Journal of Geomatics Engineering, Technology, and Science
e-ISSN 2988-532X p-ISSN 2830-1811, Vol. 5 No. 1 (September 2026), 23-35
https://doi.org/10.51967/gets.v5i1.89

Pusat Permintaan dan Cakupan Pelayanan: Penapisan Indikatif Lokasi *Fuel Terminal* Pertamax di Lamongan dengan Metode *Center of Gravity*

Demand Centre and Service Coverage: Indicative Screening of a Pertamax Fuel Terminal Location in Lamongan Using the Center of Gravity Method

Octafi Maris Dharmawan[a], Umi Yuliatin[a]

[a] Program Studi Logistik Minyak dan Gas, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jl. Gajah Mada No. 38, Cepu, Blora, Jawa Tengah 58315, Indonesia

ABSTRACT

Fuel terminal siting must reconcile the spatial distribution of demand with service-distance limits, yet applied Center of Gravity (CoG) studies rarely test data consistency or service coverage. This study provides an indicative screening of a Pertamax fuel terminal location serving Lamongan and neighbouring regencies. A route-planning list of 42 filling stations was reconciled with a coordinate table, and 41 stations (97.89% of the demand weight) were matched. The demand-weighted CoG, a weighted geometric median, and a coverage-constrained minisum optimum were computed from Haversine distances and compared with the Brengkok candidate from a preliminary study. Sensitivity was tested for service radii of 20–35 km and for alternative station sets. The CoG (6.975249° S, 112.169048° E) yields a lower weighted mean distance than Brengkok (17.36 versus 19.46 km) but leaves two stations beyond 30 km, as does the geometric median. No single site can cover all stations below 28.17 km, whereas Brengkok covers all of them from 29.06 km. Within 30 km, the constrained optimum (6.968567° S, 112.189021° E) covers all 41 stations at a weighted mean of 17.72 km, 7.21 km from Brengkok, and outperformed Brengkok in every leave-one-out and bootstrap resample. Demand centrality and service coverage are therefore complementary criteria that must be evaluated jointly. Brengkok is feasible but not optimal, and the constrained optimum marks a search zone that still requires confirmation of demand units, road-network distances, and a site feasibility assessment.

ARTICLE HISTORY

Received: October 31, 2026
Accepted: November 08, 2026
Published: November 10, 2026

KEYWORDS

Center of Gravity Method, Fuel Terminal Siting, Weighted Geometric Median, Service-Radius Coverage, Constrained Location Optimization

CORRESPONDING AUTHOR

Umi Yuliatin
Email: umi.yuliatin@esdm.go.id

How to cite: Dharmawan, O. M., Yuliatin, U. (2026). Pusat Permintaan dan Cakupan Pelayanan: Penapisan Indikatif Lokasi Fuel Terminal Pertamax di Lamongan dengan Metode Center of Gravity. *Journal of Geomatics Engineering, Technology, and Science*, 5(*1*), 23-35. https://doi.org/10.51967/gets.v5i1.89

1. PENDAHULUAN

Distribusi Bahan Bakar Minyak (BBM) dari terminal ke Stasiun Pengisian Bahan Bakar Umum (SPBU) merupakan mata rantai hilir yang menentukan ketersediaan produk di tingkat konsumen. Terminal BBM berfungsi menerima, menyimpan, dan menyalurkan produk ke pasar pengguna akhir, sehingga kebijakan logistik terpadu menuntut efisiensi biaya, ketepatan waktu dan jumlah pengiriman, serta ketersediaan produk (Mawandi et al., 2023). Biaya angkut pada jaringan hilir minyak bumi lazim dimodelkan sebanding dengan jarak antarsimpul (Öztürkoğlu & Lawal, 2016), dan biaya transportasi merupakan porsi besar dari total biaya pengisian ulang SPBU oleh armada mobil tangki (Carotenuto et al.,

CONTACT Umi Yuliatin umi.yuliatin@esdm.go.id

© 2026 The Author(s). Published by Politeknik Pertanian Negeri Samarinda.
This is Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits, unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

2024; Li et al., 2025). Satu *fuel terminal* di Indonesia dapat melayani ratusan SPBU lintas provinsi dengan pembagian zona layanan (Anggraeni et al., 2023), sedangkan perencanaan rute dari terminal BBM terpadu menuju SPBU masih menjadi objek optimasi tersendiri (Rosyida et al., 2026). Dengan demikian, posisi terminal terhadap sebaran SPBU menentukan panjang lintasan seluruh rantai distribusi di bawahnya.

Persoalan tersebut nyata pada distribusi Pertamax di Kabupaten Lamongan dan wilayah perbatasannya dengan Kabupaten Tuban, Gresik, dan Bojonegoro. Lembar kerja perencanaan rute yang dianalisis memuat 42 SPBU tujuan, dan kolom jarak terminal eksisting pada lembar yang sama mencatat jarak 2,00–51,70 km dengan 20 dari 42 SPBU berjarak lebih dari 30 km. Dokumen kajian awal kemudian mengusulkan satu kandidat *fuel terminal* baru di Lamongan. Oleh karena itu, diperlukan penilaian yang dapat ditelusuri mengenai apakah kandidat tersebut benar-benar dekat dengan pusat permintaan Pertamax sekaligus menjangkau seluruh SPBU tujuan dalam batas jarak pelayanan.

Metode *Center of Gravity* (CoG) banyak digunakan untuk merumuskan alternatif lokasi fasilitas karena hanya memerlukan koordinat titik permintaan dan bobotnya. Bersama algoritma Weiszfeld, CoG termasuk metode yang lazim dipakai pada masalah lokasi fasilitas tunggal, dan pada kasus multifasilitas CoG digunakan untuk menentukan lokasi pusat distribusi di setiap klaster permintaan (Wu et al., 2022). Di Indonesia, CoG telah diterapkan pada fasilitas intermoda jalur rel Makassar–Garongkong dengan pembandingan skenario berbasis *generalized cost* (Azmi et al., 2022), gudang eksternal di Surabaya (Soesilo et al., 2020), gudang PT ABC di Karawang yang disertai perbandingan biaya operasional (Erlangga et al., 2024), serta pusat distribusi baru di Jawa Timur (Dewi et al., 2024). Di luar Indonesia, CoG digunakan untuk menentukan lokasi industri garmen di Bangladesh (Iqbal et al., 2023), dibandingkan dengan model *p-median* untuk pemilihan lokasi fasilitas tunggal (Hanif et al., 2021), serta dipadukan dengan peta area layanan dan kendala nyata dalam latihan perencanaan lokasi pusat distribusi (Riley & Sweeney, 2024).

Pada distribusi produk minyak bumi, prinsip CoG juga dijalankan melalui analisis *greenfield* (*greenfield analysis*, GFA). GFA adalah teknik penentuan lokasi optimal untuk fasilitas baru berdasarkan lokasi pelanggan, jarak ke pelanggan, dan volume permintaan, dan dalam perangkat perencanaan rantai pasok teknik ini juga disebut analisis pusat gravitasi (Jaffal et al., 2025). Dengan kata lain, GFA merupakan implementasi CoG berbobot permintaan dalam perangkat lunak simulasi. Dalam studi distribusi BBM di Anbar, titik GFA berbiaya terendah akhirnya tidak dipilih karena kendala praktis dan regulasi, sehingga keputusan jatuh pada salah satu kandidat yang diusulkan perusahaan (Jaffal et al., 2025). Temuan tersebut menunjukkan bahwa titik hasil perhitungan CoG dan lokasi yang layak dibangun dapat berbeda, sehingga hasil CoG perlu dibandingkan secara eksplisit dengan kandidat tapak yang tersedia.

Keterbatasan CoG perlu diperhatikan pada tiga aspek. Pertama, rata-rata koordinat berbobot tidak selalu sama dengan median geometrik berbobot yang meminimumkan jumlah jarak berbobot; keduanya hanya berimpit pada kasus khusus (Sohn, 2019), sedangkan median geometrik lazim dicari secara iteratif dengan algoritma Weiszfeld (Baskar, 2021; Demir, 2022). Kedua, jarak garis lurus berbeda dari jarak jaringan jalan dan waktu tempuh; pilihan ukuran jarak dapat mengubah hasil model lokasi (Buczkowska et al., 2019), dan tingkat kerumitan jaringan jalan turut memengaruhi lokasi optimal (Zhao et al., 2019), sehingga sebagian studi menggunakan jarak dari layanan peta daring dalam model lokasi berkendala jarak layanan (Palomino et al., 2022). Ketiga, model *minisum* tidak menjamin setiap titik permintaan berada dalam batas jarak layanan. Persyaratan tersebut dirumuskan secara eksplisit dalam model *covering*, yang menetapkan jarak atau waktu layanan sebagai standar sebelum lokasi dicari (Church & ReVelle, 1974; Murray, 2016), dalam model *location-allocation* berbatas jarak (Arana-Jiménez et al., 2020; Gokbayrak & Kocaman, 2017), serta dalam model lokasi berkapasitas yang membatasi jarak layanan setiap fasilitas (Atta, 2025). Jarak maksimum yang sekecil mungkin untuk satu fasilitas dicari melalui masalah *minimax* atau *1-center* (Elzinga & Hearn, 1972). Model *covering* juga telah diterapkan di Indonesia untuk merancang jaringan fasilitas yang menjangkau seluruh potensi permintaan dalam satu provinsi (Sari et al., 2021).

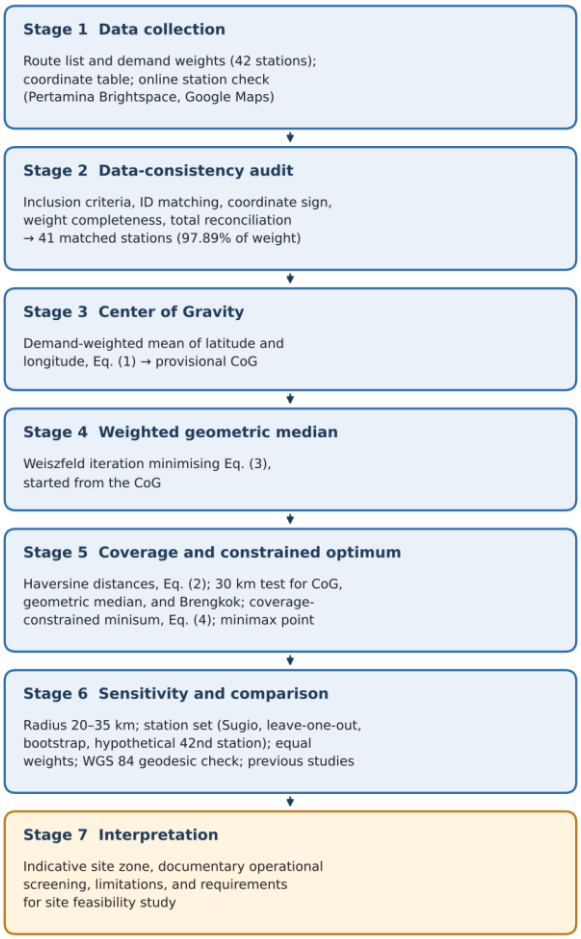
Studi CoG terapan di Indonesia yang ditelaah umumnya melaporkan satu koordinat sebagai lokasi usulan dan sebagian mengaitkannya langsung dengan penghematan biaya (Dewi et al., 2024; Erlangga et al., 2024; Soesilo et al., 2020). Kesenjangan penelitian (*research gap*) yang diisi oleh studi ini adalah belum adanya pelaporan eksplisit mengenai keterulangan perhitungan, kelengkapan data titik permintaan, pemenuhan radius pelayanan, dan kepekaan hasil terhadap ambang radius maupun himpunan titik permintaan pada penentuan lokasi *fuel terminal* berbasis CoG. Celah tersebut penting karena kesalahan satuan atau koordinat pada data SPBU langsung menggeser titik hasil, sementara batas radius pelayanan

merupakan kendala operasional yang tidak tercakup dalam rumus CoG. Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada empat hal: (1) audit konsistensi data sebelum CoG dihitung, (2) pemisahan eksplisit antara pusat permintaan dan kriteria cakupan radius pelayanan pada himpunan SPBU yang sama, (3) penurunan titik optimum berkendala cakupan sebagai pembanding independen bagi CoG, median geometrik berbobot, dan kandidat tapak, serta (4) uji sensitivitas terhadap ambang radius, komposisi himpunan SPBU, bobot, dan model bumi.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan menyusun penapisan indikatif lokasi *fuel terminal* Pertamax di Lamongan dan sekitarnya, menilai konsistensi data pembentuknya, serta membandingkan cakupan geografis hasil perhitungan dengan kandidat yang telah diusulkan. Kandidat yang dievaluasi adalah tapak di Desa Brengkok, Kecamatan Brondong, Kabupaten Lamongan (6,905863° LS; 112,205649° BT) yang diidentifikasi dalam dokumen kajian awal. Kandidat ini dibandingkan dengan tiga titik hasil perhitungan, yaitu CoG, median geometrik berbobot, dan titik optimum berkendala cakupan. Pertanyaan penelitian yang diajukan adalah (1) sejauh mana koordinat dan data permintaan yang tersedia mendukung hasil lokasi, (2) apakah pusat permintaan dan kandidat Brengkok memenuhi radius pelayanan 30 km untuk seluruh titik yang dapat dianalisis, dan (3) seberapa stabil jawaban tersebut terhadap perubahan ambang radius dan himpunan SPBU. Hasil penelitian diharapkan menjadi dasar penyaringan awal yang dapat ditelusuri sebelum kandidat lokasi dievaluasi lebih lanjut dengan jarak jaringan jalan, biaya distribusi, dan studi kelayakan tapak.

2. METODE

Penelitian dilaksanakan dalam tujuh tahap yang disajikan pada Gambar 1. Tahap pertama dan kedua mengumpulkan serta mengaudit data SPBU; tahap ketiga dan keempat menghitung CoG dan median geometrik berbobot; tahap kelima menguji cakupan radius dan mencari titik optimum berkendala cakupan; tahap keenam menguji sensitivitas hasil terhadap ambang radius, himpunan SPBU, bobot, dan model bumi serta membandingkannya dengan studi terdahulu. Tahap ketujuh menafsirkan kedudukan kandidat lokasi beserta syarat kajian lanjutannya, sehingga setiap hasil dapat ditelusuri kembali ke data dan persamaan yang digunakan.



Gambar 1. Tahapan Penelitian
Figure 1. Research Stages
Sumber/*source: Authors (2026).*

2.1. Desain Penelitian, Bahan, dan Alat

Penelitian ini menggunakan desain kuantitatif eksploratif berbasis data geospasial sekunder. Bahan penelitian berasal dari tiga sumber. Pertama, lembar kerja (*workbook*) perencanaan rute distribusi yang memuat nomor dan bobot permintaan 42 SPBU tujuan. Kedua, dokumen kajian awal penentuan lokasi *fuel terminal* yang memuat tabel koordinat dan alamat SPBU, tabel permintaan, koordinat CoG kajian awal (6,904° LS; 112,206° BT), serta koordinat kandidat Brengkok (6,905863° LS; 112,205649° BT). Ketiga, data lokasi SPBU pada situs resmi Pertamina Brightspace dan Google Maps yang digunakan sebagai bahan pendukung untuk menelusuri identitas dan koordinat SPBU yang tidak berpasangan. Koordinat kandidat Brengkok diambil apa adanya dari dokumen kajian awal dan digunakan sebagai titik uji tetap: koordinat ini tidak dihitung ulang, tidak menjadi masukan CoG, dan hanya dievaluasi dengan kriteria yang sama seperti titik hasil perhitungan.

Populasi penelitian didefinisikan sebagai himpunan pelayanan yang direncanakan, bukan inventaris seluruh SPBU di wilayah. Kriteria inklusi adalah (1) SPBU

tercantum sebagai simpul tujuan pada lembar rute *workbook*, (2) memiliki nomor SPBU dan bobot permintaan positif, dan, khusus untuk analisis spasial, (3) nomornya dapat dipasangkan dengan tepat satu koordinat pada tabel kajian awal. SPBU yang tidak memenuhi kriteria ketiga tetap dicatat, tetapi dikeluarkan dari perhitungan spasial. Seluruh SPBU yang memenuhi kriteria digunakan sebagai populasi sekaligus sampel (sampel jenuh), sehingga tidak dilakukan pemilihan sampel secara acak. Alamat dalam tabel mencakup Kabupaten Lamongan, Tuban, Gresik, dan Bojonegoro. Karena himpunan ini mengikuti rencana pelayanan, hasil penelitian berlaku bersyarat pada himpunan tersebut, dan kepekaannya terhadap perubahan himpunan diuji secara tersendiri.

Perhitungan utama dilakukan dengan perangkat lunak *spreadsheet*, kemudian diperiksa ulang dengan skrip numerik terpisah untuk CoG, jarak Haversine, iterasi Weiszfeld, optimasi berkendala, dan uji sensitivitas. Seluruh koordinat dinyatakan dalam lintang dan bujur geodetik datum WGS 84 sebagaimana ditampilkan oleh sumbernya. Peta sebaran pada Gambar 2 disusun dalam sistem koordinat WGS 84/UTM zona 49S dengan batas administrasi geoBoundaries. Parameter analisis yang digunakan adalah jari-jari bumi rata-rata R = 6.371,0088 km, radius pelayanan acuan 30 km dengan rentang uji 20–35 km, tampilan koordinat enam angka desimal, dan kriteria henti iterasi Weiszfeld perpindahan titik < 1 mm.

Nomor SPBU digunakan sebagai kunci pencocokan. Spasi di awal atau akhir, spasi nonstandar, dan tanda koma di akhir nomor dihapus untuk keperluan pencocokan, sementara nilai asli dipertahankan pada lembar sumber. Sebanyak 41 nomor dapat dicocokkan, sedangkan SPBU 53.622.12 yang tercatat sebagai entri ke-42 tidak memiliki pasangan koordinat. Titik tersebut dikeluarkan dari analisis spasial dan tidak diberi koordinat nol. Data masukan lengkap disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Masukan Koordinat dan Bobot SPBU

Table 1. Coordinate and Weight Inputs of the Filling Stations

No.	Station ID	Latitude (°)	Longitude (°E)	Weight
1	54.622.17	−6,906208	112,221690	13,55
2	54.623.13	−6,934510	112,096858	17,14
3	54.623.17	−6,899070	112,080024	14,29
4	54.623.02	−6,898977	112,155298	9,24
5	54.622.01	−6,868302	112,282073	8,75
6	53.623.23	−6,897650	112,115464	9,24
7	54.623.27	−6,961210	112,104352	12,01
8	54.623.05	−6,905500	112,072332	12,01
9	54.623.10	−7,029872	112,161771	10,66
10	54.622.03	−7,088146	112,291759	8,75
11	54.622.16	−6,859370	112,333326	8,75
12	54.623.01	−6,988026	112,124807	12,00
13	54.623.34	−7,063493	112,159417	10,66
14	54.622.05	−7,108489	112,162507	8,75
15	54.622.09	−7,095062	112,189286	8,75
16	54.622.04	−7,100854	112,208295	8,75
17	54.621.24	−7,136467	112,083810	8,80
18	54.622.21	−7,091110	112,340822	8,75
19	54.622.11	−7,141915	112,162836	8,74
20	54.622.29	−7,095880	112,341165	8,74
21	54.611.43	−6,961778	112,384767	8,77
22	55.622.31	−7,095679	112,291975	8,74
23	53.623.21	−6,887690	112,040418	9,25
24	54.623.16	−6,820213	111,966398	9,25
25	53.623.22	−6,829667	111,996105	9,25
26	54.623.12	−6,851158	112,020158	9,25
27	54.623.33	−6,865773	111,945522	9,25
28	54.623.26	−6,881952	112,004814	9,25
29	54.622.10	−6,872190	112,422191	8,75
30	54.611.14	−6,887188	112,448134	8,77
31	54.622.19	−7,094741	112,367458	8,75
32	54.622.07	−7,094377	112,379553	8,75
33	54.621.14	−7,129063	112,121153	8,81
34	53.623.24	−7,029185	112,095375	12,00
35	54.623.32	−7,050545	112,015582	9,24
36	54.621.10	−7,121606	112,102414	8,80
37	54.622.13	−7,039031	112,277955	8,75
38	54.622.18	−7,004945	112,361078	8,75
39	54.623.31	−6,882630	111,975746	10,32
40	54.623.18	−6,872575	112,054195	14,30
41	53.622.27	−6,868441	112,356205	8,75
42	53.622.12	n/a	n/a	8,74
	Total			414,82

Sumber/*source: Route-planning workbook (weights) and preliminary-study coordinate table; station 42 excluded from spatial analysis (no coordinate).*

Kolom permintaan (*demand*) pada *workbook* berisi nilai 8,74–17,14 tanpa label satuan dan periode. Namun, lembar rute pada *workbook* mencantumkan kapasitas mobil tangki 24 kL dan tabel rute menjumlahkan nilai permintaan yang sama sebagai muatan kendaraan; lembar lain pada *workbook* yang sama juga memuat angka 24 kL. Bukti internal ini mendukung interpretasi permintaan sebagai volume dalam kL untuk satu siklus layanan yang dimodelkan, meskipun durasi siklus, tahun observasi, dan produk per baris belum terkonfirmasi. Karena itu, analisis menggunakan bobot positif dengan asumsi kesebandingan antar-SPBU; konversi dengan faktor yang sama untuk seluruh bobot tidak mengubah CoG.

Penelusuran daring pada 30 Oktober 2026 menemukan SPBU 5462212 di Desa Sugio, Kecamatan Sugio, Kabupaten Lamongan pada situs resmi Pertamina Brightspace (Pertamina Patra Niaga, n.d.). Google Maps menampilkan SPBU Pertamina Sugio pada lintang −7,155457° dan bujur 112,2984842° (Google, n.d.). Nomor tersebut identik dengan entri 53.622.12 pada segmen tengah dan akhir (622.12), dan

nomor 54.622.12 tidak muncul pada daftar *workbook*. Namun, perbedaan awalan tidak dapat dijadikan bukti salah ketik karena Tabel 1 memuat lima SPBU berawalan 53 (53.623.21, 53.623.22, 53.623.23, 53.623.24, dan 53.622.27) dan satu SPBU berawalan 55 (55.622.31) yang seluruhnya memiliki pasangan koordinat sah. Oleh karena itu, identitas entri ke-42 diperlakukan sebagai belum terverifikasi. Koordinat Sugio hanya digunakan dalam skenario bersyarat, terpisah dari analisis utama 41 pasangan data asli, dan ketergantungan hasil pada entri ini juga diuji dengan menempatkan titik ke-42 secara hipotetis di seluruh wilayah studi.

2.2. Pemeriksaan Konsistensi Data

Pemeriksaan meliputi jumlah dan keunikan nomor SPBU, ketersediaan koordinat, tanda lintang, kelengkapan bobot, serta kesesuaian total tabel dengan narasi dokumen kajian awal. Permintaan dalam tabel dokumen kajian awal tidak digabungkan dengan permintaan *workbook* karena kedua seri belum memiliki hubungan satuan dan periode yang terverifikasi. Perhitungan dengan angka tabel kajian awal dilakukan hanya sebagai pemeriksaan diagnostik, bukan sebagai estimasi kebutuhan tahunan yang telah tervalidasi.

2.3. Perhitungan *Center of Gravity*

CoG dihitung sebagai rata-rata koordinat berbobot menggunakan Persamaan (1). Simbol X menyatakan bujur, Y menyatakan lintang, dan D adalah bobot permintaan *workbook* yang diasumsikan sebanding. Lintang selatan disimpan sebagai nilai negatif, sehingga penulisan 6,975249° LS setara dengan lintang bertanda −6,975249°. Penjumlahan dilakukan atas 41 SPBU yang memiliki pasangan koordinat dan bobot lengkap.

$$X = \frac{\sum_{i=1}^{n} D_i X_i}{\sum_{i=1}^{n} D_i},\ Y = \frac{\sum_{i=1}^{n} D_i Y_i}{\sum_{i=1}^{n} D_i} \quad (1)$$

dengan X dan Y adalah bujur dan lintang CoG (derajat); X_i dan Y_i adalah bujur dan lintang SPBU ke-i; D_i adalah bobot permintaan SPBU ke-i.

Perhitungan dilakukan dengan rumus *spreadsheet* dan diperiksa ulang secara numerik terpisah tanpa menggunakan keluaran POM-QM baru. Koordinat dihitung dengan presisi sumber dan ditampilkan sampai enam angka desimal; banyaknya desimal menunjukkan presisi perhitungan, bukan ketelitian survei posisi. Rata-rata lintang dan bujur merupakan pendekatan regional, sehingga hasilnya tidak diperlakukan sebagai optimasi geodesik maupun optimasi jaringan jalan.

2.4. Evaluasi Cakupan Geografis

Jarak antara setiap titik uji dan setiap SPBU dihitung dengan formula Haversine pada Persamaan (2), yaitu jarak lingkaran besar pada permukaan bola berjari-jari rata-rata 6.371,0088 km, sebagaimana lazim digunakan untuk model lokasi berbasis lintang-bujur (Baskar, 2021). Formula ini dipilih karena jarak Euclidean pada koordinat derajat kurang akurat dibandingkan metode jarak bola (Angdresey et al., 2023). Jarak yang dihasilkan digunakan untuk mengevaluasi radius geografis dan dibedakan dari panjang rute jalan, waktu tempuh, maupun jarak pulang-pergi. Untuk menguji pengaruh model bumi, seluruh jarak juga dihitung ulang sebagai jarak geodesik pada elipsoid WGS 84 dengan algoritma Karney (2013).

$$d = 2R \arcsin\left(\sqrt{\sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) + \cos\varphi_1 \cos\varphi_2 \sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right)}\right) \quad (2)$$

dengan d adalah jarak lingkaran besar (km); R = 6.371,0088 km; φ adalah lintang dan λ adalah bujur dalam radian; Δ menyatakan selisih antara dua titik.

Pemenuhan radius dihitung untuk himpunan 41 SPBU yang sama pada setiap titik uji, dan himpunan pelayanan tidak dipilih ulang setelah titik dihitung agar perbandingan dapat ditelusuri. Kandidat Brengkok hanya berjarak sekitar 0,21 km dari CoG kajian awal, sehingga kandidat tersebut tampaknya diidentifikasi di sekitar titik CoG lama yang tidak dapat direproduksi. Untuk menghindari penalaran sirkular, Brengkok tidak digunakan untuk memvalidasi CoG mana pun. Kedudukannya hanya dinilai dengan kriteria cakupan dan rata-rata jarak berbobot yang dihitung dari 41 pasangan data asli, terlepas dari cara kandidat itu dipilih, lalu dibandingkan dengan titik optimum berkendala dan titik *minimax* yang diturunkan langsung dari data SPBU.

Ambang 30 km diperlakukan sebagai parameter perencanaan, bukan hasil optimasi. Dalam model *covering*, jarak atau waktu layanan memang ditetapkan lebih dahulu oleh perencana sebagai standar layanan (Church & ReVelle, 1974; Murray, 2016), sehingga nilainya perlu dinyatakan dan diuji kepekaannya. Radius acuan 30 km digunakan dengan dua pertimbangan. Pertama, pada data perencanaan yang sama, 20 dari 42 SPBU berjarak lebih dari 30 km dari terminal eksisting, sehingga ambang ini menggambarkan kebutuhan perbaikan jangkauan yang melatarbelakangi usulan terminal baru. Kedua, dengan faktor sirkuitas jalan rata-rata yang dilaporkan antarnegara sebesar 1,12–2,10 (Ballou et al., 2002; Veres, 2025), jarak garis lurus 30 km setara dengan sekitar 34–63 km jarak jalan. Karena belum tersedia standar normatif radius pelayanan *fuel terminal* yang dapat dirujuk dalam data penelitian, simpulan penelitian ini dinyatakan bersyarat pada ambang radius dan diuji pada rentang 20–35 km.

2.5. Pembanding Median Geometrik Berbobot

Untuk menguji sejauh mana CoG mendekati titik *minisum*, median geometrik berbobot dihitung dengan meminimumkan Persamaan (3) menggunakan iterasi Weiszfeld yang diawali dari titik CoG (Baskar, 2021; Demir, 2022). Iterasi dilakukan pada proyeksi lokal ekuirektangular yang berpusat di lintang CoG, kemudian seluruh jarak hasil dievaluasi kembali dengan Persamaan (2). Pada wilayah studi yang bentangnya sekitar 60 km, pendekatan proyeksi lokal ini memadai untuk keperluan pembandingan.

$$F(p) = \sum_{i=1}^{n} D_i d(p, P_i) \quad (3)$$

Di mana $F(p)$: jumlah jarak berbobot titik p ke seluruh SPBU; $d(p, P_i)$: jarak titik p ke SPBU ke-i.

2.6. Optimum Berkendala Cakupan dan Uji Sensitivitas

Untuk mencari titik terbaik yang tetap memenuhi radius pelayanan, penelitian ini menyelesaikan masalah *minisum* berkendala cakupan pada Persamaan (4), yaitu meminimumkan jumlah jarak berbobot dengan syarat setiap SPBU berada dalam radius T dari titik terminal. Formulasi ini merupakan bentuk fasilitas tunggal dari model lokasi berbatas jarak layanan (Gokbayrak & Kocaman, 2017).

$$\min_{p} F(p), \; d(p, P_i) \leq T, \; \forall i = 1, \ldots, n \quad (4)$$

dengan T adalah radius pelayanan (km) dan simbol lain sesuai Persamaan (2) dan (3). Pada bidang lokal, fungsi tujuan bersifat konveks dan daerah layak merupakan irisan lingkaran berjari-jari T di sekitar setiap SPBU, sehingga optimum bersifat tunggal bila daerah layak tidak kosong. Solusi dicari dengan pencarian *grid* berjarak 0,002° (sekitar 220 m) untuk menentukan titik awal, kemudian diperhalus dengan *sequential least squares programming* (SLSQP) dan diverifikasi dengan pencarian satu dimensi di sepanjang lingkaran kendala yang aktif. Radius terkecil yang masih memungkinkan satu titik mencakup seluruh SPBU ditentukan dari masalah *minimax* atau *1-center* (Elzinga & Hearn, 1972); di bawah radius tersebut, Persamaan (4) tidak memiliki solusi layak.

Uji sensitivitas dilakukan pada empat dimensi. Pertama, ambang radius divariasikan 20–35 km dengan langkah 1 km untuk menghitung jumlah SPBU yang tercakup oleh setiap titik uji serta titik optimum berkendala pada setiap ambang. Kedua, himpunan SPBU diuji melalui (a) skenario 42 SPBU dengan menambahkan SPBU Sugio, (b) *leave-one-out* sebanyak 41 kali dengan mengeluarkan satu SPBU setiap kali, (c) *bootstrap* 1.000 kali dengan pengambilan ulang 41 SPBU secara acak dengan pengembalian, dan (d) penempatan hipotetis titik ke-42 berbobot 8,74 pada 3.600 posisi *grid* di dalam kotak batas sebaran 41 SPBU. Ketiga, bobot permintaan diganti dengan bobot seragam untuk menguji ketergantungan hasil pada satuan permintaan yang belum terkonfirmasi. Keempat, jarak Haversine dibandingkan dengan jarak geodesik elipsoid WGS 84. Pada setiap skenario, CoG dan titik optimum berkendala dihitung ulang, sedangkan koordinat Brengkok tetap.

2.7. Penapisan Kelayakan Operasional

Penapisan kelayakan operasional dipisahkan dari perhitungan spasial dan dilakukan secara dokumenter terhadap informasi tapak dalam dokumen kajian awal. Enam kriteria digunakan, yaitu akses jalan untuk mobil tangki, luas dan kondisi lahan, kesesuaian penggunaan lahan, risiko lingkungan dan jarak penyangga, keselamatan fasilitas, serta keterhubungan pasokan. Kriteria lingkungan dan jarak penyangga mengacu pada kajian kesesuaian lahan fasilitas BBM yang menunjukkan bahwa kriteria tersebut dapat menentukan apakah suatu lokasi berada di wilayah yang dapat diterima (Ajman et al., 2021). Setiap kriteria diberi salah satu dari tiga status: terverifikasi, bila didukung pengukuran atau dokumen teknis untuk koordinat kandidat yang sama; indikatif, bila hanya didukung tangkapan layar, narasi, atau data dengan titik asal yang berbeda; dan belum tersedia. Kandidat dinyatakan lolos penapisan operasional hanya bila seluruh kriteria berstatus terverifikasi; bila tidak, kandidat diperlakukan sebagai kandidat pembanding yang masih memerlukan studi kelayakan tapak.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Rekonsiliasi Data SPBU dan Permintaan

Daftar *workbook* memuat 42 SPBU dengan total bobot 414,82, sedangkan koordinat tersedia untuk 41 SPBU dengan total bobot 406,08. Bobot SPBU yang belum memiliki koordinat sebesar 8,74 atau 2,11% dari total. Meskipun cakupan bobot mencapai 97,89%, hasil 41 SPBU tidak dapat dilabeli sebagai hasil lengkap 42 SPBU. Ringkasan pemeriksaan disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Ringkasan Pemeriksaan Konsistensi Data

Table 2. Summary of the Data-Consistency Check

Component	Check result	Implication
Station list	42 entries in workbook; 41 in coordinate table	Coordinate and identity of 53.622.12 must be completed
Workbook weights	Total 414,82; spatially available 406,08	Probably kL per service cycle; period and product unconfirmed
Preliminary-study demand table	Literal sum 849.686,39	Differs from narrative total 102.495,95

Component	Check result	Implication
2026 projection	Narrative states 118.155,55	Projection basis and station inputs cannot be reconciled
CoG in preliminary study	6,904° S; 112,206° E	Not reproduced by either available weight series; 0,21 km from Brengkok

Sumber/*source*: *Data processing results (2026).*

Penjumlahan literal 41 nilai permintaan pada tabel kajian awal menghasilkan 849.686,39, sedangkan narasi menyatakan 102.495,95 kL/tahun untuk 2025, sehingga selisihnya mencapai 747.190,44. Perbedaan ini tidak dikoreksi dengan menghapus digit atau mengalikan faktor tertentu karena bukti pembetulannya belum tersedia. Total dan proyeksi tahunan tersebut belum digunakan untuk menentukan kapasitas terminal.

3.2. Hasil Perhitungan CoG Sementara

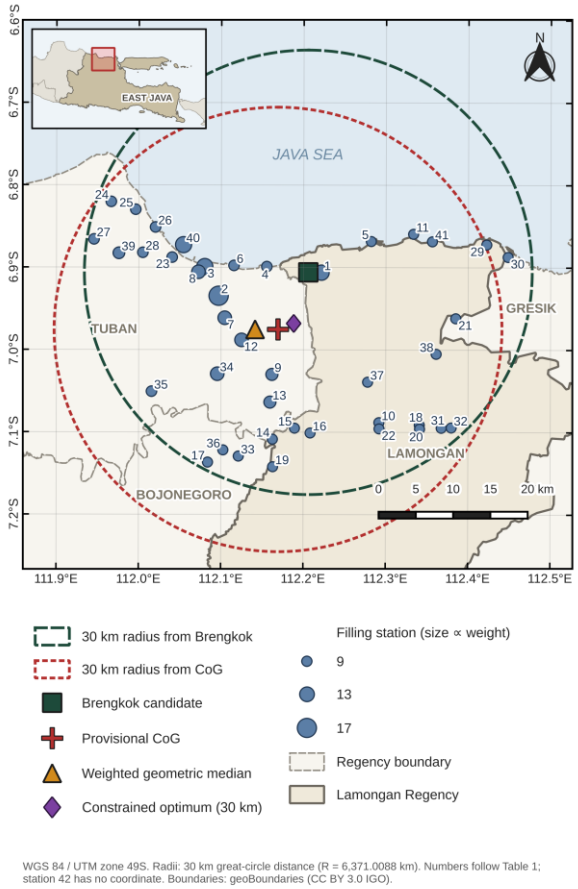
Dengan bobot *workbook* pada 41 SPBU, jumlah hasil kali lintang dan bobot adalah −2.832,509280, sedangkan jumlah hasil kali bujur dan bobot adalah 45.549,607172. Masing-masing dibagi dengan jumlah bobot 406,08, sehingga diperoleh lintang −6,975249° dan bujur 112,169048°. Perbandingan koordinat seluruh titik yang dianalisis disajikan pada Tabel 3, dan sebarannya diperlihatkan pada Gambar 2.

Tabel 3. Perbandingan Koordinat dan Dasar Perhitungan

Table 3. Comparison of Coordinates and Computational Basis

Point	n	Latitude (°)	Longitude (°E)	Basis
Provisional CoG	41	−6,975249	112,169048	Workbook weights
Diagnostic CoG	41	−6,974135	112,182437	Preliminary-study demand table as is
Weighted geometric median	41	−6,975198	112,141208	Workbook weights; Weiszfeld
Constrained optimum (T = 30 km)	41	−6,968567	112,189021	Workbook weights; Eq. (4)
Minimax point (*1-center*)	41	−6,919345	112,194972	Minimum radius 28,17 km; 1,91 km from Brengkok
Conditional CoG	42	−6,979046	112,171776	Adds Sugio station (8,74)
CoG in preliminary study	42	−6,904000	112,206000	Stated in preliminary study; not reproduced
Brengkok candidate	n/a	−6,905863	112,205649	Candidate in preliminary study; fixed test point

Sumber/*source: Data processing results (2026).*



Gambar 2. Sebaran Koordinat 41 SPBU, CoG Sementara, Median Geometrik Berbobot, Titik Optimum Berkendala, dan Kandidat Brengkok

Figure 2. Distribution of 41 Filling Stations, Provisional CoG, Weighted Geometric Median, Constrained Optimum, and the Brengkok Candidate

Sumber/*source: Data processing (2026); not a site-feasibility map.*

Perhitungan diagnostik menggunakan angka permintaan tabel kajian awal menghasilkan titik 6,974135° LS dan 112,182437° BT. Hasil tersebut juga berbeda dari CoG yang tercantum dalam dokumen kajian awal, sehingga digunakan untuk menunjukkan bahwa keluaran lama belum dapat diulang dari data yang tersedia, bukan untuk menetapkan seri bobot yang benar. CoG sementara berjarak sekitar 8,91 km dari CoG dalam dokumen kajian awal dan 8,71 km dari kandidat Brengkok. Selisih tersebut terlalu besar untuk dijelaskan sebagai pergeseran akibat pembulatan tiga desimal.

CoG kajian awal (6,904° LS; 112,206° BT) hanya berjarak sekitar 0,21 km dari kandidat Brengkok. Kedekatan ini berarti Brengkok mewarisi dasar perhitungan yang tidak dapat direproduksi, sehingga kedudukannya tidak dapat dibenarkan dengan argumen bahwa ia merupakan pusat permintaan. Karena itu, perbandingan dalam penelitian ini dibuat tidak sirkular dengan tiga cara: Brengkok hanya diperlakukan sebagai titik uji eksogen; kriteria penilaiannya dihitung dari 41 pasangan data asli tanpa menggunakan CoG lama; dan pembanding utamanya adalah titik optimum berkendala dan titik *minimax* yang diturunkan langsung dari data SPBU. Tabel 3 menunjukkan bahwa Brengkok berjarak 1,91 km dari titik *minimax* yang radius minimumnya 28,17 km, sehingga cakupan penuh Brengkok lebih tepat dijelaskan oleh kedekatannya dengan titik *minimax* daripada oleh kedekatannya dengan CoG lama.

Jika entri 53.622.12 memang merujuk pada SPBU 54.622.12 di Sugio, penambahan koordinat Google Maps dengan bobot 8,74 menghasilkan CoG bersyarat 42 SPBU pada 6,979046° LS dan 112,171776° BT, atau bergeser sekitar 0,52 km dari hasil 41 SPBU. Jarak SPBU Sugio ke kandidat Brengkok sekitar 29,58 km, sehingga kandidat mencakup 42 dari 42 titik dalam skenario ini. Hasil tersebut memperlihatkan sensitivitas terhadap pelengkapan satu titik, tetapi tidak mengesahkan koreksi identitas SPBU maupun validitas seluruh koordinat; uji yang tidak bergantung pada identitas entri ini disajikan pada Tabel 6.

3.3. Cakupan Radius dan Perbedaan Definisi Jarak

Tabel 4. Cakupan Geografis pada Himpunan 41 SPBU yang Sama

Table 4. Geographic Coverage for the Same Set of 41 Stations

Indicator	Brengkok	CoG	Geom. median	Constr. optimum
Stations within 30 km	41 of 41	39 of 41	39 of 41	41 of 41
Maximum distance (km)	29,06	32,32	35,26	30,00
Weighted mean distance (km)	19,46	17,36	17,19	17,72
Distance to Brengkok (km)	–	8,71	10,49	7,21

Sumber/*source: Haversine distances, R = 6.371,0088 km (2026).*

Tabel 4 menunjukkan bahwa CoG sementara memiliki rata-rata jarak berbobot yang lebih rendah daripada kandidat Brengkok, tetapi dua SPBU berada di luar radius 30 km, yaitu 54.622.10 (30,20 km) dan 54.611.14 (32,32 km). Sebaliknya, kandidat Brengkok memenuhi radius untuk seluruh 41 titik dengan jarak maksimum 29,06 km. Kedua indikator mengukur tujuan berbeda: rata-rata yang lebih rendah tidak membuktikan bahwa seluruh SPBU memenuhi batas pelayanan, dan tidak dapat langsung diterjemahkan menjadi penghematan biaya kendaraan.

Median geometrik berbobot terletak 3,07 km di sebelah barat CoG dan hanya menurunkan jumlah jarak berbobot sekitar 1,0% dibandingkan CoG. Titik tersebut juga meninggalkan SPBU 54.622.10 (33,06 km) dan 54.611.14 (35,26 km) di luar radius 30 km. Dengan demikian, mengganti CoG dengan titik *minisum* yang lebih tepat tidak menyelesaikan persoalan cakupan, karena kedua titik bergerak ke arah konsentrasi bobot di sisi barat, sementara dua SPBU yang tidak terlayani berada di ujung timur laut wilayah studi.

Titik optimum berkendala untuk $T = 30$ km terletak pada 6,968567° LS dan 112,189021° BT (Tabel 3 dan Gambar 2). Titik ini mencakup seluruh 41 SPBU dengan jarak maksimum 30,00 km dan rata-rata jarak berbobot 17,72 km, atau 1,74 km lebih rendah daripada kandidat Brengkok dan hanya 0,36 km lebih tinggi daripada CoG (Tabel 4). Kendala yang aktif hanya SPBU 54.611.14 di ujung timur laut, sehingga titik optimum bergeser 2,33 km dari CoG ke arah timur sampai jarak ke SPBU tersebut tepat 30 km. Titik ini berada 7,21 km di sebelah selatan-barat daya Brengkok dan, menurut batas administrasi pada Gambar 2, sekitar 2 km di sebelah barat batas Kabupaten Lamongan, yaitu di wilayah Kabupaten Tuban. Bila tapak dibatasi di dalam Kabupaten Lamongan, pencarian yang sama pada sel raster batas administrasi Gambar 2 (resolusi sekitar 0,1 km) menghasilkan titik sekitar 6,9456° LS dan 112,2050° BT dengan rata-rata jarak berbobot sekitar 18,37 km, yang masih 1,09 km lebih rendah daripada Brengkok. Daerah yang memenuhi radius 30 km untuk seluruh SPBU hanya sekitar 21,9 km², dan bagian yang berada di Lamongan sekitar 2,5 km², sehingga kendala cakupan sangat mempersempit ruang pencarian tapak.

Perhitungan ulang dengan jarak geodesik elipsoid WGS 84 menghasilkan selisih maksimum 139 m (0,55%) terhadap jarak Haversine pada seluruh pasangan titik uji–SPBU dan tidak mengubah klasifikasi radius 30 km untuk Brengkok, CoG, maupun median geometrik. Karena titik optimum berkendala berada tepat pada batas kendala, jarak geodesiknya ke SPBU 54.611.14 menjadi 30,02 km; optimasi ulang dengan jarak geodesik hanya menggeser titik tersebut sekitar 24 m.

Jarak dalam tabel kajian awal juga menunjukkan ketidaksesuaian terhadap kandidat yang dinyatakan. SPBU 54.623.13 tercantum berjarak 4,66 km,

sedangkan Haversine dari kandidat Brengkok menghasilkan sekitar 12,42 km; untuk SPBU 54.623.17, angka tabel 3,98 km dibandingkan dengan sekitar 13,89 km. Karena jarak garis lurus merupakan batas bawah panjang lintasan jalan, angka tabel yang lebih kecil dari jarak Haversine mengindikasikan perbedaan titik asal, koordinat, atau kesalahan pemindahan data. Angka-angka tersebut tidak dapat diperlakukan sebagai pengukuran dengan definisi yang sama tanpa verifikasi.

Kolom FT EXISTING pada *workbook* memuat jarak 2,00–51,70 km dengan 20 dari 42 nilai melebihi 30 km. Identitas koordinat titik asal dan metode pengukuran tidak tercantum pada blok tersebut, sehingga data ini hanya digunakan sebagai konteks kebutuhan perbaikan jangkauan dan tidak digunakan untuk membuktikan radius kandidat Brengkok. Demikian pula, hasil penggabungan rute dengan 22 mobil tangki berkapasitas 24 kL memerlukan identitas depot, frekuensi layanan, dan definisi permintaan yang jelas sebelum dapat ditafsirkan secara operasional.

3.4. Sensitivitas terhadap Ambang Radius dan Himpunan SPBU

Tabel 5 menyajikan sensitivitas cakupan terhadap ambang radius 20–35 km. Keunggulan cakupan Brengkok atas CoG bergantung pada ambang: pada 28 km CoG justru mencakup lebih banyak SPBU (38 berbanding 37), keunggulan Brengkok baru muncul mulai 29 km (40 berbanding 39), dan CoG mencakup seluruh SPBU pada ambang di atas 32,32 km. Di bawah 28,17 km tidak ada satu titik pun yang dapat mencakup seluruh 41 SPBU, sehingga ambang yang lebih ketat menuntut lebih dari satu terminal atau menerima sebagian SPBU berada di luar radius. Sebaliknya, pada setiap ambang yang layak, titik optimum berkendala selalu mencakup seluruh SPBU dengan rata-rata jarak berbobot 17,19–18,75 km, lebih rendah daripada Brengkok (19,46 km). Dengan demikian, simpulan yang tahan terhadap pilihan ambang bukanlah bahwa Brengkok merupakan lokasi terbaik, melainkan bahwa Brengkok layak secara cakupan pada ambang 29,06 km atau lebih, tetapi didominasi oleh titik lain di dalam zona layak yang sama.

Tabel 5. Sensitivitas Cakupan terhadap Ambang Radius Pelayanan 20–35 km

Table 5. Sensitivity of Coverage to the Service-Radius Threshold of 20–35 km

T (km)	Brengkok	CoG	GM	Opt. 30 km	Opt. at *T*: mean (km)
20	17	24	25	24	Infeasible
22	22	28	28	31	Infeasible
24	26	34	29	33	Infeasible
25	28	34	32	34	Infeasible
26	31	36	35	36	Infeasible
27	36	37	37	37	Infeasible
28	37	38	37	38	Infeasible
29	40	39	38	38	18,00
30	41	39	39	41	17,72
31	41	40	39	41	17,55
32	41	40	39	41	17,40
33	41	41	39	41	17,29
34	41	41	40	41	17,22
35	41	41	40	41	17,19

Sumber/*source: Data processing results (2026). Entries are numbers of the 41 stations within radius T. GM = weighted geometric median; Opt. 30 km = constrained optimum for T = 30 km; the last column re-solves Eq. (4) at each T.*

Hasil uji sensitivitas himpunan disajikan pada Tabel 6. Pada seluruh 41 skenario *leave-one-out*, CoG tidak pernah mencakup seluruh SPBU yang tersisa, sedangkan pergeseran CoG paling besar 0,71 km. Titik optimum berkendala bergeser paling jauh 2,25 km (median 0,45 km) dan selalu memiliki rata-rata jarak berbobot lebih rendah daripada Brengkok. Pada 1.000 sampel *bootstrap*, CoG gagal memenuhi radius 30 km pada 80,3% sampel, sedangkan titik optimum berkendala selalu lebih baik daripada Brengkok dengan selisih median 1,91 km (interval persentil 95%: 0,70–3,93 km) dan jarak ke Brengkok 4,24–12,44 km. Penambahan SPBU Sugio maupun penggantian bobot dengan bobot seragam menggeser titik optimum hanya sekitar 0,51 km. Penempatan hipotetis titik ke-42 di seluruh kotak batas wilayah studi menggeser CoG paling jauh 0,76 km, dan titik tersebut tetap berada dalam radius 30 km dari Brengkok pada 91,4% posisi serta dari titik optimum pada 96,7% posisi. Dengan demikian, temuan utama, yaitu CoG tidak menjamin cakupan dan Brengkok layak tetapi tidak optimal, tidak bergantung pada satu SPBU tertentu, identitas entri ke-42, maupun satuan bobot.

Tabel 6. Uji Sensitivitas Himpunan SPBU, Bobot, dan Titik Ke-42

Table 6. Sensitivity to the Station Set, Weights, and the 42nd Station

Scenario	Brengkok	CoG	Constrained optimum (30 km)
Base set (n = 41)	41/41; 19,46 km	39/41; 17,36 km	41/41; 17,72 km
Sugio added (n = 42)	42/42; 19,67 km	40/42; shift 0,52 km	42/42; 17,85 km; shift 0,51 km
Equal weights (n = 41)	41/41; 20,15 km	40/41; shift 1,20 km	41/41; 18,29 km; shift 0,51 km
Leave-one-out (41 runs)	Full coverage in 41 of 41 runs	Full coverage in 0 of 41 runs; shift ≤ 0,71 km	Lower mean than Brengkok in 41 of 41 runs; shift ≤ 2,25 km

Scenario	Brengkok	CoG	Constrained optimum (30 km)
Bootstrap (1.000 resamples)	Full coverage in all resamples	Fails 30 km in 80,3% of resamples	Lower mean in 100%; gain 1,91 km (0,70–3,93)
Hypothetical 42nd station (3.600 positions)	Covers it in 91,4% of positions	Shift ≤ 0,76 km	Covers it in 96,7% of positions

Sumber/source: *Data processing results (2026). Cells give stations within 30 km and weighted mean distance; shifts are relative to the base result.*

3.5. Kedudukan Kandidat Brengkok

Koordinat 6,905863° LS dan 112,205649° BT dipertahankan sebagai kandidat yang disebut dalam dokumen kajian awal sebagai Desa Brengkok, Kecamatan Brondong, Kabupaten Lamongan. Penyebutan administratif tersebut mengikuti identifikasi awal dan belum merupakan hasil verifikasi batas desa. Tangkapan layar Google Maps dalam dokumen kajian awal juga perlu dibaca sesuai titik asal dan tujuan yang ditampilkan, sehingga tangkapan tersebut hanya diuraikan secara naratif dan tidak digunakan sebagai bukti kuantitatif.

Tangkapan layar rute memperlihatkan alternatif rute 37,0 km, 46,6 km, dan 45,6 km dari Fuel Terminal Tuban dengan waktu tempuh masing-masing sekitar 1 jam 10 menit, 1 jam 21 menit, dan 1 jam 28 menit. Titik tujuan yang terlihat adalah −6,8997080; 112,2080428, berbeda dari koordinat kandidat Brengkok yang dianalisis. Oleh karena itu, tangkapan tersebut tidak digunakan sebagai bukti jarak atau waktu tempuh menuju kandidat akhir, dan nilainya hanya mencerminkan kondisi lalu lintas pada saat tangkapan dibuat.

Tangkapan layar akses lokal menampilkan perjalanan sepanjang 250 m melalui jalan tak bernama menuju sekitar titik kandidat. Informasi itu belum membuktikan daya dukung jalan untuk mobil tangki bermuatan penuh, luas lahan yang tersedia, maupun pemenuhan keselamatan fasilitas. Kapasitas simpan 25.000 kL dan rencana penerimaan melalui *pipeline* yang disebut dalam dokumen kajian awal memerlukan dasar perancangan dan studi teknis tersendiri sebelum dihubungkan dengan kandidat lokasi.

Berdasarkan prosedur penapisan kelayakan operasional, belum ada kriteria kandidat Brengkok yang berstatus terverifikasi. Akses jalan dan keterhubungan pasokan berstatus indikatif karena hanya didukung tangkapan layar dengan titik tujuan berbeda dan narasi rencana *pipeline*, sedangkan luas dan kondisi lahan, kesesuaian penggunaan lahan, risiko lingkungan, dan keselamatan fasilitas belum tersedia. Secara spasial, Brengkok berada di dalam zona layak radius 30 km dan dekat dengan titik *minimax*, tetapi bukan titik dengan rata-rata jarak berbobot terendah di zona tersebut. Oleh karena itu, Brengkok dipertahankan sebagai kandidat pembanding yang layak secara cakupan, sedangkan zona antara Brengkok dan titik optimum berkendala, khususnya bagian yang berada di wilayah Lamongan, menjadi area pencarian tapak untuk studi kelayakan.

3.6. Studi Pembanding

Tabel 7 membandingkan temuan penelitian ini dengan penelitian terdahulu yang relevan. Penelitian CoG di Indonesia umumnya berhenti pada koordinat usulan lalu menilai biaya secara terpisah; Azmi et al. (2022) membandingkan *generalized cost* antarskenario, sedangkan Erlangga et al. (2024) melaporkan penurunan biaya operasional untuk lokasi gudang usulan. Penelitian ini sejalan dengan prinsip pemisahan tersebut, tetapi menunjukkan bahwa sebelum tahap biaya, hasil CoG perlu diuji keterulangannya dan kesesuaiannya dengan batas pelayanan.

Tabel 7. Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Table 7. Comparison with Previous Studies

Study	Context	Approach	Relevant finding
Azmi et al. (2022)	Intermodal facilities, Makassar–Garongkong railway	CoG scenarios with generalized cost	Cost assessed separately after CoG candidates
Erlangga et al. (2024)	Warehouse, Karawang	CoG with operating-cost comparison	Lower operating cost reported for proposed site
Anggraeni et al. (2023)	Boyolali fuel terminal, Indonesia	p-median clustering and MCVRP	Routing gains measured by cost, not by terminal siting
Gokbayrak & Kocaman (2017)	Decentralized supply systems	Distance-limited location-allocation	Coverage distance treated as explicit constraint
Jaffal et al. (2025)	Petroleum products DC, Anbar	Greenfield analysis and simulation	Lowest-cost analytical site not selected after practical constraints
This study	Pertamax fuel terminal, Lamongan	CoG, data audit, radius test, constrained optimum, sensitivity tests	CoG covers 39 of 41; Brengkok 41 of 41; constrained optimum lowers mean by 1,74 km

Sumber/*source: Compiled from the cited studies and this study.*

Temuan bahwa median geometrik hanya sedikit lebih baik daripada CoG dalam jumlah jarak berbobot

konsisten dengan penjelasan Sohn (2019) bahwa centroid dan median geometrik berbobot umumnya tidak berimpit; pada data ini selisih keduanya 3,07 km dengan perbedaan jumlah jarak berbobot sekitar 1,0%. Temuan bahwa kedua titik *minisum* gagal mencakup seluruh SPBU mendukung argumen bahwa kendala jarak layanan harus dimasukkan secara eksplisit, sebagaimana dalam model *location-allocation* berbatas jarak (Gokbayrak & Kocaman, 2017), model lokasi yang membatasi jarak layanan berbasis Google Maps (Palomino et al., 2022), dan model lokasi berkapasitas dengan batas jarak layanan (Atta, 2025). Begitu kendala tersebut dimasukkan, titik terbaik pada data ini hanya bergeser 2,33 km dari CoG, tetapi berjarak 7,21 km dari kandidat kajian awal. Hasil ini juga sejalan dengan praktik perencanaan yang memadukan CoG dengan peta area layanan dan kendala nyata (Riley & Sweeney, 2024). Pada konteks produk minyak bumi, hasil ini sejalan dengan Jaffal et al. (2025): lokasi analitis berbiaya terendah tidak otomatis menjadi lokasi terpilih setelah kendala praktis dan regulasi dipertimbangkan.

3.7. Dampak Penelitian

Hasil penelitian menjawab ketiga pertanyaan penelitian dan mengisi kesenjangan yang dirumuskan pada Pendahuluan. Pertama, data yang tersedia hanya mendukung hasil lokasi sementara dengan cakupan bobot 97,89%, karena satu koordinat belum tersedia dan CoG pada dokumen kajian awal tidak dapat direproduksi. Kedua, pusat permintaan tidak memenuhi radius pelayanan 30 km untuk seluruh SPBU, sedangkan kandidat Brengkok memenuhinya. Ketiga, keunggulan cakupan Brengkok atas CoG bergantung pada ambang radius, tetapi temuan bahwa titik optimum berkendala lebih baik daripada Brengkok bertahan pada seluruh ambang yang layak dan seluruh skenario himpunan SPBU. Dengan demikian, pemisahan antara kriteria *minisum* dan kriteria cakupan yang menjadi kebaruan penelitian ini terkonfirmasi secara empiris, dan kedua kriteria tersebut perlu dievaluasi bersamaan melalui model berkendala.

Dampak praktis penelitian ini adalah tersedianya dasar penyaringan awal bagi perencana distribusi BBM: kandidat Brengkok layak dipertahankan sebagai alternatif yang memenuhi radius geografis, titik optimum berkendala menunjukkan arah pencarian tapak yang lebih dekat ke pusat permintaan, dan CoG berfungsi sebagai acuan pusat permintaan, bukan sebagai lokasi terpilih. Dampak metodologisnya adalah prosedur audit data, perhitungan CoG, median geometrik, optimasi berkendala, dan uji sensitivitas yang dapat diulang untuk wilayah layanan *fuel terminal* lain. Estimasi jarak jalan dari koordinat dengan faktor sirkuitas atau model statistik masih dapat bias, terutama pada jarak yang lebih jauh (Veres, 2025), sehingga penghematan biaya, waktu, bahan bakar, ataupun risiko *stockout* belum dapat dinyatakan dari hasil spasial ini. Dengan demikian, hasil penelitian lebih tepat digunakan sebagai gambaran indikatif dan masukan bagi model lokasi berkendala cakupan berbasis jaringan jalan serta kajian kelayakan tapak daripada sebagai keputusan investasi akhir.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa pusat permintaan dan cakupan pelayanan merupakan dua kriteria yang saling melengkapi dan perlu dievaluasi bersamaan dalam penapisan lokasi awal *fuel terminal* Pertamax di Lamongan. Dengan 41 dari 42 SPBU berkoordinat dan asumsi bobot permintaan sebanding, CoG sementara berada pada 6,975249° LS dan 112,169048° BT, sedangkan CoG pada dokumen kajian awal belum dapat direproduksi dari data yang tersedia. CoG dan median geometrik berbobot masing-masing hanya mencakup 39 dari 41 SPBU dalam radius 30 km, sedangkan kandidat Brengkok mencakup seluruhnya pada ambang 29,06 km atau lebih. Titik optimum berkendala pada 6,968567° LS dan 112,189021° BT mencakup seluruh SPBU dengan rata-rata jarak berbobot 17,72 km, 1,74 km lebih rendah daripada Brengkok, dan keunggulan ini bertahan pada seluruh uji sensitivitas. Oleh karena itu, Brengkok dipertahankan sebagai kandidat yang layak secara cakupan tetapi bukan lokasi optimal, dan hasil penelitian ini merupakan gambaran indikatif tentang zona pencarian tapak, bukan penetapan lokasi akhir.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Satu koordinat SPBU belum tersedia, satuan dan periode permintaan belum terkonfirmasi, ambang 30 km belum memiliki dasar normatif yang dapat dirujuk, dan himpunan SPBU mengikuti rencana rute, bukan inventaris seluruh SPBU di wilayah. Keakuratan alamat dan koordinat setiap SPBU juga belum diverifikasi melalui survei lapangan. Selain itu, analisis menggunakan jarak lingkaran besar alih-alih jarak jaringan jalan, batas administrasi untuk pencarian di dalam Lamongan diturunkan dari raster peta beresolusi sekitar 0,1 km, dan analisis belum memperhitungkan biaya transportasi per koridor, kapasitas kendaraan, serta evaluasi tapak.

Penelitian selanjutnya disarankan melengkapi koordinat dan memverifikasi identitas SPBU 53.622.12, merekonsiliasi data permintaan agar seluruh bobot merujuk pada produk Pertamax dan periode yang sama, serta menetapkan ambang radius pelayanan berdasarkan standar operasional yang dapat dirujuk. Kandidat lokasi di dalam zona layak perlu

dibandingkan menggunakan model lokasi berkendala cakupan dengan jarak jaringan jalan, waktu tempuh, dan biaya perjalanan. Kajian kelayakan lahan, lingkungan, dan keselamatan juga perlu dilakukan sebelum lokasi akhir *fuel terminal* ditetapkan.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Logistik Minyak dan Gas, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas (PEM Akamigas) Cepu atas dukungan fasilitas dan lingkungan akademik selama pelaksanaan penelitian ini. Penulis juga menyampaikan penghargaan kepada penyedia data Pertamina, Politeknik Energi Dan Mineral Akamigas & Google Maps serta rekan-rekan yang telah memberikan bimbingan, masukan, dan kritik membangun dalam penyempurnaan naskah ini. Penelitian ini tidak menerima pendanaan khusus dari lembaga pemberi dana mana pun.

6. REFERENSI

Ajman, N. N., Zainun, N. Y., Sulaiman, N., Khahro, S. H., Ghazali, F. E. M., & Ahmad, M. H. (2021). Environmental impact assessment (EIA) using geographical information system (GIS): An integrated land suitability analysis of filling stations. *Sustainability*, *13*(17), 9859. https://doi.org/10.3390/su13179859

Angdresey, A., Deyby Kumenap, V., & Everhard Bawole, P. A. (2023). The comparison of distance methods on the OnDemand ambulance application. *CICES*, *9*(2), 185–191. https://doi.org/10.33050/cices.v9i2.2700

Anggraeni, M. S., Tazkiya, O. N., Mawandi, E., & Amarilies, H. S. (2023, March 9). Optimization of fuel distribution routes for green logistics in multi compartment vehicle routing problem (MCVRP) using branch and bound algorithm (Case study: Boyolali Fuel Terminal). In *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. https://doi.org/10.46254/AN13.20230333

Arana-Jiménez, M., Blanco, V., & Fernández, E. (2020). On the fuzzy maximal covering location problem. *European Journal of Operational Research*, *283*(2), 692–705. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.11.036

Atta, S. (2025). Solving the capacitated facility location problem with service distance and outsourcing using a customized artificial bee colony algorithm. *Evolutionary Intelligence*, *18*(3), 60. https://doi.org/10.1007/s12065-025-01042-w

Azmi, H., Malkhamah, S., & Muthohar, I. (2022). Penentuan lokasi fasilitas intermoda menggunakan metode center of gravity pada jalur rel Makassar-Garongkong. *Semesta Teknika*, *25*(2), 100–108. https://doi.org/10.18196/st.v25i2.15357

Ballou, R. H., Rahardja, H., & Sakai, N. (2002). Selected country circuity factors for road travel distance estimation. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *36*(9), 843–848. https://doi.org/10.1016/S0965-8564(01)00044-1

Baskar, A. (2021). Simple single and multi-facility location models using great circle distance. *ITM Web of Conferences*, *37*, 01001. https://doi.org/10.1051/itmconf/20213701001

Buczkowska, S., Coulombel, N., & de Lapparent, M. (2019). A comparison of Euclidean distance, travel times, and network distances in location choice mixture models. *Networks and Spatial Economics*, *19*(4), 1215–1248. https://doi.org/10.1007/s11067-018-9439-5

Carotenuto, P., Giordani, S., & Salvatore, A. (2024). A matheuristic approach for the multi-depot periodic petrol station replenishment problem. *Mathematics*, *12*(3), 416. https://doi.org/10.3390/math12030416

Church, R., & ReVelle, C. (1974). The maximal covering location problem. *Papers of the Regional Science Association*, *32*(1), 101–118. https://doi.org/10.1007/BF01942293

Demir, E. (2022). Weiszfeld, tree-seed, and whale optimization algorithms comparison via locating transportation facilities with weightings considering the vulnerability and uncertainty. *PLOS ONE*, *17*(6), e0269808. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0269808

Dewi, F. G., Aprisi Anansyah, M. D., Hindratmo, A., & Wahyu Oktavia, C. (2024). Optimasi biaya transportasi logistik dan penentuan lokasi gudang baru menggunakan metode center of gravity (COG). *Journal of System Engineering and Technological Innovation (JISTI)*, *3*(01), 205–214. https://doi.org/10.38156/jisti.v3i01.73

Elzinga, J., & Hearn, D. W. (1972). Geometrical solutions for some minimax location problems. *Transportation Science*, *6*(4), 379–394. https://doi.org/10.1287/trsc.6.4.379

Erlangga, E., Zaki, M. R., Hermawan, R. C., & Fauzi, M. (2024). Optimalisasi lokasi gudang menggunakan metode center of gravity pada PT ABC. *Jurnal LOGIC (Logistics & Supply Chain Center)*, *3*(1), 1–8. https://doi.org/10.33197/jlscc.v3i1.2099

Gokbayrak, K., & Kocaman, A. S. (2017). A distance-limited continuous location-allocation problem for spatial planning of decentralized systems. *Computers & Operations Research*, *88*, 15–29. https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.06.013

Google. (n.d.). *SPBU Pertamina Sugio, Jalan Raya, Sugio, Kabupaten Lamongan* [Google Maps place; −7.155457, 112.2984842]. Retrieved October 30, 2026, from https://www.google.com/maps?cid=10715440611783273 31

Hanif, M., Zhang, L., Mujtaba, N., Li, J., Shah, A. H., & Ullah, S. (2021). A single non-obnoxious facility location selection for Utility Stores Corporation using center of gravity and p-median methods. In *2021 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)* (pp. 693–697). IEEE. https://doi.org/10.1109/IEEM50564.2021.9672876

Iqbal, Md. J., Paul, I. K., Rahman, B. A., Doula, A. U., Roy, S. C., Ahammed, Md. S., & Hasan, Md. M. (2023). Determination of realistic facility location in Bangladesh by using center of gravity method. *European Journal of Engineering and Technology Research*, *8*(2), 83–92. https://doi.org/10.24018/ejeng.2023.8.2.3007

Jaffal, M. S., Abdulghafour, A. B., Ayadi, O., & Masmoudi, F. (2025). Optimizing petroleum products distribution centers using GFA and AnyLogistix simulation: A case study. *Logistics*, *9*(2), 63. https://doi.org/10.3390/logistics9020063

Karney, C. F. F. (2013). Algorithms for geodesics. *Journal of Geodesy*, *87*(1), 43–55. https://doi.org/10.1007/s00190-012-0578-z

Li, J., Song, H., & Liu, H. (2025). Fuel replenishment problem of heterogeneous fleet in initiative distribution mode. *Sustainability*, *17*(2), 685. https://doi.org/10.3390/su17020685

Mawandi, E., Putri, D., Swariarga, Z., & Amarilies, H. (2023). Comparative study of biosolar distribution cost (A case study at PT Pertamina Jambi Fuel Terminal). In *Proceedings of the International Conference on Sustainable Engineering, Infrastructure and Development, ICO-SEID 2022, 23–24 November 2022, Jakarta, Indonesia*. EAI. https://doi.org/10.4108/eai.23-11-2022.2338890

Murray, A. T. (2016). Maximal coverage location problem: Impacts, significance, and evolution. *International Regional Science Review*, *39*(1), 5–27. https://doi.org/10.1177/0160017615600222

Öztürkoğlu, Ö., & Lawal, O. (2016). The integrated network model of pipeline, sea and road distribution of petroleum product. *An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications (IJOCTA)*, *6*(2), 151–165. https://doi.org/10.11121/ijocta.01.2016.00277

Palomino, K., Garcia, D., & Berdugo, C. (2022). A MILP facility location model with distance value adjustments for demand fulfillment using Google Maps. *Journal of Engineering Research*, *10*(2), 270–291. https://doi.org/10.36909/jer.10473

Pertamina Patra Niaga. (n.d.). *SPBU 5462212, Ds. Sugio Kec. Sugio, Kab. Lamongan*. Pertamina Brightspace. Retrieved October 30, 2026, from https://brightspace.pertamina.com/detail/spbu?id=7AcGUQ1-sEq9KfMgxj3mwQ

Riley, J. M., & Sweeney, K. (2024). Teaching location planning with the center-of-gravity method using real cities and distances. *Decision Sciences Journal of Innovative Education*, *22*(2), 106–116. https://doi.org/10.1111/dsji.12311

Rosyida, I., Kurniasih, N. P., & Mashuri. (2026). Best route planning for fuel distribution using Bellman-Ford algorithm and Sugeno fuzzy weighted method to support green environment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1671*(1), 012031. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1671/1/012031

Sari, D. P., Masruroh, N. A., & Asih, A. M. S. (2021). Extended maximal covering location and vehicle routing problems in designing smartphone waste collection channels: A case study of Yogyakarta Province, Indonesia. *Sustainability*, *13*(16), 8896. https://doi.org/10.3390/su13168896

Soesilo, R., Firmansyah, Y., & Sartono. (2020). Penentuan lokasi external warehouse dengan menggunakan metode center of gravity (Studi kasus di PT. RPZ Surabaya). *Jurnal Manajemen Industri dan Logistik*, *4*(1), 58–66. https://doi.org/10.30988/jmil.v4i1.372

Sohn, J. (2019). A short study on the center of gravity method for the locating a single facility. *The Journal of the Korea Contents Association*, *19*(2), 186–193. https://doi.org/10.5392/JKCA.2019.19.02.186

Veres, P. (2025). ML and statistics-driven route planning: Effective solutions without maps. *Logistics*, *9*(3), 124. https://doi.org/10.3390/logistics9030124

Wu, J., Liu, X., Li, Y., Yang, L., Yuan, W., & Ba, Y. (2022). A two-stage model with an improved clustering algorithm for a distribution center location problem under uncertainty. *Mathematics*, *10*(14), 2519. https://doi.org/10.3390/math10142519

Zhao, X., Rebreyend, P., & Håkansson, J. (2019). How does the complexity of a road network affect optimal facility locations? *Journal of Traffic and Logistics Engineering*, *7*(2), 64–71. https://doi.org/10.18178/jtle.7.2.64-71