

PENGGUNAAN TEKNIK FOTOGRAMETRI DALAM REKONSTRUKSI PAHATAN PADA BATU PRASASTI

APPLICATION OF PHOTOGRAMMETRY TECHNIQUES IN RECONSTRUCTING THE CARVING ON STONE INSCRIPTIONS

Goenawan A Sambodo¹, Yoyon K. Suprpto², Eko Mulyanto Yuniarno²
Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya¹
Departemen Teknik Elektro dan Departemen Teknik Komputer, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya²
sambodo.19071@mhs.its.ac.id

ABSTRACT

This research discusses and applies photogrammetry techniques to determine the depth of the script carvings on some worn-out stone inscriptions so images of scripts can be more readable. Inscriptions are the backbone of ancient Indonesian historical writings. Unfortunately the significance of many such ancient inscriptions can not yet be used optimally since many inscriptions are found in a state of having poor legibility, and this due both to natural as well as human factors. To this day, photogrammetry techniques have not been widely used by Indonesian researchers in order to help analyze existing cultural heritage objects, especially stone inscriptions. In addition to previous photogrammetric techniques reviews, this article also brings forward my experiment on the photogrammetric techniques, especially those directly related to the stone inscriptions. The reconstruction was not intended to interpret the meaning of the scripts, but rather to give epigraphists a new insight into other ways of clarifying worn-out scripts.

Keywords: Reconstruction; inscription; photogrammetry; documentation

ABSTRAK

Penelitian ini membahas dan menguji teknik fotogrametri untuk mengetahui kedalaman pahatan pada batu prasasti sehingga rekonstruksi dapat dilakukan guna memperjelas bekas pahatan aksara yang ada. Diharapkan akan dapat memunculkan gambar pahatan dengan lebih jelas sehingga pada akhirnya pahatan tersebut dapat dibaca. Prasasti adalah tulang punggung penulisan sejarah kuna Indonesia. Arti penting prasasti ini belum dapat digunakan dengan maksimal karena banyak prasasti yang ditemukan dalam keadaan aus pahalannya, baik karena kerusakan yang disebabkan oleh faktor alam maupun manusia. Teknik Fotogrametri belum banyak digunakan oleh peneliti dari Indonesia untuk membantu menganalisis benda cagar budaya yang ada terutama prasasti. Selain mengulas beberapa teknik fotogrametri dikemukakan pula percobaan teknik fotogrametri yang telah dilakukan khususnya yang berhubungan langsung dengan prasasti. Rekonstruksi yang dilakukan tidak dimaksudkan untuk membaca dan mengartikan hasil pembacaan aksara prasasti, akan tetapi lebih kepada memberi pandangan baru dan potensi penggunaan teknik fotogrametri bagi para ahli epigrafi tentang cara lain dalam memperjelas bekas pahatan yang telah aus.

Kata kunci: Rekonstruksi; prasasti; fotogrametri; dokumentasi

Artikel Masuk : 23-06-2020

Artikel Diterima : 27-08-2020

PENDAHULUAN

Banyak kajian mengenai prasasti yang menyatakan bahwa penelitian tidak dapat dilakukan secara lebih baik karena pahatan aksara yang hilang, aus ataupun pudar (pada naskah berbahan kain atau kertas) seiring dengan perjalanan waktu. Tulisan, baik yang ada di benda keras seperti batu dan logam maupun benda lunak seperti daun dan kertas merupakan hal yang sangat penting dalam sebuah kebudayaan. J.G. de Casparis menyebutkan bahwa di Nusantara, tulisan telah digunakan selama hampir enam belas abad, yang apabila tulisan itu dapat terdokumentasi dan direkonstruksi ulang dengan baik, maka semua itu akan dapat menjadi nilai tambah yang penting dalam penyusunan sejarah peradaban di tempat tulisan tersebut ditemukan (Casparis, 1975, hlm. 1). Prasasti adalah benda budaya yang berisi tulisan angka ataupun aksara kuna. Meskipun arti sebenarnya dalam bahasa Sanskerta adalah "pujian", akan tetapi dalam perkembangannya kata prasasti dianggap sebagai "piagam, maklumat, surat keputusan, undang-undang, atau tulisan".

Di kalangan ilmuwan di bidangnya, prasasti disebut juga sebagai "inskripsi", sementara orang awam menyebutnya sebagai "watu tulis" atau "batu bersurat". Pengertian prasasti merujuk pada sumber sejarah yang ditulis di atas batu, logam, kayu dan tanduk dan semua material berbahan keras yang kebanyakan dibuat atas perintah penguasa suatu daerah. Penyebutan prasasti dalam tulisan ini akan selalu mengacu pada definisi tersebut. Dalam pengertian umum prasasti dapat diartikan sebagai peninggalan masa lalu yang berupa tulisan yang ditorehkan/ditulis di atas permukaan benda kasar terutama batu dan logam sebagai medianya. Torehan pada media keras itu menggunakan alat pahat yang kemungkinan besar terbuat dari besi. Belum ditemukan bukti alat gores ini, akan tetapi dari perbandingan yang dilakukan pada para pemahat batu di Trowulan atau di Muntilan, serta para pemahat logam di Kotagede, Yogyakarta, diketahui bahwa mereka menggunakan alat pahat dari logam yang disesuaikan dengan ukuran media maupun besaran huruf yang akan ditulis.

Boechari (1977, hlm. 4) mengatakan bahwa tugas ahli epigrafi sekarang ini tidak saja meneliti prasasti-prasasti yang belum diterbitkan, tetapi juga meneliti ulang transkripsi prasasti-prasasti yang baru diterbitkan. Masih menurut Boechari, dalam menunaikan tugas tersebut para epigraf banyak menjumpai kesulitan, di antaranya pada prasasti bermedia batu. Tingkat keusangan batu yang tinggi membuat pahatan batu tersebut amat sulit untuk dibaca. Harusnya dilakukan berulang kali pembacaan untuk mendapatkan hasil yang memuaskan.

Kerusakan yang terjadi dapat secara garis besar diakibatkan oleh dua alasan utama. Pertama, kerusakan yang diakibatkan oleh faktor alam yang dibagi lagi menjadi kerusakan fisik seperti adanya gunung meletus, banjir, gempa bumi dan cuaca. Kejadian alam ini sering menyebabkan prasasti menjadi hilang, pecah atau menjadi aus. Contoh dari hal ini adalah temuan prasasti prasasti di sekitar Sendang Legi, Lamongan. Batuan prasasti yang memang berasal dari bahan yang gampang rusak karena batuan yang berpori-pori besar, menjadi semakin rusak karena tidak adanya bangunan pelindung yang menaungi batu itu dan juga adanya kerusakan biologis seperti akibat jamur, ganggang ataupun lumut. Adanya jamur, ganggang atau lumut pada batu prasasti yang jarang dibersihkan lama kelamaan akan membuat batu itu menjadi "lunak" dan pada akhirnya rusak.

Kerusakan kedua diakibatkan oleh ulah manusia baik yang dilakukan secara sengaja seperti karena adanya perang, sengaja dihapus atau bahkan dirusak/dihancurkan karena dianggap tidak sesuai dengan perkembangan jaman. Kerusakan yang tidak disengaja seperti yang terjadi ketika seseorang yang mencari dan mengumpulkan batu sebagai pencari mata pencahariannya, yang karena ketidaktahuannya saat itu, maka ketika menemukan sebuah batu besar yang dianggapnya cukup untuk bisa dibawa pulang kemudian memecah batu itu menjadi beberapa bagian. Bagian-bagian pecahan yang ada ketika diamati lebih jauh ternyata memiliki pahatan huruf kuna di bagian lainnya. Contoh lain adalah penutupan pahatan batu karena lapisan cat atau kapur dengan maksud untuk memperjelas pahatan yang malah mengakibatkan tertutupnya pahatan batu. Penanganan yang keliru atas batu prasasti ketika ditemukan dan atau dipindah juga dapat menyebabkan kerusakan pahatan batu yang ada.

Kerusakan prasasti batu secara fisik pada umumnya diakibatkan oleh cuaca dan pahatan awal yang memang tipis, sehingga seiring waktu pahatan itu menjadi semakin tipis dan tinggal menyisakan bekas guratan. Hal ini semakin diperparah dengan kenyataan di lapangan bahwa kebanyakan prasasti batu yang masih berada di lokasi aslinya (*in-situ*) tidak diberi pengaman atap, sehingga cuaca panas dan hujan menambah kerusakan ini. Bekas guratan itu meskipun masih dapat dilihat mata namun sangat sulit untuk dapat dibaca dengan baik. Contoh dari prasasti berbahan batu yang rusak itu dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Beberapa Kerusakan Pada Batu Prasasti

- A.** Kerusakan pahatan karena kedalaman pahatan yang menipis. **B.** Kerusakan pada pahatan yang meskipun masih tampak namun sudah sulit untuk dibaca langsung karena sudut pahatan yang melebar. **C.** Kerusakan pada pahatan karena ketipisan pahatan yang tidak sama. **D.** Kerusakan pahatan karena pahatan yang aus karena cuaca dan waktu dan bagian batu yang pecah.
(Sumber : Goenawan A. Sambodo)

Pada masa lalu, dokumentasi prasasti menggunakan cara-cara yang sangat sederhana. Membuat cetakan negatif dari kertas (absklat), membuat cetakan positif dari kertas (*rubbing*) atau menulis langsung bentuk huruf/ goresan yang ada pada batu (*facsimile*). Hasil yang didapat dengan dokumentasi melalui cara ini sungguh sangat tergantung pada keahlian masing masing pelaku pencatatan. Di

samping itu, pencatatan atau pendokumentasian prasasti dengan cara-cara seperti yang telah disebutkan di muka sangat memakan waktu ketika dilakukan di lapangan. Hasil pendokumentasian yang tidak terstandarisasi serta waktu yang lama untuk mendapatkan hasil yang diharapkan menjadi kelemahan yang meskipun sudah disadari namun belum banyak dilakukan usaha untuk mengatasinya. Gambar 2. memperlihatkan cara dan hasil yang didapat dari masing-masing pendokumentasian prasasti itu.



Gambar 2. Beberapa Cara Pendokumentasian Prasasti dan Hasilnya

A. teknik absklat; B. teknik *rubbing*; C. teknik *facsimile*

(Sumber: A, B dan C (kanan) Goenawan A Sambodo, C (kiri) *Berkala Arkeologi XIV*, 1994, hlm. 8)

Terdapat satu cara lain dalam mendokumentasikan naskah atau prasasti dengan metode yang lebih maju, yakni dengan foto. Melalui foto maka pendokumentasian sebuah benda cagar budaya terutama prasasti dapat menjadi lebih cepat dan akurat. Akan tetapi cara ini membutuhkan peralatan tambahan yang masih cukup mahal dan tidak dapat digunakan oleh banyak orang pada masa lalu. Dalam perkembangannya sekarang ini, peralatan dan teknologi foto menjadi semakin mudah didapat dengan harga yang terjangkau dan penggunaannya pun semakin luas di masyarakat. Pendokumentasian benda budaya terutama prasasti tidak lagi menjadi sebuah kebutuhan bagi instansi terkait dalam bidang budaya saja, namun sudah meluas ke segala lapisan masyarakat.

Akan tetapi, belum banyak yang dilakukan melalui teknik digital untuk lebih memperjelas huruf yang dipahatkan di atas prasasti - terutama untuk prasasti yang pahatannya tipis atau aus-, agar menjadi lebih mudah untuk dapat dibaca. Beberapa hal yang sudah dilakukan adalah dengan menggunakan aplikasi pengolah gambar yang umum seperti photoshop. Akan tetapi penggunaan dengan aplikasi ini masih memiliki beberapa kekurangan, salah satunya adalah masih diperlukan penambahan garis-garis untuk memperjelas tampilan hasil olahan. Hal ini seringkali menjadi sangat subyektif ketika pengguna aplikasi

tersebut terkesan memaksakan suatu bentuk tertentu atas hasil yang ada. Contoh hasil penggunaan yang telah dilakukan seperti tampak pada Gambar 3.



Gambar 3. Hasil Penggunaan Melalui Aplikasi Pengolah Gambar Photoshop
(Sumber: Goenawan A. Sambodo)

Berdasarkan munculnya permasalahan pada prasasti tersebut maka tulisan ini akan membahas upaya yang telah dilakukan oleh banyak peneliti serta penulis dalam upaya mendeteksi pahatan prasasti berbahan batu secara tiga dimensi menggunakan teknik fotogrametri. Metode fotogrametri umumnya menggunakan minimal dua gambar dari adegan statis yang sama atau objek yang diperoleh dari sudut pandang yang berbeda. Mirip dengan penglihatan manusia, jika suatu objek terlihat dalam setidaknya dua gambar (yang disebut paralaks) memungkinkan pandangan stereoskopis dan derivasi informasi 3D dari pemandangan yang terlihat di area gambar yang tumpang tindih. Metode ini dipilih karena sampai saat ini, penggunaan bantuan teknologi komputasi untuk bidang Arkeologi terutama epigrafi (pembacaan aksara kuna) di Indonesia masih sangat kurang. Sebagian besar bantuan teknologi komputasi yang telah ada lebih mengarah pada reka ulang bangunan, artefak atau bentuk pahatan relief yang ada pada bangunan candi.

Tulisan ini akan berusaha untuk mengenalkan lebih lanjut tentang menggunakan teknik fotogrametri ini dalam penelitian arkeologi pada umumnya lebih khusus lagi penelitian epigrafi. Adapun tujuan dari tulisan ini adalah (1) Memperkenalkan secara lebih dalam cara cara yang bisa dilakukan dengan teknik fotogrametri untuk mendeteksi pahatan dan merekonstruksinya yang dengan cara-cara terukur dengan baik serta meminimalisir perlakuan fisik terhadap prasasti (*non invasive*) maka akan dapat dihasilkan kemungkinan keterbacaan prasasti yang lebih baik; dan (2) Dari pengenalan ini diharapkan akan lebih banyak lagi peneliti yang menggunakannya sehingga diharapkan jumlah prasasti batu yang selama ini masih belum terbaca akan meningkat.

Diharapkan dengan cara-cara terukur serta meminimalkan perlakuan fisik (*non invasive*) terhadap pahatan pada batu terutama prasasti maka akan dapat dihasilkan kemungkinan keterbacaan prasasti yang lebih baik. Untuk jangka

panjang diharapkan pula pendokumentasikan pahatan-pahatan aus pada batu prasasti secara digital dalam bentuk 3 dimensi dengan akurasi yang optimal yang disertai dengan penyempurnaan metode, maka akan dimungkinkan melakukan restorasi digital dan duplikasi 3 dimensi untuk kepentingan penelitian dan pameran.

Teknik pencocokan citra yang merupakan bagian dari *image processing* adalah kemajuan teknologi yang sangat penting dalam ranah ilmu fotogrametri dan visi komputer. Teknik ini memungkinkan dihasilkannya awan titik rapat (*point cloud*) yang berasal dari citra 2D. Dalam konteks dokumentasi cagar budaya, teknik ini membuka peluang untuk dilakukannya dokumentasi 3D dari benda-benda cagar budaya serta mereka ulang atas benda-benda cagar budaya yang ditemukan dalam bentuk tidak utuh lagi atau kalau dalam bentuk prasasti, pahatan yang tidak tampak lagi. Di beberapa tempat dan mungkin bahkan di beberapa penelitian arkeologis hal ini masih belum banyak digunakan. Penggunaan data yang lebih sering dilakukan adalah secara 2D (melalui gambar, sketsa, dan foto).

METODE

Seperti dikatakan oleh Gajski dkk. (2016, hlm. 263):

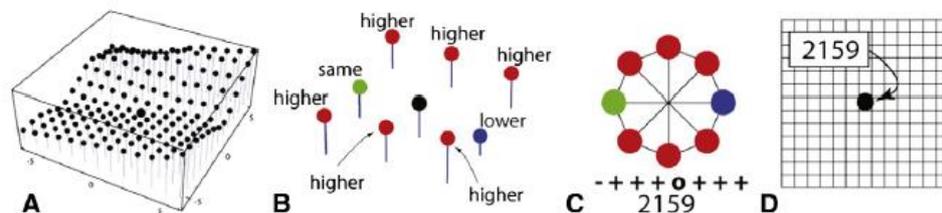
“Banyak artefak berharga berukuran kecil (beberapa sentimeter atau kurang). Dokumentasi yang relevan dari artefak semacam itu terutama terbatas pada interpretasi subjektif dan teknik menggambar manual menggunakan kaca pembesar. Teknik fotogrametri digital memungkinkan pengukuran dengan akurasi tinggi dan teknik semacam itu dapat digunakan untuk menghasilkan dokumentasi arkeometrik yang relevan dengan tingkat detail yang tinggi”.

Hal itu merupakan dasar dari penggunaan teknik fotogrametri khususnya *close-range* atau fotogrametri makro dalam upaya rekonstruksi pahatan pada batu prasasti. Dasar dari metode fotogrametri ini adalah upaya merubah bentuk dua dimensi bidang datar menjadi bentuk tiga dimensi bidang ruang sehingga pengukuran panjang lebar dan tinggi secara geometris dapat dilakukan.

Nicolae dkk. (2014) mengusulkan pahatan permukaan batu dilihat sebagai permukaan bumi dan bagian-bagian pahatan sebagai skala kecil dari lembah yang dibatasi lereng dan puncak. Salah satu alat bantu termudah yang biasa digunakan untuk menganalisis bayangan bukit yakni membuat tiruan cahaya dalam model permukaan DEM. Cara ini adalah penyesuaian yang lebih baik guna memperjelas bentuk relief pahatan yang ada. Cara yang diusulkan oleh Nicole ini sebelumnya telah digunakan oleh Jasiewicz dan Stepinski (2013) dan Victor Klinkenberg (2014) dengan data penelitian yang berbeda. Jasiewicz menggunakan data foto udara dari dataran yang ada di Polandia. Cara yang digunakan kemudian diadopsi oleh Monna (2018) dalam penelitiannya tentang relief menhir di Mongolia. Ide dasarnya adalah seperti yang dikatakan Nicole (2014) menggunakan pahatan permukaan batu dilihat sebagai permukaan bumi dan bagian-bagian pahatan sebagai skala kecil dari lembah yang dibatasi lereng dan puncak. Di bawah ini akan dijelaskan

sepintas berkenaan dengan yang oleh Jasiewicz (2013) disebut sebagai pola ternary lokal dan geomorfon yang juga telah dibicarakan oleh Yokoyama dkk. (2002).

Geomorfon adalah atribut medan dan tipe bentuk lahan, satu pemindaian DEM menghasilkan peta geomorfon. Penentuan pola lokal (*local pattern*) dilakukan dengan menggunakan lingkungan sekitar, dengan ukuran dan bentuk yang menyesuaikan diri dengan topografi lokal. Pola *ternary* lokal (LTP) adalah penerapan lebih jauh dari pola biner lokal (LBP) yang merupakan suatu metode ekstraksi ciri tertentu yang merupakan karakteristik suatu citra. Citra skala abu-abu (*Grayscale images*) dan DEM adalah sama karena kedua adalah raster bernilai tunggal (*single-valued rasters*). Jasiewicz (2013, hlm. 148) menyebutkan bahwa dalam bidang visi komputer, telah lama diakui bahwa suatu citra sebaiknya disegmentasi ke dalam struktur penyusunnya berdasarkan kesamaan tekstur. *Local Binary Patterns* (LBP) diperkenalkan sebagai deskriptor tekstur. LBP dibangun dari lingkungan lokal 3×3 di atas sel pusat; 8 tetangga diberi label 0, jika tingkat abu-abu tetangga lebih kecil dari tingkat abu-abu sel pusat, atau 1 apabila sebaliknya. *Local Ternary Patterns* (LTP) memperluas LBP ke pola bernilai 3 dengan membiarkan tingkat kontras yang kecil dianggap sebagai kurangnya kontras. Jadi, tetangga diberi label 1 jika nilainya melebihi nilai sel pusat dengan setidaknya t di mana t adalah nilai ambang yang ditentukan. Tetangga diberi label -1 jika nilainya setidaknya t lebih kecil dari nilai sel pusat. Jika tidak, tetangga diberi label 0. LBP asli terlalu sederhana untuk menjadi nilai untuk analisis DEM, di mana konsep/gagasan yang lebih tinggi, lebih rendah atau level adalah tetap penting, namun LTP, meskipun masih sederhana, menyediakan struktur yang cukup untuk digunakan untuk identifikasi unsur pokok bentuk lahan DEM.



Gambar 4. Penggunaan Konsep *Local Ternary Pattern* (LTP) Pada Klasifikasi Unsur Permukaan Bumi

(A) DEM pada sekeliling bagian yang diuji; (B) Perwakilan *ternary* yang merupakan elevasi relatif antara bagian yang diuji dan daerah sekitarnya; (C) Tiga perbedaan bentuk dari pola *ternary*; (D) Penetapan LTP pada *cell* dalam raster.

(Sumber : Jasiewicz dan Stepinski, 2013, hlm. 149)

Gambar 4. mengilustrasikan konsep penerapan LTP untuk klasifikasi bentuk lahan. Panel A menunjukkan sebagian DEM di lingkungan sel pusat. Dari pengamatan visual, jelas bahwa sel pusat memiliki unsur bentang lahan berupa lembah. Panel B hanya menunjukkan 8 “tetangga” langsung sel pusat – yang diberi label dengan warna berbeda untuk menunjukkan apakah nilai ketinggiannya lebih tinggi, lebih rendah, atau memiliki nilai ketinggian yang sama dengan sel pusat. Panel C menunjukkan pola *ternary* yang berasal dari label “tetangga”. Pola ini dapat ditunjukkan dalam tiga cara berbeda.

Pertama, secara visual sebagai segi delapan dengan setiap titik berwarna sesuai dengan konvensi yang digunakan dalam Panel B. Kedua, sebagai string dari

tiga symbol (+ = "Lebih tinggi", - = "lebih rendah", dan 0 = "sama"); simbol pertama dalam string berhubungan dengan tetangga timur dan simbol berikutnya sesuai dengan tetangga dalam urutan berlawanan arah jarum jam. Perhatikan bahwa pola dalam bentuk string juga dapat dianggap sebagai bilangan ternary (angka yang diwakili dalam basis 3) yang dapat dikonversi ke angka desimal. Dengan demikian, representasi akhir dari pola adalah angka desimal yang sesuai (2159 untuk pola yang ditunjukkan pada Gambar. 2.2). Representasi yang ringkas ini berfungsi sebagai label pola, tetapi penting untuk menekankan bahwa seluruh struktur pola dapat dipulihkan dari label tersebut. Akhirnya, panel D menunjukkan bahwa sel pusat telah diklasifikasikan sebagai geomorfon # 2159.

Dalam praktiknya, pola ternary yang mencirikan tipe medan/terrain di lingkungan sel pusat ditentukan bukan dari perbedaan ketinggian yang sederhana (seperti yang diilustrasikan dalam Gambar 2.2 untuk tujuan konseptual), melainkan dari kuantitas Δ yang diperoleh melalui karakterisasi lokal permukaan menggunakan prinsip "line-of-sight". Prinsip ini, awalnya diusulkan oleh Yokoyama dkk. (2002) sehubungan dengan gagasan tentang *terrain openness*, menghubungkan relief permukaan dan jarak horizontal dengan cara yang disebut sudut zenith dan nadir di sepanjang delapan arah kompas utama. Untuk menghitung sudut zenith dan nadir di sel pusat, delapan profil ketinggian mulai dari sel pusat dan memanjang sepanjang arah utama hingga "jarak pencarian" L diekstraksi dari DEM. Sudut elevasi adalah sudut antara jalur horizontal dan garis yang menghubungkan sel pusat dengan titik yang terletak di profil. Sudut elevasi negatif jika titik pada profil memiliki ketinggian lebih rendah dari sel pusat. Untuk setiap profil, satu set sudut elevasi DSL dihitung; simbol yang menunjukkan set ini menunjukkan ketergantungan pada arah (D) dan jarak pencarian atau skala (L). Sudut puncak profilnya didefinisikan sebagai ${}_D\Phi_L = 90^\circ - {}_D\beta_L$, di mana ${}_D\beta_L$ adalah sudut elevasi maksimum dalam ${}_D S_L$. Demikian pula, sudut nadir profil didefinisikan sebagai ${}_D\psi_L = 90^\circ - {}_D\delta_L$, dimana ${}_D\delta_L$ adalah sudut elevasi minimum dalam ${}_D S_L$.

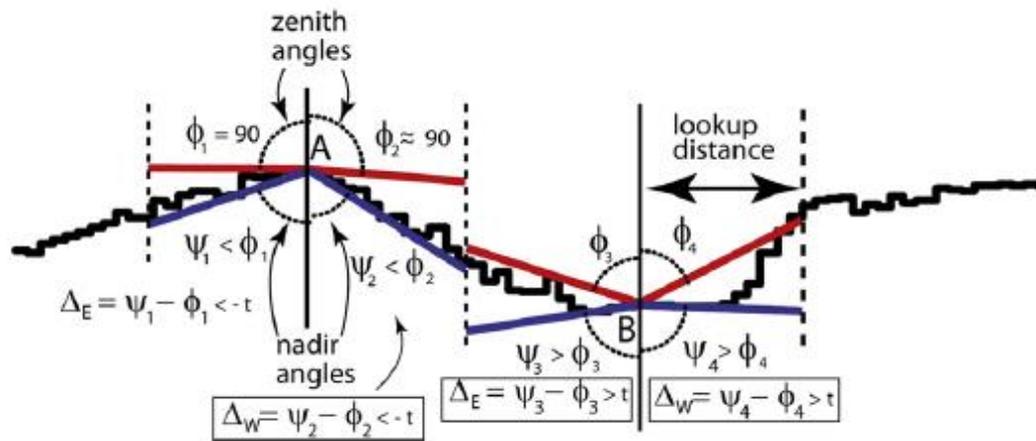
Dengan demikian, sudut zenith adalah sudut antara zenith dan garis pandangan, dan sudut nadir adalah sudut antara nadir dan garis pandang hipotetis yang dihasilkan dari pemantulan profil ketinggian sehubungan dengan bidang horizontal. Kedua sudut zenith dan nadir didefinisikan secara positif dan memiliki rentang dari 0° hingga 180° . Nilai slot dalam pola ternary yang sesuai dengan arah D dan jarak pencarian L dilambangkan dengan simbol ${}_D\Delta_L$ dan diberikan oleh persamaan (1) yang diambil dari Jarosław Jasiewicz dan Tomasz F. Stepinski (2013):

$${}_D\Delta_L = \begin{cases} 1 & \text{if } {}_D\psi_L - {}_D\phi_L > t \\ 0 & \text{if } |{}_D\psi_L - {}_D\phi_L| < t \\ -1 & \text{if } {}_D\psi_L - {}_D\phi_L < -t \end{cases} \quad (1)$$

Ada dua parameter bebas dalam rumus di atas, satu adalah pencarian jarak L dan yang lainnya adalah ambang kerataan t . Keuntungan dari menggunakan lingkungan berbasis garis pandang (*line-of-sight*) daripada lingkungan berbasis grid dalam menghitung pola-pola ternary menjadi jelas dengan mengamati bahwa, memilih nilai L yang jauh lebih besar akan menghasilkan identifikasi

elemen bentuk lahan terlepas dari skalanya. Dalam praktiknya, dengan menggunakan nilai L yang lebih besar, kita dapat secara simultan mengidentifikasi elemen bentuk lahan pada rentang skala yang lebih luas daripada yang mungkin terjadi pada lingkungan berbasis grid.

Gambar 5 mengilustrasikan konsep sudut zenith dan nadir dan menjelaskan kebutuhan untuk menggunakan keduanya dalam definisi Δ . Angka ini menunjukkan profil elevasi hipotetis melintasi garis barat-timur. Keduanya tempat dipilih dan ditandai oleh masing-masing A dan B. Secara visual mereka dapat dicirikan sebagai puncak dan lubang/ pit (atau punggung dan lembah, jika kita membayangkan profil ketinggian yang sama untuk memperluas di dimensi ketiga).

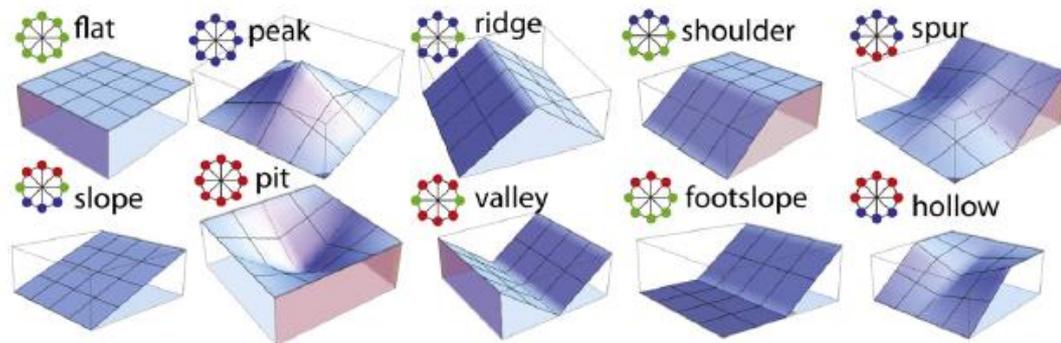


Gambar 5. Penggambaran Dari Konsep Sudut Zenith dan Nadir Serta Hubungannya Dengan Banyaknya Δ
(Sumber : Jasiewicz dan Stepinski, 2013, hlm. 149)

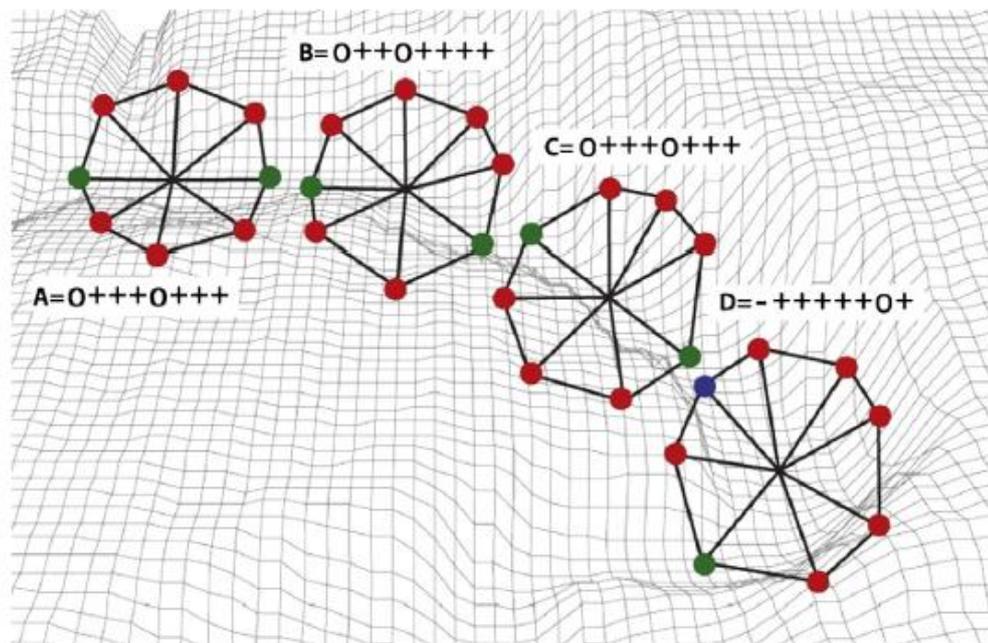
Ditampilkan tiap titik peningkatan profil *interest* dalam dua arah utama (barat dan timur) dan disesuaikan dengan sudut zenith dan nadir. Nilai Δ_s pada titik A keduanya negatif, menunjukkan puncak atau punggung, sedangkan nilai Δ_s pada titik B keduanya positif, menunjukkan lubang/*pit* atau lembah. Jika hanya menggunakan sudut zenith untuk menentukan Δ , nilai absolut Δ_s pada titik A akan sangat kecil – di bawah ambang batas kerataan – yang menunjukkan medan datar (*flat terrain*). Hal ini dikarenakan, dalam konfigurasi medan khusus ini, garis pandang (*line-of-sight*) dari permukaan tanah pada titik A ditentukan dengan lingkungan terdekat. Penggunaan sudut zenith dan nadir akan menghilangkan masalah seperti itu.

Geomorfon merupakan satu set elemen bentuk lahan yang ideal dan lengkap. Semua sel DEM dipindai dan di setiap sel dihitung nilai Δ_L untuk semua delapan arah utama. Nilai-nilai ini dimasukkan ke dalam persamaan di atas untuk mendapatkan pola *ternary* dan label desimal dari pola tersebut disimpan dalam sel yang sesuai dengan lokasinya. Klasifikasi elemen bentuk lahan yang dihasilkan dan peta yang sesuai berguna untuk penelitian pada jenis bentuk lahan tertentu di wilayah yang dipilih. Akan tetapi untuk tujuan umum jumlah elemen bentuk

lahan dalam peta geomorfometrik perlu dikurangi. Hal ini dicapai dengan mengelompokkan geomorfon ke dalam kelas-kelas yang sesuai dengan elemen bentuk lahan yang paling dikenal, seperti yang tergambar pada Gambar 6.



Gambar 6. Simbol 3D Dari Morfologi dan Hubungannya Dengan Bentuk Geomorfon Untuk 10 Unsur Yang Umum Pada Permukaan Bumi (Sumber : Jasiewicz dan Stepinski, 2013 hlm. 150)



Gambar 7. Ilustrasi Berbagai Permukaan Geomorfo Yang Terhubung Dengan Elemen Semantic Bentuk Permukaan Tunggal A,B,C dan D Yang Dihitung Dari Titik Titik Yang Berbeda Sepanjang Lekukan Lembah (Sumber : Jasiewicz dan Stepinski, 2013 hlm. 151)

Gambar 7 menjelaskan bahwa terdapat sebuah permukaan yang didominasi oleh lembah. Telah dihitung geomorfon di empat lokasi berbeda (dilambangkan dengan huruf **A**, **B**, **C**, dan **D**, masing-masing) terletak di sepanjang lembah melengkung ini. Geomorfon di lokasi **A** dan **C** memiliki pola terner yang identik dengan pola dasar “lembah” seperti yang ditunjukkan pada Geomorfon di lokasi **B** memiliki pola terner yang sedikit berbeda tetapi dengan jumlah yang sama (-1) dan (1) elemen terner sebagai geomorfon di lokasi **A** dan **C**. Sebuah geomorfon di

lokasi **D** tidak hanya memiliki pola yang agak berbeda tetapi juga jumlah elemen terner yang sedikit berbeda (ia memiliki satu (-1) elemen). Dengan demikian, ada lebih dari satu morfologi daerah arketipal yang secara semantik sesuai dengan "lembah." Oleh karena itu, prosedur untuk memperoleh peta geomorfometrik yang menunjukkan 10 tipe bentuk lahan yang paling umum adalah memindai raster yang berisi label geomorfon yang dihitung sebelumnya dan mengganti label di setiap sel dengan salah satu dari 10 tipe bentuk lahan menggunakan tabel pencarian. Tabel itu telah dibuat oleh Jasiewicz (2013:150) sebagai pelengkap paparannya.

HASIL PENELITIAN

Murtiyoso dan Suwardhi (2017, hlm. 255) menyebutkan bahwa, dokumentasi yang lebih mudah dengan teknik fotogrametri, akan membuka peluang bagi konservator, surveyor, atau arkeolog untuk melakukannya dengan menggunakan perangkat yang relatif berbiaya rendah. Peralatan minimal yang dibutuhkan adalah kamera, komputer, dan alat pengukur untuk memberikan faktor skala pada objek. Hal ini merupakan terobosan besar dalam ranah dokumentasi 3D, sebagai alternatif (atau komplemen) terhadap teknik pemindaian laser. Di lain pihak, sejumlah perangkat lunak sumber terbuka juga dapat memberikan hasil yang sangat baik dan sebanding dengan hasil dari perangkat lunak komersial.

Menurut Grün dkk. (2004, hlm. 197) keuntungan dari fotogrametri dan pendekatan berbasis citra adalah:

- (i) gambar mengandung semua informasi yang diperlukan untuk rekonstruksi 3D, dokumentasi yang akurat dan realistis (geometri dan tekstur);
- (ii) instrumen fotogrametri (kamera dan perangkat lunak) umumnya murah, sangat portabel, mudah digunakan dan dengan potensi akurasi yang sangat tinggi;
- (iii) objek dapat direkonstruksi bahkan apabila objek tersebut telah hilang atau banyak berubah menggunakan gambar yang diarsipkan.

Beberapa peneliti dari luar negeri seperti Nicolae dkk. (2014), Papadaki dkk. (2015), Monna dkk. (2018), Sapirstein (2019) diketahui telah melakukan penelitian atas pahatan-pahatan pada batu, baik yang berupa relief (pahatan dua atau tiga dimensi) maupun pahatan aksara, dengan bantuan teknik fotogrametri. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan teknik fotogrametri merupakan suatu hal yang sangat membantu untuk penelitian bekas pahatan pada batu. Bahkan hasil penelitian Sapirstein dkk (2019) berhasil memecahkan masalah atas sebuah debat panjang selama 150 tahun dengan bantuan teknik fotogrametri ini.

Monna dkk. (2018) melakukan penelitian tentang bekas pahatan dari batu menhir yang ada di Mongolia yang terkenal dengan nama "Batu Rusa" dengan beberapa tahap yakni berupa pengambilan foto dan dilanjutkan dengan pengerjaan komputasi di laboratorium yang menghasilkan bukti bahwa penggunaan fotogrametri dalam memperjelas bekas pahatan pada batu akan sangat membantu untuk menampakkannya kembali pahatan itu. Cara komputasi

yang digunakan adalah melalui pendekatan fotogrametri yakni dengan proses, pengambilan data melalui pendekatan *Structure from Motion (SfM)* membuatnya menjadi bentuk 3D dalam Mesh, menambahkan *Digital Elevation Model (DEM)* dan *Orthomosaics* sehingga hasil rekonstruksi yang dilakukan akan menjadi jelas. Akan tetapi data yang dipilih oleh Monna adalah menhir-menhir berpahat yang menurutnya masih cukup jelas untuk didata. Dia tidak mengambil contoh dari batuan yang berpahatan kurang jelas atau aus sebagai data penelitiannya (Monna dkk., 2018).

Satu hal yang tidak cocok apabila diterapkan pada keadaan lapangan di Indonesia dan Jawa pada khususnya, lebih khusus lagi pada kasus pahatan batu bertulis yang ada adalah adanya perbedaan bentuk pahatan antara relief dan aksara. Bentuk pahatan relief dalam beberapa kasus telah memiliki pola atau aturan yang jelas misalnya tokoh A karena menggambarkan seorang dewa maka ukurannya adalah kepala x cm, tangan y cm dan seterusnya seperti yang ada dalam kitab Manarasilpasastra. Berbeda dengan pahatan huruf yang sangat tergantung pada gerakan tangan masing-masing pemahat yang tidak dapat dilakukan pembakuan. Sebagai contoh khususnya di Jawa, tulisan tangan seseorang dan lainnya akan mempunyai gaya tertentu yang berbeda meskipun menulis sebuah kata yang sama.

Sapirstein (2019) mencoba untuk lebih luas lagi meneliti bekas pahatan pada batu-batu bertulis yang berada di kuil Apollo di Sisilia Italia yang merupakan peninggalan masa Yunani. Dengan teknik pencahayaan dari berbagai sudut menghasilkan bayangan yang berbeda-beda pada saat dilihat dengan bantuan teknologi komputasi, maka didapat bayangan hasil pahatan yang dapat dibaca dengan lebih jelas dibandingkan dengan pembacaan-pembacaan sebelumnya. Hasil komputasi yang didapat adalah perpaduan dari 2,5D dan 3D. Debat panjang selama 150 tahun terpecahkan dengan hasil penelitian itu. Dikatakan bahwa *rendering* (proses menyusun secara digital piksel-piksel pembentuk gambar sehingga menjadi gambar baru) data yang ditingkatkan secara digital adalah alat dan cara baru yang penting untuk otopsi tekstual, yang di masa lalu sangat bergantung pada otoritas peneliti yang menghasilkan transkripsi yang menciptakan transkripsi. Dengan cara yang lebih obyektif rekaman data dan presentasi permukaan pahatan asli secara visual dapat menyebabkan lebih banyak kemungkinan bacaan untuk teks kuno yang rusak. Data yang dipilih oleh Sapirstein adalah pahatan aus dari batu berbahan marmer yang memiliki tingkat kepadatan yang tinggi.

Di Jawa sangat sedikit batu prasasti berbahan marmer yang ditemukan. Sebagian besar batu prasasti yang ditemukan menggunakan batu andesit dengan tingkat porositas yang berbeda, bahkan di Jawa bagian utara banyak temuan batu prasasti dari batu kapur. Batu andesit yang porositasnya relatif padat pun apabila pahatan telah aus menjadikannya sangat sulit untuk dibaca, terlebih lagi batuan kapur yang pada dasarnya memiliki tingkat porositas yang memang tinggi. Hal ini mengakibatkan sebagian prasasti batu dari batuan kapur hanya meninggalkan bentuk fisiknya saja sebagai batu prasasti tanpa pernah tahu bekas pahatan yang ada di dalamnya karena hanya menyisakan permukaan yang halus.

Nicolae dkk. (2014) mengatakan bahwa proses menciptakan model bertekstur 3D yang akurat dan terpercaya dari gambar 2D telah menjadi upaya

utama dalam bidang warisan budaya. Lebih lanjut dikatakan fotogrametri dapat menjadi teknik yang valid dan dapat diandalkan untuk membuat model 3D artefak museum. Tujuan utamanya adalah membangun beberapa spesifikasi inti untuk akuisisi dan pemodelan data, untuk menjamin kualitas ilmiah data dan interoperabilitas model 3D dengan para arkeolog dan konservator. Metodologi yang diajukan bertujuan untuk menguji dan sedapat mungkin mengambil keuntungan dari beberapa algoritma yang digunakan dalam *remote-sensing*. Terutama pada bagian penggunaan data topografi beresolusi tinggi (seperti data LiDAR) untuk mengetahui, dari DEM (*Digital Elevation Model*) tampilan permukaan khusus dari sebuah permukaan, seperti lembah, punggung bukit, puncak, lubang atau perubahan lain yang berhubungan dengan situs-situs arkeologis. Dalam penelitian ini, pahatan permukaan batu dilihat sebagai permukaan bumi dan bagian bagian pahatan sebagai skala kecil dari lembah yang dibatasi lereng dan puncak. Salah satu alat bantu termudah yang biasa digunakan untuk menganalisis bayangan bukit yakni membuat tiruan cahaya dalam model permukaan DEM. Hal ini adalah cara yang sama dengan yang digunakan dalam teknik fotografi lama yakni menampilkan permukaan dengan bantuan cahaya yang datang dari sisi tertentu atas objek. Meskipun kedalaman lubang yang ada tidak dapat dikenali dengan penggunaan cahaya tersebut, akan tetapi sumber cahaya maya yang banyak dapat diperhitungkan untuk mengurangi masalah ini. Cara ini adalah penyesuaian yang lebih baik guna memperjelas bentuk relief pahatan yang ada.

Papadaki dkk. (2015) mengatakan dalam makalahnya bahwa terdapat dua teknik alternatif non-invasif non-destruktif untuk mengganti teknik tradisional dan invasif, yang bertujuan untuk membantu para ahli epigrafi untuk mengungkapkan dan menganalisis aksara-aksara yang rusak karena cuaca dari prasasti Yunani kuno yang dipahat pada batu atau marmer. Teknik yang direkomendasikan didasarkan pada pembuatan Model 3D dari permukaan ukiran prasasti melalui *Structured Light Scanner Data* yang dilanjutkan dengan prosedur *Structure from Motion*. Hasilnya menunjukkan bahwa Model 3D yang dihasilkan mampu untuk mengungkapkan huruf yang rusak tersebut, meskipun prosedur memakan waktu dan usaha serta biaya yang besar.

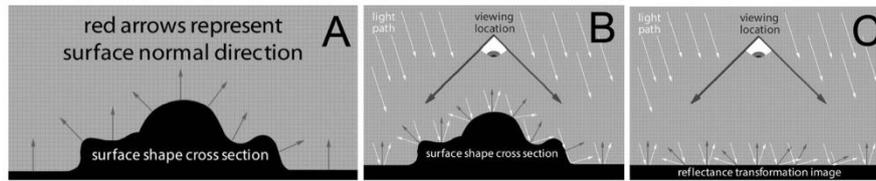
Hasil pemrosesan dan analisis diperiksa dan dievaluasi oleh seorang spesialis dalam hal detail, akurasi dan kualitas model, serta kemampuan mengungkapkan huruf yang rusak atau "tersembunyi" dan akhirnya menguraikan prasasti itu. Spesialis yang dimaksud dalam hal ini adalah seorang epigraf yang paham dan menguasai huruf huruf kuno yang ada dalam obyek yang diteliti. Perlu adanya pemilihan contoh data yang tepat sehingga tujuan yang diharapkan akan dapat menghasilkan sesuai yang diharapkan pula. Penelitian yang menggunakan teknik fotogrametri ini akan membangun sebuah hipotesis bahwa teknik fotogrametri akan dapat merekonstruksi pahatan tulisan yang ada pada sebuah batu prasasti. Diharapkan dengan hal ini maka masalah yang ada selama ini di lapangan yakni pembacaan prasasti batu yang terkendala karena tingkat keusangan dan keausan batu yang tinggi membuat pahatan tulisan yang ada pada batu itu sangat sulit untuk dibaca akan dapat terpecahkan dengan baik.

DISKUSI DAN PEMBAHASAN

Beberapa metode fotogrametri yang pernah dilakukan penulis atas prasasti berbahan batu adalah *Reflectance Transformation Image* (RTI) dan *Close-Range Photogrammetry*. RTI adalah sebuah cara pengambilan data melalui pantulan cahaya yang dihasilkan, mengambil data hasil pantulan itu, mengolahnya untuk kemudian dihasilkan sebuah rekonstruksi atas data yang telah diambil. Secara singkat dapat dikatakan mengambil data secara 2,5D mengolahnya menjadi data 3D dan merekonstruksinya.

Gambar RTI dibuat dari informasi yang berasal dari beberapa foto digital atas pemotretan objek dari posisi kamera yang diam. Dalam setiap foto, cahaya diproyeksikan dari arah yang berbeda. Proses ini menghasilkan serangkaian gambar dari objek yang sama dengan berbagai sudut pencahayaan dan bayangan yang didapat. Setiap RTI menyerupai gambar foto tunggal, dua dimensi (2D). Tidak seperti foto pada umumnya, informasi pantulan berasal dari bentuk tiga dimensi (3D) dari subjek gambar dan dikodekan dalam gambar per piksel, sehingga gambar RTI yang disintesis "tahu" bagaimana cahaya akan memantulkan subjek. Ketika RTI dibuka dalam perangkat lunak tampilan RTI, setiap piksel konstituen dapat memantulkan cahaya "virtual" interaktif perangkat lunak dari posisi apa pun yang dipilih oleh pengguna. Interaksi saling mempengaruhi antara cahaya dan bayangan dalam gambar ini mengungkapkan detail halus dari bentuk permukaan 3D obyek. Penjelasan keterangan di atas dapat dilihat pada Gambar 8.

Cara ini memang sampai saat ini masih diakui sebagai cara yang terbaik untuk mendapatkan gambar dari objek cagar budaya yang sudah aus atau rusak, akan tetapi diperlukan biaya yang besar untuk melakukannya karena banyak peralatan yang digunakan dan juga waktu yang cukup lama dibandingkan dengan sekedar pengambilan foto melalui kamera biasa. Hasil teknik RTI yang pernah penulis lakukan dapat dilihat pada Gambar 9. Gambar tersebut dihasilkan dari beberapa foto Prasasti Pucangan dari berbagai sudut pencahayaan yang berbeda. Hasil pengolahan gambar menunjukkan pahatan aksara yang lebih jelas seperti yang disajikan dalam potongan gambar Prasasti Pucangan baris 6 di Gambar 9. Pada foto hasil pengolahan tersebut terbaca dengan jelas angka tahun "929. Pembacaan angka "2" dari foto RTI tersebut secara langsung merevisi bacaan Brandes sebelumnya terhadap aksara angka tahun di baris 6 Prasasti Pucangan yang dibacanya sebagai "939" seperti tertulis pada OJO LXII baris 6 (Lihat: Brandes, 1913, hlm. 137). Sayangnya sekali, penulis tidak berhasil mendapatkan absklat yang menjadi rujukan bacaan Brandes, sehingga foto dari absklat yang menjadi dasar dari bacaan Brandes tidak dapat diberikan sebagai pembanding. Namun, paling tidak gambar hasil pengolahan RTI fragmen Prasasti Pucangan tersebut menunjukkan dan mengkonfirmasi bahwa teknik RTI dapat dimanfaatkan untuk memudahkan pembacaan aksara prasasti atau bahkan lebih jauh lagi dapat digunakan untuk memeriksa ulang bacaan aksara yang meragukan.



Gambar 8. Proses Pantulan Cahaya Dalam *Reflectance Transformation Image*.

A. Arah permukaan normal adalah Vektor yang secara matematis tegak lurus terhadap permukaan pada lokasi tertentu. Secara teknis, Vektor tersebut tegak lurus terhadap bidang garis singgung pada setiap titik di permukaan karena permukaan nyata dalam 3D, sedangkan grafik yang ditampilkan adalah 2D

B. Cahaya yang memantul dari permukaan sedemikian rupa sehingga sudut datangnya cahaya dan sudut pantulan cahaya adalah sudut yang sama dengan permukaan normal. Karena kamera berada dalam posisi yang tetap, dan asal cahaya dari setiap gambar diketahui yang merupakan contoh dari berbagai posisi cahaya, maka perangkat lunak RTI dapat menghitung permukaan normal setiap piksel dalam gambar.

C. Menunjukkan informasi refleksi yang ditangkap dalam RTI. Deskripsi matematis normal disimpan per piksel, bersama dengan informasi warna RGB (Red-Green-Blue) dari foto biasa. Kemampuan untuk merekam secara efisien warna dan informasi dalam bentuk 3D yang sebenarnya adalah kekuatan dari dokumentasi dengan RTI

(Sumber: <http://cultureheritage.org/Technologies/RTI>)

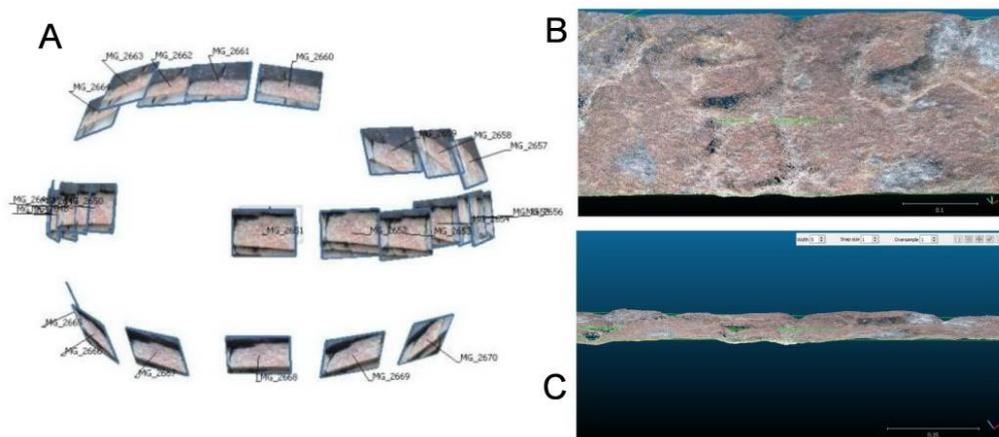


Gambar 9. Hasil Penggunaan RTI Terhadap Angka Tahun Yang Tertera Pada Prasasti Pucangan di Baris ke-6 Yang Terbaca Dengan Jelas Sebagai Angka 929
(Sumber: Dokumentasi Goenawan A. Sambodo)

Teknik fotogrametri lain yang dapat digunakan untuk pendokumentasian dan rekonstruksi pahatan pada prasasti batu adalah dengan pendekatan *Geographic Information System* (GIS). Proses diawali dengan proses pengambilan citra seperti yang dilakukan pada metode fotogrametri yang lain, kemudian membentuknya menjadi Mesh dan menambahkan *Digital Elevation Model* (DEM) pada model Mesh yang ada. Pendekatan dengan GIS ini memberikan gambaran permukaan muka bumi yang berlekuk liku, ketika diskalakan pada bentuk yang lebih kecil yakni permukaan batu prasasti, maka akan dapat pula digunakan untuk melihat bayangan lembah yang dibatasi lereng dan puncak. Demikian pula dengan model mesh yang telah memiliki angka DEM. Dengan bantuan aplikasi maka akan dapat dilakukan pengirisan samping atas model tersebut. Hasil irisan

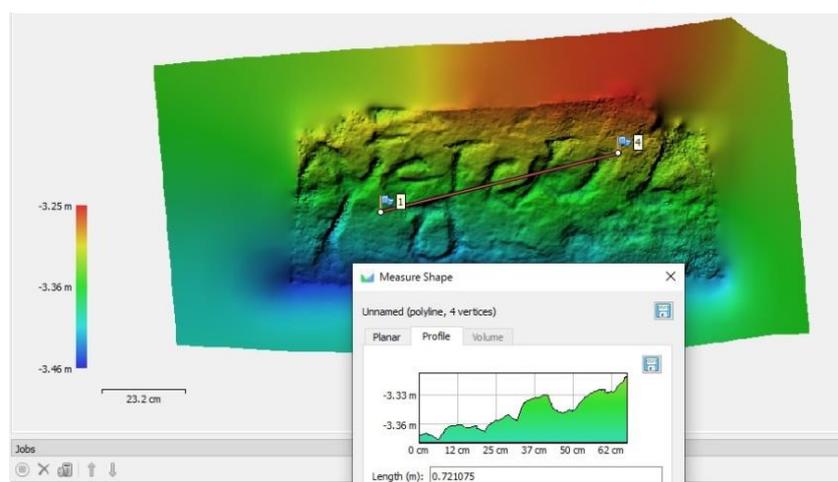
samping dari model batu itu akan didapatkan bentuk lembah, gunung dan puncak. Data berupa kedalaman pahatan serta lebar pahatan yang ada dijadikan sebagai patokan untuk merekonstruksi pahatan itu secara digital. Hasil yang didapat digunakan untuk membaca pahatan aus itu secara lebih baik. Hal ini pula yang digunakan untuk merekonstruksi pahatan yang ada.

Eksperimen penggunaan teknik fotogrametri di atas telah penulis lakukan terhadap prasasti pendek yang berada di situs Liyangan, Temanggung yang ditemukan dalam keadaan aus dan sulit dibaca. Hasil yang telah dilakukan sampai saat ini, meskipun belum sampai pada tahap yang memuaskan, tetapi dapat dibuktikan bahwa teknik fotogrametri yang dilakukan dapat memperjelas pahatan aus pada batu prasasti dan merekonstruksi ulang bentuk aksaranya. Contoh dari proses dan hasil percobaan yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 10, 11 dan 12.



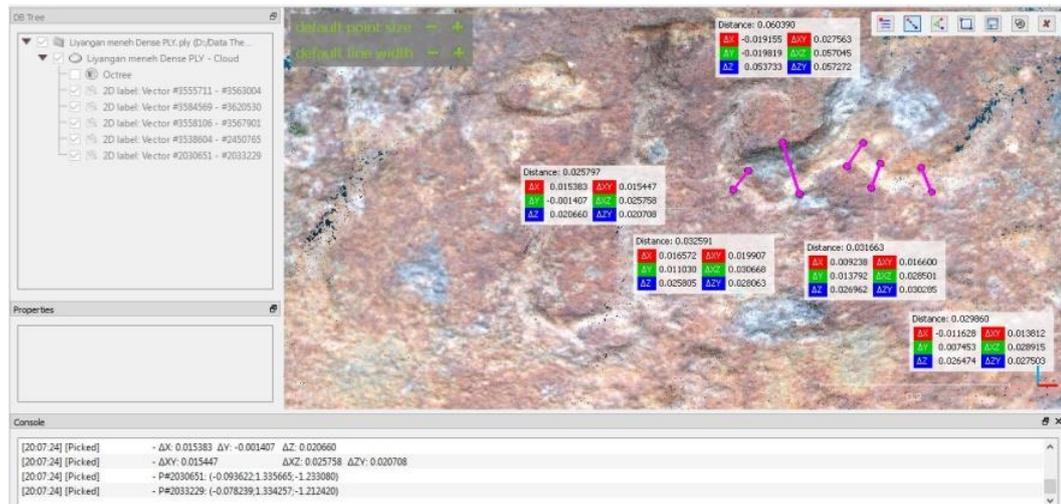
Gambar 10. Salah Satu Penggunaan Fotogrametri untuk Pendokumentasian dan Percobaan Rekontruksi Pahatan Prasasti Pendek yang Ditemukan di Situs Liyangan Temanggung Jawa-Tengah.

(Sumber: Dokumentasi Goenawan A.Sambodo)



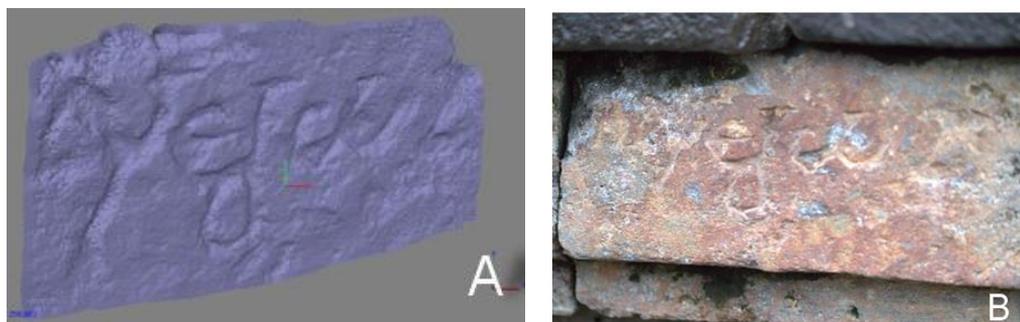
Gambar 11. Langkah Rekonstruksi dengan Melihat Irisan Samping dari Foto yang Telah Diolah dan Memiliki DEM.

(Sumber: Dokumentasi Goenawan A.Sambodo)



Gambar 12. Langkah Rekonstruksi Dengan Melihat Irisan Samping Dari Foto Yang Telah Diolah dan Memiliki DEM.
(Sumber: Goenawan A. Sambodo)

Hasil akhir pengolahan gambar prasasti pendek Liyangan dengan teknik fotogrametri dan permodelan DEM menunjukkan hasil yang meyakinkan bahwa teknik ini dapat digunakan untuk merekonstruksi aksara prasasti yang sebelumnya sulit dibaca menjadi aksara yang mudah diidentifikasi sehingga aksara di prasasti tersebut terbaca dengan baik. Gambar 13 A dan B menunjukkan perbandingan gambar olahan dengan foto langsung prasasti pendek di Situs Liyangan. Hasil akhir gambar yang telah diolah (Gambar 13 A) memperlihatkan tingkat keterbacaan aksara yang lebih tinggi dibandingkan dengan foto langsung prasasti (Gambar 13 B). Untuk sementara hasil bacaan yang dihasilkan adalah “*Kalumwayan*” yang arti kata dan maknanya tidak akan dibahas lebih lanjut dalam artikel ini karena artikel ini hanya memfokuskan pada potensi pemanfaatan teknik fotogrametri dalam merekonstruksi bentuk aksara yang aus dan tak terbaca dengan jelas. Eksperimen pengolahan digital dengan teknik fotogrametri seperti di atas saat ini masih terus berlanjut untuk dikembangkan oleh penulis untuk mendapatkan hasil rekonstruksi yang memuaskan sehingga aksara prasasti akan dapat dibaca dengan jelas dan cepat.



Gambar 13. Pengolahan Gambar Menggunakan Fotogrametri Untuk Prasasti Liyangan
A. Hasil dari rekonstruksi sementara hasil percobaan yang dilakukan;
B. Foto awal sebelum direkonstruksi secara digital dengan teknik fotogrametri
(Sumber: Goenawan A. Sambodo)

KESIMPULAN

Tulisan ini menyajikan beberapa keterangan tentang teknik fotogrametri yang dapat digunakan dalam bidang kajian arkeologi yang saat ini diakui belum banyak digunakan khususnya dalam bidang kajian epigrafi. Penyajian informasi arkeologi ini memanfaatkan data spasial fotografi dalam bentuk model tiga dimensi. Model ini dihasilkan dari teknik pemotretan orbit. Model tiga dimensi yang dihasilkan detail sehingga struktur batuan dan terutama pahatan yang ada pada batu didapat dengan detail dan kualitas bagus. Eksperimen yang dilakukan penulis dalam merekonstruksi bentuk pahatan aksara melalui model tiga dimensi ini menunjukkan hasil yang menggembirakan serta memperlihatkan potensi yang besar untuk digunakan di masa depan.

Dengan cara yang relatif mudah dilakukan, diharapkan pendataan dan pendokumentasian prasasti-prasasti yang masih *in-situ* dengan teknik fotogrametri akan menjadi lebih baik dan detail sehingga apabila ada hal terburuk terjadi atas prasasti itu, misalnya hilang, maka detail dokumentasi dengan cara ini akan dapat menyimpan data dengan baik. Pendataan atas prasasti prasasti *in-situ* dengan cara ini lebih dianjurkan karena dengan posisinya yang sering kali berada di luar pengawasan yang baik, keberadaan prasasti itu menjadi sangat rawan. Pendataan beserta dengan pengolahan gambar melalui teknik fotogrametri atas prasasti yang sudah berada dalam pengawasan yang baik pun –misalnya sudah berada di museum atau berada di lokasi yang gampang dijangkau- akan menjadi lebih bermanfaat lagi, terutama dalam meningkatkan keterbacaan pahatan prasasti agar pembacaannya menjadi lebih lengkap. Data digital ini juga akan bermanfaat di kemudian hari untuk dapat digunakan oleh peneliti lain yang akan memakai data digital tersebut melalui teknik yang lebih *ter-update* di masa depan.

Masalah yang masih ada dalam penggunaan dengan metode ini adalah sumber daya manusia yang terbatas. Harus diakui bahwa masih sedikit ahli arkeologi atau ahli epigrafi yang menggunakan cara ini. Penggunaan fotogrametri untuk bidang cagar budaya khususnya prasasti masih harus ditingkatkan. Adanya aplikasi perangkat lunak sumber terbuka (*open source*) yang gampang didapat sekarang ini haruslah dapat memicu para epigraf untuk menggunakannya bagi pengungkapan prasasti-prasasti yang masih belum dapat terbaca secara lengkap.

UCAPAN TERIMA KASIH

Untuk semua teman-teman komunitas yang berbagi suka dan duka dalam menyusuri benda cagar budaya berupa prasasti baik di Jawa Tengah, DIY dan Jawa Timur dengan penulis bersama-sama dan untuk semua foto prasasti yang beberapa di antaranya digunakan untuk melengkapi tulisan ini, penulis mengucapkan banyak terima kasih. Secara khusus ucapan terima kasih juga penulis haturkan kepada pak Arlo Griffiths yang telah mengizinkan foto prasasti Pucangan digunakan untuk mencoba salah satu teknik fotogrametri khususnya RTI guna melengkapi tulisan ini. Tulisan ini tidak akan terwujud tanpa bantuan pihak-pihak di atas.

DAFTAR PUSTAKA

- Boechari. (1977). Epigrafi dan Sejarah Indonesia. *Majalah Arkeologi*, I (2), hlm. 1-40. FSUI, Jakarta.
- Brandes, J.L.A. (1913). “Oud-Javaansche Oorkonde, nagelaten transcripties van wijlen Dr. J.L.A. Brandes, uitgegeven door N.J. Krom” . *Verhandelingen van het Koninklijk Instituut voor Taal-, Land- en Volkenkunde deel 60*
- Caine, Moshe & Maggen, Michael. (2017). Low Cost Heritage Imaging Techniques Compared. DOI: <http://dx.doi.org/10.14236/ewic/EVA2017.85>
- Casparis, J.G. de. (1975). *Indonesian Palaeography (A History of Writing in Indonesia from the Beginning to C.A.D. 1500)*. Leiden/Koln.
- Cultural Heritage Imaging | Reflectance Transformation Imaging (RTI). (n.d). Diambil 4 Juni 2020, dari <http://culturalheritageimaging.org/Technologies/RTI/>
- Gajski, D., Solter, A., & Gašparovic, M. (2016). Applications of macro photogrammetry in archaeology. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B5-263-2016>
- Grün, A., Remondino, F., & Zhang, L. I. (2004). Photogrammetric reconstruction of the great buddha of Bamiyan, Afghanistan. In *Photogrammetric Record*. <https://doi.org/10.1111/j.0031-868X.2004.00278.x>
- Jasiewicz, J., & Stepinski, T. F. (2013). Geomorphons-a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. *Geomorphology*. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.11.005>
- Klinkenberg, Victor. (2014). Are we there yet? 3D GIS in archaeological research, the case of Tell Sabi Abyad, Syria, *The Three Dimensions of Archaeology Proceedings of the XVII UISPP World Congress Volume 7/Sessions A4b and A12*, hlm. 39-47. Burgos, Spain
- Mathys, Aurore & Brecko, Jonathan & Semal, Patrick. (2013). Comparing 3D digitizing technologies: What are the differences?. DOI :10.1109/DigitalHeritage.2013.6743733.
- Miles, James. (2015). Photogrammetry and RTI Survey of Hoa Hakananai'a Easter Island Statue. *Papers from the 41st Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology Perth, 25-28 March 2013*. Computer

Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA) / Amsterdam University Press, Amsterdam 2015 hlm. 144-155.

- Monna, F., Esin, Y., Magail, J., Granjon, L., Navarro, N., Wilczek, J., Saligny, L., Couette, S., Dumontet, A., & Chateau, C. (2018). Documenting carved stones by 3D modelling - Example of Mongolian deer stones. *Journal of Cultural Heritage*. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.04.021>
- Murtiyoso, Arnadi D. , dan Suwardhi, Deni. (2017). Teknik Pencocokan Citra dalam Fotogrametri untuk Dokumentasi Cagar Budaya dalam *Bunga Rampai Forum Peneliti Muda Indonesia 2017*, hlm. 242-260. Penerbit ITB, Bandung
- Nicolae, C., Nocerino, E., Menna, F., & Remondino, F. (2014). Photogrammetry applied to problematic artefacts. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-451-2014>
- Papadaki, A. I., Agrafiotis, P., Georgopoulos, A., & Prignitz, S. (2015). Accurate 3D scanning of damaged ancient greek inscriptions for revealing weathered letters. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-237-2015>
- Sapirstein, P. (2019). Segmentation, reconstruction, and visualization of ancient inscriptions in 2.5D. *Journal on Computing and Cultural Heritage*. <https://doi.org/10.1145/3286977>
- Yokoyama, R., Shirasawa, M., & Pike, R. J. (2002). Visualizing topography by openness: A new application of image processing to digital elevation models. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*.