

Pengelolaan sampah yang efisien menjadi tantangan utama dalam sistem sanitasi perkotaan, termasuk di kawasan Perkotaan Kabupaten Klaten yang mengalami peningkatan timbunan sampah dan keterbatasan kapasitas armada sehingga menyebabkan kekurangan pengangkutan sebesar 4,37 ton/hari. Salah satu upaya efisiensi dilakukan melalui optimasi pengangkutan sampah dengan pendekatan algoritma hybrid metaheuristik. Berdasarkan Permen PUPR No. 03/PRT/M/2013 Pasal 23 ayat (1), pengangkutan sampah harus memaksimalkan kapasitas kendaraan dan merancang rute sependek mungkin dengan hambatan minimal. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan pembagian klaster Tempat Penampungan Sementara (TPS) dan rute pengangkutan armada dump truk pada jalur layanan sampah di kawasan Perkotaan Kabupaten Klaten, menggunakan algoritma hybrid *Genetic Algorithm-Variable Neighborhood Search* (GA-VNS) untuk klasterisasi serta *Ant Colony Optimization* (ACO) untuk pencarian rute terpendek dalam masing-masing klaster. Penelitian ini menjawab rumusan masalah terkait efisiensi jarak tempuh serta penurunan biaya operasional kendaraan (BOK) dan emisi Gas Rumah Kaca (GRK). Studi ini dilakukan dengan pendekatan optimasi berbasis pemrograman Python. Terdapat dua skenario: Skenario 1 mempertahankan jalur eksisting sebagai acuan klaster awal, sedangkan Skenario 2 mengoptimasi seluruh TPS tanpa batasan rute eksisting. Selisih jarak tempuh antara kondisi eksisting dan hasil optimasi digunakan untuk menghitung BOK berdasarkan persamaan Biaya Tidak Tetap dalam Pd T-15-2005-B (Departemen PU, 2005), serta estimasi emisi GRK yang mencakup gas CO₂, CH₄, dan N₂O, dengan perhitungan CO₂-*equivalent* mengacu pada Pedoman Inventarisasi GRK (Kementerian ESDM, 2018). Hasil menunjukkan bahwa algoritma hybrid menghasilkan klaster dan rute yang lebih optimal. Skenario 1 menghasilkan penghematan jarak 48,74 km/minggu (3,68%), pengurangan BOK sebesar Rp 416.402/minggu, dan penurunan emisi GRK sebesar 21,52 kg CO₂-eq/minggu. Skenario 2 lebih signifikan dengan penghematan 84,36 km/minggu (6,36%), penurunan BOK Rp 720.641/minggu, dan emisi GRK sebesar 37,25 kg CO₂-eq/minggu. Temuan ini menunjukkan potensi besar pendekatan algoritma hybrid metaheuristik dalam mendukung sistem pengangkutan sampah yang efisien, ekonomis, dan ramah lingkungan.

Kata kunci: Pengangkutan sampah, Klasterisasi GA-VNS, Rute ACO, Biaya Operasi Kendaraan, Emisi GRK



ABSTRACT

Efficient waste management remains a major challenge in urban sanitation systems, including in the urban areas of Klaten Regency, which face increasing waste generation and limited fleet capacity, resulting in a collection shortfall of 4.37 tons per day. One efficiency effort is optimizing waste transportation using a hybrid metaheuristic algorithm. Based on Regulation No. 03/PRT/M/2013 Article 23 paragraph (1), waste transportation must maximize vehicle capacity and design the shortest routes with minimal barriers. This study aims to optimize the clustering of Temporary Waste Storage Sites and dump truck routes in Klaten's urban waste service area, using a hybrid Genetic Algorithm–Variable Neighborhood Search (GA-VNS) for clustering and Ant Colony Optimization (ACO) for shortest route search. The study addresses issues related to travel distance efficiency, and the reduction of vehicle operational costs (VOC) and greenhouse gas (GHG) emissions. The study was conducted using an optimization based on Python programming with two scenarios: Scenario 1 retains existing routes as the initial clustering reference, while Scenario 2 optimizes all TPS without existing route constraints. The difference in travel distances between the existing condition and optimized results was used to calculate VOC based on the Non-Fixed Cost equation in Pd T-15-2005-B (Department of Public Works, 2005) and GHG emissions estimation, including CO₂, CH₄, and N₂O, with CO₂-equivalent calculations referring to the GHG Inventory Guidelines (Ministry of Energy and Mineral Resources, 2018). Results show that the hybrid algorithm produces optimal clustering and routes. Scenario 1 results in a distance saving of 48.74 km/week (3.68%), VOC reduction of IDR 416,402/week, and a decrease in GHG emissions of 21.52 kg CO₂-eq/week. Scenario 2 demonstrates a more significant improvement, with a saving of 84.36 km/week (6.36%), VOC reduction of IDR 720,641/week, and GHG emissions reduction of 37.25 kg CO₂-eq/week. These findings highlight the potential of the hybrid metaheuristic algorithm for supporting efficient, economical, and environmentally friendly waste transportation.

Keywords: Waste transportation, GA-VNS clustering, ACO routing, Vehicle Operating Cost, GHG Emissions