© 2025 Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP
JURNAL ILMU LINGKUNGAN
Volume 23 Issue 3 (2025) : 820-829 *ISSN 1829-8907*

Estimasi Populasi Terpapar pada Kejadian Banjir di Kecamatan Biringkanaya, Kota Makassar

Brigitta Audrynne Rombe Bunga[1*], Baba Barus[2], Dwi Putro Tejo Baskoro[2], dan Muhammad Fathahillah Dewantara Almismary[1]

[1]Program Studi Ilmu Perencanaan Wilayah, Fakultas Pertanian, IPB University, Bogor, Indonesia; e-mail: audrybrigitta@apps.ipb.ac.id
[2]Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian, IPB University, Bogor, Indonesia

ABSTRAK

Banjir merupakan ancaman serius bagi kawasan perkotaan, termasuk Kecamatan Biringkanaya, Kota Makassar, yang sering mengalami kejadian banjir dengan tingkat keparahan yang tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi populasi yang terpapar banjir di Kecamatan Biringkanaya menggunakan pendekatan dasimetrik dengan integrasi data *open source* bersumber dari citra Sentinel-1 SAR dan data bangunan dari *OpenStreetMap* (OSM). Ekstraksi genangan banjir dilakukan dengan mengaplikasikan teknik *change detection* pada citra pra-banjir dan citra saat banjir terjadi pada Desember 2023, yang dianalisis pada *platform Google Earth Engine* (GEE). Hasil analisis menunjukkan luas area yang tergenang mencapai 160,60 ha, dengan Kelurahan Sudiang Raya sebagai wilayah dengan genangan terluas. Pengujian *overall accuracy* terhadap hasil klasifikasi kawasan tergenang menunjukkan tingkat akurasi sebesar 85,71%. Data bangunan dari OSM digunakan untuk memetakan distribusi populasi berdasarkan kepadatan bangunan di Kecamatan Biringkanaya. Distribusi populasi kemudian disinkronkan dengan data genangan banjir untuk mengestimasi jumlah penduduk yang terpapar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sebanyak 915 jiwa terpapar banjir di Kecamatan Biringkanaya. Sementara itu, terjadi anomali di Kelurahan Berua, di mana luas genangan banjir di wilayah ini lebih kecil dibandingkan wilayah lain, namun jumlah penduduk terdampak justru paling tinggi. Adanya *underestimate* dalam penelitian ini disebabkan oleh keterbatasan citra dalam menangkap nilai *backscatter* air pada kawasan dengan kepadatan bangunan tinggi, sebagaimana tercermin dari tingkat akurasi yang diperoleh. Penelitian ini memberi kontribusi penting dalam memahami risiko banjir perkotaan dan perencanaan mitigasi di wilayah yang rentan. Hasil penelitian ini dapat digunakan untuk memandu perumusan kebijakan publik dalam pengembangan infrastruktur drainase dan perlindungan banjir, serta mempersiapkan respon darurat yang lebih efektif guna melindungi populasi yang memiliki risiko terpapar banjir.

***Kata kunci*:** Banjir, Dasimetrik, Hujan, Populasi, Sentinel-1 SAR, OpenStreetMap

ABSTRACT

Flooding poses a serious threat to urban areas, including Biringkanaya District in Makassar City, which frequently experiences severe flood events. This study aims to estimate the population exposed to flooding in Biringkanaya District using a dasymetric approach by integrating open-source data from Sentinel-1 SAR imagery and building data from OpenStreetMap (OSM). Flood inundation was extracted by applying a change detection technique to pre-flood and flood-event imagery from December 2023, analyzed using the Google Earth Engine (GEE) platform. The analysis results indicate that the inundated area covers 160.60 hectares, with Sudiang Raya Subdistrict experiencing the most extensive flooding. The overall accuracy test of the flood classification results showed an accuracy rate of 85.71%. Building data from OSM was utilized to map the population distribution based on building density in Biringkanaya District. This population distribution was then synchronized with flood inundation data to estimate the number of affected residents. The findings reveal that 915 people were exposed to flooding in Biringkanaya District. Meanwhile, an anomaly was observed in Berua Subdistrict, where the flood inundation area was smaller than in other areas, yet it had the highest number of affected residents. This underestimation in the study is attributed to the limitations of satellite imagery in capturing water backscatter values in densely built-up areas, as reflected in the obtained accuracy level. This study provides valuable insights into understanding urban flood risk and mitigation planning in vulnerable areas. The findings can serve as a reference for public policy formulation in the development of drainage infrastructure and flood protection, as well as in enhancing emergency response preparedness to better protect populations at risk of flood exposure.

***Keywords*:** Flood, Dasymetric, Rain, Population, Sentinel-1 SAR, OpenStreetMap

Citation: Bunga, B. A. R., Barus, B., Baskoro, D. P. T., dan Almismary, M. F. D. (2025). Estimasi Populasi Terpapar pada Kejadian Banjir di Kecamatan Biringkanaya, Kota Makassar. Jurnal Ilmu Lingkungan, 23(3), 820-829, doi:10.14710/jil.23.3.820-829

1. PENDAHULUAN

Banjir merupakan salah satu jenis bencana alam yang sangat destruktif dan dialami pada berbagai wilayah di dunia. Kejadian banjir merupakan dampak akumulasi dari aktivitas manusia dalam memenuhi kebutuhan hidupnya melalui pembangunan dan industrialisasi, yang disebut sebagai aktivitas antropogenik. Aktivitas antropogenik ini secara langsung berdampak terhadap fenomena perubahan iklim dan berimplikasi terhadap kejadian banjir (Li-An *et al*, 2018). Studi yang dilakukan oleh Kaspersen *et al* (2017) menyimpulkan bahwa jika terjadi peningkatan 1% luas lahan terbangun, maka akan berakibat pada peningkatan banjir fluvial sebesar 10%. Pembangunan yang tidak terkontrol dan konversi lahan secara masif akibat pembangunan mengurangi area resapan air. Akibatnya, limpasan air (*runoff*) semakin meningkat dan menyebabkan genangan saat curah hujan tinggi.

Dampak banjir terhadap kehidupan manusia sangat besar, tidak sedikit korban jiwa yang timbul akibat banjir. Hasil identifikasi Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) dalam InaRISK tahun 2023, dilaporkan sebanyak 109,61 juta jiwa berpotensi terpapar banjir di seluruh wilayah Indonesia, dengan masyarakat di kawasan perkotaan memiliki probabilitas yang lebih tinggi terpapar. Tingkat keterpaparan penduduk perkotaan terhadap banjir yang lebih tinggi ditandai dengan peristiwa banjir yang terjadi pada sejumlah kota-kota besar di Indonesia. Hal tersebut dikarenakan kondisi pertumbuhan penduduk yang semakin meningkat pada kota-kota besar, sehingga berimplikasi pada meningkatnya jumlah penduduk dan bangunan yang berpotensi terpapar banjir (Bertsch *et al*, 2022).

Untuk memahami risiko banjir secara lebih mendalam, pemetaan populasi terdampak menjadi langkah penting. Distribusi spasial populasi yang memiliki probabilitas terpapar banjir dapat dipetakan melalui peta resolusi tinggi, yang memungkinkan estimasi dengan lebih akurat (Zhu *et al*, 2020). Pemetaan sebaran penduduk perkotaan juga berkaitan erat dengan infrastruktur perkotaan seperti pendidikan dan transportasi (Yao *et al*, 2017). Informasi kondisi perkotaan yang digunakan dalam memetakan sebaran penduduk dapat menggunakan data yang diperoleh dari berbagai sumber, seperti media sosial dan informasi geografis (Kounadi *et al*, 2018; Yu *et al*, 2019). Data kondisi perkotaan tersebut dijadikan landasan dalam memetakan distribusi keberadaan penduduk (Song *et al*, 2018; Zhao *et al*, 2019). Menurut berbagai penelitian yang telah dilakukan, data bangunan lebih cocok digunakan dalam menggambarkan distribusi populasi untuk resolusi yang lebih tinggi (Dong *et al*, 2010; Silván-Cárdenas *et al*, 2010). Evaluasi bangunan mewakili metode analisis spasial dalam penilaian risiko banjir perkotaan (de Ruig *et al*, 2019; Hossain & Meng, 2020). Selain itu, distribusi spasial populasi berbasis data bangunan sangat cocok dalam menilai banjir perkotaan karena menggambarkan keterpaparan populasi, sekaligus bangunan.

Sebagai Kawasan Strategis Nasional (KSN), Kota Makassar mengalami pertumbuhan pembangunan yang pesat, dan menarik minat penduduk untuk bermigrasi ke kota ini dan menyebabkan jumlah penduduk semakin meningkat. Peningkatan jumlah penduduk ini berimplikasi terhadap meningkatnya kebutuhan akan lahan. Akibatnya, konversi lahan secara masif untuk memenuhi permintaan akan ketersediaan lahan terbangun untuk fungsi permukiman, industri, komersial, dan pusat pelayanan sangat sulit dihindari. Konversi lahan tersebut berdampak negatif terhadap lingkungan, salah satunya bencana banjir yang terjadi pada 13 Februari 2023, yang tercatat sebagai banjir terbesar selama 20 tahun terakhir. Curah hujan yang sangat tinggi dan melebihi kapasitas inflitrasi dan pengairan drainase, menjadi alasan dibalik peristiwa ini. Kecamatan Biringkanaya menjadi salah satu kecamatan yang terkena dampak paling parah dari kejadian banjir tersebut.

Berdasarkan data BNPB tahun 2023, sebanyak 554 rumah terendam dengan adanya kejadian banjir di Kecamatan Biringkanaya. Sebagai kecamatan terluas di Kota Makassar dengan jumlah penduduk sebesar 215.820 jiwa, sebagian besar masyarakat berpotensi terpapar langsung dengan adanya kejadian banjir. Meskipun BNPB telah mencatat jumlah hunian terdampak, data tersebut belum mencakup estimasi jumlah populasi terdampak serta distribusinya. Oleh karena itu, dibutuhkan analisis lebih lanjut untuk mengetahui estimasi dan sebaran populasi terdampak secara lebih akurat.

Estimasi populasi terdampak banjir dapat dilakukan dengan memanfaatkan data *open source*, yang memungkinkan proses *assessment* dapat dilakukan secara cepat dan minim biaya. Dalam penelitian ini, data *open source* yang digunakan adalah citra SAR (*Synthethic Aperture Radar*) untuk identifikasi banjir, dan *OpenStreetMap* (OSM) sebagai landasan dalam mengidentifikasi sebaran populasi melalui identifikasi jumlah bangunan. Berdasarkan penjelasan di atas, penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi populasi yang terpapar terhadap kejadian banjir di Kecamatan Biringkanaya dengan menggunakan pendekatan dasimetrik melalui integrasi data kejadian banjir yang diekstraksi dari citra Sentinel SAR-1, serta data bangunan dari *OpenStreetMap* (OSM) sebagai proyeksi distribusi populasi.

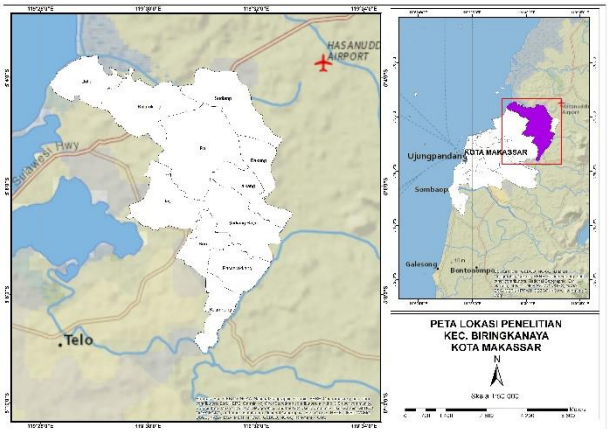
2. METODE PENELITIAN

2.1. Lokasi Penelitian

Kecamatan Biringkanaya berlokasi pada 5º4’50” Lintang Selatan (LS) dan 119º30’10” Bujur Timur (BT) serta berbatasan langsung dengan Kabupaten Maros. Kecamatan Biringkanaya memiliki luas wilayah sebesar 48,22 Km^2, terdiri dari 11 Kelurahan, yakni: Kelurahan Bakung, Kelurahan Berua, Kelurahan Bulurokeng, Kelurahan Daya, Kelurahan

© 2025, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Katimbang, Kelurahan Laikang, Kelurahan Paccerakkang, Kelurahan Pai, Kelurahan Sudiang, Kelurahan Sudiang Raya, dan Kelurahan Untia. Kecamatan Biringkanaya merupakan gerbang utama Kota Makassar melalui jalur utara yang berbatasan dengan Kabupaten Maros. Kecamatan Biringkanaya mengusung konsep *aerocity* dan merupakan satu-satunya akses menuju Bandara Internasional Sultan Hasanuddin.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

Kepadatan penduduk di Kecamatan Biringkanaya pada tahun 2023 sesuai dengan data Badan Pusat Statistika (BPS) adalah 4.476 jiwa/km^2. Kepadatan penduduk di Kecamatan Biringkanaya tergolong rendah apabila dibandingkan dengan kecamatan lain di Kota Makassar karena dipengaruhi oleh luas wilayahnya yang besar. Wilayah Kecamatan Biringkanaya dikembangkan sebagai salah satu pusat permukiman dan pelayanan pemerintahan, menyebabkan fenomena *urban sprawl* (Lolokada *et al*, 2021) menjadi tidak terelakkan. Ketersediaan lahan menjadi pemicu pengembangan Kota Makassar diarahkan pada area ini. Beberapa tahun terakhir, Kecamatan Biringkanaya selalu mengalami kejadian banjir dan termasuk sebagai kecamatan yang mengalami banjir cukup parah. Penyebab banjir ini banyak diasosiasikan dengan alih fungsi lahan.

2.2. Prosedur Penelitian

Penelitian ini menggunakan peralatan laptop yang dilengkapi beberapa *software* yaitu ArcGIS dan Microsoft Office. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini berupa Citra SAR-1 yang diperoleh dari pengolahan pada *platform* GEE *(Google Earth Engine)*, data bangunan yang berasal dari OSM, dan data administrasi wilayah yang diperoleh dari Badan Informasi Geospasial (BIG).

Citra SAR memiliki keunggulan dalam mengakuisisi data tanpa terpengaruh oleh perubahan cuaca, sehingga menjadikannya pilihan yang lebih efektif dibandingkan citra optik dalam mendeteksi keberadaan banjir (Amitrano *et al*, 2024). Interpretasi citra SAR berdasarkan nilai *backscatter* yang dihasilkan dengan nilai *backscatter* rendah terindikasi sebagai permukaan air (Haile *et al*, 2023). Dalam mendeteksi banjir, metode umum yang sering digunakan adalah *thresholding-based*. Metode ini menetapkan nilai ambang batas di mana nilai *pixel* dikategorikan sebagai area banjir, menjadikannya sebagai metode yang efisien namun memberikan hasil yang baik (Amitrano *et al*, 2018). Selain itu, metode ini biasanya diintegrasikan dengan teknik *change-detection*, yaitu metode untuk mendeteksi perubahan nilai *pixel* sebelum dan saat terjadi hujan untuk mengidentifikasi secara lebih jelas nilai *pixel* area tergenang (Kumar *et al*, 2022).

2.2.1. Ekstraksi Genangan Banjir

Tahapan ekstraksi genangan banjir dilakukan secara menyeluruh menggunakan *platform* GEE dengan akuisisi data pada bulan Juli 2023 sebagai citra akuisisi pra-banjir dan citra akuisisi bulan Desember 2023 sebagai kejadian banjir. Citra yang digunakan yakni citra Sentinel-1 SAR Level-1 *Ground Range Detected* (GRD). Citra SAR memiliki keunggulan dalam mengakuisisi data tanpa terpengaruh oleh perubahan cuaca, sehingga menjadikannya pilihan yang lebih efektif dibandingkan citra optik dalam mendeteksi keberadaan banjir (Amitrano *et al*, 2024). Interpretasi citra SAR berdasarkan nilai *backscatter* yang dihasilkan dengan nilai *backscatter* rendah terindikasi sebagai permukaan air (Haile *et al*, 2023).

Polarisasi yang digunakan merupakan jenis polarisasi VH, karena lebih baik dalam mengidentifikasi keberadaan genangan jika dibandingkan dengan polarisasi VV (Wu *et al*, 2023). Untuk melakukan monitoring kejadian banjir, metode umum yang sering digunakan adalah *thresholding-based*. Metode ini menetapkan nilai ambang batas di mana nilai *pixel* dikategorikan sebagai area banjir, menjadikannya sebagai metode yang efisien namun memberikan hasil yang baik (Amitrano *et al*, 2018). Selain itu, metode ini biasanya diintegrasikan dengan teknik *change-detection*, yaitu metode untuk mendeteksi perubahan nilai *pixel* sebelum dan saat terjadi hujan untuk mengidentifikasi secara lebih jelas nilai *pixel* area tergenang (Kumar *et al*, 2022).

Selanjutnya, citra perlu melalui *pre-processing* yang secara langsung dapat dilakukan di GEE (Bioresita *et al*, 2022). Adapun tahapan Preprocessing di GEE meliputi:

1. *Apply Orbit File:*
2. *Radiometric Calibration:*
3. *Speckle Filtering:*
4. *Terrain Correction (Geocoding): and*
5. *Convert to dB.*

Setelah melalui *preprocessing*, citra dapat digunakan untuk mengidentifikasi badan air dan area non badan air menggunakan rumus *change detection and thresholding* (CDAT) (Clement *et al*, 2017).

$$CDAT = R2 - R1$$

Ekstraksi banjir dilakukan dengan penetapan nilai *threshold* untuk kawasan banjir dan badan air. Berdasarkan Dhanabalan *et al* (2021) nilai

© 2025, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

backscatter pada area tergenang berkisar antara -21 hingga -18 dB. Dalam penelitan ini, nilai *threshold* ditentukan dengan mengambil sampel nilai *backscatter* pada *pixel* yang mengalami perubahan warna kontras karena terindikasi sebagai kawasan yang mengalami kejadian banjir (Islam & Meng, 2022). *Pixel* yang memiliki nilai *backscatter* lebih tinggi dari *threshold* saat musim kemarau dan mengalami penurunan saat musim hujan dikategorikan sebagai wilayah yang tergenang atau terkena banjir.

Selanjutnya, dilakukan uji akurasi untuk mengetahui tingkat keakuratan hasil klasifikasi dari data penginderaan jauh (Congalton & Green, 1999) menggunakan *overall accuracy, user's accuracy,* dan *producer's accuracy* (Rwanga & Ndambuki, 2017). Uji akurasi dihitung melalui perbandingan sampel yang terhitung tanpa *error* dengan kesuluruhan total sampel (Simamora *et al* 2015). Dalam hal ini, sampel uji sebanyak 70 titik diperoleh dari data indeks bahaya banjir inaRISK. Uji akurasi menggunakan *confusion matrix* disajikan pada Tabel 1 sebagai pembanding data sampel dan hasil klasifikasi.

Tabel 1. *Confusion Matrix* Klasifikasi Banjir

Aktual/Prediksi	Non Banjir	Banjir	Total
Non Banjir	15	8	23
Banjir	2	45	47
Total	**17**	**53**	**70**

Perhitungan nilai *overall accuracy, user's accuracy,* dan *producer's accuracy* menggunakan persamaan berikut:

$$User's\ accuracy = \frac{xii}{x+i}\ x\ 100\%$$

$$Producer's\ accuracy = \frac{xii}{xi+}x\ 100\%$$

$$Overall\ accuracy = \frac{\sum_{i=1}^{r} xii}{N}\ x\ 100\%$$

dimana *xii* adalah nilai diagonal dari *confusion matrix* baris ke-*i* dan kolom ke-*i*, kemudian X+*i* adalah jumlah titik dalam kolom ke-*i*, X*i*+ adalah jumlah titik dalam baris ke-*i*, dan *N* adalah total seluruh titik sampel.

2.2.2. Distribusi Populasi

Dalam konteks pemetaan dasimetrik penduduk dengan format biner, prosedur tersebut melibatkan reklasifikasi data tutupan lahan menjadi dua kelas utama: area yang berpenghuni (diberi dengan nilai 1) dan area yang tidak berpenghuni (diberi dengan nilai 0). Metode ini secara sederhana membagi area menjadi dua kategori berdasarkan keberadaan bangunan, yang dianggap mewakili keberadaan manusia atau pemukiman.

Pemetaan dasimetrik penduduk dimulai dengan pengumpulan data dari OSM untuk mengidentifikasi kawasan permukiman dengan menentukan lokasi bangunan atau infrastruktur lain yang menandakan adanya area permukiman. Lalu untuk membuat proyeksi jumlah penduduk, digunakan data sensus penduduk yang berasal dari BPS.

Selanjutnya reklasifikasi data penggunaan lahan dengan membagi area menjadi 2 (dua) kelas. Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, bahwa area yang diklasifikasikan sebagai area yang berpenghuni diberi nilai 1, dan area yang tidak berpenghuni diberi nilai 0. Langkah berikutnya, pemetaan kepadatan penduduk dilakukan dengan mendistribusikan data jumlah penduduk kedalam *grid* yang diberi nilai 1, untuk memberi gambaran distribusi populasi yang lebih akurat.

2.2.3. Estimasi Penduduk Terpapar Banjir

Estimasi jumlah populasi yang terpapar banjir dilakukan melalui proses *intersect layers* antara peta genangan dan peta kepadatan penduduk yang telah dihasilkan pada analisis sebelumnya. Adapun proses *intersect layers* secara matematis dijabarkan melalui rumus untuk estimasi jumlah total populasi terpapar banjir sebagai berikut (Halima & Hiroaki, 2022):

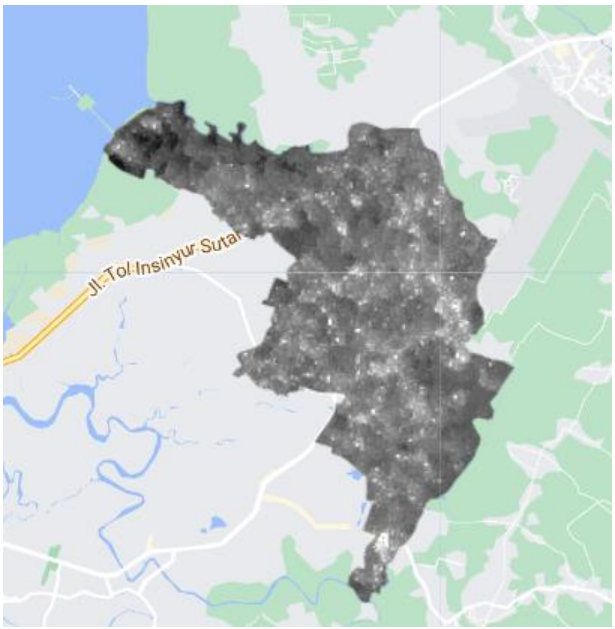
$$Tp = P \times Fh$$

dimana Tp adalah jumlah total populasi terpapar banjir, kemudian P adalah jumlah populasi dalam suatu grid atau area administrasi tertentu, dan Fh adalah kejadian banjir di area yang penelitian. Rumus ini menggambarkan cara menghitung total populasi yang terdampak oleh banjir dengan mengalikan jumlah populasi dalam suatu area dengan kejadian banjir di area tersebut (Halima & Hiroaki, 2022).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

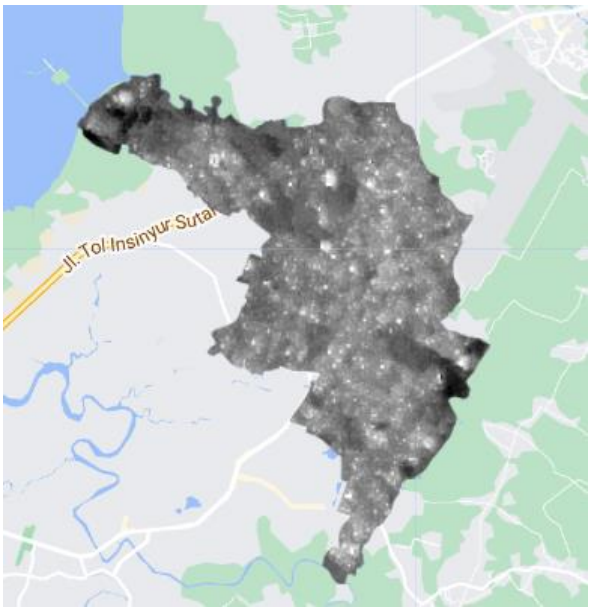
3.1. Ekstraksi Genangan Banjir

Citra yang diunduh melalui *Earth Engine Catalog* untuk melihat kondisi pra-banjir dan banjir, yang telah melalui tahapan *preprocessing* dan analisis, disajikan pada Gambar 2 dan Gambar 3.



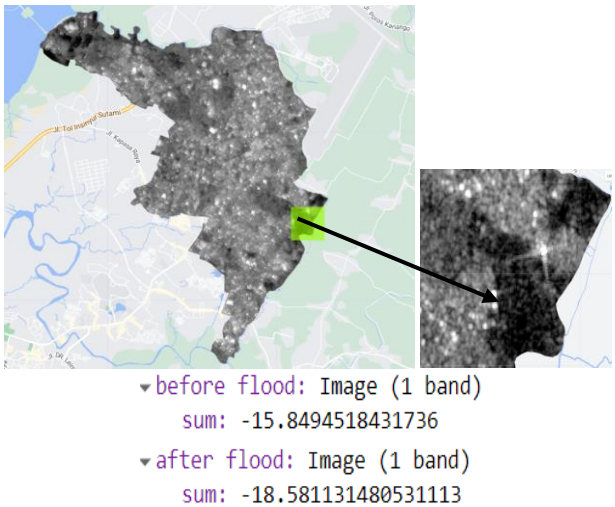
Gambar 2. Citra SAR Sebelum Banjir

© 2025, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP



Gambar 3. Citra SAR Saat Banjir

Berdasarkan Gambar 2 dan Gambar 3, terlihat jelas adanya perbedaan warna antara kedua citra yang diambil dari wilayah yang sama, namun pada waktu yang berbeda. Perbedaan ini tampak signifikan saat membandingkan citra yang diakuisisi saat musim kemarau dengan citra yang diakuisisi saat musim hujan. Citra yang diakuisisi saat musim kemarau terlihat terang. Hal ini dapat diinterpretasikan sebagai hasil dari kondisi permukaan tanah yang kering serta nilai *backscatter* yang tinggi. Sebaliknya, citra yang diakuisisi pada musim hujan memiliki perubahan yang mencolok dengan warna yang lebih gelap di beberapa wilayah. Nilai *backscatter* yang tinggi pada objek non-air mengakibatkan adanya *diffuse reflection* (pantulan menyebar) sehingga menghasilkan rona yang cerah. Objek badan air memiliki rona gelap karena adanya *specular reflection* (pantulan cermin) (Bioresita *et al*, 2022).

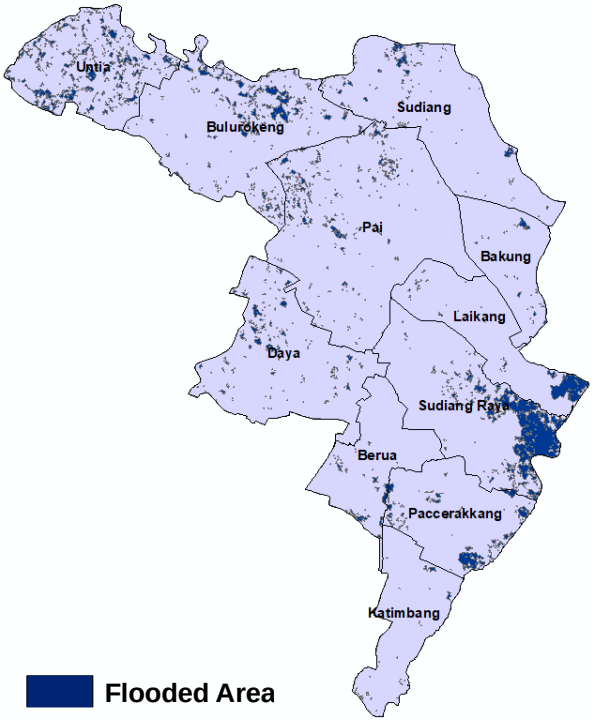


Gambar 4. Perubahan Nilai *Backscatter*

Perubahan nilai *backscatter* digunakan untuk memantau perubahan permukaan dari citra, dengan fokus pada perbedaan rona yang mengindikasikan perubahan kondisi permukaan antara dua musim yang berbeda. Nilai *backscatter* dapat digunakan untuk mendelineasi kawasan tergenang maupun badan air (Dhanabalan *et al*, 2021).

Backscatter merupakan besaran yang mengukur seberapa besar energi yang dipantulkan kembali oleh permukaan saat sinyal radar dikirimkan ke bumi dan dipantulkan kembali ke sensor satelit. Pada musim kemarau, kawasan yang terklasifikasi sebagai badan air adalah kawasan yang memiliki nilai *backscatter* yang lebih rendah dari nilai *threshold*, dalam penelitian ini digunakan *threshold* -18. Pemilihan *threshold* yang tepat merupakan kunci dari penelitian ini karena memengaruhi hasil klasifikasi (Priyatna *et al*, 2023). *Threshold* sendiri bervariasi sesuai dengan lokasi karena citra SAR juga dipengaruhi oleh heterogenitas lingkungan serta heterogenitas temporal dari *backscatter* (Martinis & Rieke, 2015).

Pada saat musim hujan, kondisi permukaan dapat berubah secara signifikan. Beberapa area yang sebelumnya kering dan memiliki nilai *backscatter* tinggi dapat mengalami perubahan signifikan dalam nilai *backscatter* karena genangan air atau kelembaban yang lebih tinggi. Oleh karena itu, perubahan nilai *backscatter* dari musim kemarau ke musim hujan menjadi kunci dalam mengidentifikasi area yang mengalami genangan atau banjir. Area yang pada musim kemarau memiliki nilai *backscatter* lebih besar dari -18 dan mengalami penurunan nilai *backscatter* hingga di bawah -18 saat musim hujan, diklasifikasikan sebagai area tergenang atau banjir.



Gambar 5. Distribusi Area Tergenang

© 2025, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Tabel 2. Luas Area Tergenang di Kec. Biringkanaya

Kelurahan	Luas Genangan (ha)
Paccerakkang	12,58
Daya	7,93
Pai	11,99
Sudiang Raya	54,42
Sudiang	6,65
Untia	25,43
Berua	3,61
Katimbang	1,28
Bakung	1,93
Laikang	13,12
Biringkanaya	**160,60**

Sumber: Hasil analisis, 2024

Secara administratif, analisis area tergenang di Kecamatan Biringkanaya memberikan gambaran tentang sebaran banjir di wilayah tersebut. Kelurahan Sudiang Raya tercatat sebagai kawasan dengan luas area tergenang tertinggi, mencapai 54,42 hektar, sementara Kelurahan Untia memiliki luas tergenang sebesar 25,43 hektar.

Kelurahan Sudiang Raya, merupakan wilayah tergenang dengan luas tertinggi, mengalami genangan karena beberapa faktor. Salah satu faktor yang potensial adalah karakteristik topografi dan drainase di wilayah tersebut. Kondisi drainase yang kurang optimal disertai kurangnya kawasan resapan dapat menyebabkan air hujan menggenangi area tersebut dengan mudah saat terjadi curah hujan yang tinggi.

Di sisi lain, Kelurahan Untia menghadapi tantangan banjir yang disebabkan oleh lokasi yang terletak di kawasan tepi pantai. Wilayah yang terletak di dekat pantai sering kali lebih rentan terhadap pasang surut air laut dan gelombang laut yang tinggi, terutama saat kondisi cuaca buruk atau fenomena alam seperti badai tropis atau hujan deras yang disertai angin kencang. Kombinasi antara curah hujan yang tinggi dan pasang air laut dapat meningkatkan risiko genangan banjir di daerah pantai seperti Kelurahan Untia. Hal ini juga bisa disebabkan oleh kurangnya pengaturan tata ruang yang mempertimbangkan risiko banjir dari laut, seperti kurangnya tanggul atau sistem perlindungan pantai yang memadai.

Validasi data kejadian banjir dilakukan dengan *confusion matrix* (Tabel 3), bertujuan untuk mendapatkan nilai *overall accuracy* menggunakan data indeks bahaya banjir dari InaRISK.

Tabel 3. Uji Akurasi dengan *Confusion Matrix*

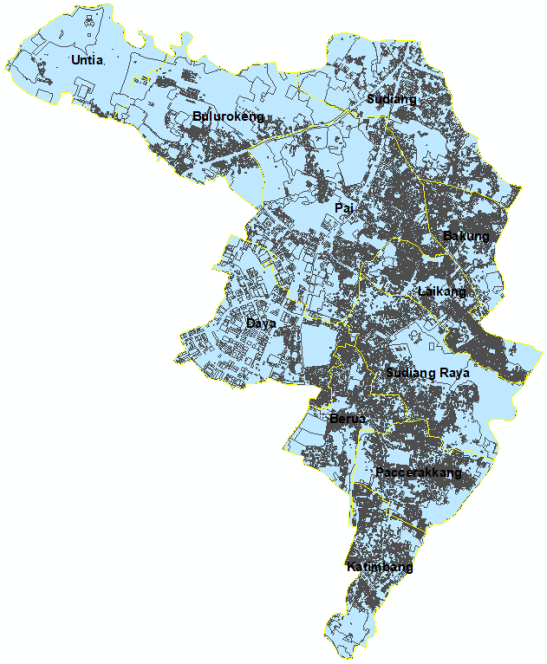
	Users's Accuracy	*Producer's Accuracy*
Non Banjir	0,65	0,88
Banjir	0,95	0,84

Sumber: Hasil analisis, 2024

Nilai *overall accuracy* yang diperoleh yaitu sebesar 85,71%, dan termasuk kedalam kategori baik, karena bernilai di atas 85% (Ursu *et al*, 2025). Sementara itu, variasi nilai yang diperoleh untuk *user's accuracy* dan *producer's accuracy* mengindikasikan adanya ketidaktepatan dalam memprediksi kawasan banjir sebagai non-banjir. Hal ini menyimpulkan bahwa masih terjadi *underestimate* (Rwanga & Ndambuki, 2017) dalam mengklasifikasikan kawasan banjir.

3.2. Distribusi Populasi

Dalam pemetaan distribusi populasi berdasarkan unit bangunan yang didapatkan dari *OpenStreetMap* (OSM), penting untuk mempertimbangkan hubungan antara pola distribusi bangunan dengan jumlah penduduk pada suatu wilayah. Data bangunan yang diperoleh dari OSM menunjukkan bahwa sebagian besar bangunan cenderung terklaster di kawasan Sudiang dan Sudiang Raya.



Gambar 6. Peta Distribusi Bangunan Bersumber dari OSM

Kelurahan Sudiang dan Sudiang Raya memang dikenal sebagai kawasan pengembangan permukiman yang signifikan dan pusat pelayanan penting di Kecamatan Biringkanaya. Dampak banjir akan lebih besar pada kawasan dengan kepadatan penduduk tinggi (Priyatna *et al* 2023).

Tabel 4. Jumlah Penduduk Kec. Biringkanaya

Kelurahan	Jumlah Penduduk
Paccerakkang	20.946
Daya	12.937
Pai	24.261
Sudiang Raya	24.028
Sudiang	26.167
Bulurokeng	16.797
Untia	2.445
Berua	21.935
Katimbang	15.664
Bakung	16.815
Laikang	31.239
Biringkanaya	**213.234**

Sumber: BPS Kota Makassar, 2023

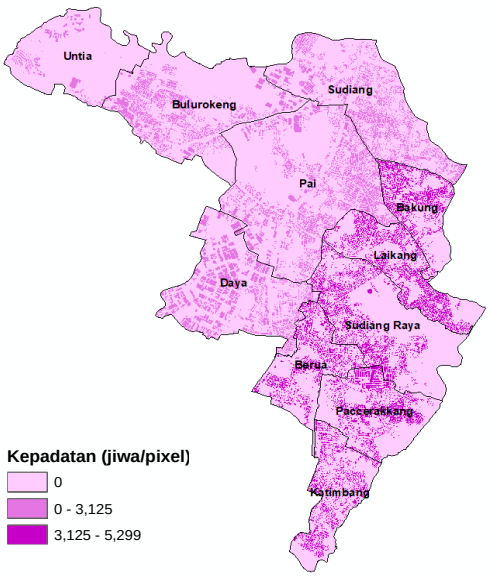
Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS) tahun 2023, total populasi di Kecamatan Biringkanaya mencapai 106.287 jiwa. Kelurahan Laikang sebagai

© 2025, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

kelurahan dengan jumlah penduduk terbanyak di kecamatan ini. Kelurahan Sudiang dan Sudiang Raya menempati posisi kedua dan ketiga dalam hal jumlah penduduk. Kelurahan Laikang memiliki jumlah penduduk yang banyak dapat disebabkan oleh beberapa faktor, termasuk lokasi strategis, pertumbuhan ekonomi, dan ketersediaan infrastruktur yang mendukung. Kelurahan yang memiliki populasi besar sering kali menjadi pusat aktivitas ekonomi dan sosial yang penting di wilayah kecamatan.

Kelurahan Sudiang dan Sudiang Raya, meskipun berada di posisi kedua dan ketiga dalam jumlah penduduk, juga memiliki peran yang penting dalam struktur kecamatan. Kedua kelurahan ini diketahui sebagai kawasan pengembangan permukiman yang penting dan pusat pelayanan di Kecamatan Biringkanaya, seperti yang sebelumnya telah dijelaskan dalam konteks distribusi bangunan. Ketersediaan fasilitas publik, aksesibilitas yang baik, dan pertumbuhan ekonomi lokal dapat menjadi faktor yang menarik penduduk untuk tinggal di kawasan ini. Penting untuk dicatat bahwa distribusi populasi di suatu kecamatan seperti Biringkanaya dapat memengaruhi berbagai aspek kehidupan masyarakat, termasuk diantaranya memengaruhi tingkat risiko banjir.

Selanjutnya pemetaan distribusi penduduk dilakukan menyinkronisasikan data bangunan dan jumlah penduduk secara administrasi. Metode yang digunakan dalam penelitian ini menunjukkan pendekatan yang inovatif dalam memanfaatkan data bangunan dari sumber seperti OSM atau database lainnya untuk menggambarkan distribusi penduduk. Berbeda dengan pendekatan konvensional yang menggunakan data populasi total per wilayah administratif atau per desa/kelurahan, pendekatan ini memperhitungkan lokasi dan pola bangunan sebagai indikator kepadatan penduduk.



Gambar 7. Distribusi Kepadatan Penduduk Berdasarkan Bangunan

Gambar 7 merupakan visualisasi distribusi penduduk yang dibagi menjadi 3 kelas menggunakan prinsip *natural breaks*. Penggunaan metode ini penting dalam analisis spasial karena dapat mengungkap pola heterogenitas yang ada dalam data, terutama dalam konteks distribusi penduduk yang dipengaruhi oleh pembangunan terpusat di suatu kawasan.

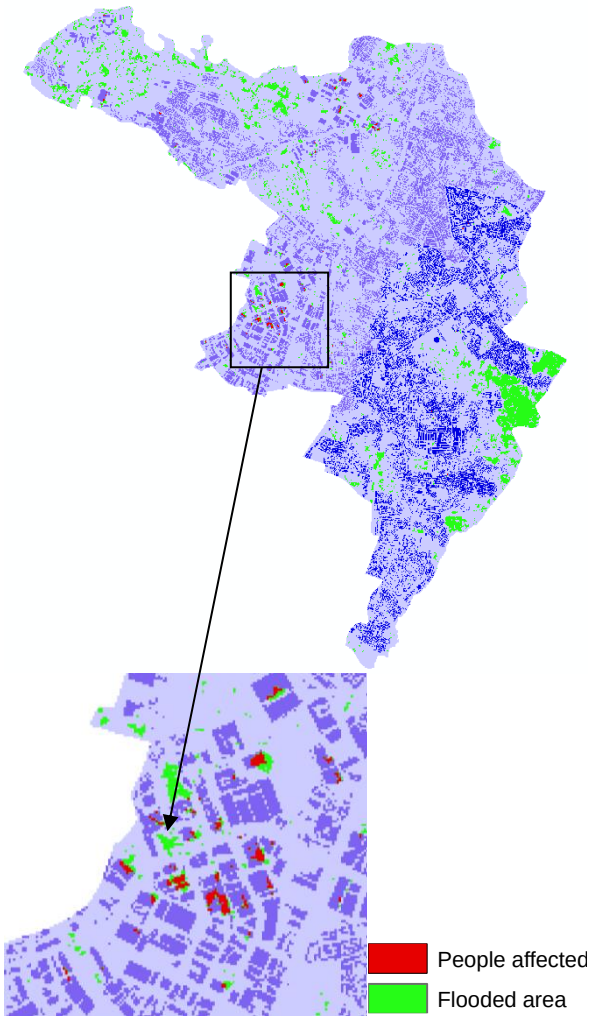
Kawasan Biringkanaya, yang merupakan fokus dari Rencana Detail Tata Ruang (RDTR) Kota Makassar, direncanakan untuk dikembangkan dengan beberapa fungsi yang bertujuan untuk meningkatkan pelayanan publik dan kualitas hidup penduduk. Beberapa inisiatif pengembangan yang disebutkan dalam RDTR termasuk:

- ***Smart* Sudiang Hub di Kelurahan Sudiang**: Ini adalah proyek pengembangan pusat perdagangan dan jasa skala kota yang akan menjadi pusat ekonomi dan komersial di wilayah tersebut. Pembangunan perkantoran dan pergudangan di sini akan mendukung aktivitas ekonomi dan menciptakan lapangan kerja bagi penduduk lokal. Selain itu, pengembangan perumahan yang terintegrasi dengan fasilitas publik juga menjadi bagian dari visi ini, untuk memenuhi kebutuhan hunian dan meningkatkan kualitas hidup warga.
- **Bakung *Limites Aerospace* di Kelurahan Bakung**: Kawasan ini diarahkan untuk pengembangan perumahan dengan kepadatan rendah, yang bertujuan untuk menciptakan lingkungan hunian yang nyaman dan ramah lingkungan. Selain itu, proyek ini juga termasuk pengembangan perdagangan dan jasa, serta fasilitas pelayanan umum skala kota seperti pendidikan. Pendekatan ini mengutamakan keberlanjutan lingkungan dan kualitas hidup yang lebih baik bagi penduduk.
- **Pengembangan area permukiman lainnya**: Di Kelurahan Berua, Sudiang Raya, dan Katimbang, pengembangan area permukiman juga menjadi prioritas dalam RDTR. Hal ini mencakup penyediaan infrastruktur dasar seperti air bersih, sanitasi, dan akses transportasi yang baik, yang merupakan faktor penting dalam meningkatkan kualitas hidup penduduk serta memastikan pertumbuhan perkotaan yang berkelanjutan.

3.3. Estimasi Jumlah Masyarakat Terpapar Banjir

Pemetaan distribusi penduduk menggunakan data bangunan sebagai proyeksi telah dilakukan untuk menghindari *over* estimasi dalam analisis keterpaparan banjir. Pendekatan ini memungkinkan untuk mengidentifikasi area-area yang paling rentan terhadap banjir dengan lebih akurat, karena data bangunan memberikan indikasi yang lebih spesifik tentang keberadaan manusia di dalam suatu wilayah.

© 2025, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP



Gambar 8. Penduduk Terpapar Banjir

Warna merah menandakan adanya masyarakat yang terpapar banjir. Banjir lebih banyak terjadi di wilayah yang tidak berpenghuni namun tetap berdampak pada penduduk secara tidak langsung. Hasil analisis juga menunjukkan bahwa banjir paling banyak berdampak pada masyarakat di Kelurahan Berua, meskipun genangan lebih banyak terjadi pada Kelurahan Sudiang Raya dan Untia. Faktor utamanya terletak pada pola permukiman yang lebih menyebar di Berua, yang berarti lebih banyak penduduk tinggal di area yang rawan banjir. Pada kelurahan lain, kawasan permukiman cenderung terklaster dan tidak menyebar sehingga pada area banjir jarang ditemukan adanya bangunan. Permukiman yang lebih tersebar dapat mengalami dampak yang lebih besar meskipun genangan banjir mungkin tidak sering terjadi di sana. Sebaliknya, kawasan permukiman yang terklaster cenderung memiliki tingkat keterpaparan yang lebih rendah terhadap banjir, karena dampaknya dapat dibatasi oleh struktur bangunan yang lebih padat.

Lebih lanjut, didalam dokumen Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Kota Makassar Tahun 2015-2034, Kelurahan Berua diperuntukkan sebagai kawasan permukiman kepadatan rendah dan daerah resapan air. Dalam hal ini, kondisi eksisting Kelurahan Berua tidak sesuai dengan rencana tata ruang. 16 tahun terakhir, daerah non terbangun atau resapan air berkurang drastis mencapai 35% dari total luas wilayah. Selain itu, Kelurahan Berua yang menjadi titik kumpul dari berbagai saluran drainase di kelurahan sekitarnya, tidak memiliki pengelolaan drainase dan badan air yang baik, sehingga tidak berfungsi secara optimal menyalurkan aliran air ke sungai terdekat (Ramadhani, 2021).

Tabel 5. Jumlah Penduduk Terpapar Banjir

Kelurahan	Kerapatan (per *pixel*)	*Count Pixel Affected*	Jumlah Terpapar
Bakung	1,736	29	51
Berua	1,343	272	366
Katimbang	2,193	49	108
Laikang	4,009	6	25
Paccerakkang	4,046	3	13
Pai	5,067	1	6
Sudiang	4,143	10	42
Sudiang Raya	1,978	59	117
Untia	3,125	56	176
Daya	5,299	2	11
Jumlah		**487**	**915**

Tabel 5 menampilkan data mengenai jumlah piksel bangunan yang terdampak banjir. Hasil penelitian ini berhasil mengestimasi jumlah populasi yang terdampak banjir, dengan jumlah angka estimasi 915 jiwa. Berdasarkan data BNPB, terdapat 554 rumah yang terendam banjir. Jika mengacu pada data rata-rata jumlah penghuni satu unit rumah di Indonesia, maka satu unit rumah dihuni oleh 3,86 jiwa (United Nations, 2022). Maka total populasi yang terpapar mencapai 1.662 jiwa. Hal ini menjadi indikasi adanya *underestimate* pada penelitian ini. Hasil ini sebenarnya telah berhasil diprediksi sesuai dengan hasil prediksi wilayah banjir dan non banjir. Dimana akurasi untuk wilayah non-banjir menggunakan citra yang diakuisisi pada satu waktu tanpa menggunakan data yang bersifat *time series* menyebabkan rendahnya akurasi dibandingkan data yang dipublikasi oleh BNPB.

Selain itu, hasil analisis sangat dipengaruhi oleh resolusi spasial citra yang digunakan. Penelitian ini yang menggunakan citra SAR 10 m cenderung dominan menerima *backscatter* dari atap bangunan di tempat yang sangat padat. Sementara itu, banjir di kawasan pemukiman dapat menyebabkan gelombang radar mengalami *double bounce backscattering* yang menyebabkan nilai hamburan balik menjadi lebih tinggi. Hasilnya, nilai selisih *backscatter* menjadi positif dan tidak teridentifikasi sebagai daerah banjir (Priyatna *et al* 2023).

Tingkat akurasi dari klasifikasi kawasan banjir menjadi kunci untuk melakukan estimasi jumlah populasi yang tepat. Penggunaan citra dengan resolusi yang lebih tinggi tentunya dapat memberikan gambaran yang lebih detail dan menunjukkan hasil yang lebih akurat. Penggunaan data bangunan berdasarkan inventarisasi langsung di lapangan akan meningkatkan akurasi hasil penelitian secara signifikan. Hal tersebut menjadi batasan dalam

© 2025, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

penelitian ini karena terbatasnya sumberdaya, sehingga peneliti hanya menggunakan citra dan data bangunan yang bersifat *open source* yang memiliki kekurangan resolusi yang tidak terlalu detail.

Meskipun terdapat kendala dalam akurasi, penelitian ini memberikan gambaran bahwa estimasi populasi dapat dilakukan dengan hasil yang termasuk baik, dan dapat digunakan sebagai data pembanding dan pelengkap. Penggunaan data *open source* diharapkan dapat memberikan gambaran secara umum mengenai keterpaparan banjir dan dapat digunakan untuk memetakan strategi mitigasi yang lebih efektif, kesiapsiagaan bencana yang lebih baik, serta pembangunan infrastruktur yang lebih tahan terhadap ancaman banjir di masa depan.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini mengestimasi populasi yang terpapar banjir di Kecamatan Biringkanaya dengan menggunakan pendekatan pemetaan dasimetrik yang mengintegrasikan data citra Sentinel-1 SAR dan informasi bangunan dari OSM. Hasil penelitian menunjukkan estimasi 915 jiwa terpapar banjir dan adanya anomali di mana Kelurahan Sudiang Raya merupakan wilayah dengan genangan terluas, akan tetapi masyarakat paling banyak terpapar banjir ditemukan di Kelurahan Berua. Pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini membuktikan efektivitasnya dalam mengidentifikasi dan memetakan populasi terpapar banjir, yang sangat penting untuk perencanaan mitigasi dan respons darurat. Temuan ini diharapkan dapat menjadi dasar bagi pengembangan kebijakan publik terkait pengelolaan risiko banjir dan perencanaan infrastruktur yang lebih baik untuk melindungi masyarakat di wilayah rentan banjir.

DAFTAR PUSTAKA

Amitrano, D., Cecinati, F., Di Martino, G., Iodice, A., Mathieu, P. P., Riccio, D., & Ruello, G. (2018). Feature Extraction from Multitemporal SAR Images using Selforganizing Map Clustering and Object-Based Image Analysis. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, *11*(5), 1556-1570. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2808447

Amitrano, D., Di Martino, G., Di Simone, A., & Imperatore, P. (2024). Flood detection with SAR: A review of techniques and datasets. *Remote Sensing*, *16*(4), 656. https://doi.org/10.3390/rs16040656

Badan Pusat Statistik Kota Makassar (2023). Kecamatan Biringkanaya Dalam Angka 2023. Kota Makassar.

Bertsch, R., Glenis, V., & Kilsby, C. (2022). Building level flood exposure analysis using a hydrodynamic model. *Environmental Modelling & Software*, *156*, 105490. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105490

Bioresita, F., Hayati, N., Ngurawan, M. G. R., & Berliana, M. (2022). Integrating Insar Coherence and *Backscatter*ing for Identification of Temporary Surface Water, Case Study: South Kalimantan Flooding, Indonesia. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *43*, 33-39. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2022-33-2022

Clement, M. A., Kilsby, C. G., & Moore, P. (2018). Multi-temporal synthetic aperture radar flood mapping using change detection. *Journal of Flood Risk Management*, *11*(2), 152-168. https://doi.org/10.1111/jfr3.12303

Congalton RG, Green K. (1999). *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*. Boca Raton, Florida (US): CRC Press, Inc.

De Ruig, L.T., Haer, T., de Moel, H., Botzen, W.J.W., Aerts, J.C.J.H. (2019). A micro-scale cost-benefit analysis of building-level flood risk adaptation measures in Los Angeles. *Water Resour. Econ.* 100147. https://doi.org/10.1016/j.wre.2019.100147

Dhanabalan, S. P., Abdul Rahaman, S., & Jegankumar, R. (2021). Flood monitoring using Sentinel-1 sar data: A case study based on an event of 2018 and 2019 Southern part of Kerala. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *44*, 37-41. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIV-M-3-2021-37-2021

Halima, I. E., & Hiroaki, S. (2022). Assessing the disparities of the population exposed to flood hazards in Nigeria. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1016, No. 1, p. 012007). IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1016/1/012007

Hossain, M.K. & Meng, Q. (2020). A Fine-Scale Spatial Analytics of the Assessment and Mapping of Buildings and Population at Different Risk Levels of Urban Flood. *Land Use Policy*, *99*, 104829. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104829

Islam, M. T. & Meng, Q. (2022). An exploratory study of Sentinel-1 SAR for rapid urban flood mapping on Google Earth Engine. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *113*, 103002. https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103002

Kaspersen, S. P., Høegh Ravn, N., Arnbjerg-Nielsen, K., Madsen, H., and Drews, M. (2017). Comparison of the impacts of urban development and climate change on exposing European cities to pluvial flooding, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 4131–4147, https://doi.org/10.5194/hess-21-4131-2017,2017.

Kounadi, O.; Ristea, A.; Leitner, M.; Langford, C. (2018). Population at risk: Using areal interpolation and Twitter messages to create population models for burglaries and robberies. *Cartogr. Geogr. Inf. Sci. 45*, 205–220. https://doi.org/10.1080/15230406.2017.1304243

Kumar, H., Karwariya, S.K. & Kumar, R. (2022). Google Earth Engine-Based Identification of Flood Extent and Flood-Affected Paddy Rice Fields Using Sentinel-2 MSI and Sentinel-1 SAR Data in Bihar State, India. *J Indian Soc Remote Sens* 50, 791–803. https://doi.org/10.1007/s12524-021-01487-3

Li-An, C., Billa, L., Azari, M. (2018). Anthropocene climate and landscape change that increases flood disasters. *Int J Hydro*. 2(4):487–491. https://doi.org/10.15406/ijh.2018.02.00115

Lolokada, T. W., Rogi, O. H., & Poluan, R. J. (2021). Tipologi Urban Sprawl Berdasarkan Atribut Kontinuitas Area Terbangun di Kecamatan Biringkanaya dan Kecamatan Tamalanrea, Kota

© 2025, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Makassar. *SPASIAL*, *8*(2), 164-173. https://doi.org/10.35793/sp.v8i2.33562

Martinis S, Rieke C. (2015). *Backscatter* analysis using multi-temporal and multi-frequency SAR data in the context of flood mapping at River Saale, Germany. Remote Sens. 7(6):7732–7752. https://doi.org/10.3390/rs70607732

Priyatna, M., Wijaya, S. K., Khomarudin, M. R., Yulianto, F., Nugroho, G., Afgatiani, P. M., ... & Hussein, M. A. (2023). The use of multi-sensor satellite imagery to analyze flood events and land cover changes using change detection and machine learning techniques in the Barito watershed. *Journal of Degraded & Mining Lands Management*, *10*(2). https://doi.org/10.15243/jdmlm.2023.102.4073

Ramadhani, A.M.A.R. (2021). Mitigasi Bencana Banjir Genangan Dalam Kawasan perkembangan Permukiman Di Kelurahan Berua, Kota Makassar, Skripsi, Fakultas Teknik, Unhas. Diakses dari: https://repository.unhas.ac.id/id/eprint/13673/2/D101171310_skripsi_19-01-2022 1-2.

Rwanga, S. & Ndambuki, J. M. (2017). Accuracy Assessment of Landuse/Landcover Classification Using Remote Sensing and GIS. *Internasional Journal of Geosciences,* 8(04), 611. https://doi.org/10.4236/ijg.2017.84033

Simamora, F. B., Sasmito, M. B., Hani'ah. (2015). Kajian Metode Segmentasi untuk Identifikasi Tutupan Lahan dan Luas Bidang Tanah menggunakan Citra Google Earth. *Jurnal Geodesi Undip*, 4(4): 43-51. https://doi.org/10.14710/jgundip.2015.9909

Silván-Cárdenas, J.L.; Wang, L.; Rogerson, P.; Wu, C.; Feng, T.; Kamphaus, B.D. (2010). Assessing fine-spatial-resolution remote sensing for small-area population estimation. *Int. J. Remote Sens. 31*, 5605–5634. https://doi.org/10.1080/01431161.2010.496800

Song, Y.; Huang, B.; Cai, J.; Chen, B. (2018). Dynamic assessments of population exposure to urban greenspace using multi-source big data. *Sci. Total Environ. 634*, 1315–1325. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.061

United Nations, Population Division. 2022. Database on Household Size and Composition. Diakses dari: https://www.un.org/development/desa/pd/data/household-size-and-composition

Ursu, C. D., Benedek, J., & Temerdek-Ivan, K. 2025. Accuracy Assessment of Four Land Cover Datasets at Urban, Rural, and Metropolitan Area Level. *Remote Sensing*, 17(5), 756. https://doi.org/10.3390/rs17050756

Wu, X., Zhang, Z., Xiong, S., Zhang, W., Tang, J., Li, Z., ... & Li, R. (2023). A Near-Real-Time Flood Detection Method Based on Deep Learning and SAR Images. *Remote Sensing*, *15*(8), 2046. https://doi.org/10.3390/rs15082046

Yao, Y., Liu, X., Li, X., Zhang, J., Liang, Z., Mai, K., & Zhang, Y. (2017). Mapping fine-scale population distributions at the building level by integrating multisource geospatial big data. *International Journal of Geographical Information Science*, *31*(6), 1220-1244. https://doi.org/10.1080/13658816.2017.1290252

Yu, B., Lian, T., Huang, Y., Yao, S., Ye, X., Chen, Z., Yang, C., Wu, J. (2019). Integration of nighttime light remote sensing images and taxi GPS tracking data for population surface enhancement. *Int. J. Geogr. Inf. Sci. 33*, 687–706. https://doi.org/10.1080/13658816.2018.1555642

Zhao, Li., Zhang, Du. (2019). Improving the Accuracy of Fine-Grained Population Mapping Using Population-Sensitive POIs. *Remote Sens. 11*, 2502. https://doi.org/10.3390/rs11212502

Zhu, S., Dai, Q., Zhao, B., & Shao, J. (2020). Assessment of population exposure to urban flood at the building scale. *Water*, *12*(11), 3253. https://doi.org/10.3390/w12113253

© 2025, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP