dilihat pada *Tabel IV.2* hasil analisis koridor tiap segmen, yang menjelaskan tentang hasil secara menyeluruh dari area studi yang sesuai dengan SNI 04-6918-2002 tentang ruang bebas dan jarak bebas minimum pada SUTT 150 kV dengan analisis koridor tiap segmen, dimana tiap segmen dianalisis pada tiap kabelnya yang telah di *buffer* 10 m pada area sekitar kabel dengan 2 kategori yaitu aman

dan bahaya, dimana kategori aman menunjukkan bahwa tidak ada objek berbahaya di sekitar kabel dengan klasifikasi *point cloud* yang berwarna hijau. Sedangkan kategori bahaya ditunjukkan dengan adanya objek yang berbahaya di sekitar kabel dengan klasifikasi warna merah seperti pada segmen T7-T8 yang dapat dilihat pada *Gambar IV.9*.

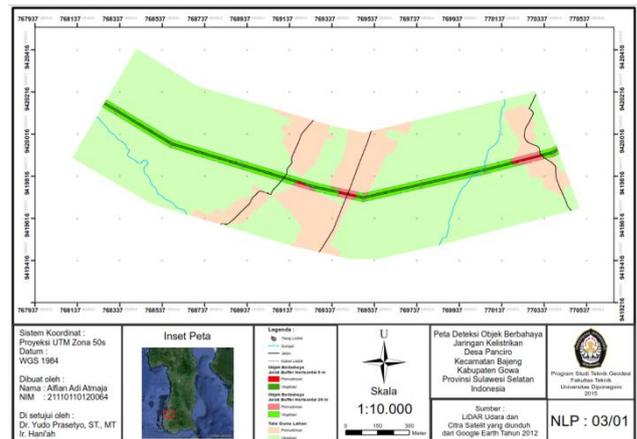
Tabel IV.2. Hasil Analisis Koridor persegmen

Segmen	Jarak antar tower (m)	Tiang	Objek Berbahaya							
			Kabel 1	Kabel 2	Kabel 3	Kabel 4	Kabel 5	Kabel 6	Kabel 7	Kabel 8
T1 - T2	303,8259	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
T2 - T3	348,8574	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
T3 - T4	350,4333	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
T4 - T5	242,9922	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
T5 - T6	279,8957	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
T6 - T7	310,6304	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
T7 - T8	332,3538	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Bahaya	Bahaya

IV.6.2. Objek Berbahaya yang Terdeteksi Secara Horisontal dengan Metode Buffer

Sesuai SNI 04-6918-2002 tentang standar jarak babas minimum horisontal dari sumbu vertikal tiang, dimana pada SUTT 150 kv standar jarak dari sumbu vertikal menara atau tiang ke konduktor (L) sebesar 2,25 m, standar jarak horisontal akibat ayunan konduktor (H) sebesar 2,05 m, dan standar jarak bebas Impuls petir (I) sebesar 1,5 m. Sehingga total standar jarak aman secara Horisontal (L+H+I) adalah 5,8 m atau dapat dibulatkan menjadi 6 m.

Dalam penelitian ini ditentukan *buffer* sebesar 6 m dan 20 m, ditentukan 6 m karena sesuai dengan SNI 04-6918-2002 yaitu jarak horisontal objek berbahaya dihitung dari sumbu vertikal tengah tiang, sedangkan *buffer* 20 m ditentukan dari rata-rata maksimum lebar lengan (*cross arm*) tiang yaitu 4 m ke kanan dan kiri. Sehingga dari kabel paling tepi baru akan di hitung secara horisontal 6 m.



Gambar IV.12. Peta hasil deteksi objek berbahaya jaringan kelistrikan secara horisontal dengan *buffer* sebesar 6 m dan 25 m

Dari *Gambar IV.12* diketahui bahwa objek berbahaya yang terdeteksi secara horisontal dari *buffer* 6 m untuk zona pemukiman seluas 3.213,066 m dan zona vegetasi seluas 23.871,262 m. Sedangkan dari *buffer* 20 m objek berbahaya yang terdeteksi pada zona

pemukiman seluas 10.978,951 m dan zona vegetasi seluas 79.297,750 m.

V. Kesimpulan dan Saran

V.1. Kesimpulan

Dari hasil pemodelan jaringan kelistrikan secara 3D dari data LiDAR udara *point cloud* dengan metode *Hough Transform*, dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut:

1. Hasil penapisan berdasarkan jarak vertikal telah menyeleksi *point cloud* sebanyak 82,84% sedangkan penapisan berdasarkan kerapatan titik telah menyeleksi *point cloud* sebanyak 99,797%. Sehingga dapat diambil kesimpulan bahwa penerapan metode penapisan berdasarkan kerapatan titik lebih baik daripada penapisan berdasarkan jarak vertikal. Hal ini dikarenakan penerapan metode penapisan berdasarkan kerapatan titik dapat menyeleksi *point cloud* lebih banyak daripada penapisan berdasarkan jarak vertikal, namun penapisan berdasarkan kerapatan titik akan sulit dilakukan jika penapisan berdasarkan jarak vertikal tidak dilakukan terlebih dahulu.
2. Nilai maksimum gap X dan Y sebesar 101,6 cm dan nilai maksimum gap Z sebesar 35,5 cm. jika melihat nilai maksimum gap yang ada, dapat dianalisis bahwa pada tiang ke-5 dan ke-6 yang paling buruk kualitas sambungannya. Sedangkan yang paling baik kualitas sambungannya adalah tiang ke-7.
3. Perbandingan akurasi ketelitian proses pemodelan 3D jaringan kelistrikan dari data LiDAR berdasarkan metode *Hough Transform* dengan metode manual dibandingkan dengan metode otomatis berdasarkan uji statistik dengan tingkat kepercayaan 95% menyatakan baik metode manual dan otomatis memiliki distribusi data yang normal dan memiliki korelasi yang kuat dengan kata lain dapat saling menggantikan, selain itu antara dua metode tersebut secara kualitatif dan kuantitatif juga tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Lalu, secara statistik hasil dari perbandingan ini menyatakan bahwa metode manual dinyatakan lebih baik dalam melakukan pemodelan kabel *powerline* secara 3D di bandingkan metode otomatis. Namun dari segi efisiensi pekerjaan, metode otomatis merupakan metode yang sangat praktis untuk digunakan dalam pemodelan kabel *powerline* karena parameter pemodelan 3D hanya dimasukkan satu kali dalam pemodelan sepanjang koridor.
4. Objek berbahaya yang terdeteksi secara 3D dari kabel *powerline* hanya terdapat pada segmen T7-T8, objek tersebut berupa vegetasi, jumlah titik yang terdeteksi sebagai objek berbahaya sebanyak 379 atau 0,003% dari total *point cloud* yang diproses. Sedangkan objek berbahaya yang terdeteksi secara horisontal dari *buffer* 6 m untuk zona pemukiman seluas 3.213,066 m dan zona vegetasi seluas 23.871,262 m.

V.2. Saran

Saran untuk pelaksanaan penelitian berikutnya yaitu:

1. Kajian yang dilakukan terhadap sistem jaringan kelistrikan di Indonesia baru sebatas pada jaringan besar SUTT dan SUTET dengan ukuran transmisi konduktor yang relatif lebih besar. Berbeda dengan jaringan kabel rumah tangga yang mempunyai ukuran konduktor lebih kecil. Perlu dilakukan kajian optimalisasi fungsi LiDAR di jaringan listrik rumah tangga yang umumnya lebih ruwet dan tidak teratur kondisinya. Namun dengan kelebihan dan kekurangannya, *point cloud* LiDAR 3D memang bisa dibilang sebagai teknologi revolusioner sekaligus teknologi alternatif untuk melakukan pemantauan jaringan listrik yang saat ini seolah-olah tanpa kontrol.
2. *Monitoring* di lapangan kondisi jaringan listrik memang sulit dilakukan secara konvensional, terlebih bila kontrol harus dilakukan terhadap jaringan integrasi yang sudah dibuat saat ini seperti jaringan Jawa-Bali-Madura. Dibutuhkan keseriusan dari pengelola jaringan untuk membangun basis data terintegrasi dengan data peta skala besar dan data 3D. Mau tidak mau, pengelola jaringan sudah harus menyiapkan diri ke arah sana untuk membangun sistem listrik terpadu sekaligus manajemen terpadu untuk mengefisienkan sekaligus mengefektifkan jaringan yang sudah ada mengingat kebutuhan listrik nasional sudah bisa dikategorikan sebagai kebutuhan pokok dalam kehidupan sehari-hari.
3. Untuk meningkatkan kualitas hasil pemodelan 3D jaringan kelistrikan sebaiknya dikombinasikan dengan foto udara ortho dengan metode LiDAR Grametri dan untuk mendapatkan data ukuran pembanding yang lebih teliti dapat dilakukan validasi ke lapangan secara langsung dengan metode pengukuran terestris.

Daftar Pustaka

- Baltsavias, E.P., 1999. Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources, *Remote Sensing of Environment*, 54(2-3):164-198.
- Harnanto, J. A., 2012, Evaluasi Ketelitian Elevasi Hasil Akuisisi ALS Dengan Pengukuran Topografi menggunakan Total Station Pada Daerah Tambang Batubara, Skripsi Yogyakarta: Jurusan Teknik Geodesi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
- Kapp, A., dan Gröll, L. 2006. *Optimal estimation of line segments in noisy lidar data. Signal Processing*, 86(9), 2304-2317.
- Liu, Y., Li, Z., Hayward, R., Walker, R., dan Jin, H. 2009. *Classification of airborne LIDAR intensity data using statistical analysis and Hough Transform with application to power line*

corridors. Melbourne, Australia: *In Proceedings of the IEEE Digital Image Computing: Techniques and Applications*, DICTA, 1–3 December 2009.

Melzer, T., dan Briese, C. 2004. *Extraction and modeling of powerlines from ALS point clouds. In Proceedings of 28th Workshop*, 47-54.

Xing, Q. 2014. *3D Reconstruction of 138 KV Powerlines from Airborne LiDAR Data*. Canada: *A thesis University of Waterloo*

Referensi Peraturan Perundangan

Standar Nasional Indonesia (SNI 04-6918-2002) mengenai ruang bebas dan jarak bebas minimum pada Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) dan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET).

Peraturan Menteri Pertambangan dan Energi No. 01/P/MPE/Tahun 1992 tentang Ruang Bebas SUTT dan SUTET untuk Penyaluran Tenaga Listrik.

Sumber dari Situs Internet

Fernandez, J. C. (2011). *Lifting the Canopy Veil*. http://www.imagingnotes.com/go/articlefreeJ.php?mp_id=264#1. Diakses pada tanggal 03 November 2014.

ASPRS Standards Committee. 2010. *LASer (LAS) File Format Exchange Activities*. Retrieved from <http://www.asprs.org/Committee-General/LASer-LAS-File-Format-Exchange-Activities.html>. Diakses pada tanggal 03 November 2014.

ASPRS Standards Committee. 2003. *ASPRS LIDAR Data Exchange Format Standard, Version 1.0*. http://www.asprs.org/a/society/committees/standards/asprs_las_format_v10.pdf. Diakses pada tanggal 03 November 2014.