

Pengukuran Fragmentasi Peledakan Tambang Metode Estimasi Gambar 3D: Tren dan Penerapannya di Lapangan

Syamsul Hidayat

Prodi D3 Teknik Pertambangan Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Mataram

*e-mail korespondensi : syamsulhidayat@ummat.ac.id

Abstrak

Pengukuran fragmen peledakan dibutuhkan untuk mengetahui distribusi ukuran yang dihasilkan. Metode 2D memiliki keterbatasan karena tidak mampu menjangkau dan memodel permukaan fragmen secara merata pada muckpile sehingga Metode 3D image analysis dikembangkan sebagai alternative. Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji tren dan penerapan metode 3D image analysis, menelaah teknik-teknik yang digunakan serta keunggulan dan tantangannya. Teknik fotogrametri dan laser scanning adalah teknik yang telah diterapkan di laboratorium, di lokasi tambang terbuka maupun tambang bawah tanah. Isu-isu penting terkait penerapan metode *3D image analysis* di lapangan adalah pencahayaan, identifikasi objek individu, lokasi ideal penempatan alat perekam gambar dan estimasi material fine. Kelebihan yang dimiliki adalah kemampuan membuat model yang lebih dalam secara 3D dan kemampuan pengambilan gambar yang merata karena penempatan alat pada posisi yang tepat. Keandalan analisa material fine, keandalan sistem otomatisasi hasil pengukuran fragmen, dan kemudahan aplikasinya di lapangan adalah tantangan yang masih harus dihadapi di masa depan.

Kata Kunci: Fragmen peledakan, *3D image analysis*, Fotogrametri, Laser scanning

Abstract

Blast fragment measurements are necessary to determine the size distribution. 2D method has limitations due to its inability to reach and model surface of fragment in muckpiles. Therefore, 3D image analysis was developed as an alternative. This research was conducted to examine trends and applications of 3D image analysis, examining its techniques, advantages and challenges. Photogrammetry and laser scanning techniques have been applied in laboratories, at open-pit and underground mines. Important issues related to the application of 3D image analysis in the field include lighting, individual object identification, ideal location for image acquisition equipment, and fine material estimation. The advantages of the method include the ability to create deeper 3D models and the ability to cover more surface area during image capturing due to precise instrument placement. The reliability of fine material analysis, the reliability of automated fragment measurement systems, and ease of application in the field are challenges that remain to be addressed in the future.

Keywords: *Blasting fragments, 3D image analysis, Photogrammetry, Laser scanning*

PENDAHULUAN

Peledakan merupakan satu kegiatan utama dalam aktivitas penambangan di lapangan. Pembongkaran batuan keras yang tidak bisa dilakukan secara langsung dengan alat mekanis harus melalui tahap peledakan. Fragmen batuan hasil peledakan merupakan parameter untuk menilai keberhasilan peledakan yang dilakukan (Kabwe, 2018). Di samping faktor lain seperti getaran dan suara, fragmentasi peledakan adalah salah satu parameter penting untuk mengukur ketercapaian suatu kegiatan peledakan apakah sudah sesuai dengan tujuan utamanya atau sebaliknya. Penilaian ketercapaian kegiatan peledakan merupakan kombinasi dari parameter teknis, ekonomis dan lingkungan, dimana fragmentasi peledakan masuk dalam parameter teknis dan bahkan bisa mempengaruhi ekonomi. Distribusi ukuran fragmentasi batuan hasil peledakan memberikan dampak pada waktu pemuatan alat mekanis (Nikkhah et. al., 2022).

Pemuatan dan pengangkutan adalah atau tahapan aktivitas paska peledakan yang harus dilakukan agar material dapat dibawa menuju ke lokasi aktifitas selanjutnya. Di samping itu, fragmentasi peledakan dapat memberikan efek pada performa peremukan batuan di unit crusher (Ozdemir, 2022). Karena pentingnya fragmentasi peledakan maka pengukuran dan analisis fragmen batuan pada muckpile adalah kebutuhan mendasar di lapangan.

Pada praktiknya, pengukuran fragmen peledakan dibutuhkan untuk mengetahui ukuran yang dihasilkan. Para praktisi dan peneliti peledakan mengembangkan beberapa metode yang digunakan untuk keperluan pengukuran fragmen peledakan. Metode-metode yang pernah diusulkan secara umum terdiri dari metode pengukuran langsung dan metode pengukuran *image analysis* (analisis gambar). Metode yang disebut terakhir secara umum juga terdiri dari metode 2 dimensi dan metode 3 dimensi. Metode *Image analysis* paling sering digunakan karena kemudahan untuk diaplikasikan di lapangan.

Pengukuran fragmen metode 2D telah diusulkan oleh Kemeny et. al., 1993 yang menunjukkan pengukuran praktis fragmen batuan berdasarkan gambar muckpile di laboratorium. Aplikasi metode *image analysis* 2D untuk analisis material ukuran fine dilakukan oleh Cho et. al., 2003. Koreksi hasil pengukuran material fine pada fragmen peledakan pada metode 2D dengan melibatkan metode statistis dilakukan pada penelitian Gheibie et. al., 2009 dimana hasil estimasi 2D dibandingkan dengan hasil model prediksi fragmentasi. Meskipun telah digunakan secara luas, metode 2D memiliki keterbatasan karena tidak mampu menjangkau dan memodel permukaan fragmen secara merata pada muckpile. Metode 3D *image* beberapa tahun terakhir ini dikembangkan sebagai salah satu alternative pengukuran fragmen peledakan.

Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji secara kritis tren dan penerapan pengukuran metode 3D *image*, termasuk di dalamnya menelaah teknik-teknik yang sudah digunakan dewasa ini, serta keunggulan dan tantangan untuk penerapannya di masa depan. Makalah ini diharapkan dapat memberikan gambaran tentang perkembangan pengukuran fragmentasi peledakan metode 3D *image analysis*, sehingga dapat menjadi alternatif rujukan ilmiah bagi para peneliti dan panduan teknis bagi para praktisi peledakan di lapangan.

METODE

Penelitian ini merupakan *literatur review* dimana data, analisis data dan penarikan kesimpulan didasarkan pada data-data yang diperoleh dari penelitian sebelumnya. Data data yang dikumpulkan terkait pengukuran fragmen hasil peledakan ditelaah secara kritis untuk memperoleh hasil dan kesimpulan sesuai tujuan penelitian. Data diperoleh dengan penelusuran pada basis data ilmiah berupa jurnal akademik, prosiding pertemuan ilmiah, laporan hasil penelitian dan sumber-sumber sejenis yang relevan dengan isu penelitian.

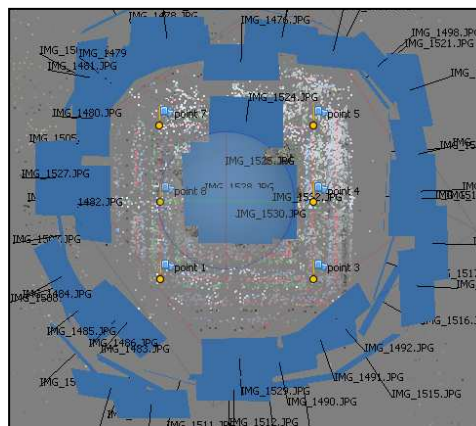
Sumber-sumber ilmiah yang dimaksud dipilih sesuai keterwakilan sub isu dan data yang relevan dengan isu utama penelitian. Sumber penelitian yang dipilih adalah sumber yang masuk dalam kelompok besar penelitian pengukuran *3D image* di laboratorium, penerapannya pada tambang open pit dan tambang bawah tanah. Analisis pada penelitian ini dilakukan secara deskriptif kualitatif. Analisis kualitatif dilakukan untuk memahami dan mengevaluasi hasil penelitian terdahulu, mencakup tren dan penerapan metode *3D image*. Pengelompokan jenis penerapannya di lapangan juga dilakukan berdasarkan kategori seperti teknologi yang digunakan (photogrammetry dan laser scanning) serta lokasi penerapan metode ini pada sistem penambangan di lapangan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tren Pengukuran 3D Photogrammetry dan Lasser Scaning

Menurut *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*; photogrammetry merupakan seni, ilmu pengetahuan dan teknologi untuk memperoleh informasi yang memadai tentang objek fisik dan lingkungan melalui proses rekaman, pengukuran dan interpretasi image photography (Moser et. al., 2005). Stereofotogrametri membangun geometri 3 Dimensi suatu benda yang sedang diamati dengan melibatkan beberapa gambar 2D. Proses stereofotogrametri ini melibatkan konversi koordinat 2D (x, y) beberapa foto menjadi koordinat X, Y, Z pada 3 Dimensi (Jang et. al., 2020). Hidayat, 2016 melakukan pengukuran fragmen metode 3D fotogrametri di laboratorium, penelitiannya menerapkan teknik manual pada pengambilan gambar, berikut adalah tahapan umum pengukuran yang dilakukan:

1. Pengambilan gambar fragmen dari berbagai sudut atau arah (*multiple angles shoot*)
2. Input gambar fragmen ke software Agisoft Photoscan
3. Proses pemodelan dan pengukuran fragmen meliputi *camera alignment*, *marking*, *build dense point cloud*, *meshing*, *build texture*, *close hole* and *extract volume of fragments process* (lihat Gambar 1)
4. Analisa distribusi fragmen menggunakan distribusi Rosin-ramler.



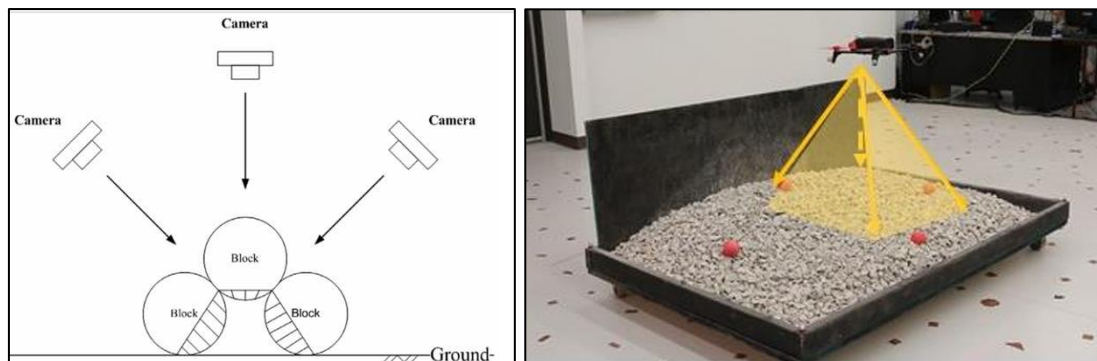
Gambar 1. Camera Alignment Pada Software Agishoft (Hidayat; 2016)

Selain teknik fotogrametri, teknik laser scanning juga digunakan pemodelan dan pengukuran fragmen pada muckpile. Laser scanning (LS), juga dikenal sebagai LIDAR, adalah teknik survei untuk mengumpulkan point cloud tiga dimensi (3D) dari objek dengan menerapkan teknik pengukuran melalui tahapan *laser ranging* dan deteksi, *scanning*, *positioning* dan orientasi (Liang et. al., 2014). Pengukuran fragmen batuan hasil peledakan menggunakan laser scanning adalah adaptasi baru diterapkan, menggunakan prosedur pengumpulan data spesifik lokasi yang mempertimbangkan akses pada lokasi pengamatan dan spesifikasi alat yang

digunakan (Onederra et. al., 2015). Pada referensi yang disebut terakhir pengukuran fragmen dilakukan pada front penambangan open pit dimana model 3D yang dibentuk adalah bagian depan, tengah, dan belakang dari setiap muckpile. Tahapan model yang dilakukan secara umum terdiri dari *edge detection*, *seed formation* dan *watershed segmentation*, tiga tahapan secara keseluruhan mendeteksi *edge fragmen* dan mengeliminasi objek pada muckpile yang tidak perlu untuk dimasukkan dalam estimasi dimensi fragmen.

Penerapan Pengukuran Di Laboratorium

Pengukuran fragmen pada pendekatan 3D dapat dilakukan dengan mengaplikasikan metode 3D Fotogrammetry, yang mengaplikasikan pengambilan gambar objek yang sama dari berbagai sudut (*multiple angles shot*). Han & Song; 2014 mengaplikasikan model 3D fotogrammetry fragmen di laboratorium dan lapangan. Untuk menguji keandalan model 3D fotogrammetry dilakukan komparasi dengan 2 hasil metode pengukuran lain yaitu metode estimasi 2D dan uji volume fragmen menggunakan media air. Selain itu pendekatan statistik untuk memperbaiki hasil estimasi 3D fotogrammetry juga dilakukan. Pada penelitian laboratorium Hidayat; 2016 hasil model 3D fotogrammetry dibandingkan dengan hasil analisa ayakan dan pengukuran volume fragmen menggunakan media air, dalam hal ini hasil ayakan adalah diameter real dari fragmen yang dianalisa. Dari ke dua jenis penyusunan sample pada penelitian Hidayat; 2016 bahwa estimasi 3D fotogrammetry untuk sampel tersusun *scattered* (menyebarkan atau tidak berhimpitan) lebih bagus hasil estimasinya dibanding dengan hasil estimasi untuk sampel tersusun *heaped* (berhimpitan). *Error* estimasi untuk *sample* *heaped* disebabkan oleh ada bagian dari *sample* batuan yang tidak bisa dimodel karena tidak masuk dalam image kamera (lihat Gambar 2). *Error* estimasi pada sampel tersusun *heaped* ini diperbaiki dengan melibatkan pendekatan statistik pada hasil estimasi fragmen.



Gambar 2. Sumber Bias Pengukuran (Han & Song, 2014) dan Pengukuran dengan UAV Drone (Bamford et.al., 2016)

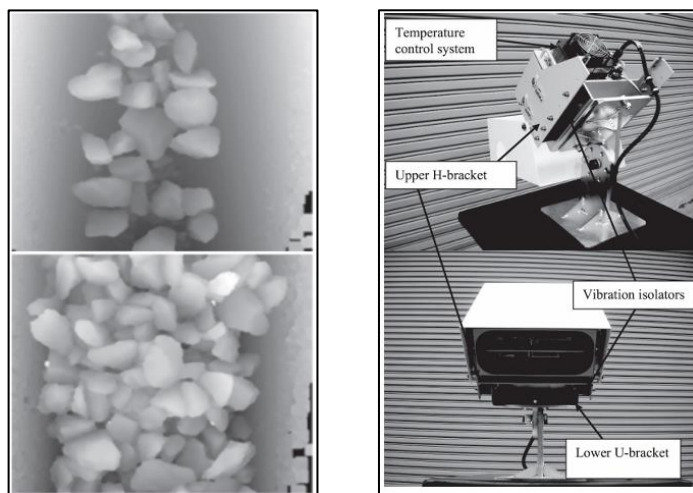
Aplikasi teknik fotogrametri untuk pengukuran fragmen dengan bantuan Unmanned Aerial Vehicles (UAV) drone pada skala laboratorium dilakukan Bamford et., al. 2017, mengaplikasikan teknik *3D fotogrametri* yang dibantu dengan drone pada saat pengambilan gambar sampel fragmen batuan di laboratorium, lihat Gambar 2. Sebagai perbandingan dengan pengambilan gambar menggunakan UAV drone, pengambilan gambar juga dilakukan secara manual. Kurva distribusi fragmen dihasilkan dari system yang diterapkan dapat diketahui secara *real-time*. Pengambilan gambar dengan UAV pada prosesnya tidak dilakukan dengan penempatan *scale object* (objek skala) pada muckpile atau sekitarnya. Menariknya hasil ini lebih baik jika dibandingkan dengan pengambilan gambar secara manual dengan penempatan *scale object*. Selain pada tambang terbuka aplikasi metode 3D pada pengukuran fragmen dilakukan juga pada kegiatan tambang bawah tanah. Keandalan metode 3D fotogrametri ini dicoba dengan membandingkannya dengan

hasil metode 2D dan hasil uji ayakan. 3 buah muckpile di laboratorruim yang tersusun dari 100 fragmen batuan dijadikan sebagai objek pengamatan untuk dianalisa distribusi fragmennya menggunakan 3 metode ini.

Hasil menunjukkan bahwa R^2 hasil analisa 3D fotogrametri lebih baik dibanding hasil analisis image 2D (Jang et. al., 2020). 3D fotogrametri pada penerapannya dapat diandalkan untuk mengenali objek fragmen yang bisa dimanfaatkan untuk analisa distribusi fragmen. Tungol et. al., 2019 membuktikan keandalan metode fotogrametri untuk mengenali individual objek kubus yang di buat model 3D *image* nya di laboratorium. Foto 2D dari tumpukan balok kubus yang terbuat dari material kayu diubah menjadi *point cloud* dan selanjutnya di buat model sehingga dapat dilakukan analisis distribusi ukuran fragmen. Pada keseluruhan proses *build model* telah dilakukan tanpa input data tambahan selain gambar dan properti intrinsik dari kamera yang digunakan.

Penerapan Pengukuran Di Tambang Open Pit

Pengambilan gambar untuk keperluan model 3D pada metode fotogrametri dapat juga dilakukan dengan menempatkan kamera pada peralatan yang sedang beroperasi seperti pada shovel (*shovel based system/CBS*) dan *belt conveyor* (*conveyor based system/CBS*), lihat Gambar 3. Pada teknik pengambilan gambar berbasis conveyor kamera diletakkan di posisi yang memungkinkan pengambilan gambar saat *belt conveyor* sedang beroperasi mengangkut material. Pada Teknik ini kalibrasi kamera adalah isu praktis yang sangat penting, *image* fragmen diperoleh pada saat conveyor berjalan, selanjutnya fragmen diestimasi volume dan distribusi ukurannya (Noy 2013). Pada *shovel based system* pengambilan gambar untuk pengukuran fragmentasi peledakan dilakukan dengan pemasangan kamera pada shovel, pengambilan gambar dilakukan pada saat shovel sedang aktiv melakukan penggalian. Pada saat proses dilakukan getaran, temperature dan kelembapan (*moisture*) adalah faktor lingkungan yang penting dipertimbangkan (Noy 2013). Baik CBS and SBS dapat memberikan visualisasi 3D dari fragmen yang sedang dianalisis. Metode Laser Scanning menjadi salah satu pilihan teknik pengukuran 3D *image* pada kebutuhan analisa fragmentasi hasil peledakan di lapangan. Penerapannya yang lebih simpel, minim alat pendukung tambahan menyebabkan teknik ini menjadi salah satu alternatif dalam penerapannya. Onederra., et al. 2015 menggunakan laser scanning untuk pengukuran fragmen pada muckpile, pada percobaan yang dilakukan pengukuran dapat meliputi area muckpile yang luas, analisis otomatis dapat diaplikasikan pada kondisi resolusi tinggi, ada proses manual yang harus dilakukan untuk kondisi resolusi rendah terutama untuk estimasi material fine (lihat gambar 4).



Gambar 3. 3D Image pada CBS dan Unit Pengambilan Gambar untuk Shovel (Noy, 2013)



Gambar 4. Penempatan Laser Scanning Pada Muckpile
(Onederra et. al., 2015)

Penerapan Pengukuran Di Tambang Bawah Tanah

Penggunaan 3D fotogrametri untuk pengukuran fragmen batuan pada tambang bawah tanah dilakukan oleh Thurley et. al., 2015, pengukuran dilakukan pada draw-point and bucket load dari alat mekanis *load-haul-dump* (LHD), lihat Gambar 5. Analisa fragmentasi dilakukan secara otomatis, pengukuran yang dilakukan dapat digunakan untuk fragmen ukuran besar dan ukuran fine. Campbell & Thurley; 2017, melakukan pengukuran fragmen menggunakan 3D laser scanning resolusi tinggi diaplikasikan pada tambang bawah tanah. Pada penelitian tersebut, pengukuran fragmen dilakukan untuk mengetahui efek dari *blasting parameters* (parameter-parameter peledakan) pada fragmentasi batuan hasil peledakan. System estimasi ini dapat menghasilkan rata-rata ukuran fragmen P50 dan P80 dengan ukuran 230 mm dan 400 mm. Secara teknis, scanner resolusi tinggi telah digunakan dan system ini membutuhkan waktu scanning yang cukup lama yaitu sekitar 10 menit serta ukuran file hasil scanning hingga 200 mb. Variasi resolusi scanning sudah diterapkan pada sistem, peningkatan kerapatan *point cloud* dapat meningkatkan jumlah deteksi partikel (*particle detection*) namun tidak menghasilkan perubahan signifikan pada distribusi ukuran fragmen. Pengukuran 3D fotogrametri jika dilakukan dengan baik dapat memberikan hasil yang memuaskan.



Gambar 5. Kondisi Pengambilan Gambar Pada Tambang Bawah Tanah
(Thurley et. al., 2015)

Image segmentation (segmentasi gambar) adalah salah satu isu penting estimasi fragmen metode 3D. Pada 3D Fotogrametri kordinat *marking objek* atau objek penanda (X, Y, dan Z) berkaitan dengan kondisi permukaan fragmen yang diamati, koordinat marking object memengaruhi validitas estimasi volume fragmen. Peralatan yang sederhana dan praktis diperlukan untuk memenuhi kebutuhan pengambilan gambar fragmen (Noy; 2013). Fine material merupakan parameter

penting untuk mengevaluasi aktivitas peledakan. Debu yang dihasilkan pada muckpile berkaitan erat dengan material fine yang dihasilkan dari aktivitas peledakan. Estimasi jumlah material fine pada pengukuran fragmen metode 3D perlu dikembangkan dalam penelitian mendatang. Efektivitas estimasi material fine dalam eksperimen laboratorium tidak dibahas dalam laporan Hand & Song; 2014 dan Hidayat; 2016. Perbandingan antara hasil analisa 3D dan hasil ayakan untuk mengevaluasi keakuratan teknis estimasi material fine belum dibahas secara rinci.

Pengukuran fragmentasi metode 3D secara praktis menjadi alternatif tambahan disamping metode 2D yang telah digunakan lebih awal dan lebih luas. Estimasi metode *3D image analysis* sudah bisa diterapkan baik pada tambang open pit dimana *space* tersedia luas ataupun tambang bawah tanah dimana ketersediaan *space* terjadi sebaliknya. Analisa fragmentasi 3D dipromosikan karena salah satunya memiliki kelebihan mampu memodel bagian fragmen yang tidak bisa dilakukan pada model 2D. Kelebihan ini, sebagaimana penelitian sebelumnya yang disebutkan pada bagian awal tulisan ini, mendorong agar model 3D mampu menghasilkan model muckpile dimana fragmen tersusun secara terhimpit dan saling tindih satu sama lain (*heaped*). Pola susunan *heaped* adalah susunan alamiah fragmen hasil peledakan pada muckpile di lapangan, ini terjadi karena energi peledakan yang mendorong fragmen ke arah atas dan depan saat detonasi terjadi. Para peneliti mencoba menjawab tantangan tersebut dengan mengajukan metode image analysis 3D. Secara akademik metode 3D dengan sendirinya menjadi kebutuhan akademik untuk *research advance* (kebutuhan kemajuan penelitian). Kemajuan alat pengukuran dan metode analisis sesuai kebutuhan yang ada pada metode image analysis 3D sampai saat ini sedang dan masih akan terus berkembang.

Isu-isu penting terkait penerapan metode 3D image analysis di lapangan adalah pencahayaan, identifikasi objek individu, lokasi ideal penempatan alat perekam gambar dan estimasi material fine. Pada penerapannya, kondisi pencahayaan sangat penting dalam pembuatan model 3D, kondisi pencahayaan akan mendukung kemampuan sistem memaksimalkan pengenalan objek fragmen. Dengan kata lain, kondisi pencahayaan dapat meminimalisir adanya ketidakakuratan pada model yang dapat mengurangi keandalan estimasi distribusi ukuran fragmen sebagai hasil akhir yang diinginkan dari kegiatan pengukuran fragmen peledakan. Identifikasi atau pengenalaan objek fragmen adalah isu krusial lainnya pada sistem estimasi 3D yang diterapkan. Pengenalan individual fragmen termasuk batas semua sisinya sangat kritikal karena akan mempengaruhi hasil estimasi volume dan diameter fragmen.

Pada tahap estimasi, diameter fragmen adalah nilai akhir yang dipedomani untuk menentukan distribusi ukuran fragmen yang merupakan salah satu tujuan utama pada pengukuran fragmentasi. Kesalahan dalam mengidentifikasi batas-batas individu fragmen akan menghasilkan kesalahan pada distribusi fragmen (*error estimation*). *Error estimation* yang signifikan akan menghasilkan distribusi ukuran fragmen dengan tingkat kesalahan yang signifikan dan ini akan mempengaruhi secara langsung efektifitas pengambilan keputusan terkait fragmentasi bagi para *engineer* di lapangan. Identifikasi atau pengenalan objek adalah tahapan penting dalam setiap metode estimasi dan analisis yang diterapkan pada 3D image analysis. Jenis serta posisi instalasi alat dan kamera sangat mempertimbangkan ketersediaan *space* dan jenis peralatan tambang terbuka maupun bawah tanah sebagai tempat pemasangan alat perekam gambar. Pengambilan gambar muckpile pada *shovel based sistem* (SBS) merupakan kelebihan pada sistem ini. Instalasi kamera pada shovel memungkinkan pengambilan gambar model dapat menjangkau lebih banyak bagian muckpile pada setiap level, ini dapat dilakukan seiring dengan kemajuan pengggalian shovel. Ketersedian gambar pada setiap lapisan kedalaman muckpile dapat meningkatkan akurasi model 3D yang dibuat dan meningkatkan estimasi hasil distribusi ukuran fargmen yang diestimasi pada sistem ini. Estimasi jumlah material ukuran fine pada 3D model masih menjadi isu yang harus dikembangkan baik dari

sisi teknik estimasi maupun teknik evaluasi hasil estimasinya. Fine material, material ukuran kecil yang bisa diterbangkan debu, adalah produk hancuran batuan sebagai hasil dari ekspansi energi peledakan pada batuan. Keberadaan material ukuran fine secara langsung berpengaruh pada kehilangan material (*loose material*) saat pemuatan dan pengangkutan, juga berpotensi menambah kuantitas debu di area penambangan. Jumlah fine material yang minim adalah diantara kondisi paska peledakan yang diinginkan di lapangan. Estimasi fine material yang akurat membantu para *engineer* untuk menyesuaikan *design* peledakan yang akan dilakukan di mas depan.

Di samping kelebihan pada penerapannya, pendekatan 3D untuk estimasi fragmen hasil peledakan masih menyisakan tantangan yang harus dicari solusinya di masa depan . Kelebihan yang dimiliki adalah kemampuan membuat model yang lebih dalam secara 3D dan kemampuan pengambilan gambar yang merata karena penempatan alat pada posisi yang tepat. Penerapan metode 3D meningkatkan kemampuan sistem untuk membuat model fragmen yang susah dijangkau pada posisi bagian yang hampir tersembunyi di bagian bawah individual fragmen pada muckpile. Instalasi alat perekam pada posisi yang tepat seperti instalasi pada shovel untuk kegiatan tambang terbuka dan instalasi di atas front kerja alat load-haul-dump untuk kegiatan tambang bawah tanah memungkinkan pengambilan gambar dapat menjangkau muckpile secara lebih merata karena dilakukan seiring dengan tahap kemajuan penggalian muckpile oleh kerja alat mekanis. Di antara tantangan yang masih harus dihadapi dalam menerapkan pendekatan 3D model pada analisa fragmentasi peledakan adalah keandalan analisa material fine, keandalan sistem otomatisasi hasil pengukuran fragmen, dan kemudahan aplikasinya di lapangan.

Estimasi *fine material* pada model 3D masih menjadi tantangan, upaya untuk membandingkan hasil estimasi fine material dengan model 3D dan dengan hasil analisa ayakan menjadi tantangan untuk dilakukan lebih detail pada penelitian di masa mendatang. Otomatisasi hasil sehingga distribusi ukuran fragmen bisa diketahui oleh engineer secara cepat di lapangan akan mempercepat dan memudahkan pengambilan keputusan yang ada kaitannya degan fragemnetasi pada kegiatan penambangan, ini masih perlu dikembangkan pada sistem 3D karena pada penerapannya proses mendapatkan distribusi ukuran fragmen belum semua dapat dilakukan secara cepat. Kemudahan penerapan di lapangan harus dipertimbangkan pada setiap metode yang diusulkan. Tantangan dari sisi kemudahan instalasi alat, kecepatan perolehan hasil analsisi distribusi fragmen dan semakin terjangkauunya biaya adalah tantangan yang dihadapi pada penerapan metode ini di masa depan.

SIMPULAN

Pengukuran metode *3D image analysis* telah diusulkan dan mulai diterapkan untuk estimasi fragmen batuan hasil peledakan dimana teknik fotogrammetry dan laser scanning adalah teknik yang sudah diterapkan untuk pengukuran di laboratorium, di lokasi tambang terbuka maupun tambang bawah tanah. Pada penerapannya baik di laboratorium maupun di lapangan metode 3D photogrametry dan laser scanning mampu mengenal individul object fragmen yang dapat dijadikan acuan untuk analisa distribusi fragmen. Pada penelitian laboratorium untuk menguji keandalannya, hasil estimasi ukuran fragmen metode 3D dibandingkan dengan hasil estimasi metode konvensional seperti hasil ayakan dan hasil pengukuran volume menggunakan media air. Pada prinsipnya model 3D terlebih dahulu akan melakukan build point cloud, segmentasi atau pengenalan individual fragmen sehingga bisa melakukan estimasi distribusi ukuran fragmen sebagi hasil akhir.

Pengukuran fragmentasi metode 3D secara praktis menjadi alternatif tambahan disamping metode 2D yang telah digunakan lebih awal dan lebih luas. Estimasi metode *3D image analysis* sudah bisa diterapkan baik pada tambang open

pit dimana *space* tersedia luas ataupun tambang bawah tanah dimana ketersediaan *space* terjadi sebaliknya. Isu-isu penting terkait penerapan metode 3D image analysis di lapangan adalah pencahayaan, identifikasi objek individu, lokasi ideal penempatan alat perekam gambar dan estimasi material fine. Di samping kelebihan pada penerapannya, pendekatan 3D untuk estimasi fragmen hasil peledakan masih menyisakan tantangan yang harus dicari solusinya di masa depan. Kelebihan yang dimiliki adalah kemampuan membuat model yang lebih detail secara 3D dan kemampuan pengambilan gambar yang merata karena penempatan alat pada posisi yang tepat. Di antara tantangan yang masih harus dihadapi dalam menerapkan pendekatan 3D model pada analisa fragmentasi peledakan adalah keandalan analisa material fine, keandalan sistem otomatisasi hasil pengukuran fragmen, dan kemudahan aplikasinya di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Bamford, T., Esmaeili, K., & Schoellig, A. P. (2017). A real-time analysis of post-blast rock fragmentation using UAV technology. *International journal of mining, reclamation and environment*, 31(6), 439-456. <https://doi.org/10.1080/17480930.2017.1339170>
- Campbell, A. D., & Thurley, M. J. (2017). Application of laser scanning to measure fragmentation in underground mines. *Mining Technology*, 126(4), 240-247. <https://doi.org/10.1080/14749009.2017.1296668>
- Cho, S. H., Nishi, M., Yamamoto, M., & Kaneko, K. (2003). Fragment size distribution in blasting. *Materials transactions*, 44(5), 951-956. <https://doi.org/10.2320/matertrans.44.951>
- Gheibie, S., Aghababaei, H., Hoseinie, S. H., & Pourrahimian, Y. (2009). Modified Kuz—Ram fragmentation model and its use at the Sungun Copper Mine. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(6), 967-973. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2009.05.003>
- Han, J. H., & Song, J. J. (2014). Statistical estimation of blast fragmentation by applying stereophotogrammetry to block piles. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 68, 150-158. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.02.010>
- Hidayat, Syamsul., 2016. *Pengukuran Fargmen Batuan Hasil Peledakan Menggunakan Metode Image Analysis 3D Photogrammetry*. Thesis Submitted to the Bandung Institute of Technology for the Degree of Master of Technic. Bandung, Indonesia
- Jang, H., Kitahara, I., Kawamura, Y., Endo, Y., Topal, E., Degawa, R., & Mazara, S. (2020). Development of 3D rock fragmentation measurement system using photogrammetry. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 34(4), 294-305. <https://doi.org/10.1080/17480930.2019.1585597>
- Kabwe, E. (2018). Velocity of detonation measurement and fragmentation analysis to evaluate blasting efficacy. *Journal of rock Mechanics and geotechnical Engineering*, 10(3), 523-533. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.12.003>
- Kemeny, J. M., Devgan, A., Hagaman, R. M., & Wu, X. (1993). Analysis of rock fragmentation using digital image processing. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119(7), 1144-1160. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1993\)119:7\(1144\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1993)119:7(1144))
- Liang, X., Kukko, A., Kaartinen, H., Hyyppä, J., Yu, X., Jaakkola, A., & Wang, Y. (2014). Possibilities of a personal laser scanning system for forest mapping and ecosystem services. *Sensors*, 14(1), 1228-1248. <https://doi.org/10.3390/s140101228>
- Moser, P., Gaich, A., Zechmann, E., & Grasedieck, A. (2005). The SMX Blast Controller-Determining the geometrical parameters of a blast based on 3D

- imaging. In *3rd EFEE World Conference of Explosives and Blasting* (pp. 401-407). EFEE.
- Nikkhah, A., Vakylabad, A. B., Hassanzadeh, A., Niedoba, T., & Surowiak, A. (2022). An evaluation on the impact of ore fragmented by blasting on mining performance. *Minerals*, 12(2), 258. <https://doi.org/10.3390/min12020258>
- Noy, M. J. (2013). Automated rock fragmentation measurement with close range digital photogrammetry. In *Measurement and Analysis of Blast Fragmentation: Workshop FRAGBLAST* (pp. 13-21).
- Onederra, I., Thurley, M. J., & Catalan, A. (2015). Measuring blast fragmentation at Esperanza mine using high-resolution 3D laser scanning. *Mining Technology*, 124(1), 34-36. <https://doi.org/10.1179/1743286314Y.0000000076>
- Ozdemir, K. (2021). Evaluation of blast fragmentation effects on jaw crusher throughput. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(19), 2036. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08426-z>
- Thurley, M., Wimmer, M., & Nordqvist, A. (2015). Blast fragmentation measurement based on 3D imaging in sublevel caving draw-points and LHD buckets at LKAB Kiruna. In *International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting: 24/08/2015-25/08/2015* (pp. 763-774). The Australasian Institute of Mining and Metallurgy.
- Tungol, Z., Kawamura, Y., Kitahara, I., & Jang, H. D. (2019, October). Development of a remote rock fragmentation size distribution measurement system for surface mines using 3D photogrammetry. In *Proceedings of the 10th International Conference on Explosives and Blasting, Chengdu, China* (pp. 27-30).