

PENENTUAN LOKASI POS STASIUN PEMADAM KEBAKARAN DI KOTA MANADO

Indah Y. Kairupan^{1,*}, Prudensy F. Opit²

¹Program Studi Teknik Informatika, ²Program Studi Teknik Industri,

¹²Fakultas Teknik, Universitas Katolik De La Salle Manado

e-mail: ikairupan@unikadelasalle.ac.id

Abstrak— Kecelakaan kebakaran sering kali terjadi secara tiba-tiba dan tidak terduga. Kecelakaan ini dapat menyebabkan cedera serius pada korban, belum lagi kerugian harta benda. Respons yang terlambat terhadap kecelakaan kebakaran dapat berakibat fatal bagi korban yang terdampak dan tim pemadam kebakaran. Makalah ini menganalisis lokasi stasiun pemadam kebakaran terbaik dan jumlah kendaraan optimal yang ditugaskan ke setiap stasiun pemadam kebakaran untuk melakukan respons darurat yang cepat. Model optimasi dua tahap yang mempertimbangkan beberapa lokasi kandidat stasiun pemadam kebakaran dan beberapa area bencana diusulkan. Model tahap pertama diformulasikan sebagai masalah pemrograman linier integer murni (PILP) yang bertujuan untuk memaksimalkan area cakupan untuk setiap kandidat stasiun pemadam kebakaran berdasarkan pembatasan waktu tempuh. Selanjutnya, model tahap kedua diformulasikan sebagai masalah pemrograman kuadrat integer campuran (MIQP) yang mengintegrasikan pemilihan lokasi stasiun pemadam kebakaran dan penugasan kendaraan ke setiap stasiun pemadam kebakaran yang dipilih. Model ini diuji di kota berukuran sedang, Manado, Indonesia dengan 10 area bencana dan 20 lokasi kandidat stasiun pemadam kebakaran. Analisis sensitivitas yang terdiri dari 5 skenario berbeda dilakukan untuk menunjukkan pentingnya parameter seperti anggaran yang tersedia dan jumlah kendaraan yang tersedia. Akhirnya, hasil menunjukkan bahwa model tersebut berjalan dengan baik di bawah beberapa anggaran dan batasan kendaraan yang berbeda.

Kata Kunci – Stasiun pemadam kebakaran, Pemilihan lokasi, Vehicle assignment, PILP problem, MIQP problem, Two-stage optimization model.

I. PENDAHULUAN

Kebakaran dapat terjadi kapan saja dan di mana saja dengan kekuatan yang tidak terduga. Kebakaran dapat terjadi dengan cepat, merusak properti, dan membahayakan nyawa. Kebakaran kota yang berbahaya telah sering terjadi di Indonesia selama beberapa tahun terakhir. Contoh signifikan termasuk kebakaran di Kosambi, Tangerang pada tahun 2017, dan Matraman, Jakarta Timur pada tahun 2021. Hilangnya banyak nyawa dan harta benda menggarisbawahi pentingnya

peran petugas pemadam kebakaran kota. Layanan pemadam kebakaran dan penyelamatan sangat penting untuk menjamin keselamatan warga kota. Namun, dengan meningkatnya pertumbuhan perkotaan di beberapa ibu kota di Indonesia, jumlah dan/atau lokasi stasiun pemadam kebakaran tidak lagi memadai untuk memberikan respons darurat yang cepat. Reaksi petugas pemadam kebakaran yang lambat dapat menyebabkan kerugian yang tidak terhitung.

Masalah jumlah stasiun pemadam kebakaran dan pemilihan lokasi di dalam ibu kota sangat penting untuk cakupan area yang dilindungi secara efisien. Stasiun pemadam kebakaran harus ditempatkan dengan tepat dan strategis untuk memenuhi batas waktu respons maksimum. Menurut [1], batas waktu respons adalah ukuran kinerja yang paling sering digunakan di area penelitian ini. Stasiun pemadam kebakaran juga harus ditempatkan sedemikian rupa sehingga area yang dilayani maksimum [2]. Selain itu, penugasan kendaraan, dalam hal ini mobil pemadam kebakaran, ke setiap stasiun pemadam kebakaran juga sangat penting. Jumlah kendaraan yang tepat yang ditempatkan di setiap stasiun sangat memengaruhi efektivitas respons darurat. Namun, di beberapa stasiun pemadam kebakaran di Indonesia, misalnya di Kota Manado, jumlah kendaraan yang tersedia terbatas dan telah ditetapkan karena keterbatasan anggaran.

Untuk mengatasi masalah ini, kami mengembangkan model optimasi dua tahap. Tahap 1 diformulasikan sebagai masalah Pemrograman Linier Integer Murni (PILP) dengan tujuan memaksimalkan area cakupan setiap kandidat stasiun pemadam kebakaran. PILP adalah jenis masalah optimasi di mana fungsi tujuan dan persamaannya adalah linier, dan semua variabel dibatasi pada nilai integer. Tahap 2 diformulasikan sebagai masalah Pemrograman Kuadrat Integer Campuran (MIQP) untuk menentukan jumlah dan lokasi stasiun pemadam kebakaran yang optimal di kota dengan anggaran terbatas, sementara secara bersamaan mengoptimalkan penugasan setiap kendaraan ke stasiun pemadam kebakaran yang dipilih. Fungsi tujuan dan persamaan dalam masalah MIQP adalah linier atau kuadrat, dan sebagian dari variabel memiliki batasan integer.

Model optimasi dua tahap untuk memecahkan berbagai masalah seperti penjadwalan [3] [4], dan masalah rantai pasokan [5][6] telah dikembangkan sebelumnya. Namun, tidak ada penelitian ini yang membahas secara khusus tentang topik pemilihan lokasi stasiun pemadam kebakaran dan penugasan

kendaraan. Sementara itu, penelitian yang terkait dengan pemilihan lokasi stasiun pemadam kebakaran telah banyak dibahas selama bertahun-tahun. Berbagai model telah dikembangkan untuk memecahkan masalah ini. Beberapa penulis menggunakan Sistem Informasi Geografis (SIG) untuk menemukan lokasi stasiun pemadam kebakaran terbaik [7][8][9]. Beberapa yang lain menggabungkan penggunaan GIS dan metode lain seperti Algoritma ANT [2], Analytical Hierarchy Process (AHP) [10], dan fuzzy AHP [11] untuk pengambilan keputusan multi-kriteria.

AHP dengan analisis spasial multikriteria berdasarkan kerentanan area telah dibahas untuk menganalisis kebutuhan stasiun pemadam kebakaran [12]. Penulis lain mengadopsi algoritma K-Means untuk mendapatkan tata letak stasiun pemadam kebakaran berdasarkan data pengapian nyata (Wang, 2018). Algoritma optimasi berbasis model alokasi lokasi untuk menemukan pemadam kebakaran berdasarkan pengiriman ambulans telah disarankan [13]. Model penutup set [14] juga telah digunakan untuk menentukan jumlah dan lokasi stasiun pemadam kebakaran terbaik.

Kami mengamati bahwa metode optimasi spasial umumnya digunakan dalam penelitian yang terkait dengan pemilihan lokasi stasiun pemadam kebakaran [15][16][17][18][19]. [18], berhasil mengidentifikasi titik api risiko kebakaran tinggi di kota besar Beijing dan mengoptimalkan jumlah dan lokasi stasiun pemadam kebakaran baru. [19], membahas masalah alokasi lokasi multi-objektif berkapasitas terurut untuk menentukan posisi stasiun pemadam kebakaran dan alokasi permintaan. Mereka mengevaluasi 3 fungsi objektif yang berbeda menggunakan algoritma genetika dan simulasi anil. Meskipun ada banyak penelitian yang telah membahas beberapa metode yang berbeda dan mengembangkan model baru untuk memecahkan masalah pemilihan lokasi stasiun pemadam kebakaran, tetapi tidak satu pun dari penelitian di atas yang mengintegrasikan masalah penugasan kendaraan darurat ke dalam model mereka.

Makalah lain yang ditulis oleh [20], menyarankan model lokasi cakupan maksimal berkapasitas modular dengan beberapa tingkat kapasitas fasilitas untuk mengoptimalkan penempatan kendaraan darurat. Mereka juga menggunakan GIS untuk mengelola data spasial. Namun, model mereka menggunakan fasilitas yang sudah ada dan hanya berfokus pada masalah penugasan kendaraan. [21] mengusulkan model pemrograman integer untuk meminimalkan biaya terkait kebakaran guna menentukan alokasi sumber daya secara efisien untuk isolasi kebakaran hutan. [22] menyajikan model pemrograman non-linier untuk menentukan lokasi stasiun pemadam kebakaran dengan meminimalkan waktu respons. Namun, kedua model optimasi mereka [21][22] belum mempertimbangkan masalah penugasan kendaraan.

[23], mengembangkan model alokasi lokasi fasilitas holistik yang menarik dengan studi kasus Hefei di Tiongkok. Model pemrograman linear integer campuran telah digunakan untuk menyelesaikan masalah tersebut. Penulis mempertimbangkan beberapa faktor seperti ukuran stasiun pemadam kebakaran, jumlah kendaraan, keandalan layanan, dan status lalu lintas. Mereka juga menentukan jumlah

kendaraan yang akan dibeli dan kemudian ditempatkan di setiap stasiun. Oleh karena itu, mereka menjalankan model mereka di bawah batasan pengadaan kendaraan dan anggaran konstruksi. Namun, model kami diformulasikan sebagai model optimasi dua tahap, dan dibangun di bawah batasan anggaran transportasi dan konstruksi. Selain itu, dalam penelitian kami, jumlah total kendaraan yang tersedia adalah tetap dan telah ditentukan sebelumnya. Lebih jauh, jarak kandidat stasiun pemadam kebakaran ke sumber air terdekat dipertimbangkan dalam model kami.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi jumlah dan lokasi stasiun pemadam kebakaran yang optimal, sementara secara bersamaan menentukan kendaraan yang ditugaskan ke setiap stasiun pemadam kebakaran yang dipilih di bawah beberapa batasan, seperti waktu tempuh dan anggaran. Untuk memastikan bahwa model yang diusulkan akan berjalan dengan baik, kami melakukan studi kasus di Kota Manado, Indonesia.

II. FORMULASI MODEL MATEMATIKA

Model baru ini diformulasikan menggunakan model optimasi dua tahap. Mengingat kompleksitas pengumpulan data, beberapa asumsi dibuat sebagai berikut:

1. Kecelakaan kebakaran hanya terjadi di satu daerah bencana pada waktu yang sama.
2. Rute kendaraan jelas dan tidak terhalang. Perjalanan tidak terpengaruh oleh kerusakan kendaraan atau gangguan lainnya.
3. Lokasi kandidat stasiun pemadam kebakaran ditentukan sebelumnya berdasarkan kondisi akses jalan dan populasi di daerah tersebut.
4. Hanya satu kandidat stasiun utama yang dibangun.
5. Daerah bencana yang terletak di luar pulau utama tidak dibahas dalam penelitian ini.

Indeksnya adalah I dan J . Di mana $I = (1 \dots, i)$ adalah himpunan lokasi kandidat stasiun pemadam kebakaran, dan I' adalah himpunan lokasi kandidat stasiun pemadam kebakaran utama (dalam studi ini, hanya satu stasiun utama yang dibangun). $J = (1 \dots j)$ adalah himpunan area yang terdampak (area bencana).

Kami membagi model kami menjadi dua tahap. Tahap pertama adalah menentukan area cakupan setiap kandidat stasiun pemadam kebakaran dan lokasi satu stasiun utama. Selanjutnya, hasil tahap pertama digunakan sebagai masukan untuk model tahap kedua. Tahap kedua diformulasikan untuk memaksimalkan jumlah kandidat stasiun yang akan dibangun dan jumlah kendaraan yang akan dialokasikan di setiap kandidat stasiun yang dipilih.

Tabel 1. Parameter Model dan Variabel Keputusan

Parameters:	
∂_j	Population density of area j (people/area(Km ²)), $j \in J$
P_j	Probability of fire accidents in area j , $j \in J$
α_i	Criticality weight of each station candidate i , $i \in I$
T_{ij}	Response time of fire station i to reach area j (minute), $i \in I, j \in J$

Parameters:	
L_j	Minimum number of vehicles to cover area j, the denser an area is, the more vehicles are required, $j \in J$ (unit truck)
N	Total number of vehicles available (unit truck)
NV_i	Maximum number of vehicles can be placed in fire station i (unit truck), $i \in I$
TR	Maximum response time (minute)
DW_i	Distance of fire station candidate i to the nearest water resources (Km), $i \in I$
\overline{DW}	Maximum distance to the nearest water resources (Km)
C_{ij}	Round-trip transportation costs from fire station i to area j (IDR/minute), $i \in I, j \in J$
TC	Maximum transportation budget available (IDR)
CW_i	Construction cost of fire station i (IDR), $i \in I$
TCW	Total construction budget available (IDR)
Decision Variables:	
X_{ij}	is equal to 1 if fire station candidate i covers area j, 0 otherwise
Y_{ij}	is equal to 1 if fire station candidate i is constructed/opened to cover area j, 0 otherwise
V_{ij}	Integer number of vehicles allocated in fire station i to cover area j

Tahap Pertama: Area Cakupan

Fungsi Tujuan:

$$\text{Maximize } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} X_{ij} \tag{1}$$

Kendala:

$$X_{ij} T_{ij} \leq TR \quad \forall i \in I, j \in J \tag{2}$$

$$X_{ij} \in [1,0] \quad \forall i \in I, \forall j \in J \tag{3}$$

Fungsi objektif (1) memaksimalkan jumlah area yang dicakup oleh stasiun pemadam kebakaran. Batasan (2) menjamin bahwa waktu tempuh dari setiap kandidat stasiun pemadam kebakaran ke area yang terdampak tidak melebihi batas waktu yang ditentukan. Batasan (3) mendefinisikan batasan biner.

Tahap Kedua: Pemilihan kandidat pemadam kebakaran dan penugasan kendaraan

Fungsi Tujuan :

$$\text{Maximize } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} Y_{ij} V_{ij} \partial_j P_j \alpha_i \tag{1}$$

Kendala :

$$X_{ij} \geq Y_{ij} \quad \forall i \in I, j \in J \tag{2}$$

$$\sum_{i \in I} Y_{ij} V_{ij} \geq L_j \quad \forall j \in J \tag{3}$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} V_{ij} \leq N \tag{4}$$

$$Y_{ij} DW_i \leq \overline{DW} \quad \forall i \in I, j \in J \tag{5}$$

$$\sum_{i \in I} Y_{ij} \geq 1 \quad \forall j \in J \tag{6}$$

$$\sum_{j \in J} Y_{ij} \leq 1 \quad \forall i \in I \tag{7}$$

$$\sum_{j \in J} Y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I' \tag{8}$$

$$Y_{ij} V_{ij} \leq NV_i \quad \forall i \in I, j \in J \tag{9}$$

$$\sum_{i \in I} V_{ij} C_{ij} T_{ij} \leq TC \quad \forall j \in J \tag{10}$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} Y_{ij} CW_i \leq TCW \tag{11}$$

$$Y_{ij} \in [1,0] \quad \forall i \in I, \forall j \in J \tag{12}$$

$$V_{ij} \text{ integer } \quad \forall i \in I, \forall j \in J \tag{13}$$

$$V_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J \tag{14}$$

Fungsi objektif (1) memaksimalkan jumlah lokasi stasiun pemadam kebakaran yang dipilih untuk mencakup area yang terkena dampak, dan untuk memaksimalkan jumlah kendaraan yang ditugaskan ke setiap stasiun pemadam kebakaran. Batasan (2) memastikan bahwa stasiun pemadam kebakaran dapat dipilih hanya jika dapat mencakup area tertentu. Batasan (3) mengonfirmasi bahwa area dengan kepadatan populasi tinggi akan dilayani oleh lebih banyak kendaraan. Batasan (4) menjamin bahwa jumlah total kendaraan yang ditempatkan di semua stasiun tidak melebihi jumlah total kendaraan yang tersedia. Batasan (5) menunjukkan bahwa lokasi stasiun pemadam kebakaran yang dipilih berada di dekat sumber air. Batasan (6) memastikan bahwa setiap area bencana akan dicakup oleh setidaknya satu stasiun pemadam kebakaran. Batasan (7) memastikan bahwa hanya satu stasiun pemadam kebakaran yang diizinkan untuk dibangun di lokasi yang sama. Batasan (8) memastikan bahwa satu-satunya stasiun utama akan dibangun. Batasan (9) memastikan bahwa jumlah kendaraan yang ditandatangani di setiap stasiun kurang dari kapasitas stasiun. Batasan (10) menjamin bahwa biaya transportasi tidak melebihi total anggaran yang tersedia. Batasan (11) mengharuskan biaya konstruksi semua stasiun yang dipilih kurang dari total anggaran konstruksi. Batasan (12) dan (13) masing-masing mendefinisikan batasan biner dan integer. Batasan (14) menunjukkan batasan non-negatif.

III. STUDI KASUS: KOTA MANADO

Kota Manado merupakan ibu kota Provinsi Sulawesi Utara, Indonesia. Berdasarkan sensus tahun 2020, jumlah penduduk kota ini mencapai lebih dari 450.000 jiwa yang tersebar di wilayah seluas 162,53 km². Kota ini padat penduduk, mulai dari pasar, pertokoan, rumah makan, perkantoran, hingga permukiman penduduk. Berdasarkan data historis yang diberikan oleh Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Manado, setiap tahunnya terjadi sekitar 100 kali kebakaran. Salah satu kebakaran terbesar terjadi pada awal tahun 2021 yang mengakibatkan 140 kios di Pasar Rakyat Paniki, Kelurahan Paniki Dua, Kecamatan Mapanget ludes terbakar. Kejadian ini saja telah menimbulkan kerugian lebih dari Rp500 juta. Kejadian ini menunjukkan bahwa tanggap darurat kebakaran sangat dibutuhkan.

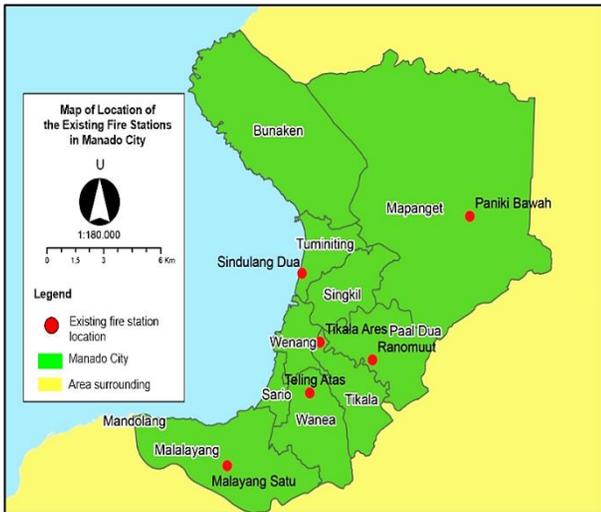
Berdasarkan wawancara dengan MCFD, kami menemukan bahwa pemilihan lokasi stasiun pemadam kebakaran yang ada di Kota Manado tidak didasarkan pada analisis lebih lanjut dan mungkin tidak mempertimbangkan beberapa faktor penting seperti kepadatan penduduk, waktu tempuh dari stasiun pemadam kebakaran ke daerah bencana, jarak ke sumber air, anggaran yang tersedia, atau bahkan kemungkinan kecelakaan kebakaran di setiap daerah bencana. Hal ini membuat jumlah dan lokasi stasiun pemadam kebakaran yang ada belum efektif.

Selain itu, jumlah kendaraan yang tersedia untuk menutupi daerah bencana telah ditetapkan karena keterbatasan anggaran pengadaan kendaraan. Pembatasan ini akan mengakibatkan terbatasnya jumlah kendaraan yang dapat dialokasikan di setiap stasiun. Oleh karena itu, Kota Manado dipilih sebagai studi kasus untuk model baru kami

IV. KONSTRAKSIDATA

Wilayah kerja KPBD meliputi 11 kecamatan yang terdiri dari 87 kelurahan dan total 553 lingkungan (Badan Pusat Statistik Kota Manado, 2021). Saat ini terdapat 6 pos pemadam kebakaran di Kota Manado, yang terdiri dari 1 pos pemadam kebakaran utama yang berlokasi di wilayah Tikala, dan 5 pos pemadam kebakaran minor yang berlokasi di Mapangnet, Tuminting, Malalayang, Wanea, dan Paal 2. Gambar 1 menunjukkan lokasi pos pemadam kebakaran yang ada di Kota Manado.

Selanjutnya, kami menentukan lokasi masing-masing kandidat pos pemadam kebakaran. Lokasi kandidat dipilih berdasarkan aksesibilitas jalan dan tingkat populasi. Dalam penelitian ini, dipilih dua lokasi kandidat dari setiap distrik di Kota Manado. Namun, dalam penelitian ini, demi penyederhanaan, kami tidak menyertakan data dari distrik Pulau Bunaken yang terletak di luar pulau utama. Gambar 2 menunjukkan lokasi masing-masing kandidat pos pemadam kebakaran, sedangkan Tabel 2 menyajikan rincian daerah bencana dan lokasi kandidat pos pemadam kebakaran.



Gambar 1. Lokasi stasiun pemadam kebakaran yang ada



Gambar 2. Lokasi calon stasiun pemadam kebakaran

Peluang terjadinya kebakaran pada setiap wilayah bencana dihitung berdasarkan jumlah kejadian kebakaran yang terjadi dari tahun 2016 sampai dengan tahun 2021. Estimasi waktu

tempuh dihitung berdasarkan lamanya perjalanan dari lokasi posko calon penyintas ke wilayah bencana. Mengingat kebakaran memerlukan respon yang cepat, dan berdasarkan ketentuan wilayah penanggulangan kebakaran (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2000), maka batas waktu tempuh ditetapkan 5 menit. Berdasarkan data yang diperoleh dari MCFD, sebanyak 18 unit mobil pompa atau mobil pemadam kebakaran jenis engine pumper (jenis mobil pemadam kebakaran yang umum) digunakan untuk mendukung kegiatan operasional di Kota Manado. Kecepatan rata-rata mobil pompa adalah 55 km/jam. Menurut MCFD, kapasitas pos pemadam kebakaran mayor adalah 12 unit mobil pompa, dan kapasitas pos pemadam kebakaran minor adalah 1 unit mobil pompa.

Tabel 2. Koordinat daerah bencana dan lokasi calon stasiun pemadam kebakaran

Ind ex	Disaster area	Ind ex	Fire Station Candidate Location	Coordinate	
				Latit ude	Longi tude
J1	Mapangnet	I1	Paniki Bawah ^{*)}	1.52	124.90
		I2	Kairagi dua	1.55	124.90
J2	Paal Dua	I3	Ranomuut ^{*)}	1.48	124.87
		I4	Perkamil	1.48	124.88
J3	Singkil	I5	Karame	1.49	124.85
		I6	Ternate Tanjung	1.49	124.86
J4	Wenang	I7	Bumi Beringin	1.48	124.84
		I8	Istiqlal	1.49	124.85
J5	Tikala	I9	Tikala Ares ^{**)}	1.48	124.85
		I10	Paal IV	1.47	124.87
J6	Wanea	I11	Teling Atas ^{*)}	1.47	124.85
		I12	Ranotana Weru	1.45	124.85
J7	Sario	I13	Sario Utara	1.47	124.84
		I14	Ranotana	1.46	124.84
J8	Malalayang	I15	Malalayang Satu ^{*)}	1.44	124.82
		I16	Malalayang Satu Timur	1.44	124.83
J9	Tuminting	I17	Sindulang Dua ^{*)}	1.51	124.84
		I18	Tumumpa Dua	1.52	124.85
J10	Bunaken	I19	Pandu	1.56	124.87
		I20	Tongkeina	1.57	124.82

^{*)} Lokasi stasiun pemadam kebakaran yang ada

^{**)} Lokasi stasiun pemadam kebakaran utama yang ada

Kepadatan penduduk diukur berdasarkan jumlah penduduk per kilometer persegi. Bobot kekritisitas stasiun pemadam kebakaran utama ditetapkan sebesar 0,5, sedangkan bobot kekritisitas stasiun pemadam kebakaran minor ditetapkan sebesar 0,0263. Dalam studi kasus ini, hanya satu stasiun utama yang diizinkan untuk dibangun. Biaya transportasi diperkirakan

berdasarkan lamanya waktu tempuh dan biaya bahan bakar (solar) dari truk pompa. Biaya bahan bakar dihitung sebesar Rp10.000 per truk per menit. Biaya pembangunan stasiun pemadam kebakaran utama dan minor diperkirakan masing-masing sebesar Rp5 Miliar per stasiun dan Rp2 Miliar per stasiun (Idayani et.al., 2020).

Tinjauan terhadap Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia Nomor 25/PRT/M/2008 tentang Pedoman Teknis Penyusunan Rencana Induk Sistem Proteksi Kebakaran, menyarankan agar penempatan stasiun pemadam kebakaran juga mempertimbangkan kedekatan dengan sumber air. Dalam penelitian ini, sumber air dapat berupa muara atau sungai. Kami mengasumsikan jarak dari calon stasiun pemadam kebakaran ke sumber air tidak boleh lebih dari 2 km. Sisa data dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Estimasi Data

Kemungkinan terjadinya kecelakaan kebakaran	Peluang terjadinya kebakaran pada area J1 sampai dengan J10 berturut-turut adalah = 0,12, 0,06, 0,15, 0,09, 0,13, 0,18, 0,04, 0,09, 0,03, dan 0,11.
Kepadatan penduduk (orang per km ²)	Kepadatan penduduk daerah bencana J1 sampai dengan J10 berturut-turut = 3445.991, 10924.623, 7055.489, 9394.812, 4509.715, 1181.037, 10827.515, 10220.532, 802.187, dan 4692.963.
Bobot kekritisian	Bobot kekritisian kandidat stasiun pemadam kebakaran I1 sampai I20 berturut-turut = 0,0263, 0,0263, 0,0263, 0,0263, 0,0263, 0,0263, 0,0263, 0,0263, 0,500, 0,0263, 0,0263, 0,0263, 0,0263, 0,0263, 0,0263, 0,0263, 0,0263, 0,0263, 0,0263, dan 0,0263.
Waktu tempuh	Diperkirakan berdasarkan kecepatan rata-rata mobil pemadam kebakaran, yaitu 55 km/jam.
Jumlah minimum kendaraan untuk mencakup setiap wilayah bencana (unit)	Jumlah minimum kendaraan untuk mencakup area J1 hingga J10 masing-masing = 1, 2, 1, 1, 1, 1, 2, 1, dan 1.
Jumlah total kendaraan yang tersedia (unit)	18 unit truk pompa.
Kapasitas stasiun (unit)	Jumlah maksimum kendaraan yang dapat ditempatkan di setiap stasiun pemadam kebakaran utama dan kecil = masing-masing 12 unit dan 1 unit.
Jarak setiap calon stasiun pemadam kebakaran ke sumber air terdekat (km)	Jarak kandidat stasiun pemadam kebakaran I1 sampai I20 berturut-turut = 5, 3, 5, 3, 3, 3, 6, 3, 3, 3, 0, 3, 4, 4, 4, 3, 5, 3, 3, dan 3 km.

Jarak maksimum ke sumber air terdekat (km)	Diperkirakan 5 km.
Biaya transportasi (IDR)	Rp 10.000 per truk/menit.
Anggaran transportasi maksimum (IDR)	Rp 500.000 per acara.
Biaya konstruksi (IDR)	Rp2.000.000.000,00 untuk pemadam kebakaran kecil; dan Rp5.000.000.000 untuk pemadam kebakaran besar.
Total anggaran konstruksi (IDR)	Diperkirakan berjumlah 30.000.000.000.

V. HASIL DAN PEMBAHASAN

Rumusan matematika dikodekan pada LINGO 18.0.44 x64 bit size. Semua percobaan diuji pada komputer pribadi dengan Intel(R) Core™ i5-5200U, RAM 8,00 GB, dan CPU 2,20 GHz. Waktu komputasi setiap percobaan kurang dari 1 menit. Pada tahap 1, kami menentukan area cakupan untuk setiap kandidat stasiun pemadam kebakaran. Batas waktu tempuh ditetapkan 5 menit, yang berarti lamanya waktu untuk berpindah dari satu stasiun ke area bencana tertentu kurang dari 5 menit. Jenis kendaraan yang digunakan oleh petugas pemadam kebakaran di kota Manado adalah truk pompa dengan kecepatan rata-rata 55 km/jam, dan biasanya membawa 3 atau 4 petugas pemadam kebakaran. Tabel 3 menyajikan area cakupan untuk setiap kandidat stasiun, di mana angka 1 adalah ketika kandidat stasiun pemadam kebakaran (i) akan dapat memberikan respons cepat ke area bencana tertentu (j), dan 0 adalah sebaliknya.

Hasil pada Tabel 4 menunjukkan bahwa, dalam batas waktu tempuh 5 menit, kandidat pos pemadam kebakaran I9 (berlokasi di Tikala Ares) mampu memberikan respon cepat terhadap 3 area bencana: J5, J6, dan J7. Dibandingkan dengan kandidat lain yang hanya dapat memberikan respon cepat terhadap maksimal 2 area bencana, kandidat I9 jelas lebih strategis. Oleh karena itu, kandidat I9 akan dipilih untuk lokasi pos pemadam kebakaran utama di Kota Manado. Hasil ini konsisten dengan situasi dalam sistem nyata, di mana pos pemadam kebakaran utama yang ada saat ini terletak di Tikala Ares. Ini juga berarti, bahwa pemerintah Manado telah memilih titik yang paling strategis untuk mendirikan pos pemadam kebakaran utama.

Tabel 4. Cakupan wilayah masing-masing calon stasiun pemadam kebakaran

Lokasi Kandidat Stasiun Pemadam Kebakaran (i)	Area Bencana (j)										Total
	J 1	J 2	J 3	J 4	J 5	J 6	J 7	J 8	J 9	J 10	
I1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
I2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2
I3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
I4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
I5	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	2
I6	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	2
I7	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	2
I8	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1

Lokasi Kandidat Stasiun Pemadam Kebakaran (i)	Area Bencana (j)										Total
	J 1	J 2	J 3	J 4	J 5	J 6	J 7	J 8	J 9	J 10	
I9*)	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	3
I10	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	2
I11	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	2
I12	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
I13	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	2
I14	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2
I15	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
I16	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2
I17	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
I18	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
I19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
I20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Total	2	3	2	2	5	4	4	3	4	2	

*) Calon pemadam kebakaran dengan jumlah layanan yang diberikan terbanyak.

Selain itu, hasil pada tahap 1 menunjukkan bahwa semua area bencana tercakup oleh setidaknya 2 kandidat stasiun. Area bencana yang paling banyak dilayani adalah area bencana J5, J6, J7, dan J9, sedangkan area bencana yang paling sedikit dilayani adalah area bencana J1, J3, J4, dan J10.

Selanjutnya, pada tahap 2, dengan menggunakan data yang diestimasi pada Tabel 3 dan hasil tahap 1 sebagai masukan, kami memilih lokasi optimal kandidat stasiun pemadam kebakaran untuk dibangun dan menetapkan penempatan setiap kendaraan ke stasiun pemadam kebakaran yang dipilih. Tabel 5 menyajikan lokasi stasiun pemadam kebakaran yang dipilih untuk memberikan respons cepat ke setiap area bencana, di mana 1 menunjukkan bahwa kandidat stasiun pemadam kebakaran di lokasi i dipilih untuk dibangun guna memberikan respons cepat ke area bencana tertentu j, dan 0 sebaliknya.

Seperti yang dapat dilihat pada Tabel 5, terdapat 13 lokasi stasiun pemadam kebakaran yang dipilih untuk dibangun yang terdiri dari 1 stasiun pemadam kebakaran utama (I9), dan 12 stasiun pemadam kebakaran minor (I1, I3, I4, I5, I6, I8, I9, I10, I11, I12, I15, I16, dan I20). Pada sistem riil, stasiun pemadam kebakaran utama I9 dan stasiun pemadam kebakaran minor I1, I3, I11, dan I15 sudah ada, sedangkan stasiun pemadam kebakaran I4, I5, I6, I8, I10, I12, I16, dan I20 diharapkan dapat dibangun.

Namun demikian, kandidat stasiun pemadam kebakaran I17 yang ada pada sistem riil tidak dipilih dalam model ini. Terdapat total 2 stasiun pemadam kebakaran yang mencakup daerah bencana J2, J5, dan J8, sedangkan daerah bencana lainnya hanya tercakup oleh 1 stasiun pemadam kebakaran. Hal ini disebabkan oleh kepadatan penduduk yang tinggi dan/atau kemungkinan terjadinya bencana yang tinggi di daerah bencana J2, J5, dan J8. Stasiun pemadam kebakaran terpilih ini dapat mencakup hingga 100% wilayah bencana.

Tabel 5. Kandidat stasiun pemadam kebakaran terpilih

Fire station candidate location (i)	Disaster area (j)										Selected station (Yes/No)
	J 1	J 2	J 3	J 4	J 5	J 6	J 7	J 8	J 9	J 10	
I1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Yes
I2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No
I3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	Yes
I4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	Yes
I5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	Yes
I6	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	Yes
I7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No
I8	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	Yes
I9*)	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	Yes
I10	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	Yes
I11	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	Yes
I12	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	Yes
I13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No
I14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No
I15	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	Yes
I16	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	Yes
I17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No
I18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No
I19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No
I20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	Yes
Total	1	2	1	1	2	1	1	2	1	1	

*) Lokasi stasiun pemadam kebakaran utama

VI. SENSITIVITY ANALYSIS

Analisis sensitivitas dilakukan dengan menguji 5 skenario berbeda untuk menunjukkan pentingnya beberapa parameter seperti anggaran konstruksi, anggaran transportasi, dan jumlah kendaraan yang tersedia (lihat Tabel 7). Skenario 1 dijalankan dengan menggunakan data asli anggaran yang tersedia, di mana anggaran konstruksi dan transportasi masing-masing sebesar Rp 30 Miliar dan Rp 500.000. Jumlah kendaraan yang tersedia ditetapkan sebesar 15 unit, 18 unit (berdasarkan data asli), dan 25 unit untuk semua skenario. Skenario 2 diuji dengan menambahkan anggaran konstruksi sebesar 20% (Rp 36 miliar) dan mengurangi anggaran transportasi sebesar 50% (Rp 250.000). Skenario 3 dijalankan dengan mengurangi anggaran konstruksi sebesar 20% (Rp 24 miliar), dan menambahkan anggaran transportasi sebesar 50% (Rp 750.000). Sementara itu, skenario 4 dijalankan dengan mengurangi anggaran transportasi sebesar 85% (Rp 75.000). Terakhir, skenario 5 diuji dengan mengurangi anggaran konstruksi dan transportasi masing-masing sebesar 10% dan 65% atau setara dengan Rp 27 miliar dan Rp 175.000.

Tabel 6. Skenario Analisis Sensitivitas

Skenario	Kasus awal (data asli)	Persentase area cakupan (%)				
		Anggaran Tersedia		Jumlah kendaraan yang tersedia (unit)		
		C	B	15	18	25
I	Kasus awal (data asli)	C	30,000,000,00	100 %	100 %	100 %
		B	0			

Skenario		Persentase area cakupan (%)				
		Anggaran Tersedia		Jumlah kendaraan yang tersedia (unit)		
				15	18	25
		T B	500,000			
2	meningkatkan 20% CB dan mengurangi 50% TB	C B	36,000,000,00	N/A	100 %	100 %
		T B	250,000			
3	Mengurangi 20% CB dan meningkatkan 50% TB	C B	24,000,000,00	N/A	N/A	N/A
		T B	750,000			
4	Mengurangi 85% TBC	C B	30,000,000,00	N/A	N/A	N/A
		T B	75,000			
5	Mengurangi 10% penyakit menular seksual dan mengurangi 65% penyakit menular seksual	C B	27,000,000,00	100 %	100 %	100 %
		T B	175,000			

Seperti yang disajikan pada Tabel 7, 5 skenario dijalankan dengan anggaran dan jumlah kendaraan yang berbeda. Skenario 1 yang dijalankan dengan menggunakan data anggaran asli, menunjukkan bahwa anggaran konstruksi dan transportasi yang tersedia cukup untuk mencakup semua area bencana baik dengan 15, 18, atau 25 unit kendaraan yang tersedia. Skenario 2 dan 3 menggambarkan perubahan anggaran yang berlawanan, di mana pada skenario 2 kami menambahkan anggaran konstruksi dan mengurangi anggaran transportasi, dan pada skenario 3 kami melakukan yang sebaliknya. Hasilnya cukup menarik di mana skenario 2 dengan 15 unit kendaraan yang tersedia menerima hasil yang tidak layak. Sementara itu, skenario yang sama dengan 18 dan 25 unit kendaraan yang tersedia menerima hasil yang baik dengan cakupan area bencana 100%. Lebih lanjut, skenario 3, menerima hasil yang tidak layak untuk semua perhitungan. Hasil yang tidak layak ini terjadi ketika satu atau lebih kendala tidak terpenuhi. Dalam model ini, setiap daerah bencana harus dicakup oleh setidaknya satu stasiun pemadam kebakaran, dan tidak ada cukup anggaran konstruksi yang tersedia untuk membangun stasiun pemadam kebakaran yang dapat mencakup semua daerah bencana.

Dengan membandingkan skenario 2 dan 3, kami mengamati bahwa pengurangan anggaran konstruksi sebesar 20% akan berdampak besar pada hasil, terutama ketika jumlah

kendaraan yang tersedia juga telah dikurangi menjadi hanya 15 unit. Sebaliknya, pengurangan anggaran transportasi sebesar 50% tidak mempengaruhi hasil akhir.

Untuk menemukan batas biaya transportasi, skenario 4 diperkenalkan. Seperti yang kita ketahui dalam model ini, kecelakaan kebakaran tidak dapat terjadi di beberapa daerah pada saat yang sama. Inilah sebabnya mengapa biaya transportasi rendah. Namun, jika anggaran transportasi dikurangi sebesar 85%, yaitu Rp 75.000, hasilnya tidak layak (seperti yang ditunjukkan pada skenario 4). Ini berarti bahwa biaya transportasi yang tersedia dalam model ini cukup untuk mendukung pengoperasian 25 unit kendaraan atau bahkan lebih. Terakhir, skenario 5 diperkenalkan untuk menunjukkan anggaran minimum yang dapat menghasilkan 100% area cakupan dengan 15, 18 atau 25 kendaraan yang tersedia. Ini dapat dianggap sebagai opsi bagi MCFD untuk mengurangi biaya. Beberapa pengujian telah dilakukan, dan anggaran minimum ditunjukkan pada Tabel 7 (lihat skenario 5), di mana anggaran konstruksi dan transportasi dapat dikurangi masing-masing hingga maksimum 10% dan 65%.

VII. KESIMPULAN

Terdapat banyak faktor yang mempengaruhi pemilihan lokasi stasiun pemadam kebakaran seperti waktu tempuh, kepadatan penduduk, dan jarak ke sumber air terdekat. Faktor-faktor ini perlu dipertimbangkan untuk memenuhi hasil penelitian. Penelitian ini mendemonstrasikan model optimasi dua tahap. Tahap 1 diformulasikan sebagai masalah PILP dengan tujuan untuk memaksimalkan area cakupan setiap stasiun pemadam kebakaran. Tahap 2 diformulasikan sebagai masalah MIQP yang mengintegrasikan pemilihan lokasi stasiun pemadam kebakaran yang optimal dan jumlah kendaraan yang ditugaskan ke setiap stasiun pemadam kebakaran yang dipilih.

Model ini cukup mudah diterapkan pada sistem nyata apa pun, seperti Kota Manado, Indonesia yang rawan kecelakaan kebakaran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semua area bencana dapat dicakup oleh stasiun pemadam kebakaran yang dipilih dengan parameter tertentu seperti waktu tempuh, anggaran, dan jumlah kendaraan. Untuk menentukan parameter yang paling terbatas, dilakukan analisis sensitivitas. Ada 5 skenario yang diuji dengan mengubah anggaran konstruksi dan transportasi, juga mengurangi dan menambah jumlah kendaraan yang tersedia. Hasil penelitian menunjukkan bahwa anggaran konstruksi merupakan parameter yang paling membatasi dalam penelitian ini, yang berarti pengurangan anggaran konstruksi lebih dari 10% akan menghasilkan perhitungan yang tidak layak.

Dalam model ini, stasiun pemadam kebakaran hanya dapat melayani satu daerah bencana pada satu waktu. Sementara di dunia nyata, kecelakaan kebakaran dapat terjadi di beberapa daerah pada waktu yang sama. Oleh karena itu, model selanjutnya akan dikembangkan untuk melayani tidak hanya satu, tetapi beberapa daerah bencana pada periode waktu yang sama. Selain itu, model kami tidak mempertimbangkan beberapa faktor eksternal yang dapat memengaruhi hasil akhir. Dengan demikian, untuk meningkatkan akurasi model ini, penelitian mendatang dapat mempertimbangkan faktor-faktor lain seperti kondisi jalan atau aksesibilitas jalan dan kondisi lalu lintas

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Aleisa, "The fire station location problem: A literature survey," *International Journal of Emergency Management*, vol. 14, no. 3, 2018. doi: 10.1504/IJEM.2018.094239.
- [2] N. Liu, B. Huang, and M. Chandramouli, "Optimal Siting of Fire Stations Using GIS and ANT Algorithm," *J. Comput. Civ. Eng.*, vol. 20, no. 5, 2006, doi: 10.1061/(asce)0887-3801(2006)20:5(361).
- [3] C. Deng, S. Zhang, W. Yang, W. Yao, J. Tan, and Z. Liu, "Two-Stage Optimization Model for Smart House Daily Scheduling Considering User Perceived Benefits," 2018. doi: 10.2991/mmsa-18.2018.15.
- [4] Y. A. Mercado, C. A. Henao, and V. I. González, "A two-stage stochastic optimization model for the retail multiskilled personnel scheduling problem: A k-chaining policy with $k \geq 2$," *Math. Biosci. Eng.*, vol. 19, no. 1, 2022, doi: 10.3934/mbe.2022041.
- [5] D. Hu, J. Feng, W. Zhao, Y. Zhai, and S. Xue, "Two Stage Optimization Models of the NCSRPE of Programs from the Perspective of Work," in *E3S Web of Conferences*, 2021. doi: 10.1051/e3sconf/202125101013.
- [6] A. Trivedi, A. Sohal, S. Joshi, and M. Sharma, "A two-stage optimization model for tactical planning in fresh fruit supply chains: A case study of Kullu, India," *Int. J. Supply Oper. Manag.*, vol. 8, no. 1, 2021, doi: 10.22034/IJSOM.2021.1.2.
- [7] A. Şen, I. Önden, T. Gökgöz, and C. Şen, "A Gis approach to fire station location selection," in *Gi4DM 2011 - GeoInformation for Disaster Management*, 2011.
- [8] M. Bagir and I. Buchori, "Model Optimasi Lokasi Pos Pemadam Kebakaran (Studi Kasus: Kota Semarang)," *Teknik*, vol. 33, no. 1, 2012.
- [9] X. M. Dong, Y. Li, Y. L. Pan, Y. J. Huang, and X. D. Cheng, "Study on Urban Fire Station Planning based on Fire Risk Assessment and GIS Technology," in *Procedia Engineering*, 2018. doi: 10.1016/j.proeng.2017.12.129.
- [10] K. Habibi, S. Lotfi, and M. J. Koohsari, "Spatial analysis of urban fire station locations by integrating AHP model and IO logic using GIS (A case study of zone 6 of Tehran)," *J. Appl. Sci.*, vol. 8, no. 19, 2008, doi: 10.3923/jas.2008.3302.3315.
- [11] W. Wang, "Site selection of fire stations in cities based on geographic information system and fuzzy analytic hierarchy process," *Ing. des Syst. d'Information*, vol. 24, no. 6, 2019, doi: 10.18280/isi.240609.
- [12] A. Sugianto and I. Buchori, "Analisis Kebutuhan Pos Pemadam Kebakaran Berdasarkan Tingkat Kerawanan Kawasan di Kabupaten Pati," *J. Pembang. Wil. KOTA*, vol. 16, no. 1, 2020, doi: 10.14710/pwk.v16i1.19956.
- [13] T. Suzuki and E. Satoh, "An analysis on the optimum location of fire department based on ambulance dispatch situation—A case study in Utsunomiya City," *Japan Archit. Rev.*, vol. 3, no. 2, 2020, doi: 10.1002/2475-8876.12144.
- [14] D. Idayani, Y. Puspitasari, and L. D. K. Sari, "Penggunaan Model Set Covering Problem dalam Penentuan Lokasi dan Jumlah Pos Pemadam Kebakaran," *J. Ilm. Soulmath J. Edukasi Pendidik. Mat.*, vol. 8, no. 2, 2020, doi: 10.25139/smj.v8i2.3280.
- [15] F. J. Alcasena, A. A. Ager, M. Salis, M. A. Day, and C. Vega-Garcia, "Optimizing prescribed fire allocation for managing fire risk in central Catalonia," *Sci. Total Environ.*, vol. 621, 2018, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.297.
- [16] U. F. Isa, M. A. Liman, M. U. Mohammed, O. S. Mathew, and Y. R. Yayo, "Spatial Analysis of Fire Service Station in Kano Metropolis, Nigeria," *IOSR J. Humanit. Soc. Sci.*, vol. 21, no. 09, 2016, doi: 10.9790/0837-2109014252.
- [17] K. C. Kiran, J. Corcoran, and P. Chhetri, "Spatial optimisation of fire service coverage: a case study of Brisbane, Australia," *Geogr. Res.*, vol. 56, no. 3, 2018, doi: 10.1111/1745-5871.12288.
- [18] W. Wang, Z. Xu, D. Sun, and T. Lan, "Spatial optimization of mega-city fire stations based on multi-source geospatial data: A case study in Beijing," *ISPRS Int. J. Geo-Information*, vol. 10, no. 5, 2021, doi: 10.3390/ijgi10050282.
- [19] S. Bolouri, A. Vafaeinejad, A. A. Alesheikh, and H. Aghamohammadi, "The ordered capacitated multi-objective location-Allocation problem for fire stations using spatial optimization," in *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2018. doi: 10.3390/ijgi7020044.
- [20] P. Yin and L. Mu, "Modular capacitated maximal covering location problem for the optimal siting of emergency vehicles," *Appl. Geogr.*, vol. 34, 2012, doi: 10.1016/j.apgeog.2011.11.013.
- [21] G. H. Donovan and D. B. Rideout, "An integer programming model to optimize resource allocation for wildfire containment," *For. Sci.*, vol. 49, no. 2, 2003, doi: 10.1093/forestscience/49.2.331.
- [22] J.-Y. Oh, A. Hessami, and H. J. Yang, "Minimizing Response Time with Optimal Fire Station Allocation," *Stud. Eng. Technol.*, vol. 6, no. 1, 2019, doi: 10.11114/set.v6i1.4187.
- [23] J. Ming, J. P. P. Richard, and J. Zhu, "A Facility Location and Allocation Model for Cooperative Fire Services," *IEEE Access*, vol. 9, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3091481.