

Pengembangan Model Pemetaan Kepadatan Penduduk Berbasis Grid melalui Redistribusi Proporsi Luas Wilayah dan *Built-up Area*

Muhammad Gunawan^{1*}, Dwi Nanda Putra Hartoto² Rahma Anisa³

^{1,2,3} Jurusan Teknik Geodesi Geomatika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, JL. Prof. Sumantri Bojonegoro No.1 Bandar Lampung 35145, Indonesia

*Email korespondensi: muhammad.gunawan@eng.unila.ac.id

(Diterima 2 Februari 2026, Disetujui 20 Juni 2026)

Abstrak

Pemetaan kepadatan penduduk berbasis administrasi masih banyak digunakan dalam analisis spasial, tetapi pendekatan ini mengasumsikan penduduk tersebar merata di seluruh wilayah administrasi. Asumsi tersebut dapat menyederhanakan variasi spasial, terutama pada wilayah yang memiliki perbedaan tutupan lahan, area terbangun, dan konsentrasi permukiman. Penelitian ini bertujuan mengembangkan dan membandingkan tiga model pemetaan kepadatan penduduk berbasis Python, yaitu Model A berupa kepadatan administrasi, Model B berupa redistribusi penduduk berbasis proporsi luas wilayah, dan Model C berupa redistribusi penduduk berbasis luas *built-up* dari ESA WorldCover. Data yang digunakan meliputi batas administrasi, jumlah penduduk, grid spasial 500 m × 500 m, dan kelas *built-up* ESA WorldCover. Model B dikembangkan menggunakan prinsip *area-weighted interpolation*, sedangkan Model C menggunakan prinsip *dasyetric mapping* dengan mekanisme *fallback* ke proporsi luas apabila *built-up* tidak terdeteksi. Hasil prapemrosesan menunjukkan terdapat 126 wilayah administrasi sumber dengan total penduduk 1.091.970 jiwa dan luas wilayah 183,602 km². Grid awal sebanyak 1.677 grid dipotong menjadi 853 grid analisis. Luas *built-up* hasil ekstraksi ESA WorldCover adalah 88,736 km² atau sekitar 48,33% dari wilayah kajian. Validasi internal menunjukkan bahwa Model B dan Model C mempertahankan total penduduk awal dengan *relative error* 0%. Model A menghasilkan rata-rata kepadatan 10.682,55 jiwa/km², Model B 5.827,11 jiwa/km², dan Model C 5.603,16 jiwa/km². Model C memiliki nilai minimum 0,00 jiwa/km² dan standar deviasi lebih tinggi daripada Model B, yang menunjukkan alokasi penduduk lebih selektif dan terkonsentrasi pada area *built-up*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan asumsi redistribusi menghasilkan pola kepadatan yang berbeda. Model C memberikan representasi spasial yang lebih mengikuti area terbangun, tetapi tetap memerlukan validasi eksternal karena *built-up* bukan data hunian atau data penduduk aktual.

Kata kunci: kepadatan penduduk; redistribusi penduduk; *area-weighted interpolation*; *dasyetric mapping*; ESA WorldCover

1. Pendahuluan

Pemetaan kepadatan penduduk merupakan bagian penting dalam analisis spasial karena menyediakan informasi mengenai bagaimana penduduk terdistribusi dalam ruang dan bagaimana distribusi tersebut dapat digunakan untuk mendukung perencanaan wilayah, pelayanan publik, manajemen risiko, kesehatan masyarakat, kajian lingkungan, dan pemantauan pembangunan berkelanjutan [1–6]. Kebutuhan terhadap data kependudukan yang lebih rinci terus meningkat karena banyak persoalan spasial tidak cukup dijelaskan

melalui data agregat administratif, terutama ketika analisis memerlukan estimasi jumlah penduduk pada unit ruang yang lebih kecil, seragam, atau berbeda dari unit pencatatan asal [7–9]. Dalam konteks ini, data kepadatan penduduk spasial tidak hanya berfungsi sebagai media visualisasi, tetapi juga sebagai masukan penting untuk analisis paparan risiko, aksesibilitas fasilitas, distribusi layanan, perencanaan infrastruktur, dan evaluasi ketimpangan spasial [5,6,10–12].

Meskipun demikian, data penduduk umumnya dikumpulkan dan dipublikasikan dalam bentuk agregasi wilayah administrasi

atau unit sensus. Kondisi tersebut menimbulkan persoalan ketika analisis membutuhkan informasi pada unit spasial yang lebih rinci atau berbeda dari unit sumber. Qiu dan Cromley [7] menjelaskan bahwa *areal interpolation* diperlukan ketika data dikumpulkan dalam satu sistem unit wilayah tetapi analisis dilakukan pada sistem unit wilayah lain, baik karena perbedaan geografi analisis, kebutuhan resolusi kecil, perubahan batas wilayah, maupun cakupan data yang tidak lengkap. Persoalan ini juga telah lama dibahas dalam literatur *areal interpolation*, *zone transformation*, dan *spatial incongruity*, yang menekankan bahwa perbedaan antara unit sumber dan unit target dapat memengaruhi hasil analisis spasial [1,7,13–16].

Pendekatan yang paling umum digunakan dalam pemetaan kepadatan penduduk adalah menghitung jumlah penduduk per satuan luas wilayah administrasi dan menampilkannya dalam bentuk peta koroplet. Peta koroplet mudah dibuat dan mudah dipahami karena mengikuti batas administrasi yang dikenal oleh pengguna peta, tetapi pendekatan ini mengandung asumsi bahwa penduduk tersebar merata di seluruh bagian wilayah administrasi [17,18]. Asumsi tersebut sering tidak sesuai dengan kondisi spasial sebenarnya karena dalam satu wilayah administrasi dapat terdapat kawasan permukiman, pertanian, hutan, badan air, ruang terbuka, kawasan industri, dan area non-permukiman lainnya. Akibatnya, kepadatan administrasi dapat melebihi kepadatan pada area yang jarang atau tidak berpenghuni dan merendahkan kepadatan pada kawasan permukiman yang lebih padat [17–19].

Keterbatasan peta kepadatan administrasi juga berkaitan dengan *Modifiable Areal Unit Problem* (MAUP), yaitu kondisi ketika hasil analisis spasial berubah karena perubahan ukuran, bentuk, skala, atau batas unit spasial yang digunakan. MAUP menunjukkan bahwa satu fenomena yang sama dapat menghasilkan pola statistik dan visual yang berbeda ketika direpresentasikan pada unit wilayah yang berbeda [14,20–23]. Dalam konteks peta kepadatan penduduk, Beconyè et al. [18] menunjukkan bahwa perbedaan tingkat agregasi dapat

menimbulkan kekeliruan persepsi visual, terutama pada wilayah dengan distribusi penduduk yang tidak merata. Kajian visualisasi peta juga menegaskan bahwa klasifikasi, ukuran unit spasial, dan bentuk representasi kartografis dapat memengaruhi persepsi pengguna terhadap pola kepadatan [18,19,24–26].

Salah satu pendekatan untuk mengurangi generalisasi akibat batas administrasi adalah mengubah data penduduk ke unit spasial yang lebih seragam, misalnya grid. Grid dapat memberikan kerangka spasial yang lebih konsisten untuk membandingkan kepadatan antarwilayah karena setiap sel memiliki ukuran dan bentuk yang seragam. Namun, penggunaan grid tidak secara otomatis menyelesaikan masalah distribusi penduduk, karena proses pengalokasian penduduk dari unit administrasi ke grid tetap memerlukan asumsi redistribusi yang jelas [6,11,18,27]. Oleh karena itu, pemetaan penduduk berbasis grid perlu dibangun dengan metode yang eksplisit agar asumsi, keterbatasan, dan konsekuensi spasialnya dapat ditelusuri.

Metode dasar yang banyak digunakan untuk mengubah data dari wilayah administrasi ke grid adalah *area-weighted interpolation*. Metode ini mengalokasikan nilai dari wilayah sumber ke wilayah target berdasarkan proporsi luas irisan antara keduanya [1,7,13,15,28]. Keunggulan utama metode ini adalah kesederhanaan, transparansi, dan kemampuannya mempertahankan total nilai asal apabila seluruh wilayah sumber tercakup dalam unit target. Dalam konteks penduduk, prinsip ini dikenal sebagai *volume preservation*, yaitu proses redistribusi tidak boleh menghilangkan atau menciptakan penduduk [1,6,29,30]. Namun, *area-weighted interpolation* tetap mengandung asumsi bahwa penduduk tersebar merata dalam setiap wilayah sumber, sehingga hasilnya masih dapat menyimpang ketika wilayah sumber memiliki variasi internal yang besar [8,30,31].

Untuk memperbaiki asumsi homogenitas tersebut, pendekatan *dasymeric mapping* menggunakan data bantu atau *ancillary data* untuk memperkirakan bagian wilayah yang lebih mungkin berasosiasi dengan keberadaan penduduk. *Dasymeric*

mapping memanfaatkan informasi tambahan seperti tutupan lahan, penggunaan lahan, jaringan jalan, impervious surface, night-time lights, titik alamat, bidang tanah, bangunan, atau area terbangun untuk membatasi atau membobotkan alokasi penduduk [6,15,17,32–37]. Sejumlah studi menunjukkan bahwa metode *dasymetric* dapat menghasilkan representasi kepadatan penduduk yang lebih rinci dibandingkan kepadatan administrasi biasa dan *area-weighted interpolation*, terutama ketika data bantu yang digunakan relevan dengan distribusi tempat tinggal penduduk [10,17,27,31,32,35].

Perkembangan pemetaan penduduk beberapa tahun terakhir menunjukkan peningkatan penggunaan data observasi bumi, data multisumber, dan metode statistik atau machine learning. WorldPop, LandScan, GHS-POP, dan GPW merupakan contoh produk populasi grid global yang menggunakan asumsi dan data bantu yang berbeda dalam mendistribusikan penduduk ke grid [2–4,4,6,38,39]. Stevens et al. [39] menggunakan pendekatan random forest dengan data penginderaan jauh dan data bantu untuk disaggregasi penduduk. Reed et al. [40] menunjukkan bahwa produk *built settlement* yang berbeda dapat memengaruhi peta penduduk grid yang dihasilkan. Sapena et al. [30] menekankan bahwa skenario data yang berbeda memerlukan strategi disaggregasi yang berbeda pula. Lei et al. [9] meninjau perkembangan pemetaan populasi grid dari sisi data bantu, model, dan prospek penelitian, sedangkan Jin et al. [41] menunjukkan bahwa data multisumber dan pendekatan *downscaling* bertahap semakin banyak digunakan dalam pemetaan penduduk beresolusi tinggi.

Meskipun metode kompleks seperti machine learning dan integrasi data multisumber semakin berkembang, pendekatan sederhana yang transparan tetap memiliki nilai ilmiah, terutama untuk membandingkan asumsi dasar redistribusi penduduk pada konteks data lokal yang terbatas. Studi terbaru menunjukkan bahwa akurasi peta populasi grid masih sangat bergantung pada kualitas data sumber, skala unit administrasi, kualitas data bantu, dan metode alokasi yang digunakan [4–6,9,42]. Liu et al. [6] menegaskan bahwa data populasi

grid pada dasarnya berasal dari data sensus atau unit administrasi yang dialokasikan ulang ke grid, dan kualitas hasilnya dipengaruhi oleh kualitas elemen masukan serta metode alokasi. Oleh sebab itu, penelitian yang membandingkan model berbasis kepadatan administrasi, *area-weighted interpolation*, dan *dasymetric mapping* masih relevan, terutama untuk menjelaskan konsekuensi metodologis dari perbedaan asumsi redistribusi.

Dalam penelitian ini, data bantu yang digunakan untuk pendekatan *dasymetric* adalah kelas *built-up* dari ESA WorldCover. Produk ESA WorldCover menyediakan peta tutupan lahan global resolusi sekitar 10 m berbasis Sentinel-1 dan Sentinel-2, sehingga dapat dimanfaatkan sebagai data bantu terbuka untuk pemodelan spasial [43–45]. Namun, kelas *built-up* tidak dapat diperlakukan sebagai data penduduk secara langsung karena kelas tersebut merepresentasikan area terbangun dan dapat mencakup bangunan residensial, bangunan industri, infrastruktur, jalan, rel, serta struktur buatan lainnya. Keterbatasan ini sejalan dengan temuan Kuffer et al. [4], yang menunjukkan bahwa model populasi grid dapat mengalami *overestimation* pada area non-residensial dan *underestimation* pada kawasan hunian padat, terutama ketika model tidak membedakan penggunaan lahan residensial dan non-residensial. Oleh karena itu, *built-up* area dalam penelitian ini diposisikan sebagai *proxy area terbangun*, bukan sebagai bukti langsung lokasi atau jumlah penduduk aktual [4,30,40,43].

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini mengembangkan dan membandingkan tiga model pemetaan kepadatan penduduk berbasis *Python*. Model A merepresentasikan kepadatan administrasi biasa sebagai baseline. Model B merepresentasikan redistribusi penduduk berbasis proporsi luas wilayah melalui prinsip *area-weighted interpolation*. Model C merepresentasikan redistribusi penduduk berbasis proporsi *built-up* area melalui prinsip *dasymetric mapping*, dengan mekanisme *fallback* ke Model B apabila *built-up* area tidak terdeteksi pada wilayah sumber. Kebaruan penelitian ini terletak pada penyusunan alur komputasi yang sederhana, transparan, dan dapat direplikasi untuk

membandingkan tiga asumsi distribusi penduduk, bukan pada klaim menghasilkan produk populasi grid final yang tervalidasi eksternal. Dengan demikian, penelitian ini berfokus pada perbandingan pola spasial, konsistensi total penduduk, proporsi wilayah sumber, proporsi built-up, jumlah fallback, dan interpretasi visual hasil model.

Tujuan penelitian ini adalah: (1) membangun Model A berupa kepadatan penduduk administrasi; (2) membangun Model B berupa redistribusi penduduk berbasis proporsi luas wilayah ke grid; (3) membangun Model C berupa redistribusi penduduk berbasis proporsi *built-up* area; dan (4) membandingkan ketiga model berdasarkan konsistensi total penduduk, asumsi redistribusi, statistik deskriptif, serta pola visual kepadatan penduduk. Dengan kerangka ini, penelitian diharapkan dapat menunjukkan bagaimana perbedaan asumsi spasial menghasilkan representasi kepadatan penduduk yang berbeda, sekaligus menegaskan batas interpretasi model berbasis *built-up* sebagai pendekatan yang memerlukan validasi eksternal pada penelitian lanjutan.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif-spasial untuk membandingkan tiga model pemetaan kepadatan penduduk. Seluruh proses pengolahan data dilakukan menggunakan *Python* dalam lingkungan JupyterLab dengan pustaka utama *geopandas*, *pandas*, *numpy*, *rasterio*, *shapely*, *matplotlib*, dan *mapclassify*. Model yang dikembangkan terdiri atas tiga skenario, yaitu Model A sebagai kepadatan administrasi, Model B sebagai redistribusi penduduk ke grid berdasarkan proporsi luas wilayah, dan Model C sebagai redistribusi penduduk berbasis proporsi *built-up area* dari ESA WorldCover. Pendekatan Model B mengacu pada prinsip *areal interpolation*, yaitu pemindahan data dari unit sumber ke unit target, sedangkan Model C mengacu pada prinsip *dasymetric mapping* yang menggunakan data bantu untuk memperkirakan distribusi spasial penduduk secara lebih rinci.

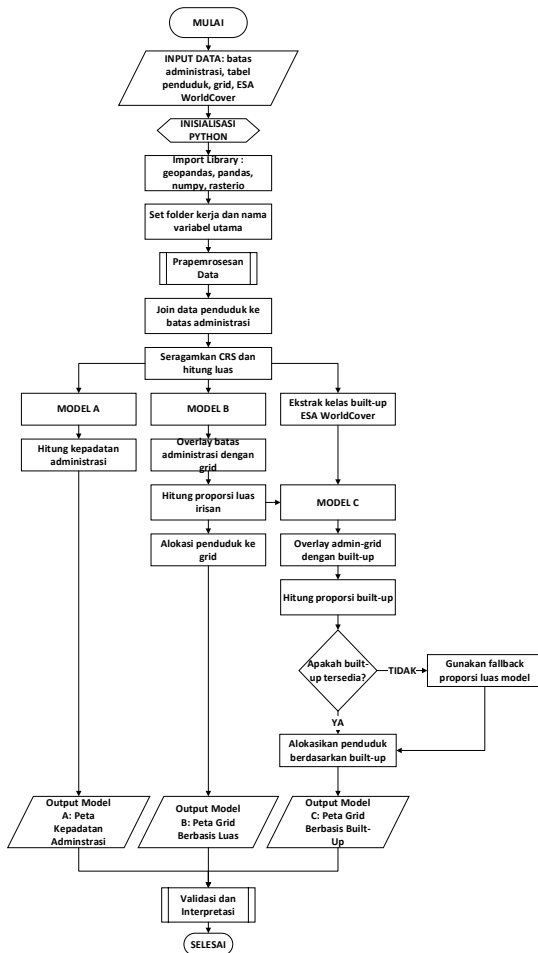
Data dan Prapemrosesan

Data yang digunakan meliputi batas administrasi, tabel jumlah penduduk, grid spasial, dan data ESA WorldCover. Batas administrasi digunakan sebagai unit sumber karena jumlah penduduk melekat pada wilayah tersebut, sedangkan grid digunakan sebagai unit target untuk menghasilkan representasi kepadatan penduduk yang lebih rinci dan seragam.

Tahap prapemrosesan meliputi penyamaan sistem koordinat, pemeriksaan geometri, penggabungan tabel penduduk dengan batas administrasi, perhitungan luas wilayah administrasi, perhitungan luas grid, serta ekstraksi kelas *built-up* dari ESA WorldCover. Kelas *built-up* digunakan sebagai pendekatan area terbangun pada Model C, bukan sebagai data langsung jumlah penduduk, karena kelas tersebut dapat mencakup bangunan residensial, bangunan industri, jalan, rel, dan struktur buatan lainnya.

Algoritma Pemodelan Berbasis Python

Alur algoritma pemodelan ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Flowchart Algoritma Pemrosesan Model

Seluruh proses pemodelan dilakukan menggunakan *Python*. Secara umum, algoritma dimulai dari pembacaan data batas administrasi, tabel penduduk, grid spasial, dan raster ESA WorldCover. Data administrasi dan grid kemudian diproyeksikan ke sistem koordinat proyeksi yang sama agar perhitungan luas dapat dilakukan secara konsisten. Setelah tahap prapemrosesan, tiga model dibangun, yaitu model_a untuk kepadatan administrasi, grid_result_m1 untuk redistribusi berbasis proporsi luas wilayah, dan grid_result_m2 untuk redistribusi berbasis proporsi *built-up area*.

Flowchart tersebut menunjukkan bahwa ketiga model dibangun dari data dasar yang sama, tetapi menggunakan asumsi distribusi penduduk yang berbeda. Model A mempertahankan unit administrasi, Model B mendistribusikan penduduk ke grid berdasarkan proporsi luas wilayah, sedangkan Model C mendistribusikan penduduk ke grid

berdasarkan proporsi *built-up area* dengan mekanisme *fallback* ke Model B apabila *built-up area* tidak terdeteksi.

Formulasi Model

Model A menghitung kepadatan penduduk administrasi dengan rumus:

$$D_i^A = \frac{P_i}{A_i} \tag{1}$$

dengan D_i^A adalah kepadatan penduduk administrasi, P_i adalah jumlah penduduk wilayah administrasi ke- i , dan A_i adalah luas wilayah administrasi ke- i .

Model B menghitung alokasi penduduk berdasarkan proporsi luas irisan administrasi-grid:

$$P_{ij}^B = P_i \times \frac{a_{ij}}{H_i} \tag{2}$$

dengan P_{ij}^B adalah penduduk dari wilayah administrasi i yang dialokasikan ke grid j , a_{ij} adalah luas irisan antara wilayah administrasi i dan grid j , serta A_i adalah luas total wilayah administrasi i .

Model C menghitung alokasi penduduk berdasarkan proporsi *built-up area*:

$$P_{ij}^C = P_i \times \frac{h_{ij}}{H_i} \tag{3}$$

dengan P_{ij}^C adalah penduduk dari wilayah administrasi i yang dialokasikan ke grid j , h_{ij} adalah luas *built-up* pada irisan wilayah administrasi i dan grid j , serta H_i adalah total luas *built-up* dalam wilayah administrasi i .

Apabila $H_i = 0$, maka digunakan mekanisme *fallback* ke Model B:

$$P_{ij}^C = P_i \times \frac{a_{ij}}{A_i} \tag{4}$$

Validasi dilakukan secara internal dengan membandingkan total penduduk awal dengan total penduduk hasil redistribusi pada Model B dan Model C. Validasi ini mengikuti prinsip *volume preservation*, yaitu total penduduk tidak boleh hilang atau bertambah akibat proses redistribusi [1].

$$RE = \frac{|P_{model} - P_{sumber}|}{P_{sumber}} \times 100 \tag{5}$$

Selain validasi total penduduk, Model B diperiksa melalui jumlah proporsi luas per wilayah sumber, melalui rumus berikut:

$$R_i^B = \sum_j \left(\frac{a_{ij}}{A_i} \right) \tag{6}$$

denga R_i^B = jumlah proporsi luas Model B pada wilayah sumber ke-i, a_{ij} adalah luas irisan antara wilayah administrasi i dan grid j, A_i adalah luas total wilayah administrasi i dan Σ_j adalah penjumlahan untuk seluruh grid j yang beririsan dengan wilayah i.

Selanjutnya Model C juga diperiksa melalui jumlah proporsi *built-up* dan jumlah wilayah yang menggunakan *fallback*. Melalui rumus berikut:

$$R_i^C = \sum_j \left(\frac{h_{ij}}{H_i} \right) \quad (7)$$

dengan R_i^C adalah jumlah proporsi *built-up* Model C pada wilayah sumber i, h_{ij} adalah luas *built-up* pada irisan wilayah administrasi i dan grid j, H_i adalah total luas *built-up* dalam wilayah administrasi i, dan Σ_j adalah penjumlahan untuk seluruh grid j yang beririsan dengan wilayah i. Perbandingan ketiga model ini dilakukan berdasarkan satuan spasial hasil, asumsi distribusi penduduk, statistik kepadatan, dan interpretasi visual pola spasial.

3. Hasil dan Pembahasan

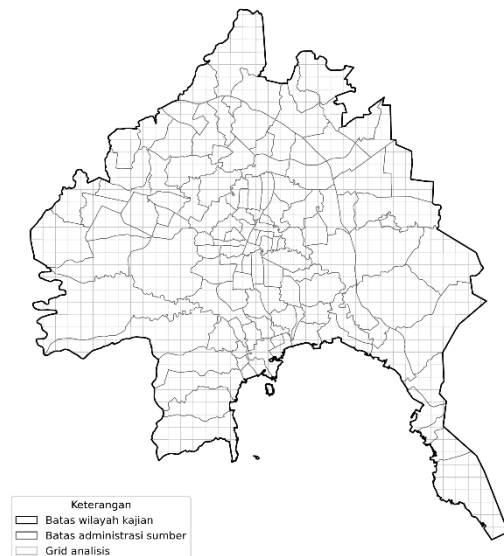
Tahap prapemrosesan menghasilkan empat komponen utama yang digunakan dalam pemodelan, yaitu batas administrasi, data jumlah penduduk, grid analisis, dan area *built-up*. Batas administrasi berfungsi sebagai unit sumber karena data penduduk melekat pada wilayah tersebut. Berdasarkan hasil pengolahan, terdapat 126 wilayah sumber dengan total penduduk 1.091.970 jiwa dan luas wilayah kajian sebesar 183,602 km².

Grid dibentuk sebagai unit spasial yang lebih seragam dalam proses redistribusi penduduk. Pada tahap awal, terbentuk 1.677 sel grid dari cakupan spasial wilayah kajian. Setelah dilakukan pemotongan mengikuti batas wilayah, jumlah sel yang digunakan dalam analisis menjadi 853. Sel-sel inilah yang menjadi unit target pada Model B dan Model C. Perbedaan jumlah tersebut terjadi karena sebagian grid awal berada di luar batas kajian atau hanya terbentuk dari cakupan awal sebelum proses clipping.

Hasil prapemrosesan menunjukkan bahwa seluruh data telah siap digunakan untuk membangun model kepadatan penduduk. Dengan susunan ini, wilayah administrasi digunakan sebagai dasar alokasi penduduk,

sedangkan grid analisis menjadi satuan spasial untuk membandingkan hasil redistribusi secara lebih konsisten antarwilayah.

Visualisasi Wilayah Kajian



Gambar 2. Geovisual wilayah kajian dan grid.

Wilayah administrasi yang digunakan untuk pengembangan model adalah Kota Bandar Lampung. Gambar 2 menampilkan wilayah kajian yang terdiri atas sejumlah unit administrasi tingkat desa yang digunakan sebagai sumber data penduduk. Batas wilayah kajian ditampilkan dengan garis hitam tebal, batas administrasi sumber dengan garis abu-abu, sedangkan grid analisis divisualisasikan sebagai sel-sel reguler yang menutupi area kajian.

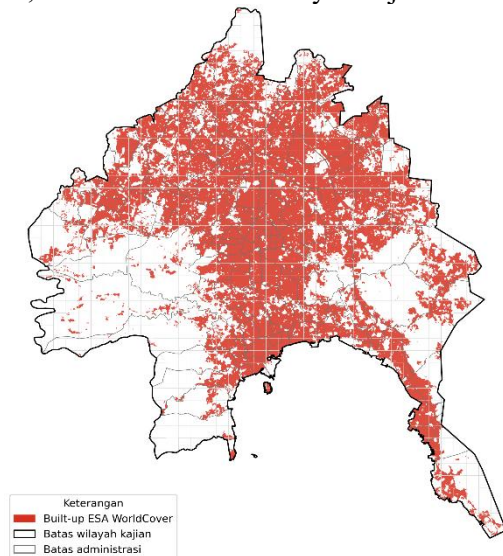
Secara visual, sel grid di bagian tengah wilayah tampak utuh karena seluruh bagiannya berada di dalam batas kajian. Sebaliknya, sel-sel di bagian tepi mengalami pemotongan mengikuti bentuk batas wilayah. Kondisi ini perlu diperhatikan karena luas setiap sel hasil pemotongan digunakan dalam perhitungan kepadatan pada Model B dan Model C. Oleh karena itu, Gambar 2 tidak hanya menunjukkan lokasi penelitian, tetapi juga memperlihatkan hubungan spasial antara unit sumber dan unit target dalam proses redistribusi penduduk.

Selain itu, peta tersebut memperlihatkan bahwa unit administrasi memiliki bentuk dan ukuran yang tidak seragam. Perbedaan ini menjadi salah satu

dasar penggunaan grid sebagai unit target, karena grid menyediakan satuan spasial yang lebih konsisten untuk membandingkan hasil kepadatan penduduk antarbagian wilayah.

Built-up ESA WorldCover

Tampilan sebaran kelas *built-up* ESA WorldCover digunakan sebagai dasar pembobotan pada Model C. Kelas yang digunakan adalah kelas 50 dari ESA WorldCover. Hasil ekstraksi menunjukkan luas tutupan sebesar 88,736 km², atau sekitar 48,33% dari total luas wilayah kajian.



Gambar 3. Geovisual built-up ESA WorldCover.

Gambar 3 memperlihatkan area *built-up* hasil ekstraksi ESA WorldCover tersebar cukup luas di wilayah kajian, tetapi pola sebarannya tidak merata. Konsentrasi yang lebih tinggi terlihat pada bagian tengah wilayah, sebagian area utara, serta koridor yang mengarah ke pesisir dan bagian tenggara. Sebaliknya, area di bagian barat, barat daya, dan beberapa wilayah pinggiran menunjukkan kerapatan area terbangun yang lebih rendah.

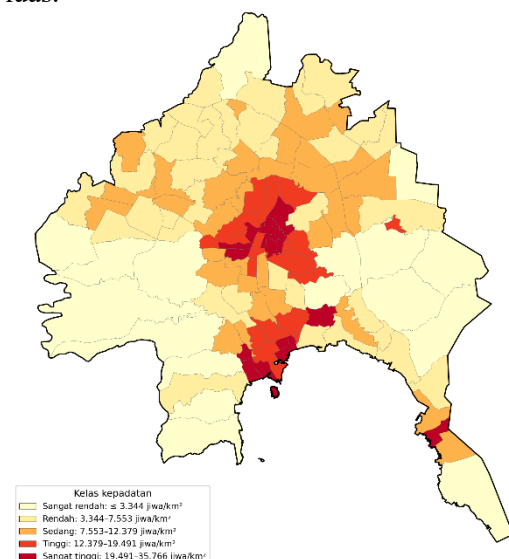
Sebaran tersebut menjadi dasar penting dalam Model C karena alokasi penduduk tidak lagi hanya ditentukan oleh proporsi luas wilayah, melainkan oleh proporsi area built-up pada setiap irisan antara wilayah administrasi dan grid. Dengan pendekatan ini, grid yang memiliki area built-up lebih besar cenderung menerima alokasi penduduk lebih tinggi. Sebaliknya, grid dengan area yang lebih kecil atau tidak terdeteksi akan

memperoleh alokasi yang lebih rendah, bahkan dapat bernilai nol.

Meskipun demikian, kelas built-up ESA WorldCover perlu dipahami sebagai proksi area terbangun, bukan sebagai data permukiman atau data penduduk aktual. Kelas ini dapat mencakup bangunan hunian, bangunan nonhunian, kawasan industri, fasilitas publik, jalan, rel, pelabuhan, dan struktur buatan lainnya. Oleh karena itu, Model C tidak dimaksudkan untuk menggambarkan distribusi penduduk aktual secara absolut, tetapi untuk menguji pengaruh penggunaan informasi area terbangun terhadap hasil redistribusi penduduk dibandingkan dengan pendekatan berbasis proporsi luas wilayah.

Model A: Kepadatan Penduduk Administrasi

Model A menghitung kepadatan penduduk pada unit administrasi. Model ini menggunakan rumus (1). Berdasarkan Gambar 4, Model A menghasilkan pola kepadatan yang mengikuti batas administrasi. Kelas kepadatan sangat tinggi tampak terkonsentrasi pada beberapa wilayah administrasi di bagian tengah dan bagian selatan. Sebaliknya, wilayah dengan kepadatan sangat rendah dan rendah lebih banyak terlihat pada bagian pinggiran, terutama pada wilayah administrasi yang lebih luas.



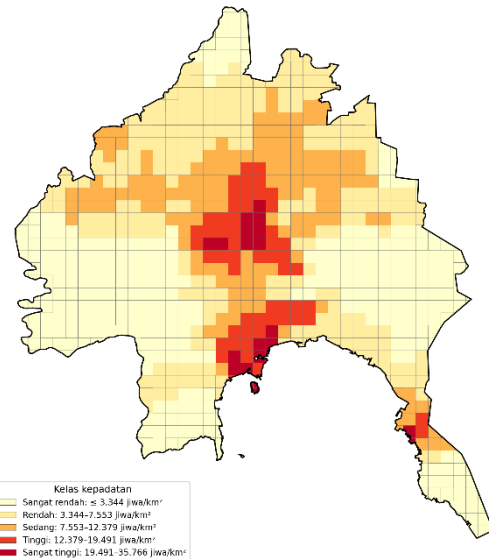
Gambar 4. Model A: Kepadatan penduduk administrasi.

Kelas kepadatan dibagi menjadi lima kelas, yaitu sangat rendah, rendah, sedang, tinggi, dan sangat tinggi. Rentang kelas yang digunakan sama untuk representasi hasil kepadatan semua peta, sehingga ketiga peta dapat dibandingkan secara visual. Berdasarkan statistik deskriptif, Model A memiliki rata-rata kepadatan sebesar 10.682,55 jiwa/km² dan median sebesar 8.969,07 jiwa/km². Nilai minimum kepadatan adalah 694,98 jiwa/km², sedangkan nilai maksimumnya mencapai 35.766,11 jiwa/km².

Peta Model A digunakan sebagai baseline karena merepresentasikan pendekatan kepadatan penduduk administrasi yang umum digunakan. Meskipun mudah dipahami, model ini memiliki keterbatasan karena setiap bagian dalam satu wilayah administrasi diberi nilai kepadatan yang sama. Akibatnya, area terbangun, area non-terbangun, ruang terbuka, maupun kawasan lain yang tidak selalu berasosiasi dengan keberadaan penduduk tetap direpresentasikan dengan nilai kepadatan yang seragam. Oleh karena itu, Model A lebih tepat digunakan untuk memberikan gambaran umum perbedaan kepadatan antarwilayah administrasi, bukan untuk menjelaskan distribusi penduduk pada skala spasial yang lebih rinci.

Model B: Redistribusi Berbasis Proporsi Luas Wilayah

Model B mendistribusikan penduduk dari wilayah administrasi ke grid berdasarkan proporsi luas irisan antara wilayah administrasi dan grid. Model ini menggunakan rumus (2).



Gambar 5. Model B: Kepadatan penduduk berbasis proporsi luas wilayah.

Gambar 5 memperlihatkan Model B menghasilkan pola kepadatan berbasis grid. Hasil menyajikan representasi spasial yang lebih rinci karena unit spasial yang digunakan bukan lagi wilayah administrasi, melainkan grid. Kelas kepadatan tinggi dan sangat tinggi masih tampak terkonsentrasi pada bagian tengah wilayah kajian dan beberapa bagian terluar, tetapi batas kelas tidak lagi mengikuti batas administrasi secara penuh. Hal ini menunjukkan bahwa proses redistribusi telah mengubah representasi kepadatan dari unit administrasi menjadi unit grid.

Meskipun demikian, asumsi bahwa penduduk tersebar mengikuti proporsi luas wilayah tetap digunakan. Akibatnya, grid yang berada pada area *non-built-up* tetap dapat menerima alokasi penduduk selama grid tersebut beririsan dengan wilayah administrasi sumber. Hal ini tampak pada peta, di mana sebagian grid di area batas tepi tetap memiliki nilai kepadatan meskipun pada peta built-up area tersebut tidak selalu terlihat sebagai area terbangun yang dominan.

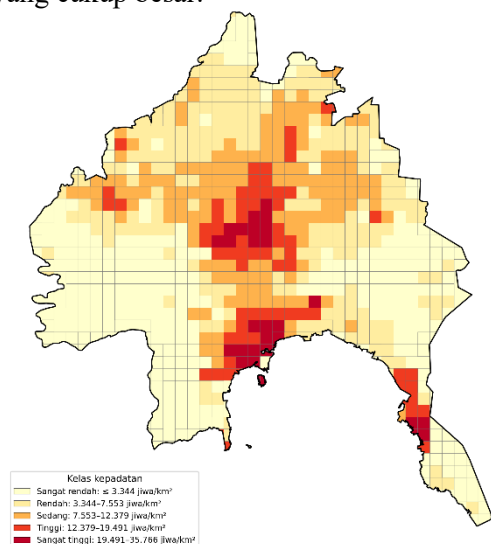
Secara statistik, Model B memiliki rata-rata kepadatan sebesar 5.827,11 jiwa/km² dan median sebesar 4.934,79 jiwa/km². Nilai minimum Model B adalah 694,98 jiwa/km², sedangkan nilai maksimumnya mencapai 31.893,74 jiwa/km². Nilai minimum yang tidak mencapai nol menunjukkan bahwa hampir seluruh grid analisis menerima alokasi penduduk selama berada dalam cakupan

wilayah sumber. Dengan demikian, Model B menghasilkan peta kepadatan berbasis grid, tetapi belum mempertimbangkan informasi fisik mengenai sebaran area terbangun.

Model C: Redistribusi Berbasis Built-up ESA WorldCover

Model C mendistribusikan penduduk berdasarkan proporsi luas built-up pada setiap irisan wilayah administrasi dan grid. Alokasi penduduk pada Model C dihitung dengan rumus (3). Jika suatu wilayah administrasi tidak memiliki *built-up* area yang terdeteksi, maka digunakan perhitungan *fallback* (4).

Gambar 6 menunjukkan bahwa Model C menghasilkan pola kepadatan yang lebih selektif dibandingkan Model B. Kelas tinggi dan sangat tinggi lebih terkonsentrasi pada grid yang berasosiasi dengan sebaran built-up, terutama pada bagian tengah wilayah kajian, beberapa koridor menuju batas terluar, dan bagian tenggara. Sebaliknya, beberapa grid pada Model B yang memperoleh kepadatan sedang atau rendah menjadi sangat rendah pada Model C karena tidak memiliki built-up yang cukup besar.



Gambar 6. Model C: Kepadatan penduduk berbasis *built-up* ESA WorldCover.

Secara statistik, Model C memiliki rata-rata kepadatan sebesar 5.603,16 jiwa/km² dan median sebesar 4.229,68 jiwa/km². Nilai kepadatan minimum pada model ini adalah 0 jiwa/km², sedangkan nilai maksimumnya mencapai 32.181,33 jiwa/km². Nilai minimum nol menjadi pembeda penting dari Model B karena menunjukkan bahwa Model C tidak

mengalokasikan penduduk ke seluruh sel secara merata, melainkan membatasi distribusi berdasarkan keberadaan area built-up.

Standar deviasi Model C sebesar 5.787,02 jiwa/km², lebih tinggi dibandingkan Model B yang memiliki standar deviasi 5.145,28 jiwa/km². Perbedaan ini menunjukkan bahwa Model C menghasilkan pola kepadatan yang lebih kontras. Sel dengan area built-up kecil atau tidak terdeteksi cenderung memperoleh nilai sangat rendah atau nol, sedangkan sel yang memiliki area terbangun lebih dominan menerima alokasi penduduk yang lebih besar. Dengan demikian, Model C lebih mampu menunjukkan konsentrasi kepadatan pada area terbangun dibandingkan Model B.

Meskipun demikian, hasil Model C tetap perlu ditafsirkan secara hati-hati. Kelas built-up ESA WorldCover tidak selalu merepresentasikan permukiman penduduk, karena dapat mencakup kawasan industri, fasilitas publik, jalan, rel, pelabuhan, dan struktur buatan lainnya. Oleh karena itu, Model C lebih tepat diposisikan sebagai model redistribusi penduduk berbasis area terbangun, bukan sebagai peta distribusi penduduk aktual yang telah tervalidasi secara eksternal.

Validasi Internal Model

Hasil validasi total penduduk ditampilkan pada Tabel 1. Total penduduk awal adalah 1.091.970 jiwa. Total penduduk hasil redistribusi Model B dan Model C juga sebesar 1.091.970 jiwa. Dengan demikian, relative error untuk Model B dan Model C adalah 0%.

Tabel 1. Validasi total penduduk

Model	Total penduduk	Selisih	Relative error
Data awal	1.091.970	0	0%
Model B	1.091.970	0	0%
Model C	1.091.970	0	0%

Hasil pada Tabel 1 menunjukkan bahwa proses redistribusi pada Model B dan Model C memenuhi prinsip *volume preservation*.

Artinya, proses redistribusi tidak menambah atau mengurangi jumlah penduduk. Perbedaan yang muncul antara Model B dan Model C bukan disebabkan oleh perubahan total penduduk, melainkan oleh perbedaan dasar alokasi penduduk pada grid.

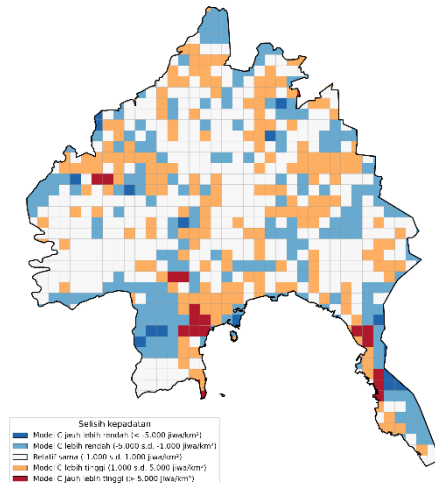
Selain validasi total penduduk, Model B divalidasi menggunakan proporsi luas wilayah sumber. Proporsi luas Model B dihitung dengan rumus (6). Nilai R_i^B yang mendekati 1 menunjukkan bahwa seluruh bagian wilayah administrasi sumber telah terwakili dalam proses overlay dengan grid. Hasil validasi menunjukkan bahwa total proporsi luas per wilayah sumber mencapai 1. Dengan demikian, proses overlay dan alokasi pada Model B dapat dinyatakan konsisten secara spasial.

Model C divalidasi menggunakan proporsi built-up per wilayah sumber yang dihitung dengan rumus (7). Nilai R_i^C yang mendekati 1 menunjukkan bahwa seluruh *built-up* dalam wilayah administrasi sumber telah terdistribusi ke grid secara konsisten. Hasil validasi menunjukkan bahwa total proporsi built-up per wilayah sumber juga mencapai 1. Selain itu, jumlah wilayah fallback adalah 0, sehingga seluruh wilayah administrasi sumber dapat dialokasikan menggunakan proporsi built-up.

Validasi ini menunjukkan bahwa Model B dan Model C konsisten secara matematis dan spasial. Namun, belum membuktikan akurasi eksternal terhadap distribusi penduduk aktual. Untuk menguji akurasi eksternal, diperlukan data pembandingan seperti data bangunan hunian, titik alamat, data rumah tangga, atau survei lapangan.

Perbandingan Spasial Model C dan B

Perbandingan spasial antara Model C dan Model B dilakukan dengan menghitung selisih kepadatan pada setiap grid. Selisih dihitung dengan rumus $\Delta D_j = D_j^C - D_j^B$. Di mana ΔD_j adalah selisih kepadatan pada grid j , D_j^C adalah kepadatan Model C pada grid j dan D_j^B adalah kepadatan Model B pada grid j .



Gambar 7. Visualisasi perbandingan kepadatan penduduk Model C – Model B.

Hasil perbandingan ditampilkan pada Gambar 7. Warna biru menunjukkan grid dengan kepadatan Model C lebih rendah daripada Model B. Warna oranye hingga merah menunjukkan grid dengan kepadatan Model C lebih tinggi daripada Model B. Warna putih menunjukkan grid dengan perbedaan relatif kecil, yaitu berada pada rentang -1.000 sampai 1.000 jiwa/km².

Berdasarkan interpretasi Gambar 7, perubahan dari Model B ke Model C tidak terjadi secara merata di seluruh wilayah. Beberapa grid mengalami peningkatan kepadatan pada Model C, sedangkan grid lain mengalami penurunan. Grid berwarna merah menunjukkan area yang memperoleh alokasi penduduk lebih besar pada Model C. Hal ini umumnya terjadi pada grid yang memiliki built-up lebih dominan, sehingga alokasi penduduk yang pada Model B tersebar berdasarkan luas wilayah menjadi lebih terkonsentrasi pada grid tersebut.

Sebaliknya, grid berwarna biru menunjukkan area yang mengalami penurunan kepadatan pada Model C. Penurunan ini terjadi karena grid tersebut memiliki built-up kecil atau tidak dominan. Dengan kata lain, penduduk yang pada Model B dialokasikan berdasarkan proporsi luas wilayah dialihkan pada Model C ke grid lain yang memiliki built-up lebih besar.

Peta perbandingan pada Gambar 7 memperjelas bahwa perbedaan antara Model B dan Model C bukan hanya perbedaan

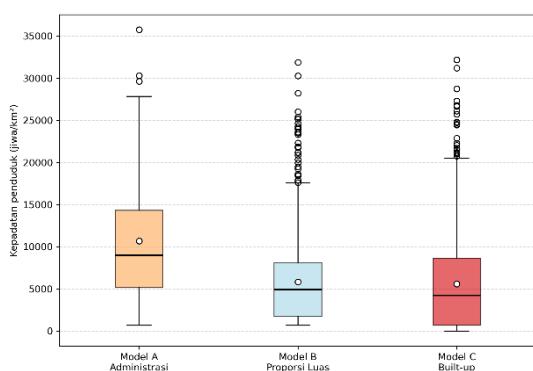
tampilan peta, tetapi perbedaan logika alokasi. Model B mengalokasikan penduduk berdasarkan proporsi luas irisan wilayah, sedangkan Model C mengalokasikan penduduk berdasarkan proporsi built-up. Oleh karena itu, Model C menghasilkan pola yang lebih terkonsentrasi pada area terbangun.

Perbandingan Statistik

Perbandingan statistik kepadatan penduduk ditampilkan pada Tabel 2, sedangkan distribusi nilainya divisualisasikan melalui *boxplot* pada Gambar 8.

Tabel 2. Statistik deskriptif kepadatan penduduk

Statistik	Model A	Model B	Model C
Jumlah unit	126	853	853
Rata-rata	10.682,55	5.827,11	5.603,16
Standar deviasi	7.354,75	5.145,28	5.787,02
Minimum	694,98	694,98	0,00
Kuartil 1	5.170,31	1.738,82	680,91
Median	8.969,07	4.934,79	4.229,68
Kuartil 3	14.321,17	8.087,00	8.646,71
Maksimum	35.766,11	31.893,74	32.181,33



Gambar 8. *Boxplot* distribusi kepadatan penduduk Model A, B, dan C

Tabel tersebut menunjukkan bahwa pendekatan administrasi memiliki rata-rata dan median kepadatan tertinggi dibandingkan dua skenario berbasis grid. Namun, nilai tersebut tidak dapat langsung dimaknai sebagai hasil yang lebih akurat, karena unit analisis yang digunakan berbeda. Pendekatan administrasi bekerja pada 126 wilayah sumber, sedangkan dua skenario redistribusi menggunakan 853 grid analisis.

Perbandingan yang lebih seimbang terdapat pada dua model berbasis grid. Pendekatan berbasis proporsi luas

menghasilkan rata-rata kepadatan sebesar 5.827,11 jiwa/km², sedangkan pendekatan berbasis built-up menghasilkan rata-rata 5.603,16 jiwa/km². Meskipun rata-ratanya sedikit lebih rendah, skenario built-up memiliki standar deviasi lebih tinggi dibandingkan skenario berbasis luas. Hal ini menunjukkan bahwa redistribusi berbasis area terbangun menghasilkan pola kepadatan yang lebih kontras.

Nilai minimum sebesar 0 jiwa/km² pada skenario built-up menunjukkan adanya grid yang tidak menerima alokasi penduduk karena tidak memiliki area terbangun yang terdeteksi. Sebaliknya, pada pendekatan berbasis luas, grid yang beririsan dengan wilayah administrasi sumber tetap memperoleh alokasi penduduk sesuai proporsi luas irisannya. Dengan demikian, hasil statistik dan *boxplot* memperkuat temuan spasial bahwa penggunaan built-up area membuat distribusi penduduk lebih selektif dan lebih terkonsentrasi pada area terbangun.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan dan membandingkan tiga model pemetaan kepadatan penduduk berbasis Python GIS, yaitu Model A berupa kepadatan administrasi, Model B berupa redistribusi penduduk berbasis proporsi luas wilayah, dan Model C berupa redistribusi penduduk berbasis built-up area ESA WorldCover. Ketiga model dibangun dari data penduduk administrasi yang sama, tetapi menggunakan asumsi distribusi spasial yang berbeda.

Hasil prapemrosesan menunjukkan bahwa wilayah kajian terdiri atas 126 wilayah administrasi sumber dengan total penduduk 1.091.970 jiwa dan luas wilayah 183,602 km². Grid awal sebanyak 1.677 grid dipotong menjadi 853 grid analisis. Data built-up ESA WorldCover yang digunakan pada Model C memiliki luas 88,736 km² atau sekitar 48,33% dari total luas wilayah kajian.

Model A menghasilkan peta kepadatan penduduk berbasis administrasi yang mudah dibaca, tetapi masih bersifat generalisasi karena seluruh bagian dalam satu wilayah administrasi diberi nilai kepadatan yang sama. Model B menghasilkan representasi kepadatan yang lebih rinci karena menggunakan grid sebagai unit analisis, tetapi

masih menyebarkan penduduk berdasarkan proporsi luas wilayah. Model C menghasilkan pola kepadatan yang lebih selektif karena alokasi penduduk diarahkan pada grid yang memiliki built-up area.

Validasi internal menunjukkan bahwa Model B dan Model C berhasil mempertahankan total penduduk awal dengan relative error 0%. Hal ini menunjukkan bahwa proses redistribusi tidak menambah atau mengurangi jumlah penduduk. Validasi proporsi luas pada Model B dan proporsi built-up pada Model C juga menunjukkan nilai 1, sehingga proses alokasi dapat dinyatakan konsisten secara matematis dan spasial.

Perbandingan statistik menunjukkan bahwa Model A memiliki rata-rata kepadatan tertinggi karena menggunakan unit administrasi. Perbandingan yang lebih seimbang terdapat pada Model B dan Model C karena keduanya menggunakan 853 grid analisis. Model C memiliki rata-rata kepadatan sedikit lebih rendah daripada Model B, tetapi memiliki standar deviasi lebih tinggi dan nilai minimum 0,00 jiwa/km². Temuan ini menunjukkan bahwa Model C menghasilkan distribusi kepadatan yang lebih kontras dan lebih terkonsentrasi pada area built-up.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa perubahan asumsi redistribusi penduduk menghasilkan pola kepadatan yang berbeda. Model C memberikan representasi spasial yang lebih mengikuti area terbangun dibandingkan Model B, tetapi hasilnya tetap harus dipahami sebagai model redistribusi berbasis built-up, bukan sebagai distribusi penduduk aktual yang telah tervalidasi eksternal. Penelitian lanjutan perlu menggunakan data pembanding seperti titik bangunan hunian, data alamat, jumlah rumah tangga, atau survei lapangan untuk menguji akurasi eksternal model.

Daftar Pustaka

1. Wu S sheng, Qiu X, Wang L. Population Estimation Methods in GIS and Remote Sensing: A Review. *GIScience & Remote Sensing*. 2005 Mar;42(1):80–96. doi:10.2747/1548-1603.42.1.80
2. Linard C, Tatem AJ. Large-scale spatial population databases in infectious disease

- research. *Int J Health Geogr*. 2012;11(1):7. doi:10.1186/1476-072X-11-7
3. Lloyd CT, Sorichetta A, Tatem AJ. High resolution global gridded data for use in population studies. *Sci Data*. 2017 Jan 31;4(1):170001. doi:10.1038/sdata.2017.1
4. Kuffer M, Owusu M, Oliveira L, Sliuzas R, Van Rijn F. The Missing Millions in Maps: Exploring Causes of Uncertainties in Global Gridded Population Datasets. *IJGI*. 2022 Jul 14;11(7):403. doi:10.3390/ijgi11070403
5. Hierink F, Boo G, Macharia PM, Ouma PO, Timoner P, Levy M, et al. Differences between gridded population data impact measures of geographic access to healthcare in sub-Saharan Africa. *Commun Med*. 2022 Sep 16;2(1):117. doi:10.1038/s43856-022-00179-4
6. Liu L, Cao X, Li S, Jie N. A 31-year (1990–2020) global gridded population dataset generated by cluster analysis and statistical learning. *Sci Data*. 2024 Jan 24;11(1):124. doi:10.1038/s41597-024-02913-0
7. Qiu F, Cromley R. Areal Interpolation and Dasymetric Modeling. *Geographical Analysis*. 2013 Jul;45(3):213–5. doi:10.1111/gean.12016
8. Liu X, Martinez A. Areal Interpolation Using Parcel and Census Data in Highly Developed Urban Environments. *IJGI*. 2019 Jul 16;8(7):302. doi:10.3390/ijgi8070302
9. Lei Z, Xie Y, Cheng P, Yang H. From auxiliary data to research prospects, a review of gridded population mapping. *Transactions in GIS*. 2023 Feb;27(1):3–39. doi:10.1111/tgis.13020
10. Barrozo LV, Pérez-Machado RP, Small C, Cabral-Miranda W. Changing spatial perception: dasymetric mapping to improve analysis of health outcomes in a megacity. *Journal of Maps*. 2016 Oct 19;12(5):1242–7. doi:10.1080/17445647.2015.1101403
11. Calka B, Nowak Da Costa J, Bielecka E. Fine scale population density data and its application in risk assessment. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*.

- 2017 Dec 15;8(2):1440–55.
doi:10.1080/19475705.2017.1345792
12. Moos N, Juergens C, Redecker AP. Geo-Spatial Analysis of Population Density and Annual Income to Identify Large-Scale Socio-Demographic Disparities. *IJGI*. 2021 Jun 24;10(7):432. doi:10.3390/ijgi10070432
 13. Lam NSN. Spatial Interpolation Methods: A Review. *The American Cartographer*. 1983 Jan;10(2):129–50. doi:10.1559/152304083783914958
 14. Openshaw S. The modifiable areal unit problem. *Norwich: Geo*; 1984. 40 p. (Concepts and techniques in modern geography; no. 38).
 15. Zandbergen PA. Dasymetric Mapping Using High Resolution Address Point Datasets. *Transactions in GIS*. 2011 Jul;15(s1):5–27. doi:10.1111/j.1467-9671.2011.01270.x
 16. Murakami D, Tsutsumi M. Practical Spatial Statistics for Areal Interpolation. *Environ Plann B Plann Des*. 2012 Dec;39(6):1016–33. doi:10.1068/b38034t
 17. Holt JB, Lo CP, Hodler TW. Dasymetric Estimation of Population Density and Areal Interpolation of Census Data. *Cartography and Geographic Information Science*. 2004 Jan;31(2):103–21. doi:10.1559/1523040041649407
 18. Beconytė G, Balčiūnas A, Šturaitė A, Viliuvienė R. Where Maps Lie: Visualization of Perceptual Fallacy in Choropleth Maps at Different Levels of Aggregation. *IJGI*. 2022 Jan 14;11(1):64. doi:10.3390/ijgi11010064
 19. Forrest D, Medyńska-Gulij B. Which mapping technique for population density is effective, attractive, and suggestive? *Abstr Int Cartogr Assoc*. 2021 Dec 13;3:1–1. doi:10.5194/ica-abs-3-82-2021
 20. Ruddell DM, Wentz EA. Scale, population, and spatial analysis: a methodological investigation. In: *Proceedings of the 15th annual ACM international symposium on Advances in geographic information systems [Internet]*. Seattle Washington: ACM; 2007 [cited 2026 Jun 2]. p. 1–4. Available from: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/1341012.1341084> doi:10.1145/1341012.1341084
 21. Sémécurbe F, Tannier C, Roux SG. Spatial Distribution of Human Population in France: Exploring the Modifiable Areal Unit Problem Using Multifractal Analysis. *Geographical Analysis*. 2016 Jul;48(3):292–313. doi:10.1111/gean.12099
 22. Buzzelli M. Modifiable Areal Unit Problem. In: *International Encyclopedia of Human Geography [Internet]*. Elsevier; 2020 [cited 2026 Jun 2]. p. 169–73. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081022955104068> doi:10.1016/B978-0-08-102295-5.10406-8
 23. Nieves JJ, Gaughan AE, Stevens FR, Yetman G, Gros A. A simulated ‘sandbox’ for exploring the modifiable areal unit problem in aggregation and disaggregation. *Sci Data*. 2024 Feb 24;11(1):239. doi:10.1038/s41597-024-03061-1
 24. MacEachren AM. CHOROPLETH MAP ACCURACY: CHARACTERISTICS OF THE DATA. 2008.
 25. Besançon L, Cooper M, Ynnerman A, Vernier F. An Evaluation of Visualization Methods for Population Statistics Based on Choropleth Maps [Internet]. arXiv; 2020 [cited 2026 Jun 2]. Available from: <https://arxiv.org/abs/2005.00324> doi:10.48550/ARXIV.2005.00324
 26. Karsznia I, Gołębiowska IM, Korycka-Skorupa J, Nowacki T. Searching for an Optimal Hexagonal Shaped Enumeration Unit Size for Effective Spatial Pattern Recognition in Choropleth Maps. *IJGI*. 2021 Aug 25;10(9):576. doi:10.3390/ijgi10090576
 27. Goerlich FJ, Cantarino I. A population density grid for Spain. *International Journal of Geographical Information Science*. 2013 Dec;27(12):2247–63. doi:10.1080/13658816.2013.799283
 28. M. F. Goodchild, N. S N Lam. Areal Interpolation: A Variant of the Traditional Spatial Problem. 1980 Jul 23.
 29. Tobler WR. Smooth Pycnophylactic Interpolation for Geographical Regions. *Journal of the American Statistical*

- Association. 1979 Sep;74(367):519–30. doi:10.1080/01621459.1979.10481647
30. Sapena M, Kühnl M, Wurm M, Patino JE, Duque JC, Taubenböck H. Empiric recommendations for population disaggregation under different data scenarios. Benenson I, editor. PLoS ONE. 2022 Sep 16;17(9):e0274504. doi:10.1371/journal.pone.0274504
 31. Zandbergen PA, Ignizio DA. Comparison of Dasymetric Mapping Techniques for Small-Area Population Estimates. *Cartography and Geographic Information Science*. 2010 Jan;37(3):199–214. doi:10.1559/152304010792194985
 32. Mennis J, Hultgren T. Intelligent Dasymetric Mapping and Its Application to Areal Interpolation. *Cartography and Geographic Information Science*. 2006 Jan;33(3):179–94. doi:10.1559/152304006779077309
 33. Mennis J. Generating Surface Models of Population Using Dasymetric Mapping. *The Professional Geographer*. 2003 Feb;55(1):31–42. doi:10.1111/0033-0124.10042
 34. Mennis J. Dasymetric Mapping for Estimating Population in Small Areas. *Geography Compass*. 2009 Mar;3(2):727–45. doi:10.1111/j.1749-8198.2009.00220.x
 35. Maantay JA, Maroko AR, Herrmann C. Mapping Population Distribution in the Urban Environment: The Cadastral-based Expert Dasymetric System (CEDs). *Cartography and Geographic Information Science*. 2007 Jan;34(2):77–102. doi:10.1559/152304007781002190
 36. Tapp AF. Areal Interpolation and Dasymetric Mapping Methods Using Local Ancillary Data Sources. *Cartography and Geographic Information Science*. 2010 Jan;37(3):215–28. doi:10.1559/152304010792194976
 37. Ngidi M, Mans G, McKelly D, Sogoni Z. Using a hybrid methodology of dasymetric mapping and data interpolation techniques to undertake population data (dis)aggregation in South Africa. *SA J of Geomatics*. 2017 Sep 19;6(2):232. doi:10.4314/sajg.v6i2.8
 38. Bhaduri B, Bright E, Coleman P, Urban ML. LandScan USA: a high-resolution geospatial and temporal modeling approach for population distribution and dynamics. *GeoJournal*. 2007 Oct 10;69(1–2):103–17. doi:10.1007/s10708-007-9105-9
 39. Stevens FR, Gaughan AE, Linard C, Tatem AJ. Disaggregating Census Data for Population Mapping Using Random Forests with Remotely-Sensed and Ancillary Data. Amaral LAN, editor. PLoS ONE. 2015 Feb 17;10(2):e0107042. doi:10.1371/journal.pone.0107042
 40. Reed FJ, Gaughan AE, Stevens FR, Yetman G, Sorichetta A, Tatem AJ. Gridded Population Maps Informed by Different Built Settlement Products. *Data*. 2018 Sep 4;3(3):33. doi:10.3390/data3030033
 41. Jin Y, Liu R, Fan H, Li P, Liu Y, Jia Y. Multi-Resolution Population Mapping Based on a Stepwise Downscaling Approach Using Multisource Data. *Remote Sensing*. 2023 Apr 6;15(7):1947. doi:10.3390/rs15071947
 42. Archila Bustos MF, Hall O, Nedomysl T, Ernstson U. A pixel level evaluation of five multitemporal global gridded population datasets: a case study in Sweden, 1990–2015. *Popul Environ*. 2020 Dec;42(2):255–77. doi:10.1007/s11111-020-00360-8
 43. Zanaga D, Van De Kerchove R, Daems D, De Keersmaecker W, Brockmann C, Kirches G, et al. ESA WorldCover 10 m 2021 v200 [Internet]. Zenodo; 2022 [cited 2026 Jun 2]. Available from: <https://zenodo.org/record/7254221> doi:10.5281/ZENODO.7254221
 44. Duarte D, Fonte C, Costa H, Caetano M. Thematic Comparison between ESA WorldCover 2020 Land Cover Product and a National Land Use Land Cover Map. *Land*. 2023 Feb 16;12(2):490. doi:10.3390/land12020490
 45. Osgouei PE, Sertel E, Kabadayi ME. Assessing the Accuracy of the Esa Worldcover 2021 for the Local Region of Lalapasa/Edirne, Turkey and Recommending Possible Accuracy Improvement Strategies. In: 2023 11th International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics)

[Internet]. Wuhan, China: IEEE; 2023
[cited 2026 Jun 2]. p. 1–4. Available
from:
<https://ieeexplore.ieee.org/document/10233678/>
doi:10.1109/Agro-Geoinformatics59224.2023.10233678