

Analisis arah perkembangan fisik kawasan terdampak gempa di Kabupaten Sleman berbasis *Nighttime Light*

Analysis of post-earthquake physical development in Sleman Regency based on Nighttime Light

Arifian Dwi Wijayanto¹, Nur Miladan^{1,2}, dan Mochamad Primasakti Satyagraha^{1,2}

¹Program Studi Perencanaan Wilayah dan Kota, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret, Surakarta, Indonesia

²Pusat Informasi Pembangunan Wilayah, Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat, Universitas Sebelas Maret, Surakarta, Indonesia

*Email korespondensi: arifiandwiwijaya@gamil.com

Abstrak. Pascagempa tektonik tahun 2006, Kabupaten Sleman mengalami perubahan spasial yang signifikan seiring dengan proses rehabilitasi dan rekonstruksi wilayah. Penelitian ini difokuskan pada empat kecamatan dengan dampak terbesar, yaitu Kecamatan Berbah, Kalasan, Depok, dan Prambanan. Tujuan penelitian ini adalah mengidentifikasi arah perkembangan fisik kawasan terbangun di wilayah terdampak gempa menggunakan kombinasi data citra cahaya malam (*Nighttime Light*) terharmonisasi dan pendekatan zonasi spasial *clockboard*. Analisis dilakukan secara longitudinal dengan memanfaatkan data DMSP-OLS dan VIIRS tahun 2006, 2007, 2013, 2018, dan 2023. Hasil penelitian menunjukkan bahwa arah dominan perkembangan fisik wilayah bergerak ke arah utara dan timur laut, menjauhi zona rawan gempa yang berasosiasi dengan Sesar Opak. Intensitas cahaya tertinggi teridentifikasi pada ring B dan sektor timur laut, yang mengindikasikan pola pertumbuhan spasial yang mempertimbangkan aspek keamanan dan aksesibilitas. Pendekatan kombinatif antara *Nighttime Light* dan *clockboard* terbukti efektif dalam memetakan dinamika spasial pascabencana dan berpotensi diterapkan pada wilayah rawan bencana lainnya. Temuan ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan metode analisis spasial berbasis bukti untuk mendukung perencanaan wilayah yang adaptif dan tangguh bencana.

Kata Kunci: Clockboard; Gempa bumi; Nighttime Light

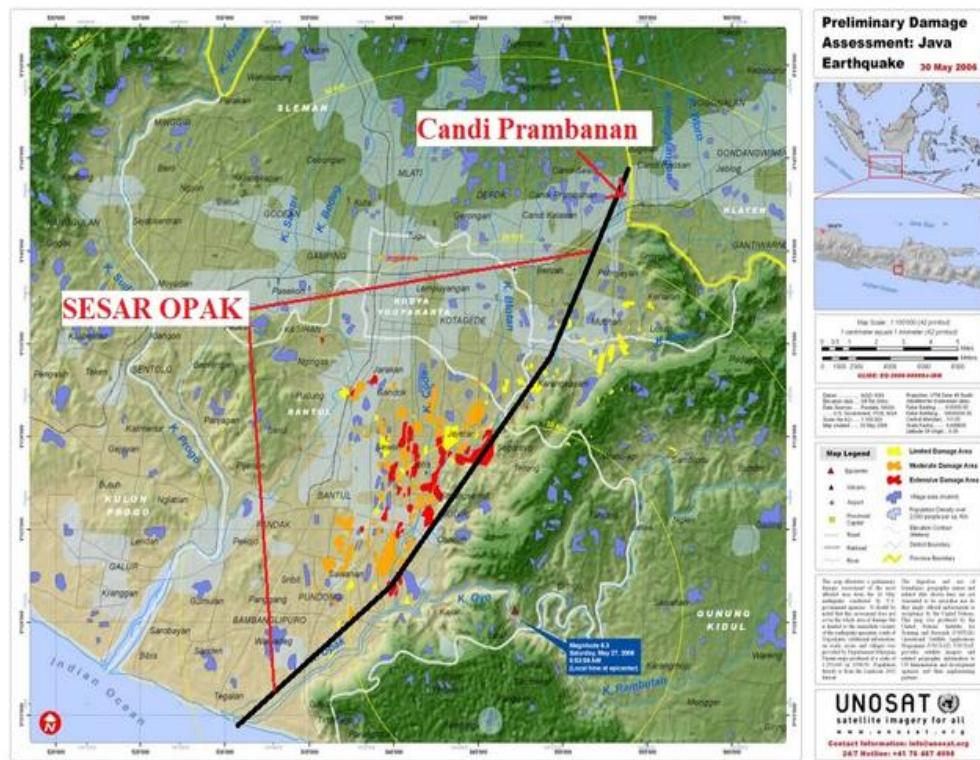
Abstract. Following the 2006 tectonic earthquake, Sleman Regency experienced significant spatial changes as part of the post-disaster recovery and reconstruction process. This study focuses on four subdistricts that were most severely affected, namely Berbah, Kalasan, Depok, and Prambanan. The objective of this study is to identify the direction of built-up area development in earthquake-affected regions by integrating harmonized Nighttime Light data with a spatial clockboard zoning approach. A longitudinal analysis was conducted using DMSP-OLS and VIIRS data from 2006, 2007, 2013, 2018, and 2023. The results indicate that the dominant direction of physical development shifted toward the north and northeast, moving away from high-risk zones associated with the Opak Fault. The highest light intensity was observed in ring B and the northeastern sector, suggesting a spatial growth pattern oriented toward safety and accessibility. The combined use of Nighttime Light imagery and the clockboard approach proved effective in capturing post-disaster spatial dynamics and shows potential for application in other disaster-prone regions. These findings contribute to the development of evidence-based spatial analysis methods to support adaptive and disaster-resilient regional planning.

Keywords: Clockboard; Earthquake; Nighttime Light

1. Pendahuluan

Kabupaten Sleman merupakan salah satu wilayah dengan perkembangan yang pesat di Daerah Istimewa Yogyakarta. Perkembangan ini didukung oleh keberadaan fasilitas pendidikan tinggi, seperti perguruan tinggi negeri dan swasta, serta infrastruktur penting seperti Bandara Adisucipto [1]. Selain itu, Kabupaten Sleman juga memiliki potensi pariwisata yang kuat, terutama dengan adanya situs-situs warisan budaya yang telah diakui dunia seperti Candi Prambanan dan Candi Ratu Boko. Berbagai faktor tersebut menjadikan kawasan ini sebagai pusat pertumbuhan regional, baik dalam aspek ekonomi, sosial, maupun tata ruang.

Namun, di balik pesatnya perkembangan tersebut, Kabupaten Sleman memiliki karakteristik geologis yang rentan terhadap bencana alam, khususnya gempa bumi. Wilayah ini terletak tidak jauh dari Sesar Opak, sebuah sesar aktif yang memanjang sepanjang aliran Sungai Opak dan menjadi pemicu gempa besar pada 27 Mei 2006 [2]. Gempa dengan kekuatan 5,9 skala Richter ini mengguncang wilayah Daerah Istimewa Yogyakarta selama 57 detik dan memberikan dampak yang signifikan, khususnya di Kabupaten Sleman bagian selatan. Kerusakan fisik yang parah, korban jiwa, serta gangguan terhadap aktivitas ekonomi dan sosial menjadikan gempa ini sebagai salah satu bencana yang paling berdampak dalam sejarah wilayah tersebut [3]. Gambar 1 menunjukkan kawasan terdampak gempa bumi tersebut.



Gambar 1. Peta dampak gempa bumi 2006 [4].

Gempa bumi besar pada tahun 2006 yang terjadi pada tanggal 27 Mei terindikasi terjadi akibat sesar opak yang menghasilkan gempa dengan kekuatan mencapai 5,9 skala Richter. Kehadiran sesar opak ini membuat daerah Yogyakarta termasuk dalam daftar daerah rentan gempa bumi, tsunami, letusan gunung berapi, banjir, dan tanah longsor (Bappenas). Sesar aktif ini terletak sepanjang aliran Sungai Opak, dengan panjang sekitar 45 km mengikuti jalur sungai tersebut. Sungai Opak bermula dari lereng Gunung Merapi dengan hilir yang berada pada Pantai Parangtritis, Bantul, Yogyakarta. Menurut peta geologi, Kabupaten Sleman, Kabupaten Bantul dan Kabupaten Klaten memiliki jarak yang cenderung dekat dengan sesar aktif Opak sehingga menjadikan kawasan tersebut mendapat dampak yang parah. Dampak yang ditimbulkan dapat dirasakan baik secara materiil maupun psikologis bagi para korban. Kerusakan materiil meliputi bangunan dan infrastruktur, sementara dampak psikologisnya berupa trauma akibat kehilangan keluarga atau kondisi lingkungan yang berubah drastis [3,5,6].

Meninjau pada gambar 1 posisi sesar opak dan gempa yang terjadi pada Kabupaten Sleman dapat disimpulkan bahwa Kecamatan Berbah, Kecamatan Kalasan, Kecamatan Depok dan Kecamatan Prambanan menjadi kecamatan yang paling terdampak dan memiliki kerugian paling tinggi pada Kabupaten Sleman terhadap kejadian gempa bumi tahun 2006 sehingga menjadi fokus wilayah pada penelitian ini.

Beberapa kecamatan yang berada dekat dengan jalur sesar, seperti Prambanan, Kalasan, Berbah, dan Depok, mengalami kerusakan cukup parah. Salah satu contoh yang paling mencolok adalah Kampung Nglepen di Desa Sumberharjo, Kecamatan Prambanan, yang mengalami fenomena tanah amblas dan retak sepanjang 300 meter yang menghasilkan ceruk selebar 20 m akibat adanya amblesan antara dua blok yang saling bergerak [7]. Situasi ini mendorong dilakukannya relokasi permukiman melalui program *resettlement*, yaitu pembangunan kembali permukiman di lokasi yang lebih aman dengan desain rumah dome sebagai hunian tahan gempa. Program ini mendapat dukungan dari pihak internasional dan menjadi model penanganan pascabencana yang melibatkan pemulihan fisik sekaligus penataan ruang ulang [8].

Bencana ini tidak hanya merusak infrastruktur, tetapi juga mengguncang aktivitas sosial dan ekonomi warga. Pemulihan kawasan pascabencana menjadi tantangan perencanaan yang tidak bisa hanya dilihat dari sisi fisik, melainkan juga dari dinamika aktivitas manusia. Dalam konteks ini, teknologi penginderaan jauh berbasis cahaya malam atau *Nighttime Light* menawarkan pendekatan baru untuk mengukur pemulihan secara fungsional [9]. Data *Nighttime light* diperoleh dari sensor yang mendekripsi pancaran cahaya buatan permukaan bumi pada malam hari, umumnya dalam spektrum tampak dan inframerah dekat. Intensitas cahaya yang terekam mencerminkan konsentrasi aktivitas manusia seperti kepadatan penduduk, kegiatan ekonomi, hingga keberadaan infrastruktur listrik [10].

Sumber utama data *Nighttime light* sejak tahun 1990-an adalah sistem DMSP-OLS yang memiliki resolusi rendah dan kecenderungan saturasi pada daerah terang. Inovasi besar terjadi sejak 2011 dengan hadirnya sensor VIIRS pada satelit NPP-Suomi, yang memiliki resolusi spasial ~750 m, jangkauan dinamis luas, dan sensitivitas tinggi terhadap cahaya rendah [11,12]. Meski begitu, perbedaan teknis antara DMSP dan VIIRS menimbulkan ketidakkonsistensi data temporal. Menjawab tantangan ini, Li et al. [13] mengembangkan *dataset harmonized* yang mengintegrasikan kedua sumber data sejak tahun 1992 melalui kalibrasi temporal dan konversi nilai. Dengan harmonisasi ini, analisis jangka panjang terhadap urbanisasi dan pemulihan wilayah terdampak bencana menjadi lebih memungkinkan.

Beberapa studi telah memanfaatkan *Nighttime light* untuk menganalisis urbanisasi, aktivitas ekonomi, hingga transformasi wilayah. Misalnya, Afrianto, F [14] menunjukkan bagaimana pembangunan Bandara Yogyakarta Internasional (YIA) tercermin dari peningkatan cahaya malam di Kulon Progo. Namun, studi terkait pemulihan pascabencana berbasis *Nighttime light* masih terbatas. Studi morfologi kota yang sudah dilakukan di Malang memang menggunakan zonasi *clockboard* berbasis *Nighttime light*, tetapi belum fokus pada konteks kebencanaan [15]. Penelitian berbasis citra satelit siang hari yang dianalisis menggunakan SIG masih lebih dominan, namun pendekatan ini kurang mampu menangkap dinamika temporal aktivitas malam hari. Artinya, belum ada pendekatan yang secara eksplisit menggabungkan data *Nighttime light harmonized* dengan zonasi spasial *clockboard* untuk menganalisis perkembangan kawasan pascabencana secara longitudinal. Dalam metode analisis data NTL (*Nighttime Light*), pendekatan yang digunakan adalah menggunakan zona-zona *clockboard*.

Pendekatan ini menganggap daerah perkotaan sebagai sebuah jam atau papan panah yang dibagi menjadi zona-zona tertentu. Dengan demikian, data NTL dapat dianalisis berdasarkan zona-zona ini untuk memahami distribusi cahaya pada malam hari di daerah perkotaan. Metode ini membantu dalam mengklasifikasikan dan memahami pola pencahayaan malam di berbagai daerah perkotaan secara lebih terperinci [16].

Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada pengembangan pendekatan kombinatif antara data *Nighttime Light harmonized* dan sistem zonasi spasial clockboard untuk menganalisis arah perkembangan area terbangun pascabencana di empat kecamatan terdampak. Pendekatan ini menilai tidak hanya pemulihan fisik, tetapi juga fungsionalitas kawasan berdasarkan intensitas aktivitas malam hari. Dalam konteks pemulihan pascabencana, keberadaan bangunan belum tentu mencerminkan aktivitas sosial-ekonomi. Dengan data *Nighttime light*, dimungkinkan untuk mendeteksi apakah suatu wilayah telah “hidup kembali” secara sosial. Di sisi lain, pendekatan *Nighttime light* juga mengatasi keterbatasan citra siang seperti gangguan awan di wilayah tropis dan kesulitan memantau aktivitas malam.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi arah perkembangan area terbangun di empat kecamatan terdampak gempa di Kabupaten Sleman, yaitu Kecamatan Berbah, Kalasan, Depok, dan Prambanan, dari tahun 2006 hingga 2023 berdasarkan analisis data *Nighttime light* dan pendekatan zonasi spasial clockboard.

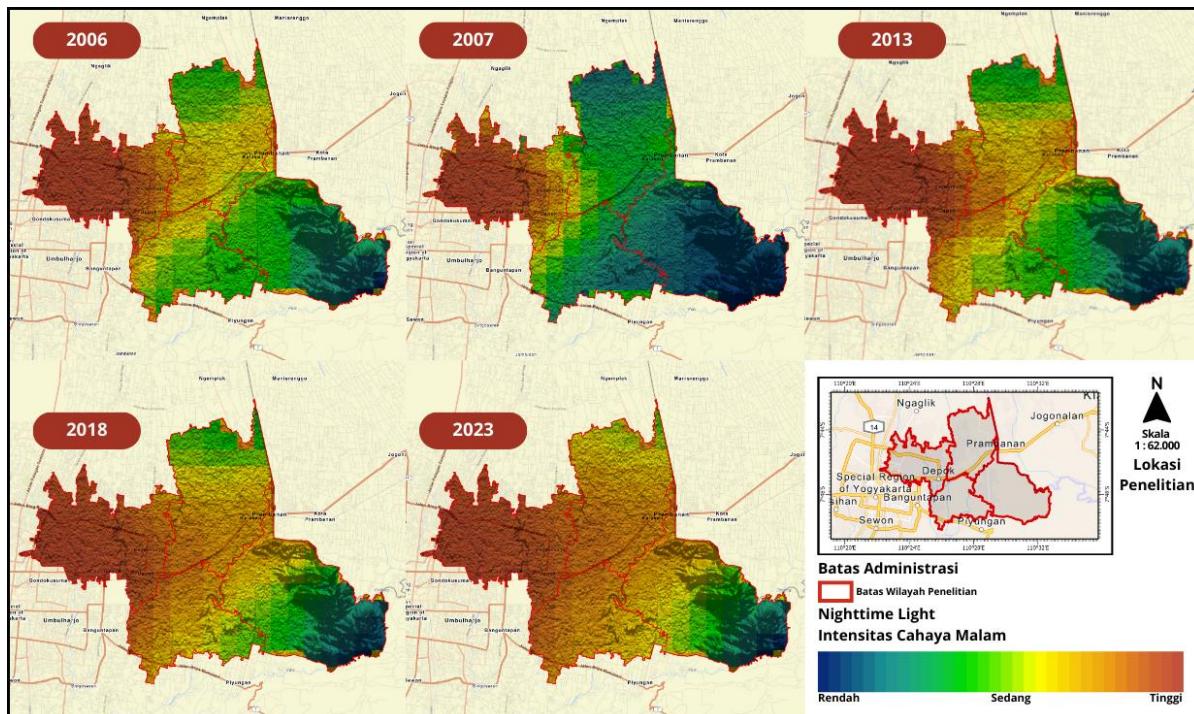
2. Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan teknik analisis spasial berbasis data penginderaan jauh. Metode yang digunakan dirancang untuk dapat direproduksi dan divalidasi melalui proses yang sistematis dan berbasis perangkat lunak sumber terbuka.

Data utama yang digunakan adalah citra *Nighttime Light Harmonized* yang telah dikalibrasi dan dikoreksi antar platform, yaitu DMSP-OLS untuk tahun 2006 dan 2007 serta VIIRS untuk tahun 2013, 2018, dan 2023. Data tersebut didapatkan melalui pengambilan dari Open Source Google berupa Google Earth Engine serta Website Lightpollution Map. Untuk menjaga konsistensi dan keterbandingan data antar waktu, digunakan dataset *Harmonized Global Nighttime light* yang telah melalui proses harmonisasi nilai radiometri dan spasial [7], sehingga mengatasi perbedaan sistem sensor antara DMSP dan VIIRS. Harmonisasi ini penting karena citra DMSP memiliki keterbatasan saturasi dan resolusi yang lebih rendah, sementara VIIRS memiliki resolusi yang lebih tinggi namun tidak tersedia untuk periode sebelum 2012. Dataset *harmonized* digunakan agar tren perubahan cahaya malam dapat dianalisis secara longitudinal tanpa bias platform.

Harmonisasi nilai radiometri dan spasial pada data *Nighttime Light* dilakukan berdasarkan prosedur dari Elvidge et al. [17], yang mencakup serangkaian *filtering* terhadap piksel yang terkontaminasi oleh cahaya matahari, bulan, awan, partikel energi tinggi, dan fenomena sesaat lainnya. Proses radiometrik menghasilkan komposit tahunan bebas *outlier* (ORCFC) melalui penyaringan statistik berbasis deviasi standar *log-radiance* [17]. Untuk harmonisasi

spasial, grid data disusun pada resolusi 15-*arcsecond* dan dilakukan koreksi latar belakang dengan mengidentifikasi area tanpa cahaya permukaan melalui filter data range dan lambda-1, kemudian dilakukan pengurangan latar belakang dengan ambang delta 0.8 untuk menghilangkan efek cahaya menyebar (*glow*). Prosedur ini memastikan keterbandingan spasial dan temporal data NTL dalam analisis longitudinal pembangunan wilayah [17]. Gambar 2 menunjukkan perubahan citra pada kurun waktu penelitian.



Gambar 2. Peta distribusi citra *harmonized NTL* tahun 2006, 2007, 2013, 2018, 2023.

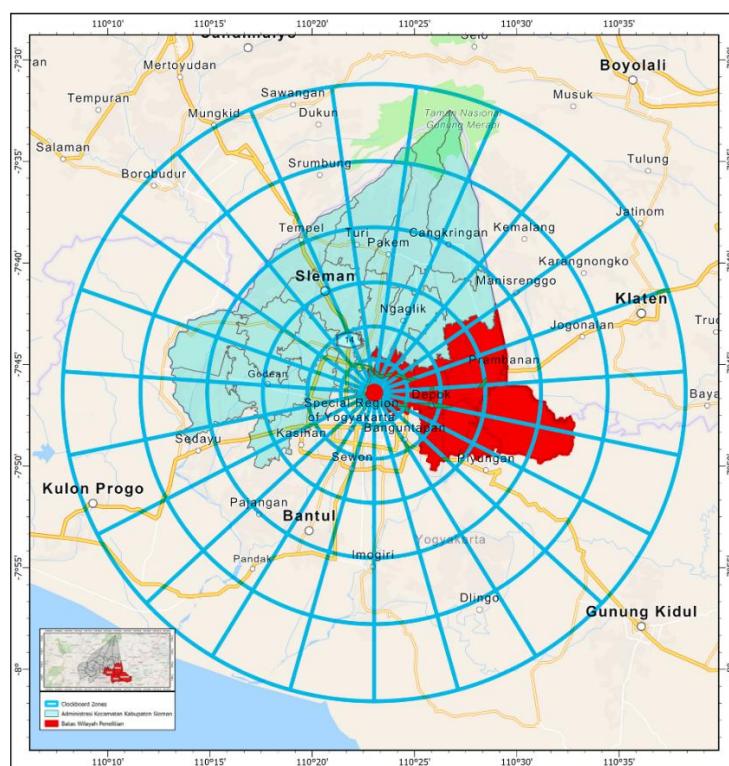
Selanjutnya, proses analisis dilakukan dalam perangkat lunak SIG, khususnya menggunakan fungsi "*Zonal Statistics*" untuk menghitung nilai rata-rata intensitas cahaya pada zona-zona yang telah ditentukan. Zonasi spasial dibuat berdasarkan metode *clockboard zones*, yaitu sistem zonasi radial yang membagi wilayah studi menjadi 12 sektor arah mata angin (setiap 30 derajat) dengan 4 lingkaran konsentris dari pusat aktivitas [16]. Pendekatan *clockboard zone* merupakan metode spasial yang mengasumsikan wilayah perkotaan sebagai struktur menyerupai papan jam (*clockboard*), di mana area tersebut dibagi menjadi beberapa sektor radial seperti jarum jam. Setiap zona merepresentasikan arah dan jarak tertentu dari titik pusat, sehingga memudahkan analisis distribusi spasial, termasuk dalam studi *Nighttime Light* (NTL). Dengan menggunakan pendekatan ini, intensitas cahaya malam hari dapat diklasifikasikan berdasarkan zona, memungkinkan identifikasi pola pencahayaan, arah pertumbuhan kota, dan tingkat aktivitas ekonomi secara lebih sistematis dan terstruktur [16].

Penetapan titik pusat dalam metode *clockboard zone* dilakukan melalui tahapan yang mempertimbangkan dimensi teoretis dan spasial secara terukur [16]. Langkah awal dilakukan

dengan mengidentifikasi kawasan dalam wilayah studi yang memiliki konsentrasi aktivitas manusia tinggi dan berlangsung secara konsisten, terutama yang berperan sebagai pusat pendidikan, perdagangan, atau pemerintahan. Pertimbangan ini mengacu pada pendekatan sistem aktivitas [18], yang menekankan bahwa pusat-pusat kota terbentuk dari interaksi sosial dan ekonomi yang intens dalam ruang tertentu.

Selanjutnya, lokasi-lokasi potensial dievaluasi berdasarkan tingkat aksesibilitas spasialnya, yaitu kemudahan koneksi terhadap jaringan transportasi utama dan keterhubungan antar zona [19]. Selain itu, pemilihan titik pusat mempertimbangkan arah pertumbuhan spasial jangka panjang yang cenderung mengikuti jalur sektoral [20], di mana ekspansi kota menjulur ke arah fungsi dominan tertentu, seperti pendidikan atau ekonomi.

Berdasarkan gabungan tiga kriteria tersebut, lokasi Universitas Negeri Yogyakarta (UNY) dipilih sebagai titik pusat *clockboard*. UNY merupakan pusat pendidikan tinggi yang tidak hanya aktif secara fungsional, tetapi juga strategis secara spasial karena terhubung dengan koridor transportasi utama (Jalan Gejayan–Kaliurang) dan berada pada arah dominan pertumbuhan wilayah studi. Dengan karakteristik tersebut, titik UNY dipandang representatif untuk dijadikan acuan dalam analisis arah perkembangan spasial kawasan terdampak menggunakan metode zonasi radial *clockboard*. Gambar 3 menunjukkan skema zonasi *clockboard* untuk kawasan penelitian.



Gambar 3. Skema zonasi clockboard Kabupaten Sleman [16].

Penerapan metode *clockboard* merujuk pada prinsip yang digunakan dalam studi geospasial urban [16], tetapi dimodifikasi untuk konteks spasial Sleman. Modifikasi yang dilakukan mencakup radius zona yang disesuaikan dengan skala spasial kabupaten dan penyesuaian jumlah ring untuk mengakomodasi cakupan *Nighttime light* secara representatif dari pusat hingga pinggiran wilayah studi.

Pada penelitian ini, analisis *Clockboard zone* digunakan untuk mengetahui pola pertumbuhan serta arah perkembangan pada lokasi penelitian. Pendekatan *clockboard zone* merupakan metode spasial yang mengasumsikan wilayah perkotaan sebagai struktur menyerupai papan jam (*clockboard*), di mana area tersebut dibagi menjadi beberapa sektor radial seperti jarum jam. Setiap zona merepresentasikan arah dan jarak tertentu dari titik pusat, sehingga memudahkan analisis distribusi spasial, termasuk dalam studi *Nighttime Light*. Dengan menggunakan pendekatan ini, intensitas cahaya malam hari dapat diklasifikasikan berdasarkan zona, memungkinkan identifikasi pola pencahayaan, arah pertumbuhan kota, dan tingkat aktivitas ekonomi secara lebih sistematis dan terstruktur [16].

Seluruh hasil zonasi berupa nilai intensitas *Nighttime light* rata-rata per zona diekstraksi dan dibandingkan secara longitudinal (tahun ke tahun) untuk mengidentifikasi dinamika arah perkembangan kawasan terbangun [16]. Untuk memudahkan interpretasi spasial, hasil intensitas cahaya diklasifikasikan ke dalam lima kelas: sangat rendah, rendah, sedang, tinggi, dan sangat tinggi. Klasifikasi ini digunakan untuk memetakan gradien perkembangan spasial dan arah dominan ekspansi wilayah terbangun. Data *Nighttime light* yang telah diproses menggunakan zonal statistic *clockboard* memiliki klasifikasi rentang nilai dari mulai 0,1 – 0,7 (Sangat Rendah), 0,71 – 3,3 (Rendah), 3,31 – 7 (Sedang), 7,1 – 17,2 (Tinggi) dan 17,21 – 41,4 (Sangat Tinggi).

3. Hasil penelitian dan pembahasan

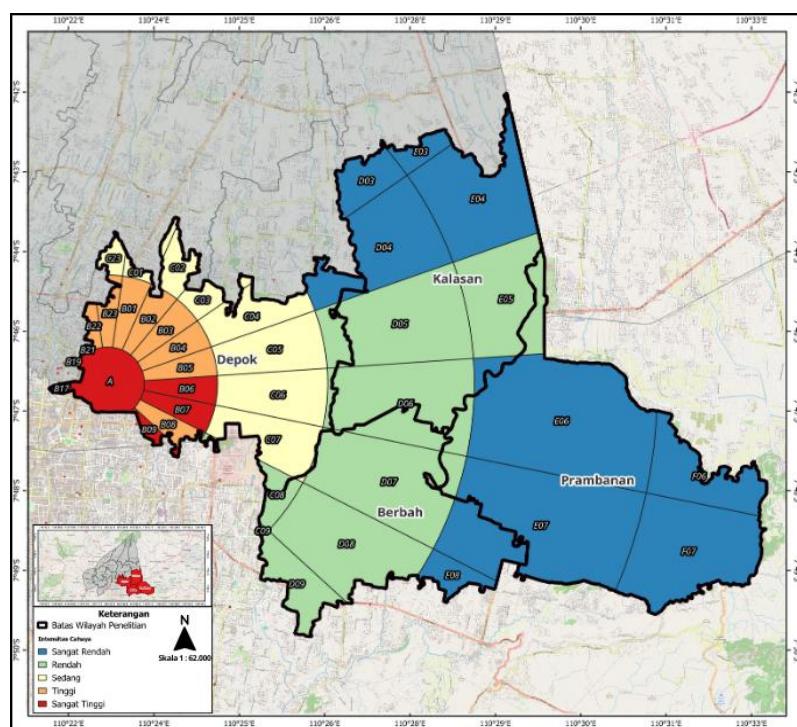
3.1. Hasil

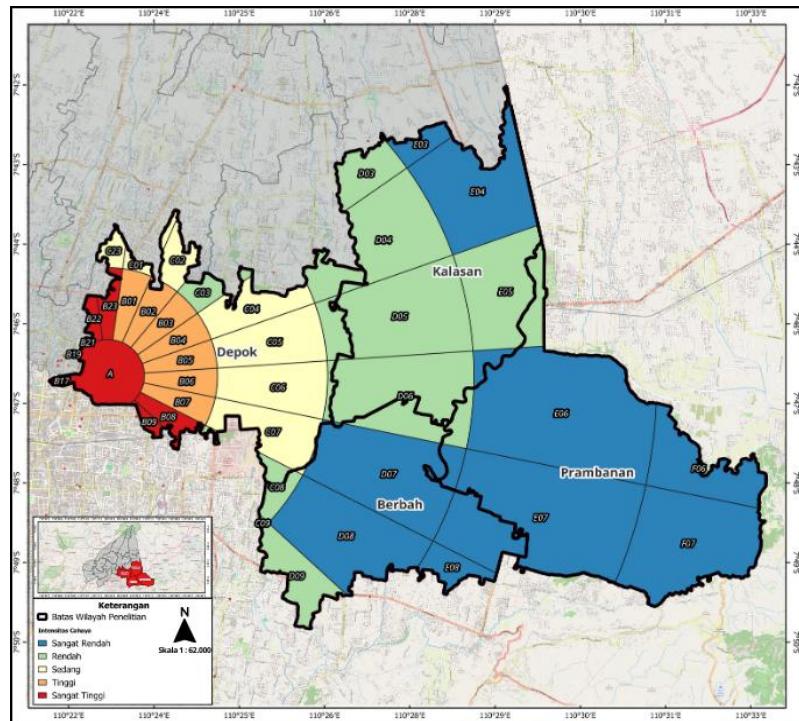
Analisis arah perkembangan area terbangun di kawasan terdampak gempa Kabupaten Sleman dilakukan dengan pendekatan berbasis data citra malam hari (*Nighttime light*) yang dikombinasikan dengan sistem zonasi spasial berbentuk *clockboard*. Zonasi ini mengelompokkan wilayah studi ke dalam 12 sektor arah mata angin dan empat ring konsentris dari titik pusat aktivitas di sekitar Universitas Negeri Yogyakarta (UNY). Pemilihan UNY sebagai pusat zonasi didasarkan pada lokasinya yang strategis, intensitas aktivitas yang tinggi, serta kesesuaian spasial dalam cakupan wilayah penelitian.

Data utama yang digunakan merupakan hasil harmonisasi citra dari sensor DMSP-OLS (untuk tahun 2006 dan 2007) dan VIIRS (untuk tahun 2013, 2018, dan 2023). Harmonisasi dilakukan agar kedua jenis data yang memiliki perbedaan teknis dapat dibandingkan secara temporal. Setelah melalui proses klasifikasi, nilai intensitas cahaya malam dibagi ke dalam lima kategori: sangat rendah, rendah, sedang, tinggi, dan sangat tinggi. Nilai intensitas *Nighttime light* ini selanjutnya dianalisis menggunakan metode zonal statistic berbasis zonasi *clockboard*.

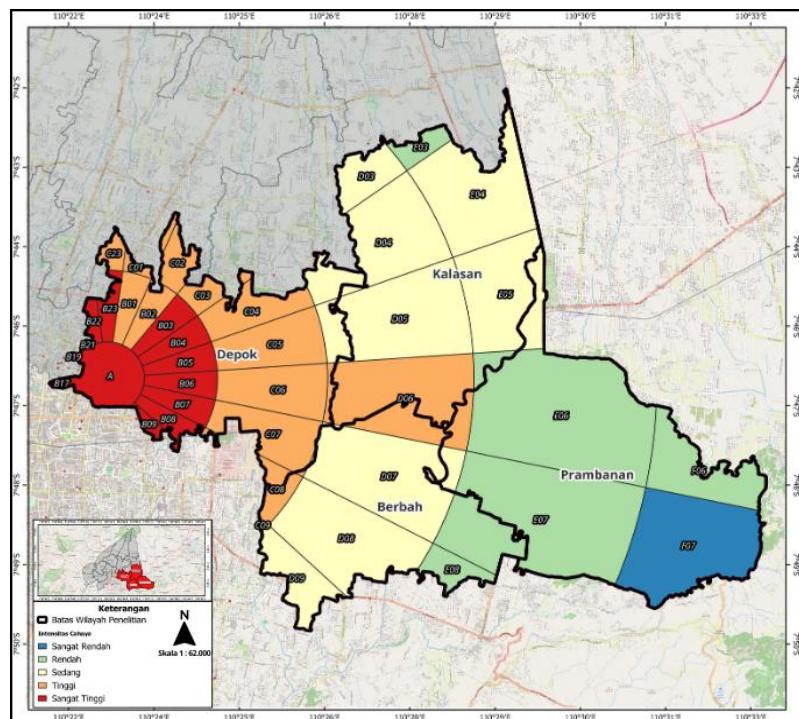
Hasil analisis menunjukkan bahwa setelah gempa bumi tahun 2006, terjadi penurunan intensitas cahaya malam yang signifikan terutama di zona-zona yang berada dekat dengan Sesar Opak. Zona-zona di bagian tenggara wilayah studi, seperti Kecamatan Prambanan dan Kalasan, menunjukkan penurunan aktivitas yang tercermin dari rendahnya nilai rata-rata intensitas cahaya malam pada tahun 2006 dan 2007. Namun demikian, sejak tahun 2013 hingga 2023, terjadi tren peningkatan intensitas yang konsisten, terutama pada ring B dan C yang mengelilingi zona pusat (ring A). Peningkatan ini mengindikasikan adanya proses pemulihan serta pertumbuhan kembali kegiatan sosial dan ekonomi di wilayah yang dinilai lebih aman secara geologis.

Secara spasial, intensitas cahaya malam tertinggi ditemukan di ring B, kemudian diikuti secara berurutan oleh ring C, D, E, dan F. Sementara itu, ring A sebagai pusat zonasi menunjukkan pertumbuhan yang lebih lambat. Fenomena ini mengindikasikan desentralisasi aktivitas spasial, di mana pertumbuhan kawasan tidak lagi terkonsentrasi di pusat kota, melainkan menyebar ke wilayah-wilayah pinggiran yang lebih terbuka dan memiliki potensi pengembangan yang lebih tinggi. Sementara itu, area yang berdekatan dengan sesar Opak tidak mengalami perkembangan yang signifikan dalam periode yang sama. Baru pada tahun 2023, daerah di sekitar sesar Opak mulai menunjukkan peningkatan aktivitas cahaya malam, yang mengindikasikan adanya pemulihan serta perkembangan infrastruktur di wilayah tersebut. Gambar 4 hingga Gambar 8 menunjukkan perkembangan intensitas cahaya dari tahun 2006 hingga 2023.

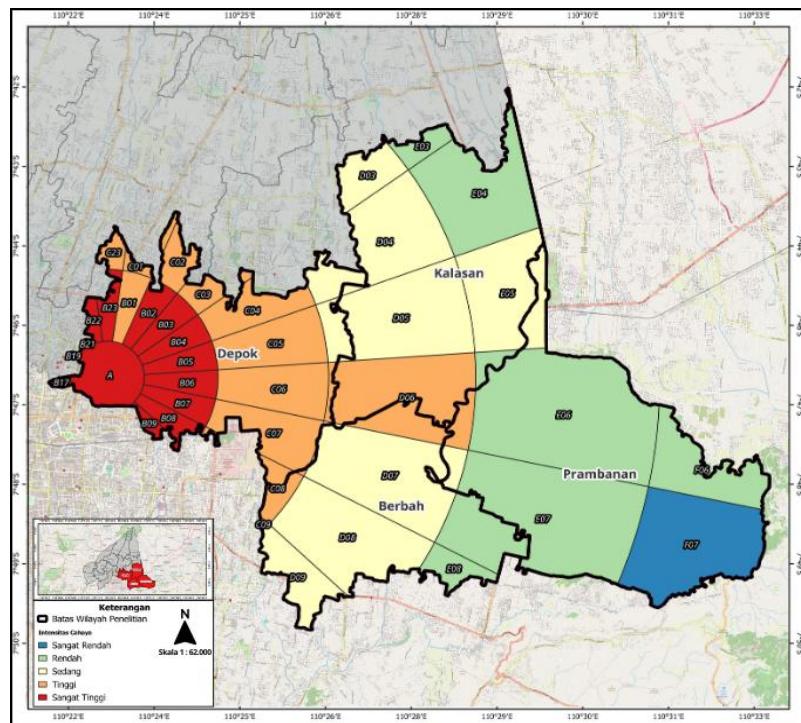




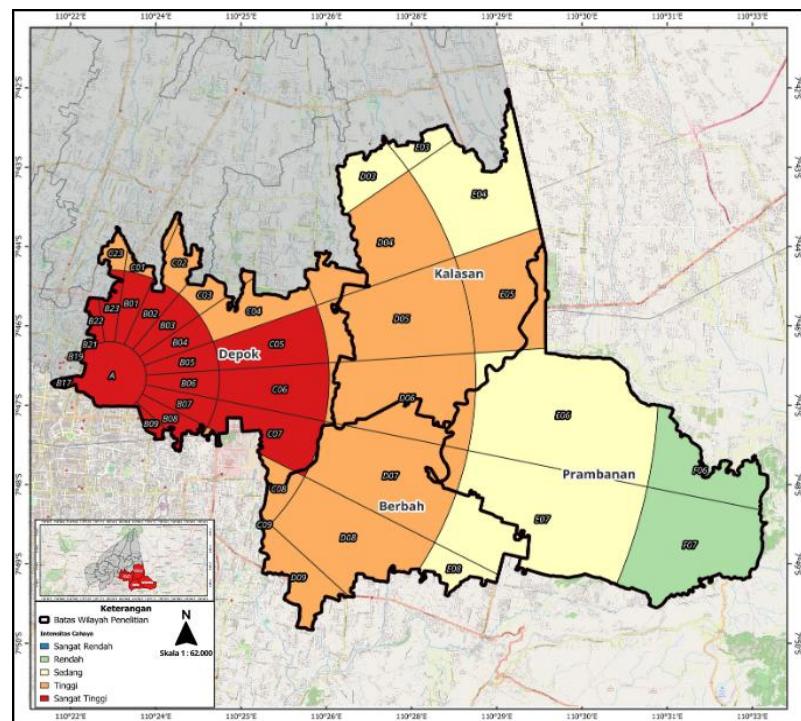
Gambar 5. Peta *clockboard* tahun 2007.



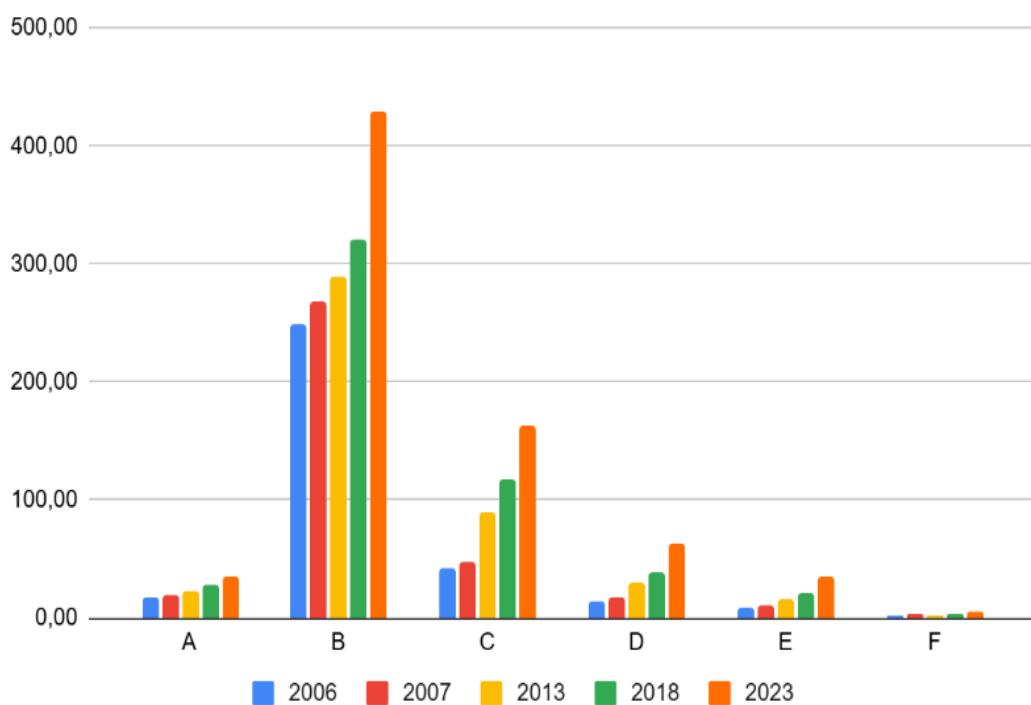
Gambar 6. Peta *clockboard* tahun 2013.



Gambar 7. Peta clockboard tahun 2018.



Gambar 8. Peta clockboard tahun 2023.



Gambar 9. Jumlah intensitas cahaya dalam *clustered column*.

Gambar 9 menunjukkan grafik agregasi intensitas *Nighttime light* untuk masing-masing ring dari tahun 2006 hingga 2023. Peningkatan signifikan terjadi di ring B dan C. Ring B secara konsisten menunjukkan nilai tertinggi, dengan lonjakan paling tajam antara tahun 2013 dan 2023. Sebaliknya, ring A mengalami pertumbuhan yang cenderung datar. Pola ini menunjukkan bahwa perkembangan kawasan cenderung lebih pesat di sekeliling pusat kota daripada di pusat itu sendiri.

Faktor-faktor yang berkontribusi terhadap pola ini meliputi keterbatasan ruang di pusat kota, dorongan pembangunan infrastruktur baru di kawasan pinggiran, serta munculnya pusat-pusat aktivitas baru seperti area permukiman hasil relokasi dan kawasan pendidikan serta area komersial baru. Sebagian besar kawasan yang mendekati Sesar Opak masih menunjukkan klasifikasi intensitas rendah hingga sedang, menandakan bahwa proses pemulihan di zona ini belum berjalan optimal atau masih terbatas pada fungsi tertentu.

Interpretasi ilmiah dari hasil ini menunjukkan bahwa intensitas cahaya malam dapat digunakan sebagai indikator yang valid untuk menilai dinamika spasial dan sosial ekonomi kawasan terdampak bencana. Intensitas tinggi berkorelasi dengan lokasi yang memiliki aksesibilitas tinggi, fungsi strategis, serta persepsi keamanan yang lebih besar terhadap risiko gempa. Sebaliknya, intensitas rendah yang konsisten dapat menandakan stagnasi pembangunan atau bahkan potensi alih fungsi lahan yang sebelumnya produktif menjadi tidak aktif.

Jika dibandingkan dengan studi oleh Firman Afrianto dan Graha di Kota Malang [15], terdapat kemiripan dalam hal dominasi pertumbuhan di ring B dan C. Namun, perbedaan mencolok terletak pada penyebabnya. Pertumbuhan di Malang dipengaruhi oleh tekanan urbanisasi yang bersifat alami dan historis, sementara di Sleman, arah pertumbuhan juga sangat dipengaruhi dengan adanya faktor geologis. Konteks ini menunjukkan bahwa bencana alam memberikan tekanan spasial yang menghasilkan morfologi wilayah yang khas, dan perlu dipahami sebagai bagian penting dalam perencanaan ruang berbasis risiko.

Secara keseluruhan, pendekatan kombinatif antara citra *Nighttime light* dan zonasi clockboard dalam penelitian ini berhasil memberikan gambaran arah perkembangan spasial wilayah terdampak gempa secara longitudinal. Pendekatan ini memungkinkan visualisasi arah, intensitas, dan persebaran spasial dalam satu kesatuan analisis, yang relevan bagi perencanaan wilayah pascabencana. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menjelaskan dinamika fisik pascagempa, tetapi juga memberikan kerangka analitis bagi pengambilan kebijakan pembangunan wilayah yang lebih adaptif dan tangguh terhadap risiko bencana.

3.2. Pembahasan

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi arah perkembangan area terbangun di Kabupaten Sleman pascagempa tahun 2006 dengan menggunakan data citra malam hari (*Nighttime Light*) dan pendekatan zonasi spasial clockboard. Hasil analisis menunjukkan bahwa arah pertumbuhan spasial tidak lagi terkonsentrasi di pusat kota, melainkan bergeser ke arah utara dan timur laut dari pusat zonasi. Pola ini selaras dengan kondisi geologis wilayah, di mana bagian selatan dan tenggara Sleman yang dekat dengan jalur Sesar Opak memiliki tingkat kerentanan yang lebih tinggi terhadap bahaya gempa bumi. Oleh karena itu, pertumbuhan wilayah cenderung menghindari zona rawan dan berkembang menuju kawasan yang dianggap lebih aman.

Temuan ini merefleksikan bahwa masyarakat dan aktivitas pembangunan secara umum beradaptasi terhadap risiko bencana dengan memilih lokasi yang lebih stabil secara geologis. Ini menjadi bukti bahwa arah perkembangan spasial pascagempa bukanlah suatu proses acak, tetapi sangat dipengaruhi oleh persepsi risiko, ketersediaan ruang, serta aksesibilitas terhadap fasilitas dan infrastruktur. Dengan demikian, hasil penelitian ini berkaitan erat dengan pertanyaan utama dalam pendahuluan, yaitu bagaimana arah perkembangan wilayah pascagempa dapat dianalisis secara spasial dan temporal melalui pendekatan berbasis data penginderaan jauh.

Secara ilmiah, peningkatan intensitas cahaya malam terbukti sebagai indikator valid terhadap perubahan aktivitas sosial dan ekonomi suatu wilayah. Citra *Nighttime light* yang menunjukkan peningkatan intensitas di ring B dan C memberikan gambaran bahwa pusat pertumbuhan baru muncul di zona-zona tersebut. Wilayah seperti Kecamatan Depok dan sekitarnya mengalami peningkatan aktivitas yang signifikan karena keberadaan fasilitas pendidikan, pusat komersial, serta jaringan transportasi utama.

Selain itu, karakter spasial Sleman yang kini menunjukkan pola perkembangan multipusat juga diperkuat oleh faktor-faktor fungsional. Kawasan sekitar Universitas Negeri Yogyakarta (UNY), Universitas Gadjah Mada (UGM), dan pusat perbelanjaan seperti Hartono Mall menjadi episentrum baru aktivitas masyarakat. Indikator perkembangan fisik suatu wilayah bukan hanya pada bertambahnya bangunan, melainkan juga peningkatan intensitas dan keragaman aktivitas [21]. Dalam konteks ini, data *Nighttime light* memberikan gambaran kuantitatif tentang bagaimana peningkatan intensitas cahaya malam mencerminkan perubahan fungsi ruang, terutama dari kawasan penyanga menjadi pusat aktivitas baru.

Wilayah yang sebelumnya terkena dampak signifikan, seperti zona dekat Sesar Opak, tetap menunjukkan intensitas cahaya yang rendah dalam jangka panjang. Hal ini mengindikasikan keterbatasan dalam proses pemulihan, serta rendahnya preferensi masyarakat untuk kembali dan membangun kembali di zona rawan. Ini menegaskan pentingnya perencanaan berbasis risiko, di mana wilayah dengan kerentanan tinggi sebaiknya dialokasikan untuk fungsi non-permanen atau ruang terbuka. Strategi ini penting untuk mencegah terulangnya kerugian akibat bencana di masa depan.

Jika dibandingkan dengan studi Firman Afrianto dan Graha [15] di Kota Malang, terdapat kemiripan dalam pola pertumbuhan yang dominan pada ring luar. Namun, perbedaan mendasar terletak pada faktor penyebabnya. Pertumbuhan di Malang bersifat alami, didorong oleh tekanan urbanisasi dan ekspansi pusat kota lama, sementara pertumbuhan di Sleman bersifat adaptif sebagai respons terhadap tekanan geologis. Ini menegaskan bahwa dinamika pascabencana menciptakan pola morfologi kota yang khas, yang berbeda dari proses urbanisasi konvensional. Oleh karena itu, penting bagi perencanaan wilayah untuk mempertimbangkan dinamika risiko sebagai faktor yang memengaruhi struktur ruang jangka panjang.

4. Kesimpulan

Gempa bumi yang melanda Kabupaten Sleman pada tahun 2006 tidak hanya menimbulkan dampak fisik yang signifikan, tetapi juga mendorong transformasi spasial yang berlangsung dalam jangka panjang. Memahami arah perkembangan area terbangun pascagempa menjadi penting sebagai dasar penyusunan kebijakan penataan ruang berbasis risiko.

Dari hasil analisis dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa arah perkembangan area terbangun di Sleman cenderung bergeser ke arah utara dan timur laut, menjauhi zona rawan gempa seperti jalur Sesar Opak. Hal ini menunjukkan adanya respons spasial masyarakat terhadap risiko, di mana pembangunan dan aktivitas sosial-ekonomi lebih terkonsentrasi di zona yang dianggap aman, memiliki koneksi tinggi, serta ditunjang oleh fasilitas publik seperti institusi pendidikan dan pusat komersial. Temuan ini tidak hanya memperkuat teori pertumbuhan kota multipusat dan sektoral, tetapi juga mengonfirmasi bahwa persepsi risiko menjadi faktor utama dalam pembentukan struktur ruang baru pascabencana.

Secara keseluruhan, penelitian ini mempertegas bahwa bencana tidak hanya menjadi pemicu disrupsi, tetapi juga dapat menjadi momentum untuk transformasi tata ruang yang lebih

adaptif. Arah perkembangan kawasan pascabencana dipengaruhi oleh kombinasi antara risiko geologis, struktur sosial, serta dinamika pembangunan wilayah. Oleh karena itu, pemanfaatan data spasial seperti *Nighttime Light*, dikombinasikan dengan pemahaman terhadap struktur keruangan dan kebijakan ruang, menjadi pendekatan yang relevan untuk memahami dan mengarahkan pertumbuhan wilayah secara berkelanjutan dan tangguh terhadap bencana. Pemetaan arah perkembangan fisik menggunakan *Nighttime light* dapat digunakan sebagai indikator dini untuk memantau pola migrasi spasial pascabencana, serta menilai efektivitas program *resettlement* dan pemulihan infrastruktur. Hasil penelitian ini dapat dimanfaatkan dalam penyusunan Zonasi Rencana Tata Ruang, rencana pemulihan bencana, dan integrasi data cahaya malam (*Nighttime light*) dalam perencanaan wilayah memberikan peluang strategis bagi pemerintah daerah untuk mengembangkan sistem pemantauan spasial yang responsif dan berbasis bukti.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk memanfaatkan data *Nighttime Light* terbaru dari satelit VIIRS karena memiliki resolusi spasial lebih tinggi dan mampu merekam perubahan spasial dengan lebih akurat, khususnya pada skala lokal. Data VIIRS juga mengurangi bias saturasi cahaya yang umum terjadi pada *dataset* DMSP-OLS, sehingga lebih ideal untuk memantau dinamika urbanisasi secara presisi dan terkini.

Selain itu, integrasi *Nighttime light* dengan data sosial-ekonomi (seperti kepadatan penduduk, akses listrik, dan IPM) serta citra satelit siang hari (seperti Landsat atau Sentinel) akan memperkaya analisis spasial dan memberikan pemahaman lebih mendalam mengenai dinamika pembangunan. Kombinasi ketiga jenis data ini memungkinkan interpretasi yang lebih komprehensif terhadap arah pertumbuhan wilayah, ketimpangan, dan perubahan penggunaan lahan secara kontekstual dan empiris.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih peneliti ucapan kepada tim peneliti Kajian Evaluatif Proses Resettlement dan Urbanisasi Pasca Bencana Gempa Bumi di Yogyakarta dan sekitarnya berbasis Teknologi Aplikasi *Nighttime Light* (NTL) yang telah bekerja sama untuk melakukan penelitian dengan teknologi baru di Indonesia. Selain itu juga, instansi pemerintah Kabupaten Sleman terutama Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) yang telah memberikan gambaran mengenai kejadian gempa tahun 2006 dan memberikan masukan terhadap penelitian ini.

Referensi

- [1] Listikarini DI, Harlan E. The Impact of Yogyakarta International Airport (YIA) Development on the Economy in the Special Region of Yogyakarta: Input-Output Analysis. EKO-REGIONAL: Jurnal Pembangunan Ekonomi Wilayah 2024;19. <https://doi.org/10.32424/er.v19i2.15038>.
- [2] Zulkifli R, Muhardi M, Perdhana R. Analisis Struktur Geologi Bawah Permukaan di Kabupaten Sleman dan Sekitarnya. JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi) 2024;10:162–73. <https://doi.org/10.23960/jge.v10i2.326>.

[3] Trisilia MS, Sugiyanto C, Rifa'i A. Impact of natural disasters on mental health and welfare: the case of the 2006 Yogyakarta earthquake. *Discover Psychology* 2024;4. <https://doi.org/10.1007/s44202-023-00112-3>.

[4] UNITAR-UNOSAT. UNOSAT: The United Nations Satellite Centre. <Https://UnitarOrg/Sustainable-Development-Goals/United-Nations-Satellite-Centre-UNOSAT> 2024. <https://unitar.org/sustainable-development-goals/united-nations-satellite-centre-UNOSAT>.

[5] Heanoy EZ, Brown NR. Impact of Natural Disasters on Mental Health: Evidence and Implications. *Healthcare* 2024;12:1812. <https://doi.org/10.3390/healthcare12181812>.

[6] First JM. Post-traumatic stress and depression following disaster: examining the mediating role of disaster resilience. *Front Public Health* 2024;12. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1272909>.

[7] Badan Pengelola Geopark Gunung Sewu. Rayapan Tanah Nglepen. Geopark Jogja 2023.

[8] Asgary A, Naeemi P, Ganguli N, Tofighi M, Attarian K, Fioretto T. Road to Resettlement: Understanding Post-disaster Relocation and Resettlement Challenges and Complexities Through a Serious Game. *International Journal of Disaster Risk Science* 2024;15:521–35. <https://doi.org/10.1007/s13753-024-00580-8>.

[9] Yuan Y, Wang C, Liu S, Chen Z, Ma X, Li W, et al. The Changes in Nighttime Lights Caused by the Turkey–Syria Earthquake Using NOAA-20 VIIRS Day/Night Band Data. *Remote Sens (Basel)* 2023;15. <https://doi.org/10.3390/rs15133438>.

[10] Zheng Q, Seto KC, Zhou Y, You S, Weng Q. Nighttime light remote sensing for urban applications: Progress, challenges, and prospects. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 2023;202:125–41. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2023.05.028>.

[11] Li S, Cao X, Zhao C, Jie N, Liu L, Chen X, et al. Developing a Pixel-Scale Corrected Nighttime Light Dataset (PCNL, 1992–2021) Combining DMSP-OLS and NPP-VIIRS. *Remote Sens (Basel)* 2023;15:3925. <https://doi.org/10.3390/rs15163925>.

[12] Chen Z, Yu B, Yang C, Zhou Y, Yao S, Qian X, et al. An extended time series (2000–2018) of global NPP-VIIRS-like nighttime light data from a cross-sensor calibration. *Earth Syst Sci Data* 2021;13:889–906. <https://doi.org/10.5194/essd-13-889-2021>.

[13] Li X, Zhou Y, Zhao M, Zhao X. A harmonized global nighttime light dataset 1992–2018. *Sci Data* 2020;7:168. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0510-y>.

[14] Afrianto F, Fathiyaturahma A, Purwono N. Nighttime Light Imagery Analysis: Big Data Approaches for Urban Planning. *Citieslab* 2024;4.

[15] Afrianto F, Rendra Graha DT. Morfologi Kota Malang: Sebuah Tinjauan dari Nighttime Light Satellite Imagery. *Jurnal Plano Buana* 2023;3:68–76. <https://doi.org/10.36456/jpb.v3i2.7002>.

[16] Lovelace R, Tennekes M, Carlino D. ClockBoard: A Zoning System for Urban Analysis. *Journal of Spatial Information Science* 2022:63–85. <https://doi.org/10.5311/JOSIS.2022.24.172>.

- [17] Elvidge CD, Baugh K, Zhizhin M, Hsu FC, Ghosh T. VIIRS Night-Time Lights. *Int J Remote Sens* 2017;38:5860–79. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1342050>.
- [18] Yunus HS. *Struktur Tata Ruang Kota*. Yogyakarta: Pustaka Pelajar; 2004.
- [19] Black J. *Urban Transport: Planning Theory and Practice*. London: Croom Helm; 1981.
- [20] Hoyt H. *Structure and Growth of Residential Neighborhoods in American Cities*. Washington DC: Federal Housing Administration; 1939.
- [21] Branch MC. *Comprehensive Planning for the 21st Century: General Theory and Principles*. Westport: Praeger Publisher; 1998.