BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Batubara merupakan salah satu bahan galian yang sangat penting sebagai bahan bakar alternatif setelah minyak bumi. Mengingat semakin menipisnya cadangan minyak bumi (Triono, 2014). Kegiatan survey pada usaha pertambangan merupakan kegiatan pendukung yang sangat penting, baik pada tahap persiapan (eksplorasi), selama kegiatan operasional, maupun pada tahap penutupan tambang (Mahfudz, 2012).

TLS merupakan teknologi pemetaan secara terestris berupa alat yang dapat memindai permukaan objek dengan menggunakan gelombang cahaya tampak yang ditransmisikan ke objek yang dipetakan kemudian dipantulkan dan diterima kembali oleh alat, sehingga jarak dari alat ke objek yang dipindai dapat diketahui. Keunggulan dari *TLS* adalah dapat memancarkan hingga 500.000 titik perdetik sehingga dapat langsung memindai permukaan objek yang terbentuk dari kumpulan titik tersebut (Quintero dkk., 2008).

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengkaji penggunaan metode fotogrametri menggunakan wahana *Unmanned Aerial Vehicle* (*UAV*) sebagai alternatif dari metode pengukuran terestris menggunakan *Terrestrial Laser Scanner* (*TLS*) dalam pemodelan tiga dimensi topografi tambang batubara. Pemanfaatan *UAV* dinilai mampu meningkatkan efisiensi operasional dari segi waktu akuisisi data, fleksibilitas cakupan area, serta kemudahan mobilisasi peralatan di area tambang terbuka yang dinamis.

Penelitian dilaksanakan pada area pertambangan batubara PT. Pamapersada Nusantara *site* Asmi, yang berlokasi di Kecamatan Kapuas Tengah, Kab. Kapuas, Kalimantan Tengah. Area penelitian dipilih karena memiliki karakteristik morfologi pit yang kompleks dengan variasi elevasi signifikan dan aktivitas pengupasan *overburden* yang aktif, sehingga membutuhkan data topografi yang akurat untuk mendukung perencanaan dan pengendalian operasional tambang.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana hasil pembentukan *Digital Terrain Model* (*DTM*) dari data *UAV* fotogrametri dan *Terrestrial Laser Scanner* (*TLS*) menggunakan metode interpolasi *Nearest Neighbor*, *Inverse Distance Weighting* (*IDW*), dan *Triangulated Irregular Network* (*TIN*) pada *Area of Interest* (*AOI*) yang sama?
2. Berapakah nilai akurasi vertikal (*RMSEz*) pada model *DTM* hasil data *UAV* dan *TLS* terhadap titik sampel (*GPS/GNSS*), serta termasuk ke dalam Kelas Akurasi Vertikal manakah model tersebut berdasarkan standar *ASPRS Positional Accuracy Standards* (2024)?
3. Bagaimana perbandingan visual dengan metode penampang melintang *DTM UAV* dan *DTM TLS* menggunakan metode interpolasi *Nearest Neighbor*, *Inverse Distance Weighting* (*IDW*), dan *Triangulated Irregular Network* (*TIN*)?

1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui hasil pembentukan *Digital Terrain Model* (*DTM*) menggunakan metode *Unmanned Aerial Vehicle* (*UAV*) dan *Terrestrial Laser Scanner* (*TLS*) pada area pertambangan batubara PT. Pamapersada Nusantara *site* Asmi, sehingga diperoleh gambaran karakteristik data elevasi dari masing-masing metode sebagai dasar evaluasi kualitas model permukaan tanah.
2. Mengetahui besarnya nilai akurasi vertikal (*RMSEz*) pada *DTM* hasil interpolasi *Nearest Neighbor*, *Inverse Distance Weighting* (*IDW*), dan *Triangulated Irregular Network* (*TIN*) dari data *UAV* dan *TLS* berdasarkan titik sampel hasil pengamatan *GNSS*.

3. Mengetahui perbandingan visual dengan metode penampang melintang *DTM UAV* dan *DTM TLS* menggunakan metode interpolasi *Nearest Neighbor*, *Inverse Distance Weighting* (*IDW*), dan *Triangulated Irregular Network* (*TIN*)?

Manfaat dari penelitian ini adalah :

1. Memberikan rekomendasi metode pemetaan topografi yang paling sesuai untuk diterapkan pada tambang batubara berdasarkan hasil analisis ketelitian vertikal, guna mendukung pengambilan keputusan teknis serta meningkatkan akurasi perhitungan volume dan monitoring perubahan permukaan tambang.
2. Menjadi bahan evaluasi dalam pemanfaatan teknologi survei geospasial di lingkungan pertambangan, khususnya dalam menentukan efisiensi dan efektivitas penggunaan *UAV* maupun *TLS*.
3. Meningkatkan kualitas pengelolaan data topografi tambang yang mengacu pada standar akurasi yang berlaku, seperti yang ditetapkan oleh *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (*ASPRS*).

1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian ini terfokus dan tidak menyimpang dari tujuan yang telah ditetapkan, maka batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian dilakukan pada area pertambangan batubara PT. Pamapersada Nusantara *site* Asmi, Barunang, Kapuas Tengah, Kab. Kapuas, Kalimantan Tengah, dengan cakupan area yang telah ditentukan sebagai lokasi studi.
2. Data yang dianalisis terbatas pada *Digital Terrain Model* (*DTM*) dengan metode interpolasi *IDW*, *TIN* dan *Nearest Neighbor* yang dihasilkan dari *Unmanned Aerial Vehicle* (*UAV*) fotogrametri dan *Terrestrial Laser Scanner* (*TLS*).

3. Analisis difokuskan pada ketelitian vertikal (*vertical accuracy*), yang dihitung menggunakan metode *Root Mean Square Error* (*RMSEz*) berdasarkan titik sampel.
4. Evaluasi akurasi vertikal mengacu pada standar yang ditetapkan oleh *ASPRS Positional Accuracy Standards* Edition (2024).
5. Perbandingan dilakukan terhadap nilai elevasi dan analisis penampang melintang berdasarkan *DTM* masing-masing metode interpolasi.
6. Sistem referensi tinggi yang digunakan sebagai acuan untuk seluruh data *Digital Terrain Model* (*DTM*), baik yang dihasilkan dari *Terrestrial Laser Scanner* (*TLS*) maupun *Unmanned Aerial Vehicle (UAV)*, dibatasi hanya menggunakan sistem tinggi ortometrik.

1.5 Sistematika Penulisan

Berikut merupakan sistematika penulisan pada penelitian ini, agar laporan penelitian dapat tersusun dan tertata dengan baik yang akan dipaparkan dalam lima bab sebagai berikut :

A. Bab I : Pendahuluan Pada bab ini menguraikan mengenai latar belakang penelitian ini dilakukan. Kemudian menguraikan rumusan masalah, tujuan penelitian, dan batasan masalah mengenai penelitian yang dilakukan
B. Bab II : Dasar Teori Pada bab ini berisi tentang teori-teori yang dijadikan sebuah landasan dalam penelitian dan gambaran lokasi penelitian beserta kajian pustaka.
C. Bab III : Metodologi Penelitian Pada bab ini berisi tentang penjelesan mengenai penelitian yang akan dilakukan dimulai dari tahapan persiapan, pengumpulan data, pemrosesan data, hingga menjadi sebuah data yang nantinya akan dianalisa.
D. Bab IV : Hasil dan Analisa Pada bab ini menguraikan mengenai penjelasan dari hasil yang dilakukan dalam penelitian. Selanjutnya hasil dari penelitian akan dianalisa dan akan dikaji berdasarkan

ketentuan-ketentuan yang telah ditetapkan.

E. Bab V : Penutup Pada bab ini merupakan bab terakhir dari penulisan laporan penelitian yaitu berupa kesimpulan berdasarkan penelitian yang telah dilakukan. Serta tambahan saran sebagai bentuk penyempurnaan pada.

1.6 Penelitian Terdahulu

Adapun beberapa penelitian terdahulu yang digunakan sebagai acuan dalam penulisan ini yaitu sebagai berikut:

1. *A critical comparison of interpolation techniques for digital terrain modelling in mining*

   Penelitian terdahulu yang relevan dilakukan oleh Raza dkk. (2023) dalam studinya yang berjudul "*A critical comparison of interpolation techniques for digital terrain modelling in mining*". Penelitian ini melakukan perbandingan kritis terhadap efektivitas berbagai teknik interpolasi, *meliputi Inverse Distance Weighting* (*IDW*), *Splines, Kriging*, dan *Natural Neighbour*, untuk pembuatan pemodelan medan digital di sektor pertambangan. Studi tersebut menekankan bahwa ketepatan pemilihan metode interpolasi sangat krusial karena berdampak langsung pada akurasi *Digital Terrain Model* (*DTM*) yang digunakan dalam estimasi volume cadangan dan aktivitas penambangan.

   Hasil analisis regresi pada penelitian tersebut menunjukkan bahwa metode *Natural Neighbour* memberikan performa prediksi terbaik dengan nilai $R^2 = 0{,}968$, sementara pada pemakaian metode *IDW*, varian *inverse distance squared* $(x = 2)$ terbukti sebagai estimator yang paling optimal. Temuan ini menegaskan pentingnya evaluasi berbagai algoritma interpolasi berdasarkan karakteristik data sebelum menetapkan model permukaan digital guna meminimalkan kesalahan kalkulasi material di lapangan.

2. Analisis Akurasi Ketelitian Vertikal *DEM* Foto Udara Pada Kawasan Permukiman (Studi Kasus: Kelurahan Sekip Jaya, Kecamatan Kemuning, Palembang)

   Evaluasi terhadap keandalan wahana tanpa awak *(UAV)* dalam pemetaan topografi kawasan perkotaan telah dilakukan oleh Sastra dkk. (2023) melalui studi berjudul "Analisis Akurasi Ketelitian Vertikal *DEM* Foto Udara Pada Kawasan Permukiman (Studi Kasus: Kelurahan Sekip Jaya, Kecamatan Kemuning, Palembang)". Fokus utama kajian tersebut adalah mengukur tingkat presisi vertikal dari *Digital Elevation Model* (*DEM*) dengan membandingkan nilai elevasinya terhadap titik uji independen (*ICP*) yang diamati secara presisi menggunakan instrumen GPS Geodetik.

   Berdasarkan perhitungan yang mengacu pada standar Badan Informasi Geospasial (Perka BIG No. 6 Tahun 2018), penelitian tersebut menemukan bahwa toleransi kesalahan vertikal (LE90) dari model yang diuji mencapai 4,5 meter. Hasil ini mengklasifikasikan produk fotogrametri tersebut ke dalam standar ketelitian geometri kelas 3, sehingga dinyatakan memenuhi syarat untuk kebutuhan penyusunan peta berskala 1:10.000.

3. Analisis Perbandingan Ketelitian Vertikal *DTM (Digital Terrain Model)* dari Foto Udara dan LiDAR *(Light Detection And Ranging)* (Wilayah Studi: Sungai Gelam Timur Jambi)

   Latifa dkk. dalam studinya yang berjudul "*Analisis Perbandingan Ketelitian Vertikal DTM (Digital Terrain Model) dari Foto Udara dan LiDAR (Light Detection And Ranging) (Wilayah Studi: Sungai Gelam Timur Jambi)*" melakukan komparasi akurasi *DTM* antara metode foto udara (*UAV PPK*) dan *Handheld LiDAR*. Hasil analisis uji akurasi menurut SNI 8202:2019 menunjukkan bahwa *DTM* dari *LiDAR* memberikan ketelitian yang lebih tinggi dengan nilai LE90 sebesar 0,22 meter, yang memenuhi standar peta skala 1:1.000 (Kelas 2). Sementara itu, metode foto udara menghasilkan LE90 sebesar 1,23 meter, yang masuk dalam

klasifikasi standar peta skala 1:5.000 (Kelas 2).

Studi ini menyimpulkan bahwa meskipun kedua metode memenuhi standar minimal pembuatan peta topografi, penggunaan *LiDAR* lebih direkomendasikan untuk menghasilkan ketelitian vertikal yang optimal, khususnya pada area survei yang didominasi oleh vegetasi rapat

4. Analisa Data Foto Udara untuk *DEM* dengan Metode *TIN*, *IDW*, dan *Kriging*

   Kajian mendalam mengenai efektivitas algoritma interpolasi dalam pemodelan medan dari data foto udara telah dilakukan oleh Arfaini dan Handayani (2016) dalam studinya yang berjudul *"Analisa Data Foto Udara untuk DEM dengan Metode TIN, IDW, dan Kriging"*. Penelitian tersebut secara spesifik mengevaluasi perbandingan tiga metode interpolasi, yaitu *Triangulated Irregular Network* (*TIN*), *Inverse Distance Weighted* (*IDW*), dan *Kriging*, dengan memanfaatkan *mass point* yang diekstraksi melalui teknik *stereoplotting* dari foto udara stereo skala besar (1:10.000).

   Analisis ketelitian dilakukan dengan cara mengkomparasikan nilai elevasi *Digital Elevation Model* (*DEM*) hasil interpolasi terhadap *DEM* referensi dari satelit TerraSAR-X. Hasil evaluasi *Root Mean Square Error* (*RMSE*) menunjukkan bahwa metode *TIN* dan *IDW* berhasil memenuhi standar ketelitian vertikal *American Society of Photogrammetry and Remote Sensing* (*ASPRS*) yang mensyaratkan *error* maksimal 1 meter. Studi tersebut menyimpulkan bahwa metode *TIN* merupakan algoritma paling optimal untuk pembentukan *DEM* dari data foto udara karena memberikan nilai *RMSE* terendah sebesar 0,477 meter, disusul oleh metode *IDW* (0,926 meter), sedangkan metode *Kriging* menghasilkan tingkat *error* yang tidak memenuhi standar (3,453 meter).

5. Analisis Perbandingan Ketelitian Vertikal *Digital Terrain Model* (*DTM*) *UAV* dan *TLS* pada Area Pertambangan Batubara (Studi

Kasus: *Job Site* Lati PT. Berau Coal, Kabupaten Berau, Kalimantan Timur)

Penelitian komparatif mengenai pemodelan topografi pada sektor pertambangan telah dilakukan oleh Azizah (2023) melalui studi yang berjudul "Analisis Perbandingan Ketelitian Vertikal *Digital Terrain Model* (*DTM*) *UAV* dan *TLS* pada Area Pertambangan Batubara (Studi Kasus: *Job Site* Lati PT. Berau Coal, Kabupaten Berau, Kalimantan Timur)". Fokus utama dari riset ini adalah untuk mengevaluasi kelayakan metode fotogrametri menggunakan *Unmanned Aerial Vehicle* (*UAV*) DJI Phantom 4 Pro sebagai alternatif yang lebih efisien dibandingkan metode pengukuran langsung menggunakan *Terrestrial Laser Scanner* (*TLS*). Pengujian dilakukan melalui serangkaian analisis, meliputi validasi akurasi vertikal mengacu pada standar *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (*ASPRS*) 2013, uji statistik, komparasi penampang melintang, serta kalkulasi volume (*cut and fill*).

Hasil analisis menunjukkan bahwa *Digital Terrain Model* (*DTM*) yang dihasilkan dari *UAV* memenuhi standar akurasi vertikal kelas II dengan nilai *Root Mean Square Error* (*RMSEz*) sebesar 2,4 cm pada *Independent Check Point* (*ICP*), serta memiliki profil elevasi yang selaras dengan *DTM* dari *TLS*. Meskipun secara statistik tidak ditemukan perbedaan yang signifikan secara menyeluruh, studi ini mencatat bahwa selisih elevasi kecil pada *DTM UAV* dapat mempengaruhi ketepatan dalam kalkulasi volume material. Oleh karena itu, penelitian tersebut menyimpulkan bahwa *UAV* merupakan alternatif yang sangat memadai untuk pembuatan model topografi tiga dimensi di area tambang, namun belum sepenuhnya direkomendasikan jika digunakan sebagai instrumen tunggal untuk perhitungan volume batubara yang presisi.

BAB II
DASAR TEORI

2.1 Tambang Terbuka

Tambang Terbuka adalah metode penambangan yang segala kegiatan atau aktivitas penambangannya dilakukan di atas atau relatif dekat dengan permukaan bumi, dan tempat kerjanya berhubungan langsung dengan udara luar. Pit batu bara adalah lubang atau cekungan yang diakibatkan oleh kegiatan penambangan batu bara. Pit ini merupakan area yang telah dikupas tanah permukaannya sampai dengan lapisan batu baranya terlihat (Tri et al., 2018). Ilustrasi tambang terbuka dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Tambang Terbuka

Kegiatan pertambangan adalah suatu kegiatan, teknologi dan bisnis yang berkaitan dengan industri pertambangan mulai dari prospeksi, eksplorasi, evaluasi, penambangan, pengolahan, pemurnian, pengangkutan sampai pemasaran (Mada, 2015). Secara garis besar metode dalam ilmu pertambangan dapat dikategorikan menjadi tiga, antara lain :

1. *Open Pit* (tambang terbuka) merupakan suatu metode dalam pertambangan yang dilakukan di atas atau relatif dengan permukaan bumi dan segala pekerjaannya berhubungan dengan udara bebas.
2. *Underground* (tambang bawah tanah) merupakan suatu metode dalam pertambangan yang dilakukan di bawah permukaan

pekerjaannya bumi tidak dan segala langsung berhubungan dengan udara bebas.

3. Tambang bawah air merupakan suatu metode dalam pertambangan yang dilakukan di bawah permukaan air. Penambangan batu bara telah dilakukan sejak puluhan tahun yang lalu dan masih berlangsung sampai saat ini. Semakin pesatnya batu bara, kegiatan penambangan disebabkan karena ditemukannya lokasi-lokasi yang masih mengandung banyak batu bara dan tersedianya sumber daya manusia serta perkembangan teknologi yang kian menunjang kegiatan pertambangan.

Sistem penambangan akan berbeda antara satu bahan tambang dan bahan tambang lainnya. Pada penambangan batuan, mengingat posisi endapannya berada di bawah permukaan tanah, maka metode penambangannya akan menggunakan sistem penambangan terbuka (*open surface mining system/quarry*) dan area *front* penambangannya akan berbentuk teras-teras atau jenjang-jenjang (*bench*). Peralatan berat yang digunakan untuk pengupasan lapisan penutup (*overburden*) adalah *bulldozer, dump truck* dan *hydraulic excavator*. Khusus pada areal yang memiliki lapisan penutup yang sangat keras dilakukan peledakan (*blasting*). Sistem penambangan terbuka dimulai dari kegiatan pembukaan lahan tambang dengan cara pembersihan lahan (*land clearing*), pengupasan tanah pucuk (*topsoil*), pengupasan tanah penutup (*overburden*), dan penutupan tanah penutup (*back filling*), selanjutnya masuk pada kegiatan eksploitasi dan terakhir kegiatan pasca tambang dan reklamasi (Suyartono, 2003).

2.2 *Terrestrial Laser Scanner*

Terrestrial Laser Scanner (*TLS*) adalah metode penentuan posisi berbasis darat yang menggunakan teknologi *Scanning* dengan menempatkan alat survey tersebut di permukaan bumi. Sinar laser dipancarkan oleh laser internal dalam unit instrumen untuk menangkap data spasial. Jutaan poin dihasilkan untuk mendapatkan yang tepat bentuk dan

posisi objek dalam bentuk koordinat x, y dan z. Gambar 2.2 menampilkan representasi visual dari salah satu instrumen pemindai laser tiga dimensi merek RIEGL.



Gambar 2. 2 *Terrestrial Laser Scanner*

Jika diklasifikasikan berdasarkan jarak jangkauan objek yang dapat direkam oleh *TLS* maka terdapat tiga jenis yaitu (Simanjuntak, 2018):

1. *Short range* dengan jangkauan jarak alat 50m – 150m
2. *Medium range* dengan jangkauan jarak alat 150m – 350m
3. *Long range* dengan jangkauan jarak alat hingga 1000m.

2.2.1 Prinsip Kerja *Terrestrial Laser Scanner*

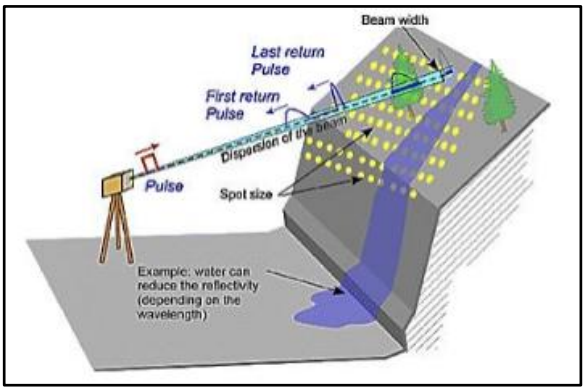
TLS adalah peralatan survei modern yang digunakan untuk pengukuran posisi permukaan yang akurat. Sinar laser digunakan untuk pengukuran dan karenanya tingkat ketelitiannya mencapai hingga mm. Visibilitas yang buruk karena cuaca berkabut dan keberadaan debu umumnya dialami di lokasi penambangan dan survei dalam kondisi seperti itu adalah salah satu kekuatan *TLS* (Bazarnik, 2018).

Dalam sistem pengukuran jarak, komponen sentral yang digunakan adalah laser *rangefinder*. Instrumen ini tersusun atas empat komponen utama, yaitu:

1. pemancar pulsa (*transmitter*);
2. penerima pulsa yang meliputi detektor, penguat sinyal, dan

Automatic Gain Control (*AGC*);

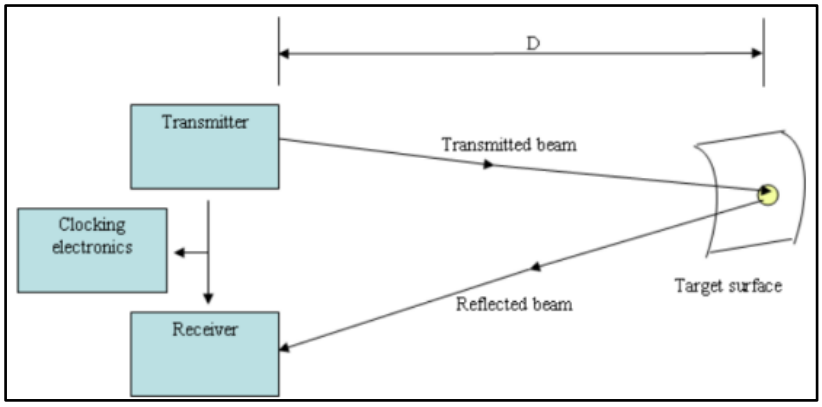
3. unit pengukur waktu elektronik atau *Time-to-Digital Converter* (*TDC*); serta
4. sistem optik pemancar dan penerima.



Gambar 2. 3 Prinsip dari *Terrestrial Laser Scanner* (Jaboyedoff et al., 2012)

Secara praktis, mekanisme pemindaian permukaan oleh *TLS* di lapangan dapat direpresentasikan pada Gambar 2.3. Saat instrumen memancarkan pulsa laser ke arah target, pancaran tersebut tidak bergerak sebagai garis imajiner yang absolut, melainkan mengalami dispersi atau penyebaran seiring bertambahnya jarak lintasan. Hal ini menghasilkan suatu jejak luasan (*spot size*) dengan lebar pancaran (*beam width*) tertentu saat membentur permukaan. Apabila objek yang dipindai memiliki struktur pelapisan yang kompleks seperti kanopi vegetasi, satu tembakan pulsa dapat menembus sela-sela objek dan menghasilkan lebih dari satu gelombang pantul kembali ke instrumen.

Pantulan awal yang membentur halangan terluar disebut sebagai *first return pulse*, sedangkan pantulan dari permukaan solid terdalam disebut *last return pulse*. Selain itu, daya pantul pulsa juga sangat bergantung pada karakteristik material target; material seperti air memiliki sifat mereduksi tingkat reflektivitas bergantung pada panjang gelombang laser yang digunakan.



Gambar 2. 4 Ilustrasi pengukuran jarak berbasis pulsa (Quintero dkk, 2008)

Adapun proses di balik kalkulasi jarak optis dari pantulan tersebut bekerja berdasarkan mekanisme berbasis pulsa atau prinsip waktu tempuh (*Time of Flight*), sebagaimana diilustrasikan secara fundamental pada Gambar 2.4. Proses komputasi ini diregulasi oleh sistem pewaktuan elektronik (*clocking electronics*). Proses diawali saat *transmitter* menembakkan pulsa cahaya (*transmitted beam*) ke arah objek sasaran. Sebagian dari energi pulsa tersebut digunakan untuk memicu sistem pewaktuan elektronik untuk mulai mencatat waktu secara presisi.

Saat pulsa mengenai target (*target surface*), energi cahaya terhambur dan dipantulkan kembali menuju instrumen (*reflected beam*). Pulsa pantul ini kemudian ditangkap oleh sensor *receiver* dan dikonversi menjadi sinyal arus listrik yang diteruskan ke diskriminator waktu. Kedatangan sinyal ini secara otomatis menghentikan catatan sistem pewaktuan. Dengan mengidentifikasi total durasi interval waktu sejak pulsa berangkat hingga pantulannya diterima kembali, sistem dapat mengkalkulasi secara matematis jarak horizontal absolut (D) antara *TLS* dan permukaan objek menggunakan konstanta kecepatan rambat gelombang elektromagnetik.

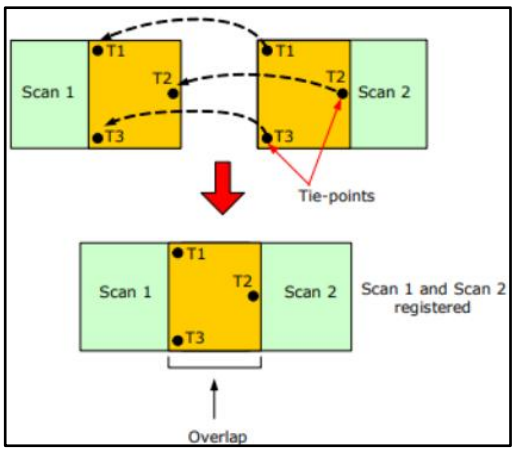
2.2.2 Registrasi Data

Registrasi adalah suatu proses penggabungan data hasil *Scan world* ke dalam sistem koordinat yang sama (Wibowo, 2015). Pada saat pembentukan model 3d tidak mungkin dapat dilakukan hanya dengan satu kali *Scan* sehingga perlu dilakukan beberapa kali pindah agar dapat merekan seluruh penampakan objek yang akan. Hasil dari *Scan* adalah

berupa *point cloud* dari tempat berdiri alat yang berbeda dan mengacu pada koordinat lokal. Untuk menggabungkan koordinat lokal dari beberapa *Scan world* maka perlu dilakukan registrasi.

1. Metode *Target to target*

   Registrasi *target to target* (berbasis target) adalah metode penggabungan *point clouds* yang mengandalkan target buatan manusia yang diletakkan di area pengukuran. Target buatan ini biasanya memiliki bentuk geometris khusus yang mudah dikenali oleh perangkat lunak dengan tingkat presisi tinggi, seperti bola (*spheres*), silinder, atau papan pola catur (*checkerboard*).



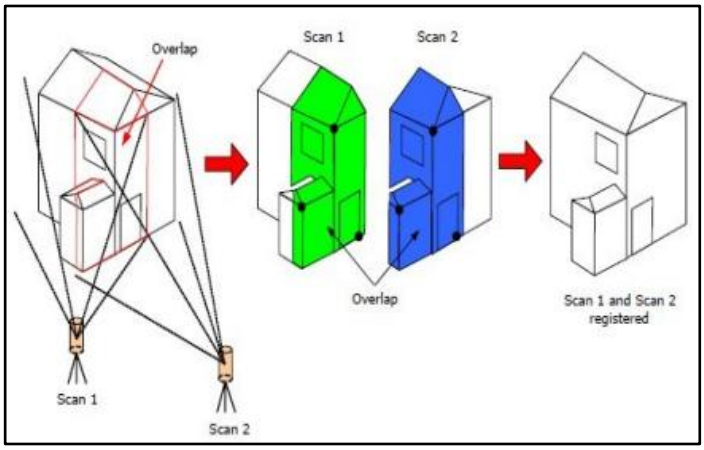
Gambar 2. 5 Metode *Target to target*

Pada gambar 2.5, target-target tersebut harus diletakkan pada area yang saling bertampalan (*overlap*) antara dua posisi berdiri alat (stasiun) yang berbeda. Perangkat lunak pengolahan data akan mendeteksi titik tengah (pusat geometri) dari target tersebut di setiap hasil *Scan*. Dengan mencocokkan (memasangkan) minimal tiga target yang sama dari dua *Scan* yang berbeda, algoritma perangkat lunak dapat menghitung parameter transformasi (translasi 3D dan rotasi 3D) untuk menyatukan kedua *point clouds* tersebut.

2. Metode *Cloud To Cloud*

   Registrasi *cloud to cloud* atau yang sering disebut registrasi tanpa target (*targetless registration*) adalah metode penyatuan *point clouds* yang tidak memerlukan pemasangan target buatan di lapangan. Metode ini memanfaatkan geometri objek alami atau fitur

fisik (seperti sudut bangunan, lereng tanah, dinding, dll) yang terekam secara bersamaan pada area *overlap* dari dua posisi *Scan*.

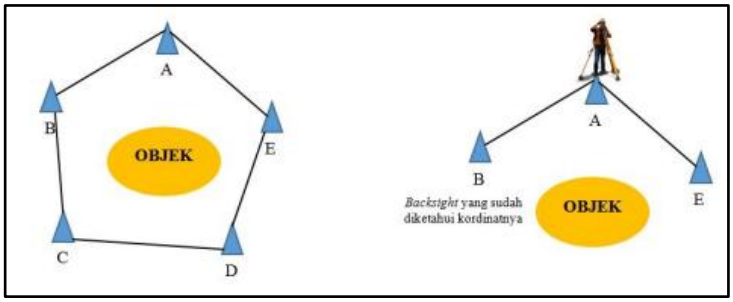


Gambar 2. 6 Registrasi *cloud to cloud*

Gambar 2.6 mengilustrasikan proses registrasi data spasial 3D pada suatu objek bangunan, di mana area tumpang tindih (*overlap*) dari dua stasiun pemindaian yang berbeda (*Scan 1* dan *Scan 2*) dimanfaatkan sebagai acuan untuk menyatukan kedua data pindaian tersebut menjadi satu model bangunan tiga dimensi yang utuh.

3. *Traverse*

Registrasi *traverse* (poligon) merupakan metode pengukuran *TLS* yang mengadopsi prinsip pengukuran poligon pada alat ukur konvensional seperti *Total Station*. Pada metode ini, titik berdiri alat dan titik orientasinya didefinisikan secara berurutan membentuk kerangka jaring.



Gambar 2. 7 Registrasi *traverse* (poligon) (Simbolon, 2017).

Gambar 2.7 mengilustrasikan mekanisme registrasi data pindaian menggunakan metode *traverse* (poligon). Pemindai (*TLS*) ditempatkan secara terpusat pada titik yang sudah diketahui

koordinatnya. Alat tersebut kemudian dipaksa (*forced centering*) untuk membidik target yang berada di stasiun sebelumnya (*backsight*) sebagai acuan arah/orientasi, lalu melakukan pemindaian, dan selanjutnya membidik target di stasiun berikutnya (*foresight*). Proses ini dilanjutkan secara berantai. Dengan cara ini, *point clouds* yang direkam tidak hanya terikat satu sama lain, tetapi juga langsung terikat secara georeferensi terhadap sistem koordinat global.

2.3 *Unmanned Aerial Vehicle (UAV)*

Pesawat tanpa awak *Unmanned Aerial Vehicle* (*UAV*) merupakan jenis pesawat terbang yang dikendalikan alat sistem kendali jarak jauh lewat gelombang radio. *UAV* merupakan sistem tanpa awak (*Unmanned System*) yaitu sistem berbasis elektro mekanik yang dapat melakukan misi-misi terprogram dengan karakteristik sebuah mesin terbang yang berfungsi dengan kendali jarak jauh oleh pilot atau mampu mengendalikan dirinya sendiri, *UAV* dapat dikendalikan manual melalui radio kontrol atau secara otomatis dengan mengolah data pada sensor (Saraoinsong, 2018).



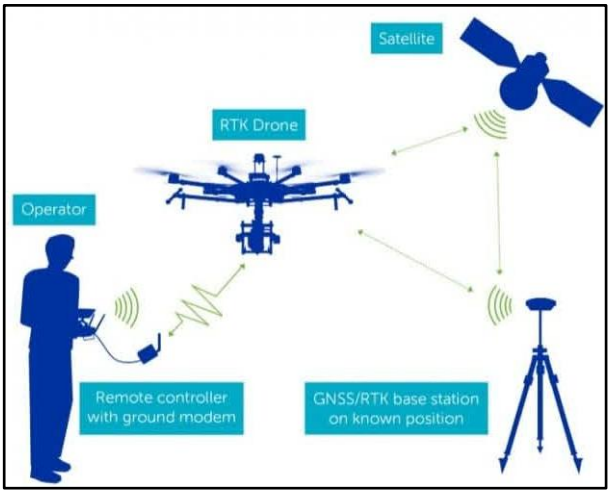
Gambar 2. 8 *Unmanned Aerial Vehicle (UAV)*

Gambar 2.8 merepresentasikan salah satu contoh instrumen *UAV* komersial berjenis wahana sayap putar (*rotary-wing* atau *quadcopter*). Terminologi terbaru *UAV* fotogrametri menjelaskan bahwa platform ini dapat beroperasi dan dikendalikan dari jarak jauh baik secara semi- otomatis maupun otomatis tanpa perlu pilot duduk di kendaraan. Perkembangan teknologi *UAV* menggunakan kamera non-metrik sangat mendukung dalam pekerjaan pemetaan. Data foto udara hasil proses awal yang berupa *point clouds* belum terklasifikasikan, sehingga perlu dilakukan proses *filtering*

point clouds agar dihasilkan kelas *ground* untuk dijadikan *DTM* (*Digital Terrain Model*) (Wirantiko et al., 2020).

2.3.1 *Unmanned Aerial Vehicle* Modul *RTK*

UAV RTK (*Unmanned Aerial Vehicle Real-Time Kinematic*) adalah wahana udara tanpa awak yang telah terintegrasi dengan modul penerima sinyal GNSS (*Global Navigation Satellite System*) *onboard*. Seperti diperlihatkan pada gambar 2.9 , Modul ini berfungsi untuk menerima data koreksi posisi secara langsung (*real-time*) dari stasiun pangkalan (*base station*) di darat melalui tautan radio atau jaringan internet selama penerbangan berlangsung. Dengan sistem ini, setiap foto yang diambil oleh kamera *drone* akan langsung mendapatkan informasi koordinat (*geotagging*) dengan tingkat presisi yang sangat tinggi, umumnya mencapai orde sentimeter.



Gambar 2. 9 Konsep *UAV RTK (Unmanned Aerial Vehicle Real-Time Kinematic)*

2.3.2 Jalur Terbang

Jalur terbang foto udara (*flight path atau flight line*) merupakan rute lintasan yang telah direncanakan secara sistematis dan harus dilalui oleh wahana terbang (seperti pesawat udara atau *Unmanned Aerial Vehicle*/*UAV*) saat melakukan perekaman sensor atau pemotretan di atas suatu area pemetaan. Perencanaan jalur terbang sangat krusial dalam survei fotogrametri untuk memastikan seluruh area target terliput secara

komprehensif tanpa adanya area kosong (*gap*) data. Gambar 2.10 memvisualisasikan rancangan jalur terbang (*flight plan*) otomatis dalam misi akuisisi data fotogrametri menggunakan wahana *Unmanned Aerial Vehicle (UAV)*.



Gambar 2. 10 Jalur Terbang *UAV*

Salah satu parameter utama dalam jalur terbang adalah *overlap* (tumpang tindih) antar foto, yang terdiri dari *forward overlap* (sepanjang jalur terbang) dan *sidelap* (antar jalur terbang yang berseberangan). Standar industri umumnya mensyaratkan *forward overlap* sebesar 60-80% dan *sidelap* minimal 40-60%.

2.3.3 Ortorektifikasi

Ortorektifikasi merupakan proses koreksi geometrik pada citra satelit atau foto udara yang bertujuan untuk menghilangkan distorsi spasial akibat pengaruh variasi elevasi topografi (pergeseran relief) dan kemiringan sensor kamera (*tilt*) saat perekaman dilakukan.

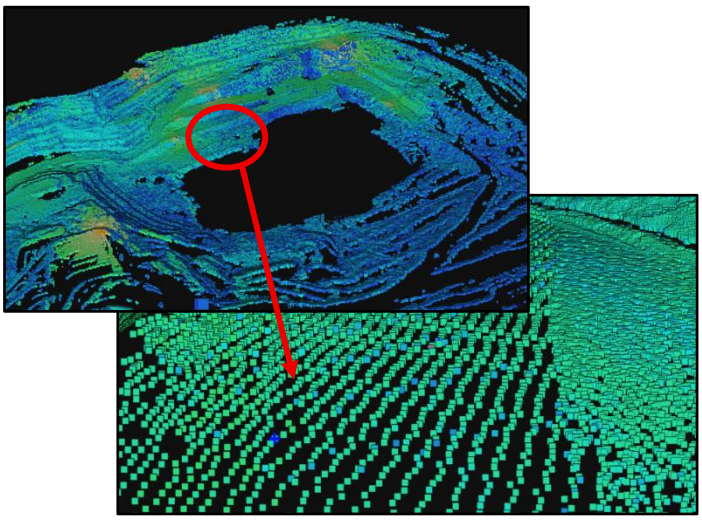
Secara teknis, proses ini merekonstruksi proyeksi sentral dari foto udara asli menjadi proyeksi ortogonal (tegak lurus). Untuk melakukan proyeksi ulang ini, proses ortorektifikasi secara mutlak membutuhkan parameter orientasi sensor dan model permukaan tiga dimensi, umumnya berupa *Digital Elevation Model* (*DEM*) atau *Digital Terrain Model* (*DTM*), guna mengoreksi pergeseran titik akibat perbedaan tinggi permukaan bumi. Selain itu, *Ground Control Point* (*GCP*) juga digunakan dalam proses

ortorektifikasi untuk memastikan akurasi posisi geometri citra terikat dengan sistem koordinat referensi secara presisi.

Hasil akhir dari tahapan ortorektifikasi adalah citra tegak yang dikenal sebagai ortophoto. Berbeda dengan foto udara mentah yang skalanya bervariasi pada setiap titik tergantung pada tinggi rendahnya medan, orthophoto memiliki skala yang seragam di seluruh bagian permukaannya. Dengan karakteristik geometris yang sudah ekuivalen dengan peta planimetris ini, orthophoto dapat digunakan secara tepercaya untuk melakukan deliniasi objek serta pengukuran jarak, sudut, koordinat, dan luasan di atas peta.

2.4 *Point Cloud*

Point cloud adalah suatu Kumpulan data titik dalam ruang tiga dimensi pada suatu sistem koordinat (Sitek et al, 2006). Pada saat akuisisi data di lapangan menggunakan alat *TLS* akan dihasilkan data berupa *point cloud*. Data *point cloud* hasil dari *TLS* dapat digunakan untuk pemodelan objek sesuai dengan aslinya. Hasil pemodelan objek yang sesuai dengan aslinya tersebut bisa digunakan untuk Analisa selanjutnya, misalkan untuk perhitungan volume. Gambar di bawah merupakan tampilan dari *point cloud* batu bara. Kerapatan *point cloud* tergantung pada setting alat sebelum melakukan pengukuran.

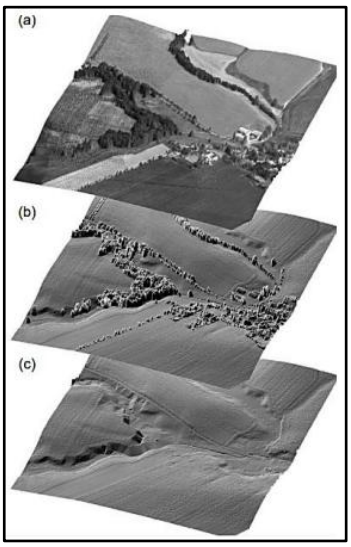


Gambar 2. 11 *Point Cloud*

Gambar 2.11 merepresentasikan visualisasi data *point cloud* (awan titik) tiga dimensi yang merekam geometri topografi secara detail, dengan karakteristik bentuk permukaan yang menyerupai area pertambangan terbuka (*open-pit*).

2.5 *Digital Terrain Model* (*DTM*)

DTM merupakan model tanah digital yang memuat informasi ketinggian permukaan tanah (*bare earth surface*) tanpa terpengaruh oleh vegetasi dan fitur buatan manusia lainnya . *DTM* disertai fitur-fitur tambahan seperti punggungan bukit atau aliran air Sungai memberikan representasi permukaan topografi yang lebih baik serta mampu memodelkan relief lebih realistik (Kevin et al., 2019).



Gambar 2. 12 *Digital Terrain Model*

(a) Foto udara, (b) *DSM*, (c) *DTM* (sumber : Kenemans dan Ramsey, 2013)

Berdasarkan gambar 2.12 tersebut, tahapan pemodelan topografi permukaan bumi direpresentasikan dalam tiga bentuk visual. Gambar (a) Foto Udara menampilkan kondisi rupa bumi secara nyata beserta seluruh elemen tutupan lahannya. Data ini kemudian dimodelkan menjadi (b) *Digital Surface Model* (*DSM*), yakni model elevasi yang masih mengikutsertakan objek di atas permukaan tanah sehingga vegetasi dan

bangunan tampak menonjol. Untuk mendapatkan bentuk topografi yang sebenarnya, data *DSM* diproses menggunakan teknik penyaringan (*filtering*) guna membuang objek n*on-ground*, sehingga menghasilkan (c) *Digital Terrain Model* (*DTM*) atau *bare earth surface*. Pada *DTM*, morfologi tanah asli yang sebelumnya tertutup kanopi pohon atau struktur buatan dapat terekspos dengan jelas.

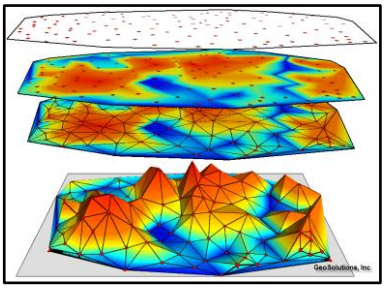
Representasi *DTM* ini sangat esensial dalam survei rekayasa karena memberikan parameter yang akurat untuk pembuatan garis kontur, analisis kelerengan, dan perhitungan volume (*cut and fill*) tanpa adanya distorsi dari objek di atas permukaan tanah.

2.6 Pembentukan *Digital Terrain Model*

Interpolasi adalah metode yang dilakukan untuk memprediksi nilai grid yang tidak diwakili oleh titik sampel (Childs, 2011). Beberapa metode interpolasi antara lain: *Inverse Distance Weighting* (*IDW*), *Kriging*, *Nearest Neighbor*, *Spline* dan *Triangulated Irregular Network* (*TIN*). Akurasi dari *DTM* tergantung dari metode interpolasi yang digunakan oleh sebab itu diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai perbandingan dari metode-metode interpolasi tersebut (Arun, 2013).

2.6.1 *Triangulated Irregular Network* (*TIN*)

TIN adalah salah satu metode untuk merepresentasikan suatu *surface* (permukaan) dalam bentuk jaring-jaring segitiga." (Li, Zhu, & Gold, 2004). Gambar 2.13 mengilustrasikan tahapan konseptual pembentukan representasi permukaan bumi menggunakan algoritma spasial, yang secara spesifik merepresentasikan metode *Triangulated Irregular Network* (*TIN*). Dalam pembentukan *TIN* dibutuhkan setidaknya enam titik yang dapat digunakan untuk pembentukan jaring segitiga. Tiga titik berada pada *node* sebagai ujung sisi-sisi segitiga dan tiga titik lainnya merupakan titik luar yang membentuk membentuk jaring segitiga lain.

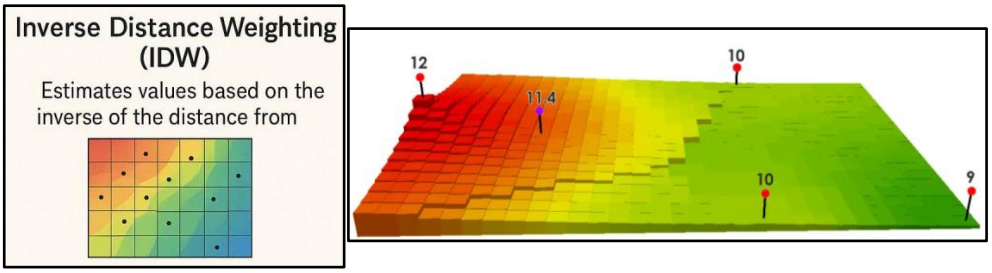


Gambar 2. 13 Model *DTM* dengan interpolasi TIN

Triangulated Irregular Network (*TIN*) adalah model data topologi berbasis vektor untuk mempresentasikan bentuk 12 permukaan bumi yang diperoleh dari titik-titik tinggi yang tersebar secara tidak teratur dan *feature breakline*, serta membentuk jaringan segitiga tidak beraturan yang saling berhubungan. Masing-masing segitiga terdiri dari tiga *vertex* yang mempunyai koordinat x, y dan elevasi (z) atau satu set koordinat disebut *Mass Point.*

2.6.2 *Inverse Distance Weighting* (*IDW*)

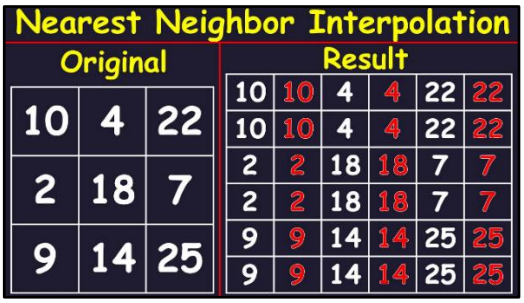
Inverse Distance Weighting menentukan *cell value* dengan kombinasi pembobotan linear, dimana bobot adalah fungsi jarak dari titik *input* terhadap lokasi *cell output* (Childs, 2011). Metode ini membuat data dilakukan pembobotan selama interpolasi, sehingga pengaruh satu titik relatif terhadap titik lainnya dan semakin berkurang ketika jarak terhadap *node grid* semakin besar (Yang, Kao, Lee, & Hung, 2004). Gambar 2.14 mengilustrasikan prinsip operasional dan representasi visual dari metode interpolasi spasial tersebut.



Gambar 2. 14 Interpolasi *Inverse Distance Weighting*

2.6.3 *Nearest Neighbor*

Metode *Nearest Neighbor* (Tetangga Terdekat) merupakan algoritma interpolasi spasial yang menetapkan nilai pada suatu titik yang tidak diketahui (*unknown point*) berdasarkan nilai dari titik sampel tunggal yang secara geometris terletak paling dekat dengan titik tersebut (Sibson, 1981). Dalam proses pembentukan *Digital Terrain Model* (*DTM*) berbasis grid, metode ini bekerja dengan cara mengisi setiap sel atau piksel pada struktur raster menggunakan nilai elevasi dari titik input terdekat yang jatuh di dalam atau di sekitar area sel tersebut.



Gambar 2. 15 Metode *Nearest Neighbor*

Gambar 2.15 mengilustrasikan secara konseptual mekanisme transformasi resolusi matriks spasial menggunakan algoritma interpolasi tersebut. Prinsip dasar dari metode ini tidak melibatkan perhitungan rata-rata tertimbang atau fungsi *polinomial* kompleks, melainkan menggunakan fungsi alokasi jarak *Euclidean* sederhana. Secara matematis, penentuan nilai elevasi pada sel grid dapat dirumuskan sebagai berikut:

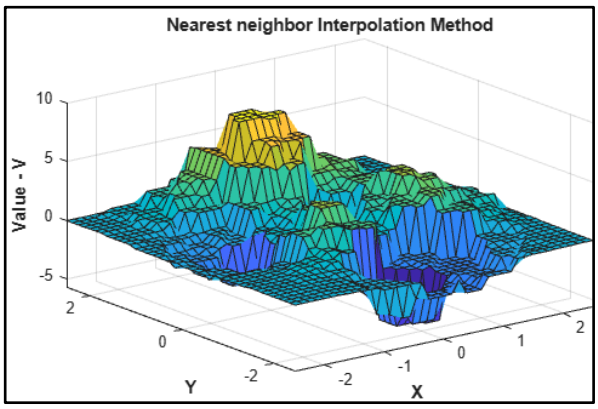
$$Z(P) = Z(P_i)\ dimana\ d(P, P_i) = min\{d(P, P_i)\} \quad \text{.....(2.1)}$$

Keterangan:

1. $Z(P)$: adalah nilai elevasi pada pusat sel grid yang dicari.
2. P_i: adalah titik sampel dengan jarak terpendek ke pusat sel grid.
3. $d(P, P_i)$: adalah fungsi jarak *Euclidean* antara titik estimasi dan titik sampel.

Menurut Watson (1992), karakteristik utama dari *Nearest Neighbor* adalah sifatnya yang *non-exact interpolator* jika dilihat dari visualisasi permukaan, namun sangat akurat dalam mempertahankan nilai asli data lapangan (*original data values*). Karena tidak adanya proses penghalusan

(*smoothing*), *DTM* yang dihasilkan melalui metode ini seringkali menunjukkan fenomena diskontinuasi pada batas antar sel, yang secara visual tampak seperti undakan atau tangga (*blocky appearance*).



Gambar 2. 16 Interpolasi *Nearest Neighbor*

Gambar 2.16 memvisualisasikan bentuk topografi hasil interpolasi menggunakan metode tersebut. Dalam aplikasinya pada pembuatan *DTM*, metode ini memiliki beberapa implikasi teknis yang signifikan (Li dkk., 2005):

1. Efisiensi Komputasi:

   Merupakan metode tercepat untuk memproses data dalam jumlah besar, seperti *point cloud* hasil akuisisi *LiDAR* atau fotogrametri, karena hanya memerlukan pencarian indeks jarak.

2. Preservasi Data:

   Sangat efektif digunakan apabila tujuan pemetaan adalah untuk analisis yang memerlukan nilai elevasi asli tanpa manipulasi matematis, sehingga variansi lokal tetap terjaga.

3. Ketergantungan pada Kerapatan Data:

   Kualitas permukaan *DTM* sangat bergantung pada kerapatan titik sampel. Jika jarak antar titik sampel lebih besar daripada ukuran sel grid (*cell size*), maka akan muncul artefak kotak-kotak yang tajam pada model permukaan digital.

Oleh karena itu, pemilihan ukuran grid dalam metode *Nearest Neighbor* menjadi krusial. Ukuran grid yang ideal harus mempertimbangkan distribusi spasial dari titik kontrol tanah agar mampu merepresentasikan morfologi medan secara optimal tanpa menghasilkan

redundansi data yang berlebihan (Hengl, 2009).

2.7 *Random Point*

Dalam pemodelan topografi seperti *Digital Terrain Model* (DTM), titik acak (*random points*) digunakan sebagai metode pengambilan sampel independen untuk menguji akurasi vertikal dari model yang dihasilkan. Titik acak merupakan sekumpulan titik koordinat (X, Y) yang disebar secara stokastik di dalam batas area penelitian sedemikian rupa sehingga setiap lokasi memiliki probabilitas yang sama untuk terpilih sebagai titik uji. Penyebaran titik uji secara acak ini bertujuan untuk meminimalisasi bias subjektif dalam evaluasi model, memastikan bahwa variasi topografi secara keseluruhan dapat terepresentasikan secara objektif (Congalton & Green, 2019). Dalam studi geomatika dan pemetaan di Indonesia, penentuan titik uji (*Independent Check Point*) yang disebar secara acak dan proporsional sangat direkomendasikan untuk menghindari bias dan memastikan titik uji mewakili berbagai variasi relief permukaan secara menyeluruh (Prasetyo dkk., 2019).

Untuk keperluan evaluasi, titik-titik acak dibangkitkan secara spasial secara eksklusif hanya di dalam batas area tambang terbuka, dan dibatasi agar tidak merepresentasikan bidang di luar batas area penambangan. Titik-titik ini difungsikan sebagai titik uji independen untuk mengekstrak nilai elevasi (Z) dari DTM berbasis sistem grid biasa yang dihasilkan dari algoritma *IDW* dan *Nearest*. Nilai elevasi pada titik acak tersebut kemudian dikomparasikan secara langsung dengan data referensi aktual untuk menghitung parameter statistik akurasi vertikal, seperti *Root Mean Square Error* (RMSE). Pendekatan pengambilan sampel acak ini memungkinkan pengujian yang komprehensif terhadap keandalan masing-masing algoritma interpolasi, serta sejalan dengan pedoman ketelitian spasial nasional yang mensyaratkan distribusi titik uji yang objektif dan tersebar secara representatif di area studi (BIG, 2014; Polat et al., 2015).

2.8 Uji Akurasi *DTM*

Permukaan *Digital Terrain Model* (*DTM*) merupakan representasi tiga dimensi dari permukaan medan yang dinyatakan dalam koordinat spasial (X, Y, Z). Dalam pembentukan *DTM*, kesalahan dapat terjadi pada masing-masing komponen koordinat tersebut. Kesalahan pada koordinat (X, Y) disebut sebagai kesalahan planimetri (horizontal), sedangkan kesalahan pada koordinat (Z) disebut sebagai kesalahan elevasi atau kesalahan vertikal. Pada penelitian topografi pertambangan, evaluasi akurasi umumnya lebih difokuskan pada ketelitian vertikal karena berpengaruh langsung terhadap perhitungan volume dan analisis perubahan permukaan.

Penilaian akurasi *DTM* dapat dilakukan dalam dua pendekatan utama, yaitu:

1. Akurasi planimetri dan akurasi ketinggian dinilai secara terpisah.
2. Akurasi horizontal dan vertikal dinilai secara simultan sebagai akurasi posisi tiga dimensi.

Dalam praktik evaluasi ketinggian *DTM*, terdapat beberapa pendekatan yang dapat digunakan, yaitu:

1. Pendekatan berbasis produksi (*procedural assessment*), yaitu menilai potensi kesalahan pada setiap tahapan proses akuisisi dan pengolahan data, termasuk kualitas instrumen dan metode interpolasi yang digunakan.
2. Pendekatan berbasis karakteristik wilayah, yang mempertimbangkan bahwa akurasi vertikal sangat dipengaruhi oleh kemiringan dan kompleksitas morfologi medan. Semakin terjal dan kompleks suatu wilayah, semakin besar kemungkinan deviasi elevasi yang terjadi.
3. Evaluasi melalui pengujian kartometrik, yaitu membandingkan elevasi *DTM* dengan data referensi independen yang diperoleh dari pengukuran lapangan presisi tinggi untuk memperoleh nilai kesalahan secara eksperimental.
4. Evaluasi berbasis titik diagnostik (*Independent Check*

Points/*ICP*), di mana sampel titik ketinggian yang tidak digunakan dalam pembentukan model dimanfaatkan untuk menguji kualitas elevasi *DTM* secara statistik.

Pada *DTM* yang dibangun dari data fotogrametri *UAV*, keakuratan sangat dipengaruhi oleh:

1. Kualitas sensor dan resolusi citra (*Ground Sampling Distance*/*GSD*)
2. Ketinggian terbang dan konfigurasi *overlap* citra
3. Jumlah dan distribusi *Ground Control Point* (*GCP*)
4. Ketelitian pengukuran titik kontrol
5. Geometri stereo dan proses kalibrasi kamera

Sementara itu, pada *DTM* yang dihasilkan dari *Terrestrial Laser Scanner* (*TLS*), faktor yang mempengaruhi akurasi meliputi:

1. Resolusi dan kepadatan titik hasil pemindaian
2. Jarak dan sudut pemindaian terhadap objek
3. Proses registrasi antar-*Scan position*
4. Kualitas kontrol koordinat dan transformasi sistem referensi

Dengan demikian, uji akurasi *DTM* merupakan proses evaluasi komprehensif yang mencakup analisis statistik kesalahan elevasi serta peninjauan faktor teknis yang mempengaruhi pembentukan model. Hasil pengujian ini menjadi dasar dalam menilai kualitas *DTM* dan menentukan kelayakannya untuk mendukung kegiatan operasional pertambangan.

2.9 Uji Akurasi Ketelitian Vertikal

Uji akurasi merupakan tahapan evaluasi yang dilakukan untuk mengetahui tingkat ketelitian suatu data spasial dengan mengacu pada standar pengujian yang berlaku. Dalam konteks data topografi atau *Digital Terrain Model* (*DTM*), pengujian akurasi posisi dilakukan dengan membandingkan koordinat hasil pemodelan (X, Y, Z) terhadap koordinat referensi yang diperoleh langsung dari pengukuran lapangan pada titik uji independen. Perbandingan tersebut bertujuan untuk mengidentifikasi besarnya deviasi antara nilai model dan kondisi sebenarnya di permukaan

tanah.

Evaluasi ketelitian posisi dilakukan secara kuantitatif menggunakan parameter statistik, salah satunya adalah *Root Mean Square Error* (*RMSE*). Nilai *RMSE* diperoleh dari perhitungan selisih koordinat antara titik hasil model dengan titik referensi, yang kemudian dikuadratkan, dirata-ratakan, dan diakarkan. Parameter ini merepresentasikan besarnya kesalahan total yang mencakup komponen kesalahan acak (*random error*) maupun kesalahan sistematis (*systematic error*) dalam data.

Nilai *RMSE* untuk ketelitian dapat dirumuskan sebagai berikut (ASPRS, 2024):

$$RMSEz = \sqrt{\frac{\sum_{I=1}^{n}(z_{map}I - z_{cek}I)^2}{n}} \quad \text{.....(2.2)}$$

Keterangan :

n = Jumlah total pengecekan pada peta

z = Nilai koordinat pada sumbu Z

$$\text{LE90} = 1.6499 \times RMSEz \quad \text{.....(2.3)}$$

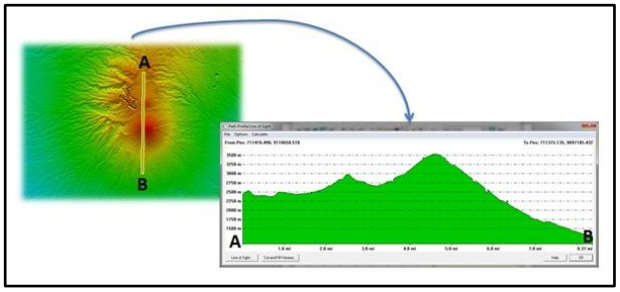
Berdasarkan ketentuan *ASPRS* (2024), standar akurasi data digital dapat dianalisis kelas akurasinya berdasarkan nilai *RMSEz*-nya, berikut untuk kelas standar akurasi :

Tabel 2. 1 Standar akurasi vertikal untuk data elevasi digital (sumber : ASPRS, 2024)

Kelas Akurasi Vertikal	*Absolute Accuracy*		Akurasi relatif (jika ada)		
	NVA *RMSE*V (cm)	VVA *RMSE*V (cm)	*Within-Swath Smooth Surface Precision Max Diff* (cm)	*Swath-to-Swath Non-Vegetated RMSDZ* (cm)	*Swath-to-Swath Non-Vegetated Max Diff* (cm)
1-cm	≤ 1.0	*As found*	≤ 0.6	≤ 0.8	≤ 1.6
2.5-cm	≤ 2.5	*As found*	≤ 1.5	≤ 2.0	≤ 4.0
5-cm	≤ 5.0	*As found*	≤ 3.0	≤ 4.0	≤ 8.0
10-cm	≤ 10.0	*As found*	≤ 6.0	≤ 8.0	≤ 16.0
15-cm	≤ 15.0	*As found*	≤ 9.0	≤ 12.0	≤ 24.0
20-cm	≤ 20.0	*As found*	≤ 12.0	≤ 16.0	≤ 32.0
33.3-cm	≤ 33.3	*As found*	≤ 20.0	≤ 26.7	≤ 53.3
66.7-cm	≤ 66.7	*As found*	≤ 40.0	≤ 53.3	≤ 106.7
100-cm	≤ 100.0	*As found*	≤ 60.0	≤ 80.0	≤ 160.0
333.3-cm	≤ 333.3	*As found*	≤ 200.0	≤ 266.7	≤ 533.3

2.10 Uji Penampang Melintang

Penampang memanjang adalah irisan tegak pada lapangan dengan mengukur jarak dan beda tinggi titik-titik di atas permukaan bumi. Profil memanjang digunakan untuk melakukan pengukuran yang jaraknya jauh, sehingga dikerjakan secara bertahap beberapa kali. Karena panjangnya sangat besar, skala vertikal yang digunakan dibuat berbeda dengan skala horizontalnya. Cara pengukuran penampang memanjang sama dengan cara pengukuran secara berantai. Penampang memanjang digunakan untuk pekerjaan membuat *trace* jalan kereta api, jalan raya, saluran air, pipa air minum, dan sebagainya (Bagus et al., 2015). Gambar 2.17 mengilustrasikan proses penarikan potongan melintang (*cross-section*) permukaan bumi yang diekstrak langsung dari data elevasi digital.



Gambar 2. 17 Penampang melintang (sumber : GISPEDIA)