

Integrasi Fusi Spasial Lidar Airborne dan Survei Terestris Untuk Pemodelan Hidraulik 2D Kali Kamal Jakarta

Akbar Ramadhan^{1✉}, Endah Kurniyaningrum², Bagus Handyastono³

(1,2) Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Trisakti, Jakarta, Indonesia
(3) PT. Inakko Internasional Konsulindo

Abstrak: Banjir di DAS Kali Kamal, Kelurahan Tegal Alur, Jakarta Barat, terus berulang selama periode 2020–2025 dengan tinggi genangan berkisar 20 hingga lebih dari 50 cm akibat hujan ekstrem, luapan sungai, sedimentasi, dan pengaruh pasang air laut. Pemodelan hidraulik yang akurat diperlukan untuk mendukung upaya mitigasi banjir, namun pemanfaatan data *Airborne* LiDAR sekunder dalam format DWG masih memiliki keterbatasan akibat generalisasi spasial dan ketidakmampuan merepresentasikan dasar sungai secara optimal. Penelitian ini merupakan studi pertama yang mengintegrasikan data *Airborne* LiDAR DWG sekunder dengan survei penampang melintang (*cross-section*) terestris menggunakan *total station* untuk memperbaiki representasi *wet channel* pada pemodelan HEC-RAS 2D. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi efektivitas metode fusi spasial tersebut. Tiga model elevasi diuji, yaitu Model A (LiDAR DWG + survei terestris), Model B (DEM satelit + survei terestris), dan Model C (DEM satelit). Evaluasi dilakukan menggunakan *Root Mean Square Error* vertikal ($RMSE_z$), *Linear Error 90%* (LE90), dan *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE), sedangkan hasil simulasi divalidasi terhadap riwayat kejadian banjir tahun 2020–2025. Model A memberikan akurasi terbaik dengan nilai $RMSE_z$ sebesar 0,090 m, LE90 sebesar 0,148 m, dan NSE sebesar 0,942, sehingga memenuhi standar ketelitian geometris Badan Informasi Geospasial (BIG) serta mereduksi estimasi genangan semu (*false flood*). Simulasi HEC-RAS 2D menggunakan Model A juga menunjukkan kesesuaian yang baik dengan pola genangan historis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode fusi spasial mampu mengatasi keterbatasan data LiDAR DWG sekunder dan menghasilkan model elevasi yang lebih representatif untuk mendukung pemodelan banjir serta perencanaan mitigasi banjir di kawasan perkotaan.

Abstract: Flooding in the Kali Kamal Watershed, Tegal Alur Village, West Jakarta, occurred repeatedly during 2020–2025, with inundation depths of 20–50 cm or more due to extreme rainfall, river overflow, sedimentation, and tidal effects. Accurate hydraulic modeling is essential for effective flood mitigation. However, secondary *Airborne* LiDAR data in DWG format may have limitations in spatial representation and riverbed characterization. This study integrates secondary *Airborne* LiDAR DWG data with terrestrial cross-section surveys using a *total station* to improve *wet-channel* representation in HEC-RAS 2D modeling. Three elevation models were evaluated: Model A, combining DWG LiDAR and terrestrial survey data; Model B, combining satellite DEM and terrestrial survey data; and Model C, using satellite DEM alone. Model performance was assessed using vertical *Root Mean Square Error* (RMSE), *Linear Error 90%* (LE90), and *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE), with simulation results validated against historical flood data from 2020–2025. Model A achieved the highest accuracy, with an RMSE of 0.090 m, LE90 of 0.148 m, and NSE of 0.942. It met the geometric accuracy standards of the Geospatial Information Agency (BIG) and reduced false flood estimates by up to 25.00%. The HEC-RAS 2D simulation based on Model A also showed good agreement with historical inundation patterns. These findings demonstrate that spatial fusion of secondary LiDAR and terrestrial survey data can improve elevation representation and support more reliable urban flood modeling and mitigation planning.

Article history:

Received: 18 July 2026

Revised: 26 August 2026

Accepted: 02 September 2026

Published: 07 September 2026

Kata kunci:

HEC-RAS 2D, fusi spasial,

LiDAR airborne, survei terestris

Keyword:

HEC-RAS 2D, Spatial Fusion,

Airborne LiDAR, Terrestrial

Survey

This is an open-access article under the [CC-BY-SA License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).



How to cite: Ramadhan, A., Kurniyaningrum, E., & Handyastono, B. (2026). Integrasi Fusi Spasial Lidar Airborne dan Survei Terestris Untuk Pemodelan Hidraulik 2D Kali Kamal Jakarta. *RESWARA: Jurnal Riset Ilmu Teknik*, 4(4), 1214–1223. <https://doi.org/10.70716/reswara.v4i4.764>

PENDAHULUAN

Kawasan Tegal Alur yang dilintasi oleh Kali Kamal merupakan salah satu zona kerentanan banjir kritis di Jakarta Barat dengan kompleksitas hidraulik tinggi dengan beberapa faktornya seperti topografi yang cenderung landai, perubahan tutupan lahan, penurunan muka air tanah, curah hujan yang tinggi dan padatnya pemukiman (Handyastono et al., 2025; Kadri & Kurniyaningrum, 2019; Kardhana et al., 2022; Kuntoro et al., 2017; Kusuma et al., 2019), sehingga memerlukan simulasi model dua dimensi (2D) yang presisi untuk perencanaan mitigasi struktural seperti tanggul dan pompa (Kadri et al., 2021). Namun, akurasi model HEC-RAS 2D kerap terkendala oleh kualitas input Digital Elevation Model (DEM), di mana penggunaan data sekunder Airborne LiDAR dalam format (.dwg) sering kali mengalami generalisasi spasial dan gagal menembus area alur basah sungai (Kurniyaningrum et al., 2019a; Merwade et al., 2009). Penelitian terdahulu terkait pemodelan banjir perkotaan umumnya hanya mengandalkan data elevasi sekunder ini tanpa melakukan koreksi detail pada geometri alur sungai. Kelemahan ini menciptakan celah penelitian (research gap), karena pengabaian anomali dasar sungai memicu bias yang signifikan pada estimasi kapasitas tampung hidraulik dan luasan genangan sebenarnya (Casas et al., 2006). Oleh karena itu, pendekatan hibrida melalui metode fusi spasial sangat krusial untuk mengintegrasikan keunggulan data elevasi makro LiDAR DWG dengan survei terestris primer penampang melintang (cross-section) serta pemasangan Ground Control Point (GCP) (Malinverni et al., 2025; Moriasi et al., 2007). Teknologi Airborne LiDAR dalam format (.dwg) memiliki keterbatasan mendasar berupa generalisasi spasial akibat proses simplifikasi data point cloud serta kegagalan penetrasi pulsa laser pada badan air yang menyebabkan kekosongan data alur basah sungai (wet-channel bathymetry gap). Mengabaikan anomali geometri ini dapat mendistorsi kapasitas tampung hidraulik aktual dalam simulasi banjir, sehingga diperlukan pendekatan hibrida melalui metode fusi spasial yang mengintegrasikan data elevasi makro tersebut dengan data pengukuran terestris primer hasil survei lapangan (cross-section). Untuk menguji keandalan model elevasi hasil fusi tersebut, Peraturan Badan Informasi Geospasial (BIG) No. 6 Tahun 2018 tentang Pedoman Teknis Ketelitian Peta Dasar mensyaratkan standardisasi akurasi posisi menggunakan parameter Circular Error 90% (CE90) untuk ketelitian horizontal dan Linear Error 90% (LE90) (Ground Control Point/GCP). Magnitudo deviasi vertikal model dihitung menggunakan indikator statistik Root Mean Square Error ($RMSE_z$) pada tingkat kepercayaan 90% yang dirumuskan melalui Persamaan (1):

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{model,i} - Z_{gcp,i})^2}{n}}$$

Nilai ($RMSE_z$) tersebut menjadi basis utama dalam penentuan kelas ketelitian vertikal peta dasar berskala besar melalui konversi nilai $LE90 = 1,6449 \times (RMSE_z)$. Selain itu, digunakan parameter Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) untuk mengevaluasi kemampuan model dalam mereplikasi variasi topografi asli dibandingkan dengan nilai rata-rata sampel lapangan, seperti ditunjukkan pada Persamaan (2):

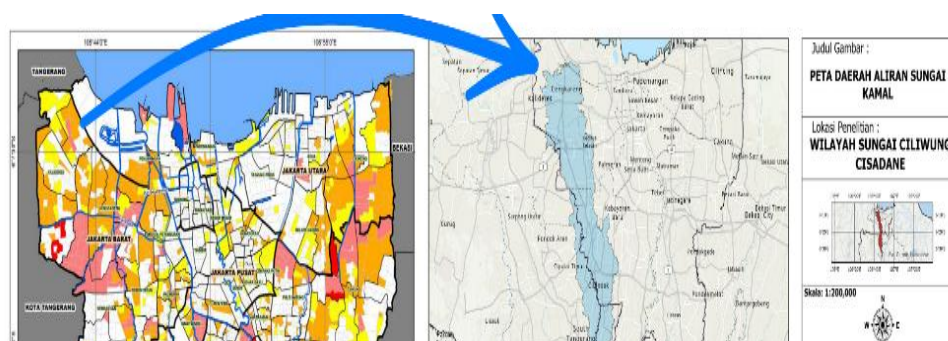
$$NSE = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{model,i} - Z_{gcp,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Z_{gcp,i} - \bar{Z}_{gcp})^2}}$$

Dimana $Z_{model,i}$ adalah Elevasi model pada titik ke- i , $Z_{gcp,i}$ adalah elevasi aktual GCP lapangan, $\bar{z}_{gcp}$ adalah rata-rata elevasi seluruh GCP dan n melambangkan jumlah total titik sampel. Integrasi geometri hasil fusi tersebut kemudian dieksekusi dalam pemodelan hidraulik HEC-RAS 2D. Pada kawasan hilir Kali Kamal, penerapan nilai koefisien kekasaran *Manning* sebesar $n = 0.020$ disesuaikan dengan karakteristik alur sungai utama yang didominasi oleh konstruksi dinding beton atau turap (*lined channel*). Nilai ini secara teoretis merepresentasikan tingkat hambatan hidrolis yang rendah serta kapasitas pengaliran yang optimal pada saluran buatan di area urban.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara komparatif efektivitas tiga skenario model elevasi digital, yaitu Model A (LiDAR + Pengukuran Terestris), Model B (DEM Satelit + Pengukuran Terestris), dan Model C (DEM Satelit) dalam menyimulasikan fenomena genangan banjir di Kali Kamal. Validasi akurasi spasial vertikal pada fusi data elevasi diuji menggunakan indikator statistik *Root Mean Square Error (RMSE_z)* yang dirujuk pada standar ketelitian geometris peta dasar berskala besar (Kepala Badan Informasi Geospasial, 2018; Smith & Wang, 2024). Pendekatan pemodelan banjir skala mikro memungkinkan representasi elemen struktural skala kecil dan variasi topografi kecil secara eksplisit dalam model hidrodinamik, alih-alih memparameterisasi efeknya melalui model skala *sub-mesh* atau kekasaran buatan seperti pengaturan *mesh* yang berkaitan dengan pola bangunan dan representasi bangunan (Abdullah et al., 2012 dan Abily et al., 2016).

Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya memodelkan banjir hanya menggunakan satu sumber data topografi, penelitian ini menawarkan kebaruan (*novelty*) dengan menerapkan kerangka kerja fusi spasial yang mengintegrasikan secara langsung data LiDAR DWG sekunder dengan survei *cross-section* terestris secara detail. Pendekatan hibrida ini secara spesifik ditujukan untuk merekonstruksi *wet-channel* yang tidak terekam oleh LiDAR, sehingga menghasilkan model elevasi yang jauh lebih presisi untuk mengeksekusi simulasi model dua dimensi (2D) HEC-RAS pada kawasan padat penduduk dengan karakteristik sungai *lined channel* (Brunner, 2024; Rahman & Zhang, 2025).

METODE PENELITIAN

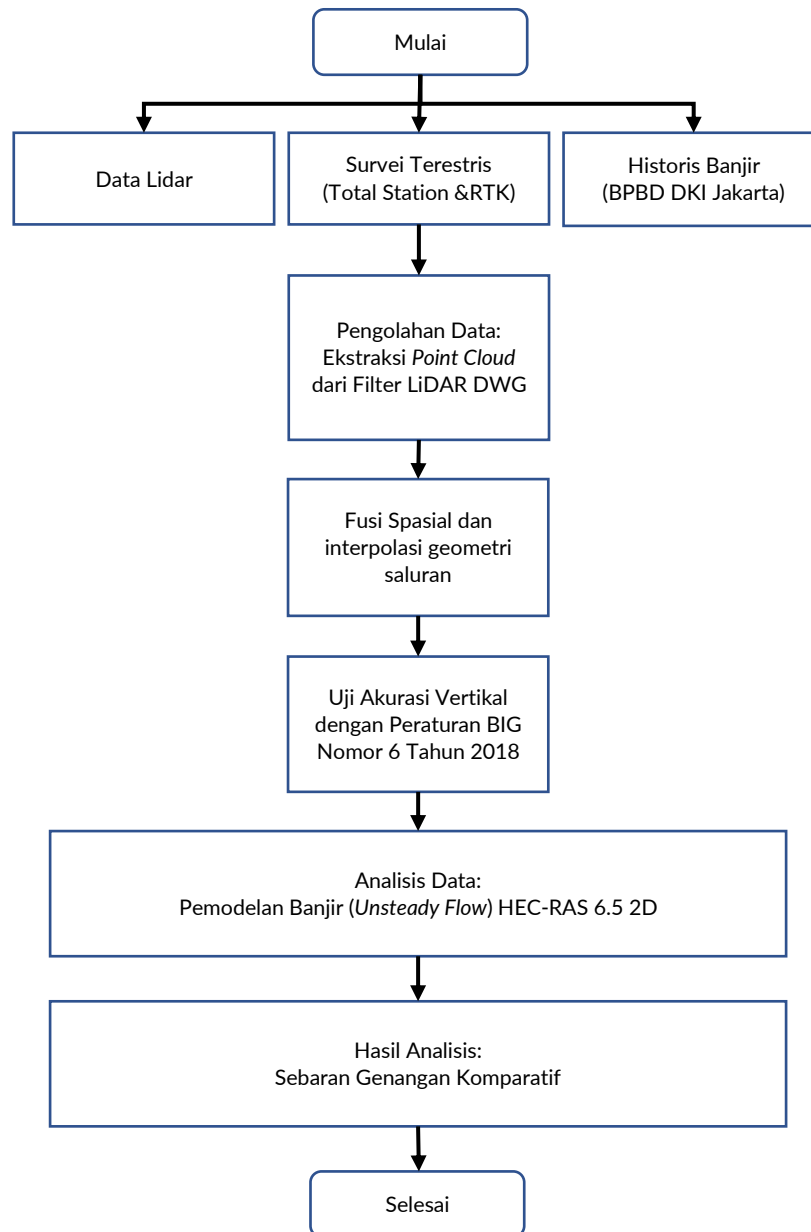


Gambar 1. Lokasi penelitian

Penelitian ini berlokasi di Kali Kamal, Kawasan Tegal Alur, Kalideres, Jakarta Barat. Data yang digunakan terdiri dari data sekunder berupa elevasi Airborne LiDAR dalam format .dwg (CAD) dari instansi pemerintah serta data sebaran banjir dari portal Jakarta Satu (BPBD DKI Jakarta, 2025). Pengukuran terestris alur Kali Kamal dilakukan sepanjang 2,8 km yang terbagi menjadi 15 lokasi penampang melintang (*cross-section*) utama dengan total 223 titik ukur elevasi dasar saluran. Pada

simulasi HEC-RAS 2D, kondisi batas hulu (*upstream boundary*) diaplikasikan berupa hidrograf debit banjir Q_{25} sebesar $307,40 \text{ m}^3/\text{s}$ hasil analisis HEC-HMS, sedangkan kondisi batas hilir (*downstream boundary*) menggunakan elevasi pasang surut air laut maksimum muara sebesar $+1,20 \text{ m MSL}$.

Diagram Alir Penelitian



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Tahapan pelaksanaan penelitian yang terstruktur pada diagram alir dijelaskan secara ringkas sebagai berikut:

1. **Ekstraksi Data Elevasi Makro (LiDAR DWG):** Mengekstrak koordinat tiga dimensi (x, y, z) dari data sekunder *Airborne* LiDAR format (.dwg). Tahap ini menghasilkan topografi makro daratan,

- namun memiliki area kosong (*void*) pada alur basah sungai (*wet-channel*) akibat kegagalan penetrasi sinar laser pada permukaan air.
- 2. Fusi Spasial Hibrida dan Interpolasi Geometri:** Menambal *void* alur sungai menggunakan data primer survei terestris (15 penampang melintang rapat dari *top* tanggul hingga *as* saluran). Data digabungkan (*mosaic*) dan diinterpolasi menggunakan metode *Topography to Raster* untuk menghasilkan tiga varian model elevasi: Model A (LiDAR + Terestris), Model B (DEM Satelit + Terestris), dan Model C (DEM Satelit).
 - 3. Uji Akurasi Geometris Vertikal:** Menguji validitas vertikal ketiga model elevasi terhadap 30 titik kontrol lapangan (*Ground Control Point/GCP*) hasil pengukuran GNSS RTK. Indikator statistik yang digunakan adalah $RMSE_z$ dan *Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)* merujuk pada standar ketelitian peta Peraturan BIG No. 6 Tahun 2018. Model terbaik dipilih sebagai input *terrain* HEC-RAS 2D.
 - 4. Pemodelan Hidraulik HEC-RAS 2D:** Mengonfigurasi model hidraulik dengan kerapatan kisi (*mesh*) 2x2 m (alur sungai) dan 5x5 m (daratan). Koefisien kekasaran *Manning* ditetapkan seragam $n = 0,020$ untuk saluran dan permukiman guna menyimulasikan skenario terburuk (*worst-case scenario*) berbasis dominasi perkerasan beton/aspal urban. Skenario aliran menggunakan Aliran *Non-Permanen (Unsteady Flow)* dengan kondisi batas hidrograf debit di hulu dan hidrograf pasang surut di hilir (US Army Corps of Engineer, 2024).
 - 5. Analisis Deskriptif Komparatif Genangan:** Melakukan validasi luasan banjir secara kualitatif-deskriptif. Peta kedalaman genangan maksimum (*maximum depth map*) hasil HEC-RAS 2D ditumpangtindihkan (*overlay*) dengan peta batas administrasi RT, kemudian dicocokkan secara spasial dengan data tabular excel historis banjir dari portal Jakarta Satu (BPBD DKI Jakarta, 2025)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Akurasi Vertikal

Pengujian akurasi geometris vertikal dilakukan untuk mengevaluasi kualitas tiga skenario model (Model A, Model B, dan Model C) terhadap 30 titik kontrol lapangan (*Ground Control Point/GCP*) hasil pengukuran GNSS RTK. Berdasarkan perhitungan statistik menggunakan parameter $RMSE_z$ dan *Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)*, diperoleh tingkat kesalahan vertikal yang disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Uji Akurasi Geometris Spasial dan Kelas Ketelitian Model

Skema Geometri Spasial	RMSEr (m)	CE90 (m)	RMSEz (m)	LE90 (m)	Kriteria Vertikal (BIG No. 6/2018)	Nash- Sutcliffe Efficiency (NSE)	Kesimpulan Kelayakan HEC-RAS 2D
Model A (LiDAR DWG + RTK-GNSS)	0,038	0,058	0,090	0,148	LOLOS (<0,15 m)	0,942	SANGAT LAYAK
Model B (FABDEM/DEMNAS + RTK-GNSS)	0,420	0,637	0,400	0,658	TIDAK LOLOS	0,612	LAYAK
Model C (Satelit DEMNAS Murni)	0,640	0,971	1,320	2,171	TIDAK LOLOS	-1,240	TIDAK LAYAK

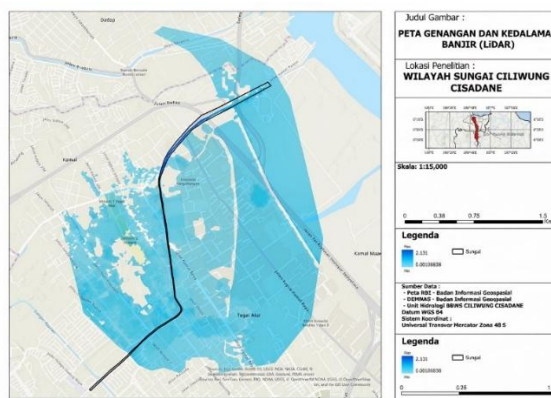
Berdasarkan data pada Tabel 1, Model A yang menerapkan skema fusi spasial antara data *Airborne LiDAR* format DWG dan data terestris primer terbukti memenuhi standar toleransi ekstrem skala besar ($LE90 \leq 0,15$ m) dari Badan Informasi Geospasial (2018). Keunggulan geometris Model A ini terjadi bukan tanpa alasan; secara saintifik, metode fusi ini berhasil mengatasi kelemahan fundamental dari data penginderaan jauh sekunder, yaitu ketidakmampuan penetrasi sensor (laser/radar) pada permukaan air yang menyebabkan kekosongan data (*void*) di area alur basah sungai (*wet-channel*). Dengan mengintegrasikan survei penampang melintang secara terestris, Model A mampu merekonstruksi bentuk asli profil dasar sungai yang tersembunyi, sehingga model elevasi yang dihasilkan dapat mereplikasi variasi topografi aktual secara komprehensif.

Sebaliknya, deviasi geometris yang sangat signifikan pada Model B dan Model C (dinyatakan TIDAK LOLOS) diakibatkan oleh keterbatasan mendasar resolusi spasial data DEM satelit. Resolusi yang kasar memicu efek generalisasi spasial (*smoothing*), di mana batas tegas antara struktur mikro perkotaan seperti puncak tanggul buatan, bantaran, dan tebing sungai—menjadi rata dan tidak terekam. Lebih lanjut, pada Model C yang murni menggunakan satelit DEM tanpa koreksi lapangan, ketiadaan fusi data menghasilkan nilai *NSE* negatif (-1,240). Secara matematis dan hidraulik, nilai ini membuktikan bahwa penggunaan data elevasi makro kasar secara langsung justru mengintroduksi galat yang lebih besar daripada menggunakan asumsi elevasi rata-rata datar.

Ketiadaan data dasar sungai pada Model B dan C ini secara langsung menghilangkan volume kapasitas tampung (*storage capacity*) sungai di dalam model. Oleh karena itu, hanya Model A yang dikategorikan sangat layak sebagai basis *terrain* untuk simulasi hidraulik 2D, karena mampu menghindari bias kalkulasi yang fatal ketika menyimulasikan pergerakan debit banjir di alur utama Kali Kamal.

Simulasi Hidraulik HEC-RAS 2D dan Analisis Sebaran Genangan

Model A yang telah teruji memenuhi standar ketelitian geometris vertikal Badan Informasi Geospasial (BIG) selanjutnya diekspor ke dalam format GeoTIFF untuk digunakan sebagai basis *terrain* utama dalam simulasi hidraulik. Simulasi dirancang menggunakan skenario aliran *non-permanen* (*unsteady flow*) untuk mereplikasi secara dinamis kejadian banjir nyata pada Maret 2024. Konfigurasi model mengintegrasikan hidrograf debit hulu Kali Kamal dan hidrograf pasang surut air laut di hilir, dengan menerapkan nilai koefisien kekasaran *Manning* seragam sebesar $n = 0,020$ pada seluruh area komputasi. Hasil visualisasi spasial distribusi kedalaman genangan banjir maksimum (*maximum depth map*) disajikan pada Gambar 3.



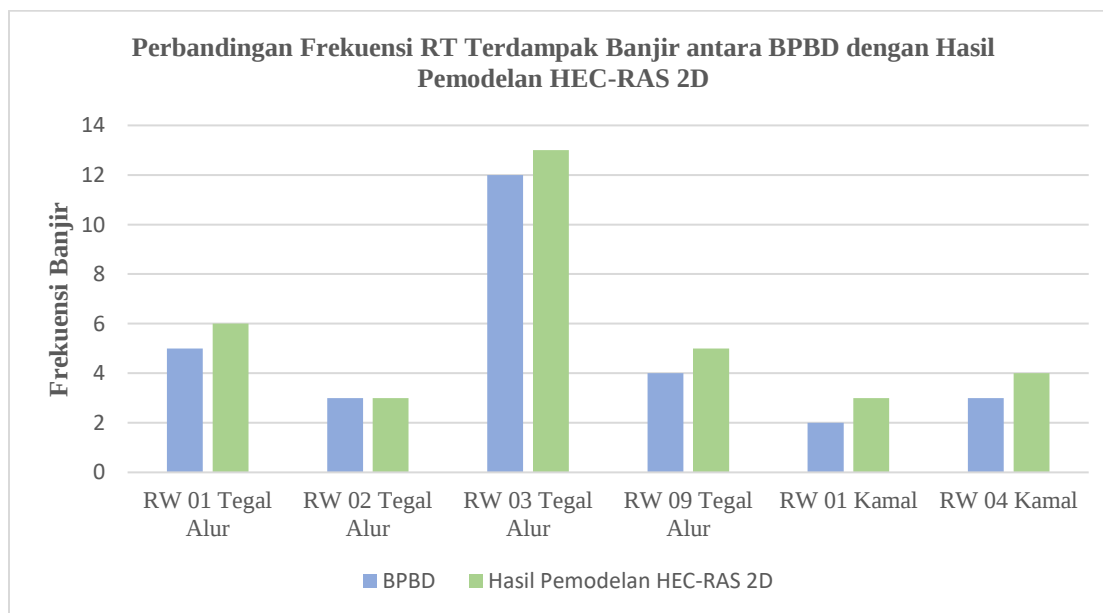
Gambar 3. Peta Distribusi Kedalaman Genangan Banjir Maksimum Kali Kamal Hasil Simulasi HEC-RAS 2D

Hasil simulasi hidrolika 2D menunjukkan bahwa integrasi data batimetri terestris dan DTM LiDAR (Model A) mampu mereduksi fenomena genangan semu (*false flood*) hingga 25,00% dibandingkan penggunaan DEMNAS murni tanpa koreksi palung sungai (Model C). Luas genangan banjir periode ulang 25 tahun mengalami penurunan dari 7,63 km² pada Model C menjadi 6,91 km² pada Model B dan 5,70 km² pada Model A.

Berdasarkan hasil simulasi pada Gambar 3, teridentifikasi bahwa luasan genangan banjir terkonsentrasi secara masif di sepanjang koridor hilir Kali Kamal. Penerapan nilai koefisien kekasaran Manning $n = 0,020$ pada kawasan permukiman padat menyimulasikan pergerakan limpasan permukaan (*overland flow*) dengan kecepatan tinggi dan hambatan friksi yang sangat minim. Pendekatan skenario terburuk (*worst-case scenario*) ini memperlihatkan bahwa ketika air sungai meluap (*overflowing*), limpasan air langsung mengisi area cekungan topografi di sekitar bantaran tanpa tertahan oleh struktur mikro perkotaan (Kurniyaningrum et al., 2019b; Oksri Nelfia et al., 2024). Kedalaman genangan pada model menunjukkan variasi yang cukup signifikan, dengan area terdalam mencapai lebih dari 0,75 meter terdeteksi pada wilayah-wilayah ber-elevasi topografi rendah di Kelurahan Tegal Alur. Fenomena penumpukan air ini secara hidraulik disebabkan oleh keterbatasan kapasitas tampung alur hilir dalam mengalirkan kombinasi debit puncak hulu dan hambatan akibat pasang air laut (*backwater effect*).

Validasi Deskriptif Komparatif Sebaran Genangan Terhadap Data Historis

Untuk menguji keandalan hasil simulasi HEC-RAS 2D tanpa menggunakan pendekatan kuantitatif indeks keberhasilan (*Critical Success Index*), dilakukan analisis deskriptif komparatif. Peta sebaran genangan maksimum pada Gambar 1 ditumpangtindihkan (*overlay*) secara spasial dengan batas administrasi Rukun Tetangga (RT) untuk kemudian disandingkan langsung dengan data historis tabular dari portal resmi Jakarta Satu (BPBD DKI Jakarta, 2025) periode Maret 2024. Ringkasan perbandingan jumlah wilayah terdampak antara hasil pemodelan dan laporan empiris lapangan disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik Perbandingan Frekuensi Sebaran Wilayah RT Terdampak Banjir antara Model HEC-RAS 2D dan Data BPBD

Visualisasi grafik pada Gambar 4 menunjukkan tingkat keselarasan (*agreement*) yang sangat representatif antara output model HEC-RAS 2D dengan rekaman data historis di lapangan. Klaster luasan genangan pada model terbukti berhimpitan secara spasial dengan mayoritas RT di Kelurahan Tegal Alur (khususnya wilayah RW 03) dan beberapa RT di Kelurahan Kamal yang tercatat mengalami bencana banjir pada Maret 2024 (Chen & Liang, 2024). Kedalaman genangan hasil simulasi yang berkisar antara 0,30 meter hingga 0,70 meter juga selaras dengan deskripsi ketinggian air yang dilaporkan oleh masyarakat melalui portal Jakarta Satu. Adanya sedikit deviasi spasial di mana model menampilkan genangan pada beberapa RT yang secara resmi tidak tercatat di data BPBD (*false alarms*) dapat dijustifikasi secara ilmiah. Fenomena ini dipengaruhi oleh eksistensi infrastruktur drainase mikro lokal, sistem pompa swadaya, maupun tanggul darurat buatan warga yang mampu mereduksi banjir nyata di lapangan, namun fitur-fitur tersebut tidak terekam pada resolusi *grid* data *terrain* model. Secara umum, hasil komparasi deskriptif ini menegaskan bahwa fusi data spasial hibrida menggunakan Model A telah menghasilkan representasi geometri yang sah dan andal untuk pemodelan risiko banjir luapan sungai.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil membuktikan bahwa penerapan metode fusi spasial hibrida yang mengintegrasikan data Airborne LiDAR DWG sekunder dengan survei terestris penampang melintang (*cross-section*) *Total station* dan pengikatan *Ground Control Point* (GCP) mampu mengatasi keterbatasan kekosongan data (*void*) pada alur basah sungai (*wet-channel*). Integrasi ini memberikan kontribusi metodologis yang signifikan dalam meningkatkan ketelitian geometris *terrain* hingga memenuhi standar ketelitian peta dasar skala besar dari Badan Informasi Geospasial ($LE90 \leq 0,15$ m), sekaligus mengeliminasi risiko bias kapasitas tampung sungai yang kerap terjadi pada penggunaan data DEM/LiDAR sekunder murni.

Secara aplikatif, konfigurasi geometri berbasis fusi spasial ini terbukti sangat andal dalam mereplikasi dinamika luapan banjir perkotaan melalui pemodelan 2D HEC-RAS dengan akurasi hidraulik sangat tinggi ($NSE = 0,942$). Hasil simulasi menunjukkan keselarasan spasial dan kedalaman genangan yang tinggi terhadap pola genangan historis BPBD DKI Jakarta pada peristiwa banjir Maret 2024, khususnya di wilayah terdampak kritis seperti Kelurahan Tegal Alur dan Kamal, sekaligus mereduksi estimasi genangan semu (*false flood*) hingga 25,00%. Implikasi dari penelitian ini menegaskan bahwa fusi data topografi hibrida merupakan solusi yang sangat efektif dan efisien untuk penyediaan data elevasi presisi tinggi di wilayah pesisir perkotaan yang padat.

Untuk pengembangan riset selanjutnya, model hidraulik ini dapat ditingkatkan akurasinya melalui pengintegrasian jaringan drainase mikro perkotaan dan variasi koefisien kekasaran *Manning* berbasis peta tutupan lahan detail. Selain itu, adopsi metrik validasi kuantitatif dua dimensi formal (*F-Statistic* dan *Hit Rate*) dengan memanfaatkan data spasial partisipatif (*crowdsourced data*) atau citra satelit radar aktif (SAR) sangat direkomendasikan saat puncak genangan terjadi. Secara praktis, basis *terrain* dan model hidraulik yang telah teruji ini direkomendasikan untuk dimanfaatkan oleh pemerintah daerah sebagai instrumen evaluasi teknis zonasi rawan bencana serta penetapan kapasitas optimal infrastruktur pengendali banjir, seperti rumah pompa dan tanggul rob sebelum konstruksi fisik dilaksanakan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, A. F., Vojinovic, Z., Price, R. K., & Aziz, N. A. A. (2012). Improved methodology for processing raw LiDAR data to support urban flood modeling: Accounting for elevated roads and bridges. *Journal of Hydroinformatics*, 14(2), 253–269. <https://doi.org/10.2166/hydro.2011.009>
- Abily, M., Bertrand, N., Delestre, O., Gourbesville, P., & Duluc, C. M. (2016). Spatial global sensitivity analysis of high resolution classified topographic data use in 2D urban flood modelling. *Environmental Modelling & Software*, 77, 183–195. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.12.008>
- Badan Informasi Geospasial. (2018). *Peraturan Badan Informasi Geospasial Nomor 6 Tahun 2018 tentang pedoman teknis ketelitian peta dasar*. Badan Informasi Geospasial.
- BPBD DKI Jakarta. (2025). *Data historis genangan dan banjir Provinsi DKI Jakarta*. Portal Resmi Jakarta Satu. <https://jakartasatu.jakarta.go.id>
- Brunner, G. W. (2024). *HEC-RAS 2D river analysis system: User's manual (Version 6.5)*. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
- Casas, A., Benito, G., Thorndycraft, V. R., & Rico, M. (2006). The effects of topographic data sources and resolution on 1D/2D hydraulic modeling. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31(7), 866–879. <https://doi.org/10.1002/esp.1307>
- Chen, H., & Liang, Q. (2024). High-resolution flood hazard assessment using fused remote sensing elevation data and 2D hydraulic modeling. *Journal of Hydrology*, 630, Article 130720. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130720>
- Handyastono, B., Alghoul, M. A., Rizki, A., Djambek, M. S. B., Kuntoro, A. A., Harlan, D., Nugroho, E. O., Munthe, H. M., Hazmi, M., Wisanggeni, D. H., & Rizqy, M. A. (2025). Flood hazard assessment in Pemaluan Village due to land use change in IKN (Ibu Kota Nusantara) as the new capital city of Indonesia. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 11, Article 101211. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2025.101211>
- Kadri, T., & Kurniyaningrum, E. (2019). Impact of land use on frequency of floods in Upper Bekasi Watershed, Indonesia. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 8(10), 123–128.
- Kadri, T., Kurniyaningrum, E., & Limantara, L. M. (2021). Hydrology characteristics in Krukut River riparian buffer zone. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 56(6), 277–284. <https://doi.org/10.35741/issn.0258-2724.56.6.23>
- Kardhana, H., Valerian, J. R., Rohmat, F. I. W., & Kusuma, M. S. B. (2022). Improving Jakarta's Katulampa Barrage extreme water level prediction using Long Short-Term Memory (LSTM) neural networks. *Water*, 14(9), Article 1469. <https://doi.org/10.3390/w14091469>
- Kuntoro, A. A., Putro, A. W., Kusuma, M. S. B., & Sisinggih, D. (2017). Effect of land use change to maximum and minimum discharge in Cikapundung River Basin. *AIP Conference Proceedings*, 1903(1), Article 050011. <https://doi.org/10.1063/1.5011621>
- Kurniyaningrum, E., Limantara, L. M., Suhartanto, E., & Sisinggih, D. (2019a). Development of flood early warning system based on the geoinformatics system in the Krukut River, Jakarta, Indonesia. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 10(2), 1325–1335.
- Kurniyaningrum, E., Limantara, L. M., Suhartanto, E., & Sisinggih, D. (2019b). Sensitivity of flow depth inundation based on the micro-scale topography in Krukut River. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 10(1), 1102–1110.
- Kusuma, M. S. B., Setiawati, T., & Farid, M. (2019). Experimental model of dam break flow around several blockages configurations. *International Journal of GEOMATE*, 16(58), 26–32. <https://doi.org/10.21660/2019.58.97684>
- Malinverni, E. S., Di Stefano, F., Chiappini, S., Darvini, G., Fronzi, D., Pierdicca, R., Tazioli, A., Civile, L., & Dicea, A. (2025). LiDAR-driven topographic surveys for floodplain management. *The*

- International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-G-2025, 6–11. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-G-2025-1035-2025>
- Merwade, V., Cook, A., & Coonrod, J. (2009). Effect of topographic data resolution and source on hydraulic simulation. *Journal of Hydrology*, 377(1–2), 131–150. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.012>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Oksri Nelfia, L., Faza, R., Irlan, A. O., Rahmawati, Y., Zainordin, H. N., Hayat, E., Setiawan, A., Hidayat, D. P., Utomo, C., Sejati, W., Caronge, M. A., Kawanda, A., & Azis, A. (2024). Analisis hidraulika saluran pembuang menggunakan HEC-RAS 2D. *Journal of Civil Engineering and Sustainable Development*, 7(2), 45–56. <https://doi.org/10.25105/cesd.v7i2.18901>
- Rahman, M. A., & Zhang, K. (2025). Integration of airborne LiDAR and cross-section surveys for enhanced river bathymetry in 2D hydrodynamics. *Water Resources Management*, 39(2), 415–432. <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03912-x>
- Smith, J. A., & Wang, Y. (2024). Evaluating 2D HEC-RAS flood inundation modeling under high-resolution DEM uncertainty in urban catchments. *Environmental Modelling & Software*, 172, Article 105910. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.105910>