Jurnal Sumber Daya Air
Vol. 17, No.1, Mei 2021

P -ISSN 1907 - 0276
E- ISSN 2548 - 494X
Terakreditasi Kemenristek Dikti
http://jurnalsda.pusair-pu.go.id

PEMANFAATAN *DIGITAL TERRAIN MODEL* HASIL FOTOGRAMETRI *UNMANED AERIAL VEHICLE* UNTUK ESTIMASI KETINGGIAN GENANGAN AIR BANJIR HASIL DETEKSI CITRA *SYNTHETIC APPERTURE RADAR*

DTM UTILIZATION OF UAV PHOTOGRAMMETRY RESULT TO ESTIMATE THE FLOOD WATER LEVEL FROM SAR IMAGES DETECTION

Hariady Indra Mantong[1)*]

[1)] Balai Wilayah Sungai Sulawesi III Palu, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
Jl. DR. Abdurrahman Saleh No.230, Birobuli Utara, Kec. Palu Sel., Kota Palu, Sulawesi Tengah, Indonesia
*Coresponden email: harrymantong51@gmail.com

Diterima: 23 Februari 2021; Direvisi: 25 Februari 2021; Disetujui: 20 Mei 2021

ABSTRACT

Utilization of The Unmanned Aerial Vehicle (UAV) or Drone has brought revolution in digital photogrammetry. The feature matching on surface reconstruction or Digital Surface Model (DSM) are quickly finished. However, DSM doesn't represent itself as a part of topography, that is why DSM should be converted into Digital Terrain Model (DTM). This research is to investigate the accuracy of UAV photogrammetry's DTM for hydraulic modeling purpose. This study has produced 4 sets of DTMs; 2 sets of DTMs with different grid resolution which are 2 cm & 40 cm, also the 2 other sets of DTM with extra fine nature algorithm and set of filtering parameters adjustment; bulge, offset, spike and standard deviation. Every DTM are validated by Ground Control Point (GCP) from Real Time Kinematic-Different Global Positioning System (RTK-DGPS) measurement. According to the validation, the adjustment of filtering parameters is the most accurate method with Root Mean Square Error (RMSE) of 6,17 cm for 2 cm resolution; and 5,22 cm for 40 cm resolution. Next, DTM UAV is used to estimate the flood water level from Synthetic Aperture Radar (SAR) Image detection with 46 flood images on Glane and Losser area, east part of Overijssel, The Netherlands, since October 2014 to December 2017, then validated with the insitu water level measurement and resulted RMSE 6,72 cm for set of UAV DTM's 40 cm resolution with the filtering parameters adjustment. Therefore, this DTM UAV can be used as a topography parameter in hydraulic modeling, especially at the similar flat-surface terrain where this research have been conducted.

Keywords : *UAV photogrammetry, SAR detection, DTM production*

ABSTRAK

Penggunaan pesawat tanpa awak atau Drone membawa revolusi dalam fotogrametri digital. Pencocokan obyek dalam rekonstruksi model permukaan atau Digital Surface Model (DSM) dapat dilakukan dengan lebih cepat. Namun DSM tidak mewakili topografi yang sebenarnya sehingga harus dikonversi menjadi Digital Terrain Model (DTM). Penelitian ini menyelidiki akurasi DTM dari proses fotogrametri UAV untuk keperluan model hidraulik. Studi ini menghasilkan 4 set DTM; 2 set DTM dengan resolusi grid yang berbeda yaitu 2 cm dan 40 cm, serta 2 set DTM lain dengan algoritma extra fine nature dan satu set dengan algoritma penyesuaian parameter filtering; bulge, offset, spike, dan standard deviation. Setiap DTM divalidasi terhadap Ground Control Point (GCP) hasil pengukuran Real Time Kinematik- Differential Global Positioning System (RTK-DGPS). Dari validasi diketahui bahwa set DTM dengan penyesuaian parameter filtering adalah yang paling akurat dengan Root Mean Square Error (RMSE) 6,17 cm untuk resolusi 2 cm dan 5,22 cm untuk resolusi 40 cm. DTM UAV kemudian digunakan untuk estimasi ketinggian air banjir dari deteksi Citra Synthetic Aperture Radar (SAR) dengan 46 citra banjir untuk area Glane dan Looser, bagian timur Overijssel, Belanda, dari Bulan Oktober 2014 hingga Desember 2017, kemudian DTM UAV divalidasi terhadap pengukuran tinggi muka air di lapangani dan menghasilkan RMSE 6,72 cm untuk set DTM resolusi 40 cm dengan penyesuaian parameter filtering. Dengan demikian, DTM hasil metode fotorametri ini dapat digunakan sebagai parameter topografi dalam pemodelan hiraulika, secara khusus pada permukaan tanah yang rata seperti daerah dimana penelitian ini dilakukan.

Kata Kunci : *Fotogrametri UAV, Deteksi SAR, Produksi DTM*

DOI: https://doi.org/10.32679/jsda.v17i1.711
© Bintek SDA, Dirjen SDA, Kementerian PUPR Naskah ini di bawah kebijakan akses terbuka dengan lisensi CC-BY-SA (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

PENDAHULUAN

Aliran air di atas dan di bawah permukaan tanah ditentukan oleh topografi dan digerakkan oleh gravitasi (Drever, 2005; Dunne dan Black, 1970). Topografi adalah parameter utama dalam pemodelan hidrologi yang didasari hubungan inheren antara aliran air dengan bentuk permukaan bumi pada daerah aliran sungai (Woodrow, dkk., 2016). Parameter topografi dapat diperoleh dengan teknik konvensional (geodetis) yang akurat dan presisi walaupun sangat memakan waktu (Uysal, dkk., 2016). Selain itu, teknik yang paling mutakhir yaitu *Airborne Light Detection and Ranging (LiDAR)* menghasilkan parameter topografi yang akurat dan cepat namun sangat mahal terlebih untuk area kecil. Adapun data topografi dari metode-metode tersebut dikonversi menjadi *Digital Terrain Models (DTM)* untuk pemodelan hidraulik. Resolusi *DTM* memiliki efek signifikan pada model hidrolik 1D atau 2D (Haile dan Rientjes, 2005). Oleh karena itu, untuk hasil model hidraulik yang handal diperlukan parameter *DTM* dengan resolusi tinggi.

Unmanned Aerial Vehicle (UAV) atau *drone* telah menjadi *platform* penting dalam penginderaan jarak jauh dan fotogrametri digital saat ini (Tamminga, dkk., 2015). Penggunaan *drone* untuk area yang relatif kecil dengan tinggi terbang rendah terbukti efektif dalam mendeteksi dan menangkap detail obyek penutup lahan dan menghasilkan foto resolusi sangat tinggi. (Hua, Qi, Shang, Hu, & Han, 2016). Pemanfaatan *drone* dapat menghasilkan *DTM* dengan akurasi 20 mm pada area datar seluas 0.6 Ha dengan material kerikil yang dipotret dari ketinggian 160 m, dan menghasilkan akurasi 10 mm dari ketinggian 80 m (Reshetyuk dan Mårtensson, 2016). Eksstraksi topografi dengan teknik fotogrametri *drone* ini menggunakan algoritma *key feature matching* (pencocokan obyek kunci) dari foto-foto stereoskopis sehingga menghasilkan mozaik foto (Haala dan Cavegn, 2016). *Key feature matching* ini menghasilkan model penutup lahan yang disebut *Digital Surface Model (DSM)* yang selanjutnya dikonversi menjadi *Digital Terrain Model (DTM).* Perbedaan antara *surface model* dan *terrain model* diilustrasikan pada Gambar 1 di bawah ini.

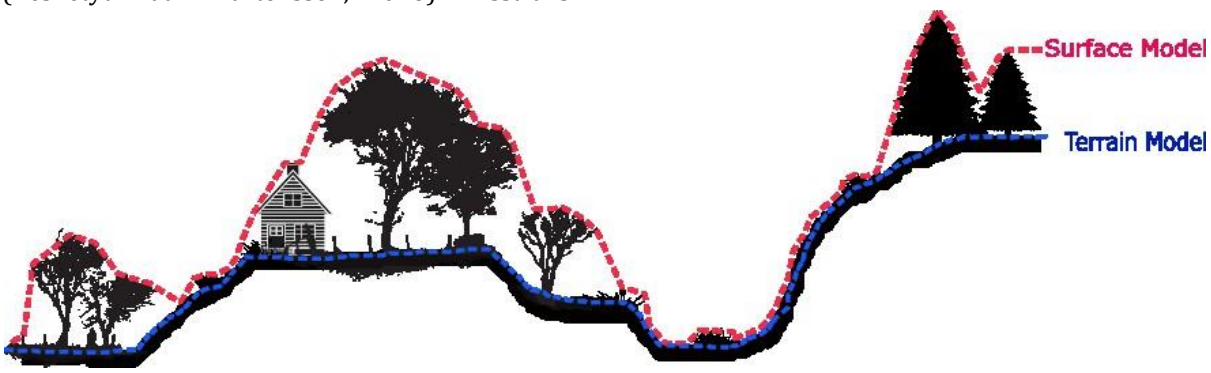
Proses konversi *DSM* menjadi *DTM* dikerjakan dengan mengeliminasi penutup lahan pada *DSM* dan mengambil topografi yang sebenarnya. Konversi *DSM* menjadi *DTM* di tunjukkan pada Gambar 2.

Konversi *DSM* menjadi *DTM* ini perlu diselidiki pada setiap tahapan prosesnya. Proses penyelidikan tersebut kemudian diharapkan dapat menghasilkan sebuah protokol mengenai proses produksi *DTM* dengan teknik fotogrametri *drone* yang dapat dihandalkan.

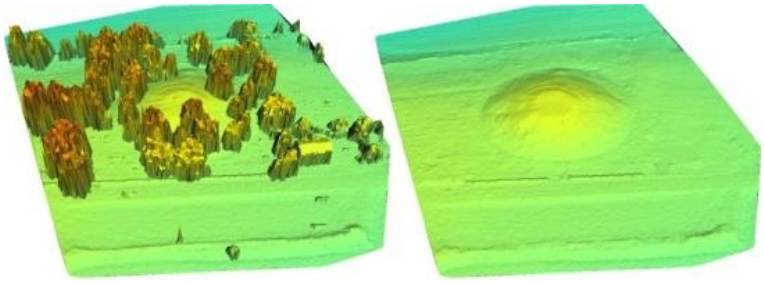
METODOLOGI

Alur penelitian dijelaskan melalui Gambar 3. Secara garis besar, penelitian ini dilakukan dalam tiga tahap yaitu:

1. Menyusun sebuah protokol proses produksi *DTM* dari fotogrametri *UAV*
2. Validasi akurasi *DTM* dari Fotogrametri *UAV*
3. Menentukan batas ketinggian banjir hasil deteksi citra *SAR multi-temporal* diukur dari *DTM* hasil fotogrametri *UAV*

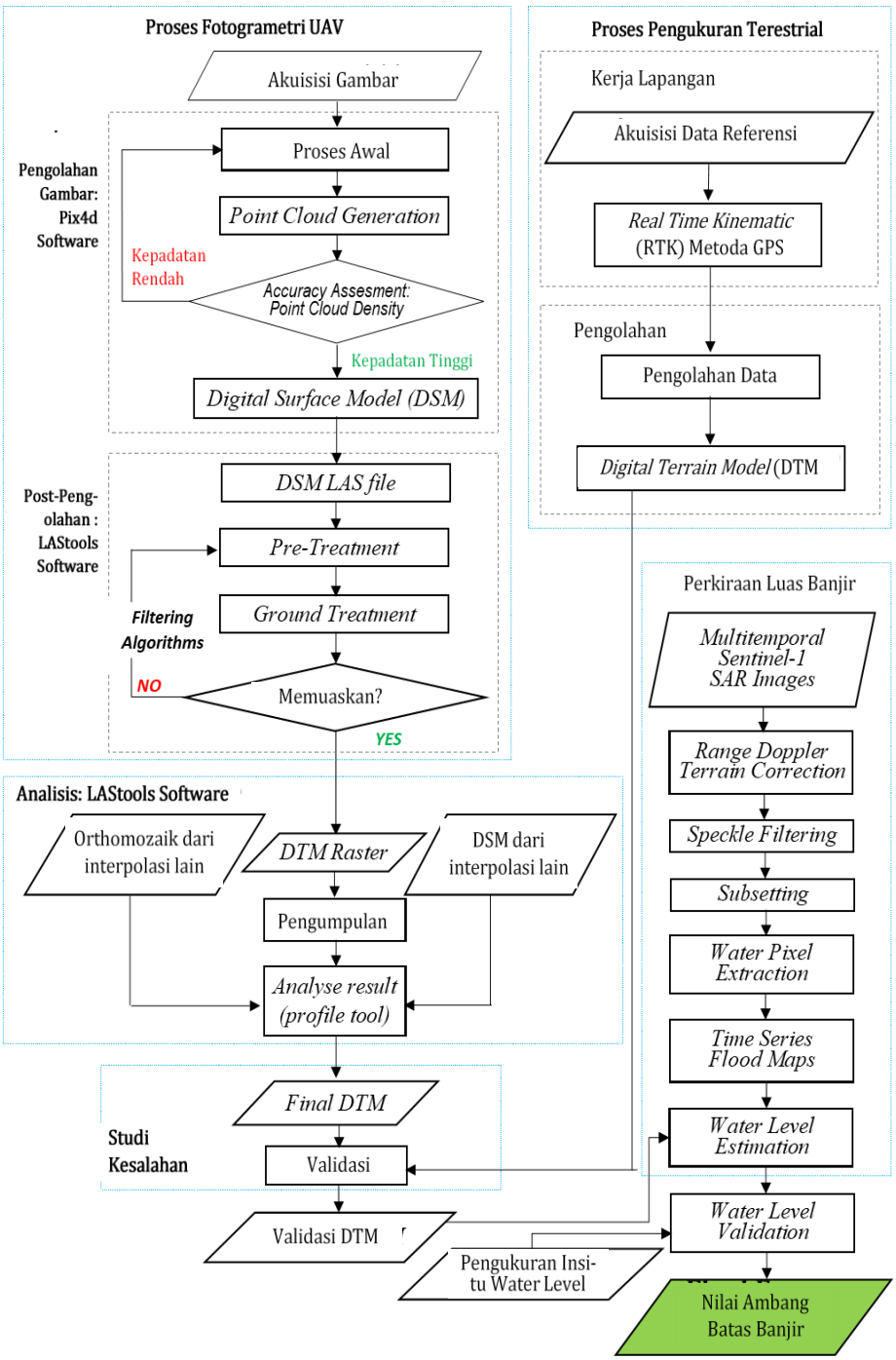


Gambar 1 Perbedaan antara model permukaan (surface) dan model terrain



DSM DTM

Gambar 2 Konversi dari *DSM* ke *DTM*



Gambar 3 Diagram Alir Penelitian

Tahap-tahap tersebut diuraikan ke dalam beberapa langkah berikut ini.

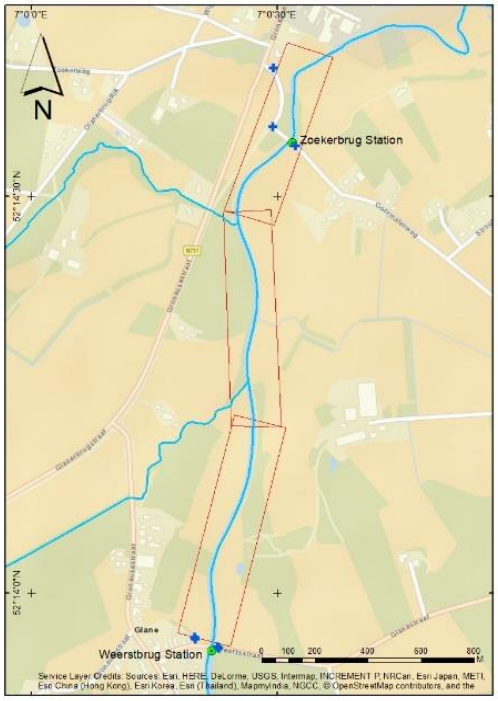
1. Menyusun protokol proses produksi *DTM* dari fotogrametri *UAV*

Teknik pengambilan foto dalam fotogrametri sangat menentukan kualitas *point cloud* dan orthophoto yang dihasilkan. Langkah pertama adalah menyusun *Flight plan* yang berisi luas area, jumlah seri penerbangan / *serial flights*, *overlap* depan dan samping, tinggi terbang / *altitude*, serta *software* pemotretan yang dipakai. *Drone* yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis *quadcopter (4 propeller) DJI Phantom 4* dengan *software pix4d capture.* Luas area yang difoto ± 2 km^2, berbentuk memanjang ± 1km dengan *point of interest* bagian sungai antara Kota Glane dan Kota Losser di sisi timur Provinsi Overijssel, Belanda. Area ini adalah *natural man-made flood plain* (dataran banjir buatan) yang setiap tahun tergenang banjir Sungai Dinkel dari Rhine Utara, Westphalia, Jerman. Pembuatan dataran banjir di sepanjang sungai ini merupakan bagian dari program mitigasi banjir oleh *Waterschap* (Dewan Air) *Vechtstromen*. (minimalisisr istilah asing)

Area penelitian dipotret dalam tiga seri penerbangan (Gambar 4*). Overlap* depan dan samping sebesar 80% dengan tujuan memperoleh *feature matching* yang tinggi dari semua foto. *Altitude* saat mengambil gambar adalah 50 m sehingga didapatkan *Ground Sampling Distance (GSD)* 2 cm. Nilai *GSD* ini menjadi indikasi resolusi spasial dari orthophoto yang dihasilkan. Dalam pengambilan gambar, digunakan *Ground Control Points (GCP)/* titik-titik kontrol yang tersebar di area penelitian. Titik-titik *GCP* berfungsi sebagai titik kontrol untuk orientasi dan georeferensi foto. *GCP* yang diambil adalah obyek alami dan buatan yang jelas dikenali dari foto. Titik-titik *GCP* diukur menggunakan *RTK-GPS Leica CS15-GS14 RTK GNSS GPS Bluetooth Smart Antenna* dengan akurasi 8 mm + 0,5 ppm (rms) horizontal dan 15 mm +0,5 ppm (rms) vertikal (Leica, 2018).

Pemrosesan foto dikerjakan dengan *software digital photogrammetry pix4d mapper*. Pada proses ini semua koordinat *X,Y,Z* dari *GCP* diplot ke dalam setiap foto yang merekam titik tersebut untuk me-rekonstruksi *point cloud*. Akurasi proses ini dinyatakan dalam laporan pemrosesan foto yang berisi jumlah foto terkalibrasi, *Root Mean Square Error (RMSE)* georeferensi, serta *error ellipse /* elips kesalahan dari persebaran dan jumlah *GCP* (Gambar 5).

Point cloud kemudian dipadatkan menjadi *DSM* dalam format *LAS/LAZ file.* Konversi *DSM* menjadi *Digital Terrestrial Model (DTM)* dilakukan

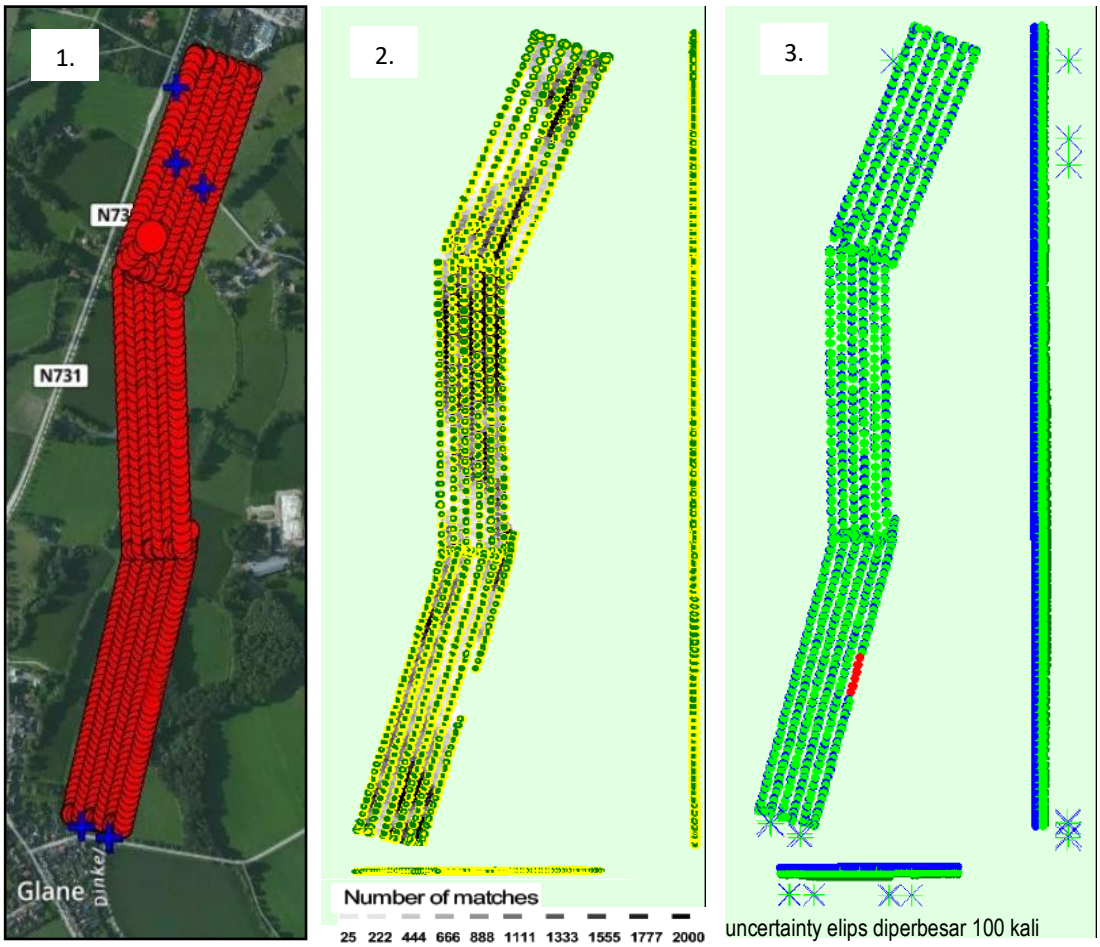


Gambar 4 Polygon area yg dicover dalam 3 kali penerbangan dengan lokasi-lokasi *GCP* (tanda plus biru) untuk produksi Ortofoto.

dengan *software LAS Tools* dengan analogi eliminasi penutup lahan alami maupun artifisial di atas topografi sebenarnya. Proses eliminasi tersebut dikerjakan dengan cara subtitusi titik-titik elevasi topografi di bawah penutup lahan dengan elevasi *GCP* pengukuran *RTK-DGPS.* Penggunaan *GCP* sangat menentukan kemiripan *DTM UAV* dengan topografi sebenarnya. Setiap penutup lahan harus diwakili oleh minimal 1 titik kontrol, begitu juga dengan perbedaan *relief*; datar, landai, berbukit hingga medan ekstrim. Tidak hanya jumlah, tetapi distribusi *GCP* juga sangat mempengaruhi akurasi *DTM UAV* ini. Proses konversi dilakukan dengan menggunakan algoritma-algoritma yang tersedia, dikombinasi dengan koreksi *LAS file* secara manual khususnya untuk *upper* dan *under noises. DTM* yang dihasilkan dari fotogrametri *UAV* ini divalidasi terhadap *DEM LiDAR* dalam mengukur ketinggian banjir hasil deteksi citra *SAR Sentinel-1*.

2. Validasi akurasi DTM dari Fotogrametri UAV

Validasi *DTM* hasil fotogrametri *UAV* dilakukan terhadap *DEM Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN)2* dengan resolusi 50 cm dan diperoleh dari teknologi *LiDAR. DEM AHN2* ini adalah parameter topografi yang sangat akurat yang menjadi referensi semua pemodelan hidraulik di Belanda.



Gambar 5 1. Posisi nadir pada setiap foto (titik warna merah) terhadap GCP (tanda positif warna biru). 2. indikasi kecocokan obyek dari foto-foto yang overlap, ditandai dengan zona gelap pada area yg tidak terdapat GCP. 3. Uncertainty elips / Elips ketidakpastian hasil kalibrasi dari semua foto-foto udara yang overlap

Validasi titik-titik referensi (GCP) yang digunakan, juga dilakukan terhadap hasil pengukuran terrestrial *RTK-DGPS,* karena jumlah, distribusi, dan jarak antar GCP terbukti dapat menambah akurasi DTM UAV (Villanueva dan Blanco, 2019). Penilaian proses validasi ini dinyatakan dengan *Root Mean Square Error (RMSE)* dari masing-masing produk *DEM* ke *DTM* referensi, seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 1 dibawah ini.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(P_i - O_i\right)^2}{n}} \qquad (1)$$

Dengan keterangan:

P : Prediksi atau Prakiraan

O : Observasi

n : Jumlah sampel

RMSE merupakan nilai rata-rata dari jumlah kuadrat kesalahan, untuk menyatakan besarnya kesalahan model perkiraan. Nilai *RMSE* kecil menunjukkan variasi nilai model perkiraan (*P*) mendekati variasi nilai obeservasinya (*O*). Proses validasi ini menghasilkan nilai *RMSE DTM UAV* terhadap *DEM AHN2* dan juga terhadap pengukuran *RTK-DGPS.*

Citra SAR yang telah melalui *terrain correction, subseting*, dan *speckle filtering,* kemudian di proses dengan cara *resampling* nilai piksel pantulan air. *Resampling* ini dilakukan berdasarkan investigasi histogram citra antara nilai spektral obyek air dan yang bukan air. Selanjutnya dilakukan reklasifikasi nilai piksel genangan banjir dari tubuh air permanen dengan teknik *color composite*. Reklasifikasi ini menghasilkan nilai ambang/ *threshold value* piksel banjir yang akan diberlakukan kepada 46 citra banjir. Dari proses ini diketahui area yang paling sering tergenang banjir dalam bentuk poligon-poligon terklasifikasi.

Luas area genangan banjir kemudian di *overlay* dengan dua set *platform* topografi (*DTM UAV* dan *DEM AHN2)* untuk mengestimasi ketinggian genangan. Validasi hasil estimasi ketinggian air

banjir dari dua platform topografi tersebut dilakukan terhadap data stasiun pengukur ketinggian air/ *water level station.* Data pengukuran insitu berfungsi sebagai referensi untuk menyelidiki *DTM UAV* ini.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengambilan gambar pada tanggal 15 September 2017 menghasilkan 683 foto dalam tiga penerbangan. Jumlah GCP yang digunakan untuk georeferensi adalah 7 titik dengan *RMSE* ketiga arah yaitu X = 0,026, Y = 0,022, dan Z = 0,053. Distribusi lokasi *GCP* yang merata terbukti meningkatkan akurasi georeferensi. *Error ellips* juga menunjukan *offset* terdistribusi merata di seluruh areal liputan, khususnya disekitar lokasi GCP. Fotogrametri UAV yang dikerjakan sesuai protokol, telah menghasilkan beberapa produk seperti Gambar 6. Orthophoto, *DSM*, *DTM* dengan resolusi sesuai *GSD* yaitu 2cm, dan *DTM* dengan resolusi spasial yang diturunkan menjadi 40 cm.

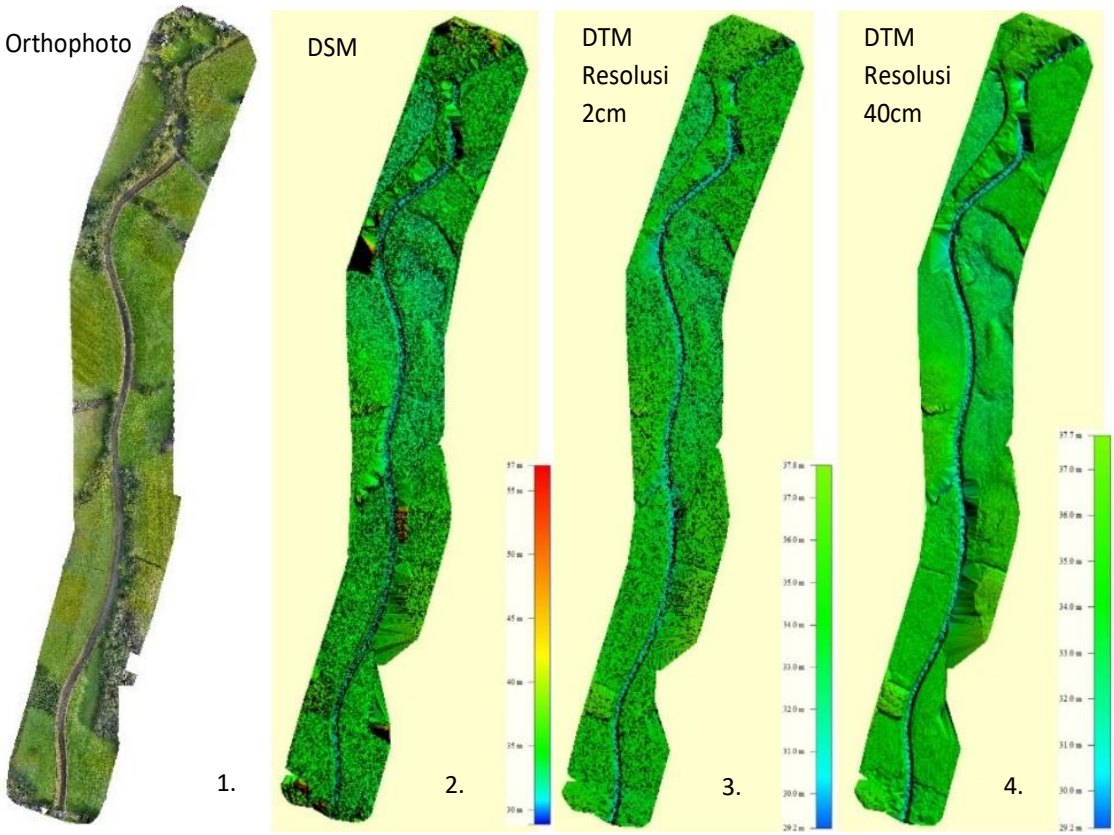
DTM hasil fotogrametri *UAV* kemudian divalidasi dengan set *DEM AHN2* dan terhadap koordinat Z pengukuran *RTK-DGPS*, menghasilkan indikasi nilai-nilai regeresi linear seperti Gambar **7**.

Dari nilai-nilai regresi linear di atas, terindikasi bahwa *DTM UAV* sebagai parameter topografi dapat diandalkan untuk mengukur elevasi titik kontrol. Nilai *RMSE* untuk *DTM UAV* dengan resolusi 2 cm terhadap titik referensi adalah 0,0617 dan untuk resolusi 40 cm adalah 0,0522. Penelitian ini merekomendasikan penggunaan *DTM UAV* resolusi 40 cm untuk digunakan mengukur ketinggian banjir hasil deteksi citra *SAR*. Dari penelitian ini diketahui bahwa setiap parameter *filtering* berpengaruh berbeda terhadap *DTM UAV* yang dihasilkan. Setiap parameter memberi respon berbeda terhadap jenis penutup lahan dan bentuk lereng.

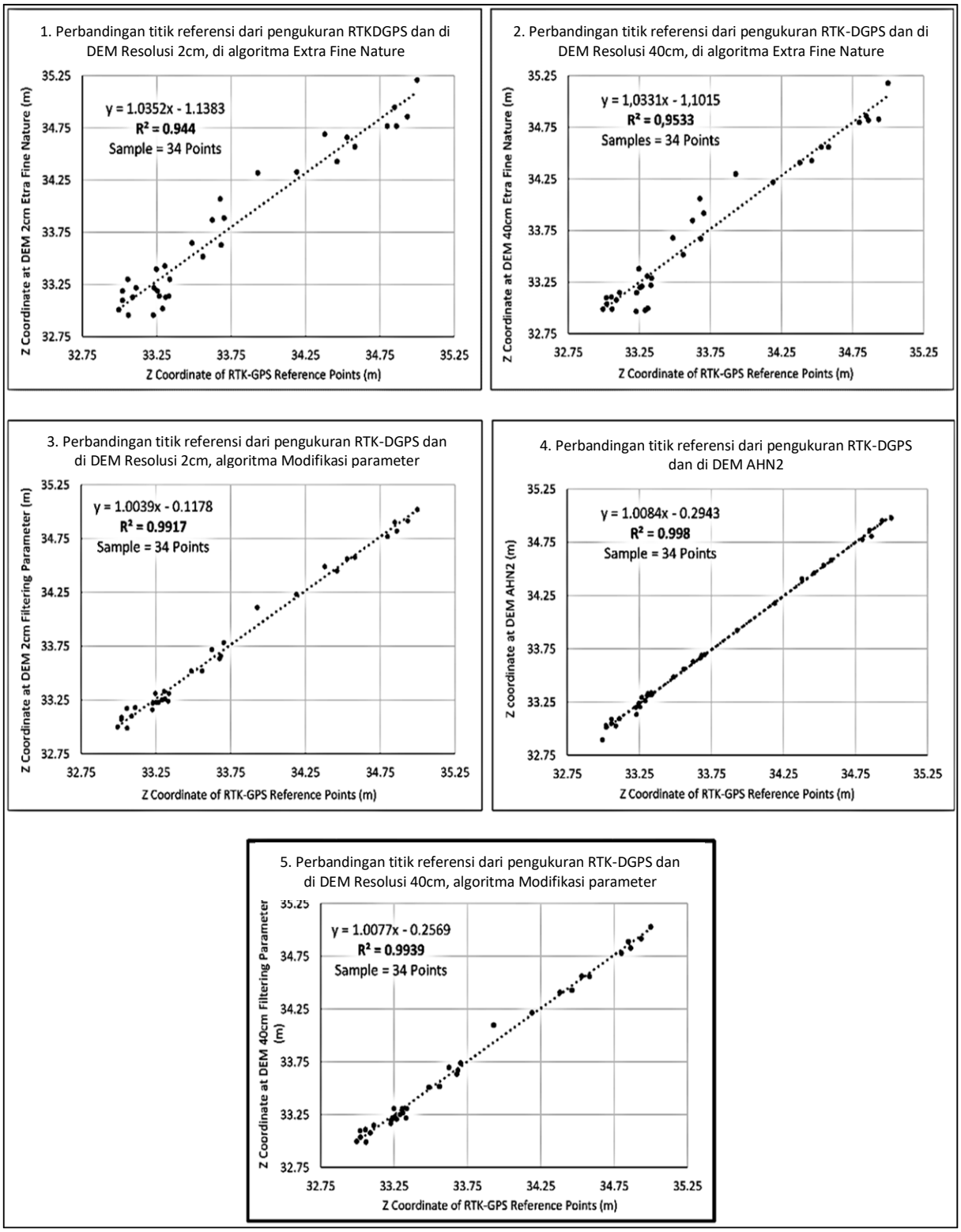
Ekstraksi nilai piksel genangan banjir dilakukan dengan teknik *color composite* seperti pada Gambar 8.

Metode di atas menunjukkan nilai *backscatter pixel* -15,18360 sebagai *threshold value* untuk 46 citra banjir *Sentinel-1 multi temporal*.

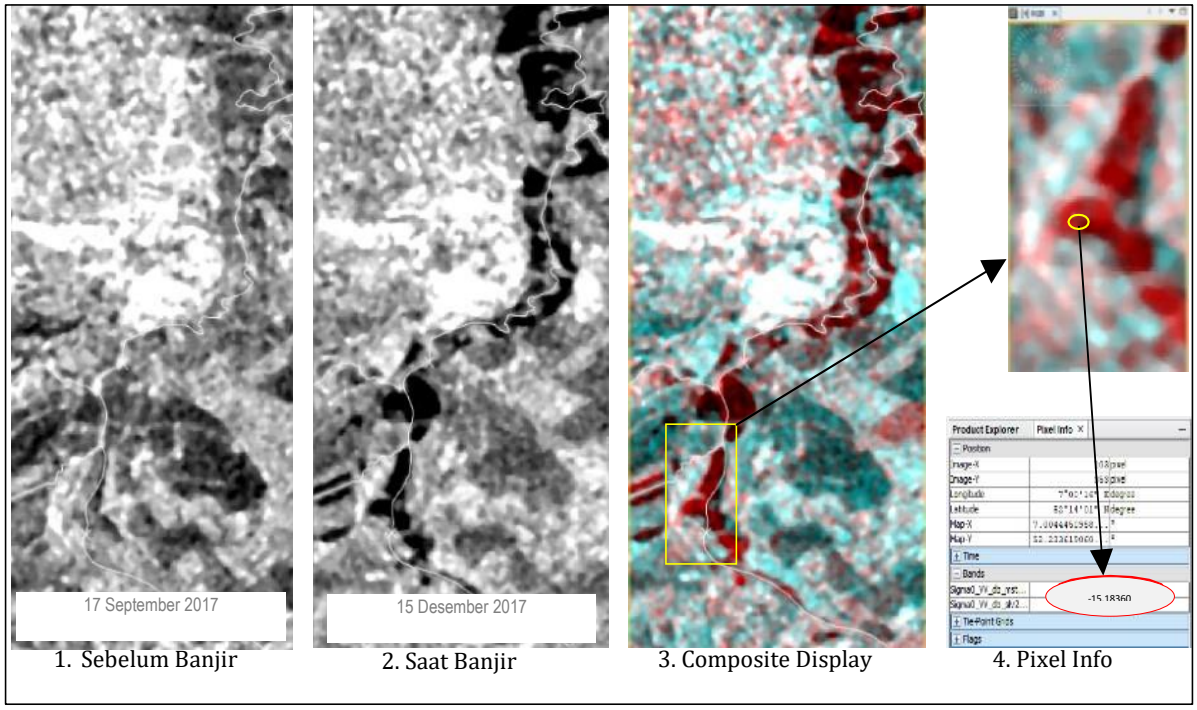
Reklasifikasi dilakukan dengan *bandmath* ***if Sigma0_VV_db <-15 then one else NaN,*** sehingga nilai piksel < -15 diklasifikasikan sebagai 1 (genangan air = putih) dan nilai lainnya adalah 0 (hitam). Reklasifikasi 46 citra banjir *multi temporal* menghasilkan peta frekuensi banjir seperti pada Gambar 9.



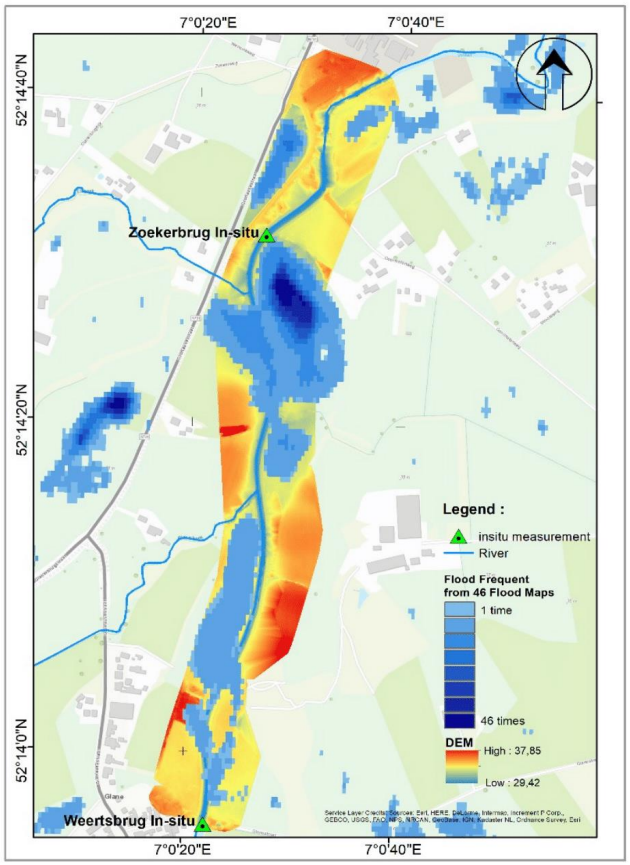
Gambar 6 Hasil Proses Produksi *DTM* dari Fotogrametri *UAV: 1. Orthophoto, 2.DSM Resolusi 2cm, 3.DTM resolusi 2cm, 4.DTM resolusi 40cm*



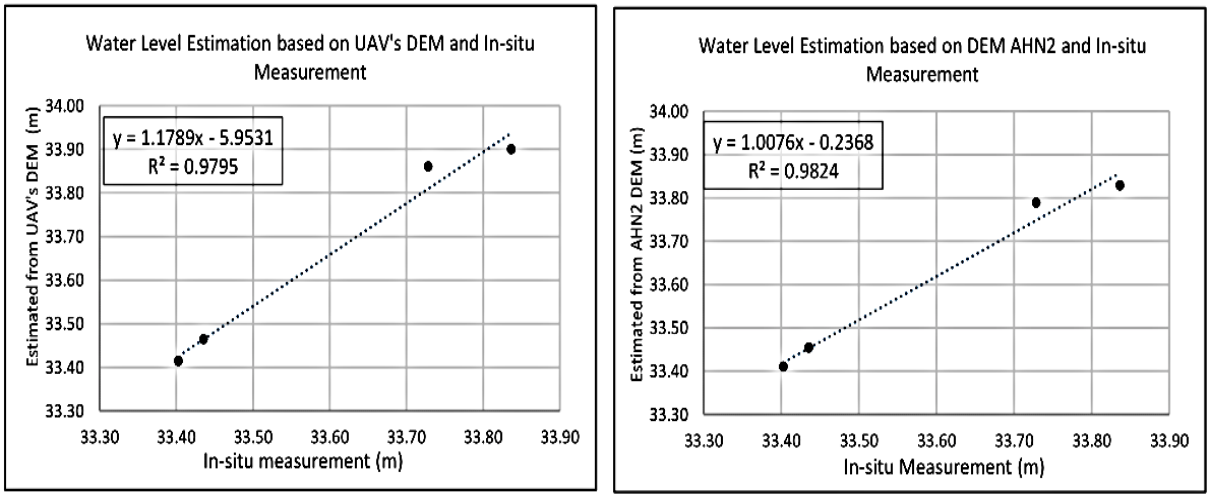
Gambar 7 Validasi model-model elevasi pada titik referensi : 1. Perbandingan titik referensi dari pengukuran RTKDGPS dan di DEM Resolusi 2cm, di algoritma *Extra Fine Nature.* 2. Perbandingan titik referensi dari pengukuran RTK-DGPS dan di DEM Resolusi 40cm, di algoritma Extra Fine Nature. 3. Perbandingan titik referensi dari pengukuran RTK-DGPS dan di DEM Resolusi 2cm, algoritma Modifikasi parameter. 4. Perbandingan titik referensi dari pengukuran RTK-DGPS dan di DEM AHN2. 5. Perbandingan titik referensi dari pengukuran RTK-DGPS dan di DEM Resolusi 40cm, algoritma Modifikasi parameter



Gambar 8 Penentuan *threshold value* piksel banjir dengan *color composite:* 1. Citra Sentinel-1 sebelum banjir, 2. Citra Sentinel-1 pada saat banjir, 3. Teknik pengambilan nilai pixel banjir dengan metode *color composite*, 4. Nilai pixel yang diambil sebagai *threshold.*



Gambar 9 Peta Frekuensi Banjir dari Citra *SAR* Oktober 2014 - Desember 2017



Perbandingan penggunaan DTM UAV dengan pengukuran in situ, untuk tinggi muka air

Perbandingan penggunaan DTM AHN2 dengan pengukuran in situ, untuk tinggi muka air

Gambar 10 Perbandingan akurasi pengukuran tinggi estimasi muka air antara: 1. DTM UAV dengan pengukuran in situ, dan 2. *DEM AHN2 dengan pengukuran in situ.*

Validasi ketinggian genangan air banjir dengan platform *DTM UAV* terhadap pengukuran *water level in-situ* dan dilakukan seperti pada Gambar 8. Dari Gambar 10 diketahui aplikasi *DTM UAV* resolusi 40 cm untuk estimasi ketinggian air banjir 97,95% berkorelasi dengan hasil pengukuran insitu, dan penggunaan DEM AHN2 98,24% berkorelasi dengan hasil pengukuran di stasiun tinggi muka air. Hasil validasi ini menunjukkan nilai *RMSE* 0,0672 yang memberikan indikasi bahwa *DTM UAV* dapat digunakan untuk pemodelan hidrolik.

KESIMPULAN

Laporan proses fotogrameteri yang ditunjukan dengan *Uncertainty Ellips* menunjukan bahwa area yang tidak terdapat GCP maupun yang jarak antar GCP-nya berjauhan mempunyai ketidak jelasan (Uncertainty) yang lebih besar. Jumlah dan distribusi *GCP* sangat krusial mempengaruhi hasil georeferensi orthophoto fotogrametri *UAV*. Langkah yang paling penting dalam konversi *DSM* menjadi *DTM* yaitu mengatur parameter *filtering* (*bulge, offset, spike,* dan *standard deviation*).

Penggunaan *DTM* hasil fotogrametri *UAV* untuk estimasi ketinggian genangan air banjir berdasarkan polygon genangan pada 46 citra banjir, terbukti memberikan akurasi yang baik, setelah divalidasi dengan pengukuran tinggi air banjir dari stasiun tinggi muka air yang ada dilokasi. Estimasi ketinggian air banjir dari DTM UAV 97,95% berkorelasi dengan hasil pengukuran insitu, dan 98,24% berkorelasi dengan penggunaan DEM AHN2 untuk pengukuran di stasiun tinggi muka air. Hal ini mengindikasikan *DTM UAV* cukup handal digunakan sebagai *platform* peta frekuensi banjir yang dihasilkan dari deteksi citra *SAR* multi temporal.

Perlu adanya studi komprehensif mengenai aplikasi *UAV* untuk pengambilan parameter topografi. Studi dengan tipe *drone* lain, tinggi terbang yang beragam berdasarkan jenis tutupan lahan, sensor pada posisi nadir ataupun *oblique* dan dengan pola linear / *cross runs*. Jenis penutup lahan dan kelas lereng dalam penetapan *GCP* untuk rekonstruksi *DSM* dan orthophoto, juga perlu diteliti lebih lanjut untuk mendapat protokol yang spesifik dengan akurasi yang handal.

Perlu eksplorasi lanjutan mengenai pengaruh parameter *filtering* (*bulge, offset, spike,* dan *standard deviation*) pada konversi DSM menjadi DTM. Perlu dilakukan studi mengenai pengaruh setiap parameter *filtering* pada kondisi yang berbeda. Studi lanjut tersebut dapat mengindikasikan parameter yang paling *sensible* dalam produksi DTM.

Hasil penelitian juga memberikan indikasi postif akan penggunaan *DTM UAV* untuk pemodelan hidraulik, terlebih jika daerah tersebut belum mempunyai data topografi yang akurat. Metode ini dapat menjadi solusi praktis dan hemat waktu.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada *supervisor* penelitian kami di *University of Twente* Belanda, yaitu Dr. Ir. Christiaan Van der Tol dan Ir. GN. Parodi atas

bimbingan dan supervisi yang diberikan. Terima kasih kepada Pimpinan dan rekan kerja di Balai Wilayah Sungai Sulawesi III Palu dan Dinas Cipta Karya dan Sumber Daya Air Provinsi Sulawesi Tengah atas motivasi dan dukungan yang diberikan dalam mengembangkan kemampuan teknis keilmuan disamping tugas pokok sebagai Aparatur Sipil Negara (ASN).

DAFTAR PUSTAKA

Drever, J. I. (2005). *Surface and Ground Water, Weathering, and Soils*. Elsevier.

Dunne, T. & Black, R. D. (1970). Partial area contributions to storm runoff in a small New England Watershed. *Water Resources Research*, *6*(5), 1296–1311. https://doi.org/10.1029/WR006i005p01296.

ESA. (2010). Image Processing with Next ESA SAR Toolbox (NEST) Flood Mapping Using ASAR Data with NEST. Retrieved from http://earth.eo.esa.int/download/eoedu/Earth net-website-material/to-access-from-Earthnet/2010_AndeSAT-practical-sessions_Bolivia/ASAR-Ecuador-floods.zip

Haala, N. & Cavegn, S. (2016). High Density Aerial Image Matching: State-of-The - Art and Future Prospect. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XLI-B4,* 625–630. https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B4-625- 2016

Haile, A. & Rientjes, T. (2005). Effects of LiDAR DEM resolution in flood modelling: a model sensitivity study for the city of Tegucigalpa, Honduras. *ISPRS WG III/3, III/4,* 168–173. *Retrieved from* http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/3-W19/papers/168.pdf

Hua, C., Qi, J., Shang, H., Hu, W., & Han, J. (2016). Detection of collapsed buildings with the aerial images captured from UAV. *Science China Information Sciences*, *59*(3), 32102. https://doi.org/10.1007/s11432-015-5341-7

Leica, G. A. G. (2018). *Leica Viva GS14 – GNSS Smart Antenna. Retrieved January* 22, 2018, from https://leica-geosystems.com/products/gnss-systems/smart-antennas/leica-viva-gs14

Pdok.nl, https://www.pdok.nl/introductie/-/article/actueel-hoogtebestand-nederland-ahn2-

Reshetyuk, Y. & Mårtensson, S.-G. (2016). Generation of Highly Accurate Digital Elevation Models with Unmanned Aerial Vehicles. *The Photogrammetric Record*, *31(154)*, 143–165. https://doi.org/10.1111/phor.12143

Tamminga, A., Hugenholtz, C., Eaton, B., & Lapointe, M. (2015). Hyperspatial Remote Sensing of Channel Reach Morphology and Hydraulic Fish Habitat Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV): A First Assessment in the Context of River Research and Management. *River Research and Applications*, *31*(3), 379–391. https://doi.org/10.1002/rra.2743

Uysal, M., Toprak, A. S., & Polat, N. (2015). DEM Generation with UAV Photogrammetry and Accuracy Analysis in Sahitler Hill. *Measurement*, *73*, 539–543. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.06.010

Villanueva, J.K.S. & Blanco, A.C (2019). Optimization of Ground Control Point (GCP) configuration for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) survey using Structure From Motion (SFM). *5th International Conference on Geoinformation Science*, Morocco. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-4-W12-167-2019

Woodrow, K., Lindsay, J. B., Berg, A. A. (2016). Evaluating DEM conditioning techniques, elevation source data, and grid resolution for field-scale hydrological parameter extraction. *Journal of Hydrology*, *540*: 1022–1029. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.07.018