

PEMODELAN TIGA DIMENSI (3D) SALURAN IRIGASI MENGGUNAKAN DATA AIRBORNE LIDAR BATHYMETRY (ALB) DI BENDUNG PEJENKOLAN, KEBUMEN

Mohamad Bagas Setiawan¹, Istarno¹

¹Departemen Teknik Geodesi, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada
Jalan Grafika No. 2, Bulaksumur, Yogyakarta. Indonesia 55281, email: mohamad.bagas.s@mail.ugm.ac.id

(Diterima 17 Mei 2019, Disetujui 17 Juli 2019)

ABSTRAK

Pemerintah Indonesia sedang melakukan kegiatan peningkatan dan pembangunan jaringan irigasi yang ditargetkan selesai pada tahun 2019 (Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, 2016). Untuk merealisasikan hal tersebut diperlukan metode pengukuran jaringan irigasi secara cepat dan tepat. Salah satu alternatif yang dapat digunakan adalah *Airborne LiDAR Bathymetry* (ALB). ALB merupakan metode penentuan kedalaman pada perairan jernih dan relatif dangkal seperti dekat pantai dan danau, menggunakan wahana seperti pesawat dengan tinggi terbang rendah serta memancarkan pulsa laser (Guenther, 2001). Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji model tiga dimensi (3D) yang direpresentasikan dengan *Digital Terrain Model* (DTM) dari data pengukuran ALB untuk menentukan kedalaman saluran irigasi. Pada penelitian ini, DTM dibentuk dari dua buah sensor yaitu sensor *Near InfraRed* (NIR) dan sensor hijau pada saluran irigasi primer, sekunder, dan tersier. Model 3D yang dibentuk menggunakan data sensor NIR mewakili tinggi permukaan air pada saluran, sedangkan model 3D yang dibentuk menggunakan data sensor hijau mewakili dasar saluran. Dalam proses pembentukan DTM menggunakan data ALB, perlu diperhatikan proses *editing* data kedalaman berdasarkan dimensi saluran agar diperoleh hasil yang representatif.

Kata kunci : *Airborne LiDAR Bathymetry, Saluran Irigasi, DTM, Sensor NIR, Sensor hijau*

ABSTRACT

The Indonesian government is conducting activities to increase and develop irrigation networks which are targeted for completion in 2019 (Directorate General of Water Resources 2016). To realize this, a method for measuring irrigation networks is needed quickly and precisely. One alternative that can be used is Airborne LiDAR Bathymetry (ALB). ALB is a method of determining depth in clear and relatively shallow waters such as near beaches and lakes, using vehicles such as planes with high flying lows and emitting laser pulses (Guenther 2001). This research was conducted to examine three-dimensional (3D) models represented by Digital Terrain Models (DTM) from ALB measurement data to determine the depth of irrigation channels. In this study, DTM was formed from two sensors, Near InfraRed (NIR) sensors and green sensors in primary, secondary and tertiary irrigation channels. The 3D model formed using NIR sensor data represents the water level on the channel, while the 3D model formed using green sensor data represents the channel base. In the process of forming DTM using ALB data, it is necessary to pay attention to the editing process of depth data based on channel dimensions in order to obtain representative results.

Keywords : *Airborne LiDAR Bathymetry, Irrigation Channel, DTM, NIR sensor, green sensor*

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Berdasarkan Undang-undang Nomor 7 Tahun 2004 tentang Sumber Daya Air, yang dimaksud irigasi adalah usaha penyediaan, pengaturan dan pembuangan air untuk menunjang pertanian yang jenisnya meliputi irigasi permukaan, irigasi rawa, irigasi air bawah tanah, irigasi pompa dan irigasi tambak. Dalam suatu sistem irigasi, diperlukan suatu lokasi penampungan air berupa infrastruktur waduk. Waduk merupakan infrastruktur yang dapat

dimanfaatkan untuk berbagai keperluan seperti membangkitkan listrik, penyedia air untuk irigasi dan air minum, sebagai pengendali banjir, bahkan dapat digunakan untuk tempat rekreasi (Imhof, dkk., 2006). Guna merealisasikan fungsi waduk sebagai penyedia air irigasi, dibuatlah saluran-saluran irigasi sebagai sarana mengairi sawah-sawah disekitarnya. Saat ini pemerintah sedang melakukan program peningkatan dan pembangunan jaringan irigasi untuk mendukung terciptanya swasembada beras yang ditargetkan selesai pada tahun 2019 (Badan Perencanaan Pembangunan Nasional, 2013).

Dalam melaksanakan kegiatan peningkatan dan pembangunan jaringan irigasi beserta rehabilitasi diperlukan data saluran yang baik. Terdapat beberapa metode pengukuran dalam bidang ilmu Geodesi dan Geomatika yang dapat digunakan untuk memperoleh peta dasar antara lain metode Terrestrial menggunakan pengukuran Total Station, Pengukuran GNSS, Fotogrametri, maupun teknologi LiDAR (*Light Detection and Ranging*). Salah satu upaya konkret yang dilakukan pemerintah yaitu melaksanakan kegiatan peningkatan saluran irigasi di Kabupaten Kebumen yang mengalir dari bagian utara Kebumen yaitu Waduk Pejengkolan hingga ke Pantai Selatan pada tahun 2018.

Proses pemetaan dalam kegiatan peningkatan saluran irigasi di Kabupaten Kebumen tersebut dilakukan menggunakan teknologi *Airborne LiDAR Bathymetry* (ALB). Untuk memperoleh data saluran irigasi yang baik, perlu dilakukan pemodelan tiga dimensi (3D) yaitu dengan pembentukan *Digital Terrain Model* (DTM) yang baik pula. Untuk mencapai hal tersebut, proses pembentukan DTM menggunakan data ALB perlu memperhatikan aspek permukaan air dan dasar saluran agar dapat diperoleh kedalaman saluran yang tepat. Model yang diperoleh dari pemrosesan tersebut dapat dimanfaatkan untuk analisis lebih lanjut terkait saluran irigasi.

1.2 Rumusan Masalah

Metode pengukuran menggunakan ALB merupakan metode yang masih sangat baru dilakukan di Indonesia. Selain dapat digunakan untuk melakukan pemetaan daratan, teknologi ALB dapat pula digunakan untuk melakukan mengetahui kedalaman dari suatu perairan dangkal. Kajian mengenai hasil pengukuran ALB di Indonesia pun masih sangat jarang bahkan belum pernah dilakukan. Hal tersebut yang mendasari dilakukannya kajian ini, untuk mengetahui proses pembentukan model tiga dimensi menggunakan data ALB yang dapat dimanfaatkan untuk keperluan peningkatan dan pembangunan jaringan irigasi beserta rehabilitasi jaringan irigasi.

1.3 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang Lingkup Penelitian antara lain:

1. Menggunakan sebagian kecil data pengukuran ALB yang dilakukan tahun 2018.
2. Dilakukan pembentukan DTM menggunakan data dari sensor Near InfraRed (NIR) dan sensor hijau ALB.
3. Membandingkan DTM saluran yang dihasilkan dari dua sensor yang ada untuk mengetahui kedalaman saluran.

4. Wilayah penelitian merupakan wilayah Jaringan Irigasi Bendung Pejengkolan Kebumen.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Airborne LiDAR Bathymetry* (ALB)

Teknologi ALB mulai berkembang pada tahun 1960an dengan dilakukannya penelitian oleh Hickman dan Hogg pada tahun 1969. Penelitian tersebut dilakukan untuk menguji kemampuan pulsa laser biru dan hijau sebagai sensor ALB yang digunakan untuk memetakan wilayah perairan dekat pantai. Berdasarkan penelitian yang dilakukan di Danau Ontario tersebut, diperoleh bahwa dalam pengukuran tersebut terdapat beberapa hal yang perlu dikembangkan kembali untuk dapat memperoleh hasil yang maksimal.

Penelitian-penelitian lain berkembang setelah adanya penelitian dari Hickman dan Hogg misalnya untuk melakukan pemetaan topografi dasar perairan dangkal (Guenther, 1985). Selain dapat digunakan untuk mengukur kedalaman laut, data hasil pengukuran menggunakan ALB juga dapat pula digunakan untuk mengukur gelombang air (Jennifer L. Irish & Kobayashi, 2001) dan dapat pula digunakan untuk membuat model aliran sungai (Mandlbürger dkk., 2015). Meskipun beberapa penelitian dilakukan di daerah pesisir pantai (Allouis dkk., 2010; Irish & White, 1998; Irish dan Kobayashi, 2001; Saylam dkk., 2018), pengukuran ALB juga pernah dilakukan di daerah aliran sungai dan danau yang memiliki karakteristik air tawar (Morsy dkk., 2018).

Penelitian yang dilakukan oleh Pan dkk., 2015 mengevaluasi kemampuan teknologi ALB untuk melakukan pemetaan sungai yang relatif dangkal. Berdasarkan penelitian tersebut diperoleh bahwa pendefinisian permukaan air dan tingkat kekeruhan sangat mempengaruhi kemampuan dari sensor ALB. Secara umum, diperoleh kedalaman rerata sungai 6 cm dengan standar deviasi sebesar 14 cm pada keadaan jernih, sedangkan pada keadaan keruh diperoleh rerata kedalaman 16 cm dengan standar deviasi sebesar 27 cm.

2.2 *Digital Terrain Model* (DTM)

DTM dikembangkan oleh Miller dan La Flamme yang bekerja di Laboratorium Fotogrametri MIT (Massachusetts Institute of Technology) di akhir tahun 1950-an. Mereka mendefinisikan DTM adalah gambaran permukaan bumi yang disajikan secara statistik yang terdiri dari himpunan titik-titik koordinat X, Y, Z hasil pengukuran lapangan (Prahasta, 2008). Sedangkan menurut Doyle (1978), Model Terrain Digital atau yang sering disebut *Digital Terrain*

Model (DTM) merupakan susunan angka yang diurutkan yang mewakili distribusi spasial dari karakteristik terain.

2.3 Manajemen Jaringan Irigasi

Kegiatan manajemen jaringan irigasi dan drainase pada dasarnya terdiri dari tiga katagori yaitu (Hofwegen, 1992):

1. Kegiatan sehubungan dengan air, seperti pengadaan air (air permukaan atau air tanah), distribusi dan alokasi air serta pembuangan kelebihan air melalui jaringan drainase.
2. Kegiatan sehubungan dengan bangunan /jaringan dalam rangka mengontrol air, seperti planning dan desain, konstruksi serta operasi dan pemeliharaan (O&P).
3. Kegiatan sehubungan dengan organisasi pengelola, seperti pengambilan keputusan, mobilisasi sumber daya, komunikasi dan penyelesaian konflik.

Tujuan manajemen irigasi sebagaimana diuraikan oleh Uphoff (1991) adalah untuk:

1. Peningkatan produksi, dicapai melalui peningkatan intensitas tanam, luas tanam dan panen.
2. Pengempurnaan sistem distribusi air, lebih adil dan merata, *reliability* dan *predictability* yang akurat, serta pemberian air yang tepat waktu.
3. Tidak ada konflik diantara pengelola dan pemakai air atau diantara pemakai air bagian hulu dan bagian hilir.
4. Berkesinambungan dalam ketersediaan sumber daya, baik lahan, air, material ataupun sumber daya manusianya untuk kesinambungan produksi yang optimal.
5. Mobilisasi sumber daya yang lancar.

3. ALAT DAN BAHAN

Alat yang digunakan pada penelitian ini antara lain:

- a. Perangkat Lunak
 - i. Sistem Operasi Windows 10 64-bit
 - ii. Perangkat Lunak Global Mapper v.18.0
 - iii. Microsoft Office 2016
- b. Perangkat Keras
 - i. Laptop
 - ii. *Harddisk* dan *Flashdisk*

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- a. *Point cloud* sensor NIR hasil pengukuran ALB yang sudah diklasifikasi dalam format *.las
- b. *Point cloud* sensor hijau hasil pengukuran ALB yang sudah diklasifikasi dalam format *.las

4. METODE PENELITIAN

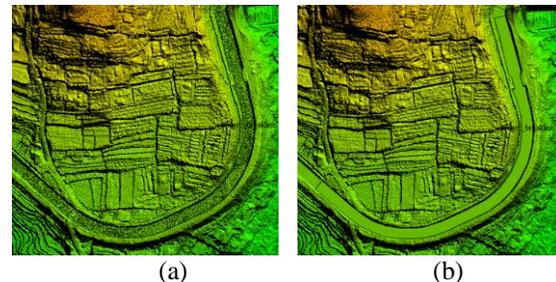
Metodologi pada penelitian ini dimulai dari proses persiapan yaitu studi literatur serta persiapan data dan peralatan yang dibutuhkan. Tahapan kedua adalah menentukan area yang memuat saluran irigasi yang akan digunakan. Selanjutnya, dilakukan pemotongan *point cloud* sesuai dengan batas area yang telah ditentukan untuk mempermudah proses pengolahan data *point cloud*. Hasil yang diperoleh dari proses tersebut adalah *point cloud* yang sudah dipotong sesuai batas area yang ditentukan.

Point cloud tersebut kemudian digunakan untuk membuat *Digital Elevation Model* (DTM) baik untuk data *point cloud* dari sensor *Near InfraRed* (NIR) maupun sensor hijau. DTM yang diperoleh dari kedua data tersebut kemudian dibandingkan untuk mengetahui adanya beda elevasi antara kedua DTM tersebut untuk mengetahui kedalaman saluran dengan menggunakan penampang memanjang dan melintang saluran irigasi. DTM yang digunakan adalah sebagian kecil dari keseluruhan area yang terdiri atas saluran primer, sekunder, dan tersier.

5. HASIL DAN PEMBAHASAN

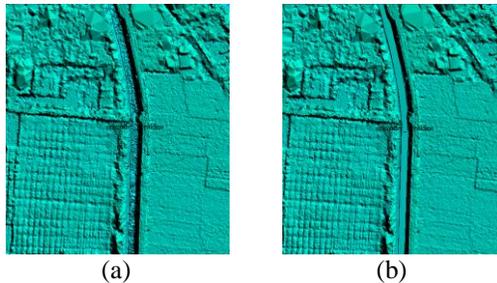
5.1 Hasil DTM Sensor NIR

Proses pembentukan DTM sensor NIR dilakukan pada saluran irigasi primer, sekunder, dan tersier. Selain dilakukan pembentukan DTM, untuk data sensor NIR dilakukan pula proses *hydro-flattening* agar diperoleh permukaan air yang datar. Hasil DTM yang diperoleh dari data sensor NIR pada saluran primer ditunjukkan pada Gambar 1 berikut.



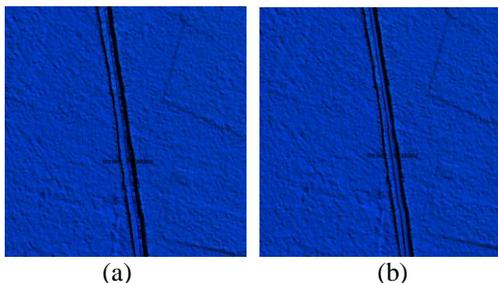
Gambar 1. (a) Tampilan DTM sensor NIR saluran primer sebelum *hydro-flattening* (b) Tampilan DTM sensor NIR saluran primer setelah *hydro-flattening*

Berdasarkan hasil pada Gambar 1, dapat dilihat bahwa sebelum dilakukan proses *hydro-flattening*, permukaan air pada saluran primer yang dibentuk dari data sensor NIR terlihat tidak beraturan. Setelah proses *hydro-flattening* dilakukan, kenampakan saluran menjadi lebih teratur dan merepresentasikan keadaan air. Tampilan DTM yang diperoleh dari data sensor NIR pada saluran sekunder ditunjukkan pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. (a) Tampilan DTM sensor NIR saluran sekunder sebelum *hydro-flattening* (b) Tampilan DTM sensor NIR saluran sekunder setelah *hydro-flattening*

Gambar 2 menunjukkan tampilan hasil pembentukan DTM dari data sensor NIR pada saluran sekunder. Dapat dilihat dari hasil tersebut, DTM yang diperoleh memiliki tampilan yang tidak teratur pada DTM sebelum dilakukan proses *hydro-flattening*. Pada DTM yang telah dilakukan proses *hydro-flattening* menunjukkan tampilan yang lebih teratur dan merepresentasikan keadaan permukaan air pada saluran sekunder. Tampilan DTM yang diperoleh dari data sensor NIR pada saluran sekunder ditunjukkan pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3. (a) Tampilan DTM sensor NIR saluran tersier sebelum *hydro-flattening* (b) Tampilan DTM sensor NIR saluran tersier setelah *hydro-flattening*

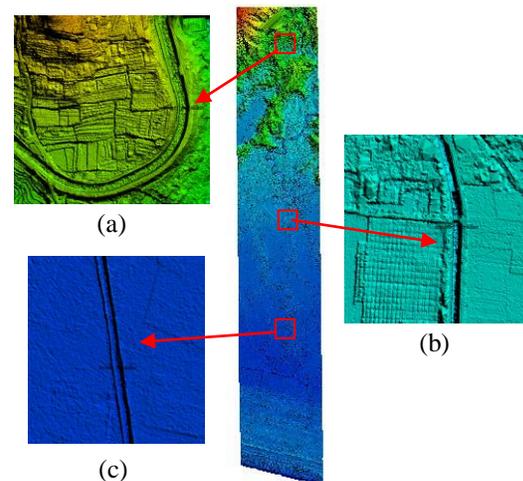
Sama seperti pada kedua hasil sebelumnya, pada saluran tersier yang ditampilkan pada Gambar 3 juga menunjukkan tampilan yang tidak teratur

pada DTM sebelum dilakukan proses *hydro-flattening*. Setelah dilakukan proses *hydro-flattening*, tampilan saluran menjadi lebih teratur.

Berdasarkan hasil tersebut dapat dilihat bahwa sebelum dilakukan proses *hydro-flattening* permukaan area perairan masih berbentuk tidak teratur. Setelah dilakukan proses *hydro-flattening* area perairan menjadi lebih teratur dan mendekati keadaan permukaan air sebenarnya baik pada saluran primer, sekunder, maupun tersier.

5.2 Hasil DTM Sensor Hijau

Selain dilakukan pembentukan DTM dari data sensor NIR, dilakukan pula pembentukan DTM menggunakan data sensor hijau. Tidak seperti pada sensor NIR, sensor hijau dapat melakukan penetrasi hingga menembus tubuh air. Hasil DTM yang diperoleh dari data sensor hijau ditampilkan pada Gambar 4 berikut.



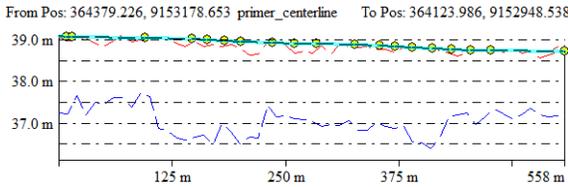
Gambar 4. (a) Tampilan DTM saluran primer dari data sensor hijau (b) Tampilan DTM saluran sekunder dari data sensor hijau (c) Tampilan DTM saluran tersier dari data sensor hijau

Berdasarkan Gambar 4 di atas, dapat dilihat bahwa DTM yang dibentuk pada saluran irigasi baik primer, sekunder, maupun tersier data sensor hijau dapat merepresentasikan bagian bawah permukaan air. Akan tetapi, untuk memperoleh kedalaman dari permukaan saluran, perlu dilakukan pertampalan dengan data sensor NIR.

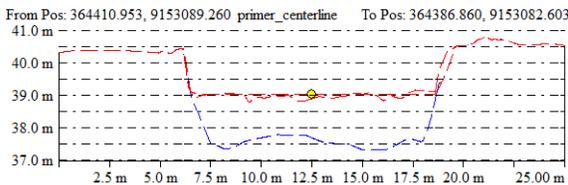
5.3 Perbandingan DTM Sensor NIR dan Sensor Hijau

Hasil DTM dari sensor NIR dan sensor hijau ditampilkan untuk mengetahui perbedaan

elevasi pada saluran irigasi baik primer, sekunder, maupun tersier dengan cara membuat penampang memanjang dan melintang pada masing-masing saluran. Hasil penampang memanjang dan melintang DTM pada saluran primer ditunjukkan pada Gambar 5 dan Gambar 6 berikut.

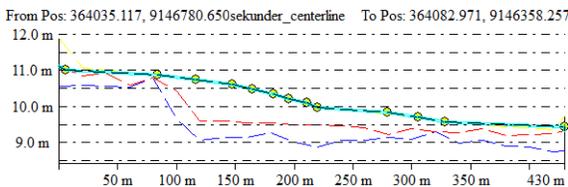


Gambar 5. Penampang memanjang saluran primer

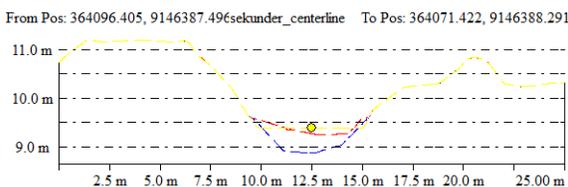


Gambar 6. Penampang melintang saluran primer

Berdasarkan penampang memanjang dan melintang saluran primer yang ditunjukkan pada Gambar 5 dan Gambar 6 dapat dilihat bahwa garis merah yang tidak beraturan menunjukkan permukaan air yang belum diproses dengan *hydro-flattening*, sedangkan garis biru menunjukkan dasar saluran yang dideteksi berdasarkan data sensor hijau. Hasil penampang memanjang dan melintang DTM pada saluran sekunder ditunjukkan pada Gambar 7 dan Gambar 8 berikut.



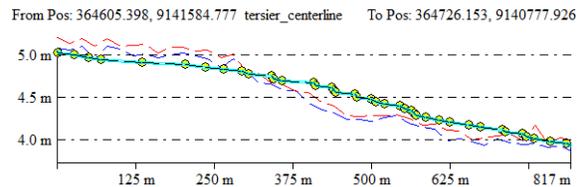
Gambar 7. Penampang memanjang saluran sekunder



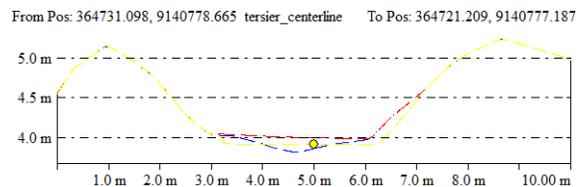
Gambar 8. Penampang melintang saluran sekunder

Gambar 7 dan Gambar 8 di atas menunjukkan penampang memanjang dan melintang pada saluran sekunder. Berdasarkan gambar tersebut dapat dilihat garis kuning

menunjukkan permukaan air yang sudah dilakukan *hydro-flattening*, sedangkan garis merah menunjukkan permukaan air yang belum dilakukan proses *editing* dan garis biru menunjukkan dasar saluran yang dihasilkan dari data sensor hijau. Penampang memanjang dan melintang saluran tersier ditunjukkan pada Gambar 9 dan Gambar 10 berikut.



Gambar 9. Penampang memanjang saluran tersier



Gambar 10. Penampang melintang saluran tersier

Berdasarkan Gambar 9 dan Gambar 10 di atas, dapat dilihat bahwa terdapat data sensor hijau yang berada di atas permukaan air hasil *hydro-flattening*. Oleh karena itu, perlu dievaluasi kembali hasil *hydro-flattening* pada saluran tersier. Hal tersebut dapat disebabkan karena ukuran saluran tersier yang berkisar antara 1-2 meter dengan kedalaman 0,5-1 meter, sehingga proses *hydro-flattening* menjadi sangat riskan menimbulkan kesalahan kedalaman permukaan air.

Berdasarkan hasil tersebut, permukaan DTM yang diperoleh dari sensor NIR terletak di atas DTM sensor hijau baik pada saluran primer, sekunder, maupun tersier. Hal tersebut menunjukkan bahwa pada teknologi ALB memungkinkan untuk mengetahui kedalaman suatu saluran berdasarkan data sensor NIR dan sensor hijau. Sensor NIR yang tidak dapat melakukan penetrasi ke tubuh air akan mewakili permukaan air, sedangkan sensor hijau yang dapat melakukan penetrasi ke dalam tubuh air merepresentasikan dasar perairan. Akan tetapi, dasar perairan yang dihasilkan dari data sensor hijau perlu dilakukan pengecekan kembali, karena masih ada kemungkinan dasar perairan yang diperoleh bukan merupakan dasar saluran tetapi berupa sedimen yang mengendap. Selain itu hasil yang telah diperoleh menunjukkan bahwa pada saluran primer diperoleh tampilan yang teratur, sedangkan pada saluran yang lebih kecil yakni sekunder dan tersier menunjukkan hasil yang semakin tidak teratur.

6. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil yang diperoleh, dapat ditarik kesimpulan bahwa dari proses *hydro-flattening* diperoleh permukaan air yang lebih teratur. Model 3D yang dibentuk menggunakan data sensor NIR mewakili tinggi permukaan air pada saluran, sedangkan model 3D yang dibentuk menggunakan data sensor hijau mewakili dasar saluran. Kedalaman saluran dapat diketahui dengan menggunakan dua data sensor yaitu sensor NIR dan sensor hijau. Dalam melakukan *editing* data kedalaman perlu memperhatikan dimensi saluran agar diperoleh hasil yang representatif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kepada Program Studi Magister Teknik Geomatika, Departemen Teknik Geodesi UGM, Direktorat Jenderal Sumber Daya Air Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, *Asian Development Bank* (ADB), PT. Map Tiga Internasional, dan PT. Leica Geosystem Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Allouis, T., Bailly, J. S., Pastol, Y., & Le Roux, C. (2010). *Comparison of LiDAR waveform processing methods for very shallow water bathymetry using Raman, near-infrared and green signals*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(6), 640–650. <https://doi.org/10.1002/esp.1959>
- Badan Perencanaan Pembangunan Nasional. (2013). *Buku Pegangan Perencanaan Pembangunan Daerah 2014*. Kementerian Perencanaan Pembangunan Nasional/Badan Perencanaan Pembangunan Nasional. Diambil dari https://www.bappenas.go.id/files/6613/7890/3137/2.Handbook_2014.pdf
- Direktorat Jenderal Sumber Daya Air. (2016). *Program IPDMIP Untuk Meningkatkan Produksi Pertanian Beririgasi*. Diambil 18 April 2019, dari <http://sda.pu.go.id/pages/posts/Program-IPDMIP-Untuk-Meningkatkan-Produksi-Pertanian-Beririgasi>
- Doyle, F. J. (1978). Digital Terrain Models: An Overview. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 44(12), 1481–1485. Diambil dari https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1978journal/dec/1978_dec_1481-1485.pdf
- Guenther, G. C. (1985). *Airborne Laser Hydrography*.
- Guenther, G. C. (2001). *Airborne LIDAR Bathymetry Services*, 1–73.
- Hickman, G. D., & Hogg, J. E. (1969). *Application of an Airborne Pulsed Laser for Near Shore Bathymetric Measurements*, (1969), 47–58.
- Hofwegen, P.J.M., 1992, *Principles of Irrigation Management*; The Netherlands: Lecture Notes, HE Delf, April.
- Imhof, A., Schneider, A. K., Wong, S., & Lawrence, S. (2006). *Dams, Rivers and Rights: An Action Guide for Communities Affected by Dams*. California: International Rivers Network.
- Irish, J. L., & Kobayashi, N. (2001). *LiDAR Applications for Coastal Engineering: Sea Bottom Mapping and Water Wave Measurement*, (May).
- Irish, J. L., & White, T. E. (1998). *Coastal engineering applications of high-resolution lidar bathymetry*.
- Mandlbürger, G., Hauer, C., Wieser, M., & Pfeifer, N. (2015). *Topo-bathymetric LiDAR for monitoring river morphodynamics and instream habitats-A case study at the Pielach River*. *Remote Sensing*, 7(5), 6160–6195. <https://doi.org/10.3390/rs70506160>
- Morsy, S., Shaker, A., & El-Rabbany, A. (2018). *Using Multispectral Airborne LiDAR Data for Land/Water Discrimination: A Case Study at Lake Ontario, Canada*. *Applied Sciences*, 8(3), 349. <https://doi.org/10.3390/app8030349>
- Pan, Z., Glennie, C., Hartzell, P., Fernandez-diaz, J. C., Legleiter, C., & Overstreet, B. (2015). *Performance Assessment of High Resolution Airborne Full Waveform LiDAR for Shallow River Bathymetry*, 5133–5159. <https://doi.org/10.3390/rs70505133>
- Pemerintah Indonesia. (2004). *Undang-Undang Republik Indonesia No. 7 Tahun 2004 Tentang Sumber Daya Air*.
- Prahasta, E. (2008). *Model Permukaan Dijital. Pengolahan Data DTM (Digital Terrain Model) & DEM (Digital Elevation Model) Dengan Perangkat Lunak: Surfer, Global Mapper dan Quickgrid*. Penerbit Informatika Bandung.
- Saylam, K., Hupp, J. R., Averett, A. R., Gutelius, W. F., & Gelhar, B. W. (2018). *Airborne lidar bathymetry: assessing quality assurance and quality control methods with Leica Chiroptera examples*. *International Journal of Remote Sensing*, 39(8), 2518–2542.

<https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1430916>

Uphoff, N., Ramamurthy, P. and Steiner, R., 1991, *Managing Irrigation; Analyzing and Improving the Performance of Bureaucraties*; Sage Publications, New Delhi; Newbury Park, London.