

**OPTIMASI *FACILITY LOCATION PROBLEM* SEBAGAI UPAYA
PENINGKATAN EFEKTIVITAS CAKUPAN WILAYAH
MANAJEMEN KEBAKARAN DI DAERAH ISTIMEWA
YOGYAKARTA**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Strata-1
Program Studi Teknik Industri - Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia**



Nama : Zahwa Putri Aghniya
No. Mahasiswa : 22522329

**PROGRAM STUDI TEKNIK INDUSTRI PROGRAM SARJANA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
2026**

PERNYATAAN KEASLIAN

Saya mengakui bahwa tugas akhir ini adalah hasil karya saya sendiri kecuali kutipan dan ringkasan yang seluruhnya sudah saya jelaskan sumbernya. Jika dikemudian hari ternyata terbukti pengakuan saya ini tidak benar dan melanggar peraturan yang sah maka saya bersedia ijazah yang telah saya terima ditarik kembali oleh Universitas Islam Indonesia.

Yogyakarta, 23 Juni 2026


Zahwa Putri Aghniya)
22522329



SURAT BUKTI PENELITIAN



FAKULTAS
TEKNOLOGI INDUSTRI

Gedung KH. Mies Mansur
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kalirejo km 14.5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext. 4110, 4100
F. (0274) 895007
E. regjwi@iui.ac.id
W. iui.ac.id

SURAT KETERANGAN PENELITIAN

Nomor : 294/Ka.lab SIMANTI/20/Lab.SIMANTI/VI/2026

Assalamu'alaikum Warohmatullahi Wabarokaatuh

Dengan hormat,

Yang bertanda tangan dibawah ini, menerangkan bahwa:

Nama : Zahwa Putri Aghniya

Nim : 22522329

Jurusan : Teknik Industri

Dosen Pembimbing : Putri Dwi Annisa, S.T., M.Sc.

Menyatakan bahwa mahasiswa tersebut diatas telah melaksanakan penelitian tugas akhir dengan judul "**OPTIMASI FACILITY LOCATION PROBLEM SEBAGAI UPAYA PENINGKATAN EFEKTIVITAS CAKUPAN WILAYAH MANAJEMEN KEBAKARAN DI DAERAH ISTIMEWA YOGYAKARTA**". Mulai penelitian 1 Januari 2026 sampai 31 Mei 2026.

Demikian surat keterangan penelitian ini kami buat. Atas perhatiannya dan kerja samanya kami mengucapkan terima kasih.

Wassalamu'alaikum Warohmatullahi Wabarokaatuh

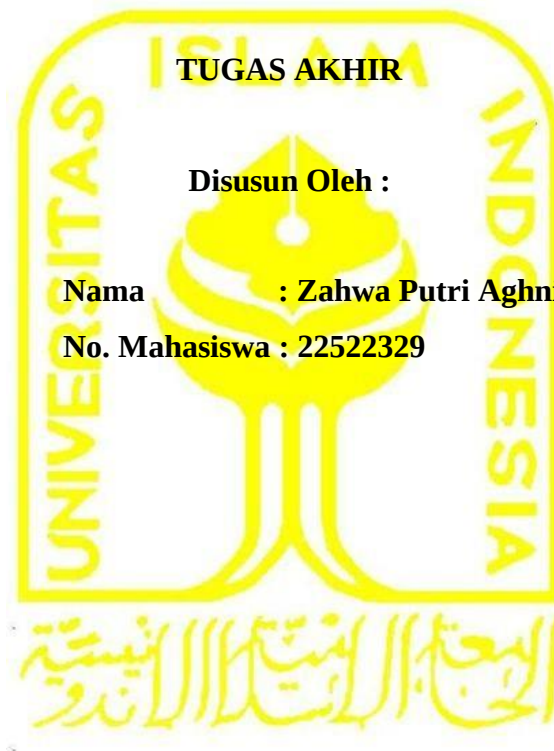
Yogyakarta, 12 Juni 2026

Kepala Laboratorium
Sistem Manufaktur Terintegrasi

Putri Dwi Annisa, S.T., M.Sc.

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

**OPTIMASI *FACILITY LOCATION PROBLEM* SEBAGAI UPAYA
PENINGKATAN EFEKTIVITAS CAKUPAN WILAYAH
MANAJEMEN KEBAKARAN DI DAERAH ISTIMEWA
YOGYAKARTA**



TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Zahwa Putri Aghniya

No. Mahasiswa : 22522329

Yogyakarta, 10 Juli 2026

Dosen Pembimbing

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Putri Dwi Annisa', is placed above the printed name of the supervisor.

Putri Dwi Annisa, S.T., M.Sc.

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI
OPTIMASI FACILITY LOCATION PROBLEM SEBAGAI UPAYA PENINGKATAN
EFEKTIVITAS CAKUPAN WILAYAH MANAJEMEN KEBAKARAN DI DAERAH
ISTIMEWA YOGYAKARTA

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Zahwa Putri Aghniya

No. Mahasiswa : 22522329

Telah dipertahankan di depan sidang penguji sebagai salah satu syarat untuk
memperoleh gelar Sarjana Strata-1 Teknik Industri Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia

Yogyakarta, 10 Juli 2026

Tim Penguji

Putri Dwi Annisa, S.T., M.Sc.

Ketua

Ir. Elanjati Worldailmi, S.T., M.Sc., IPM, ASEAN Eng.

Anggota I

Didin Dwi Novianto, S.T., M.LSCM.

Anggota II

Mengetahui,

Ketua Program Studi Teknik Industri Program Sarjana

Fakultas Teknologi Industri

Universitas Islam Indonesia

Ir. Muhammad Ridwan Andi Purnomo, S.T., M.Sc., Ph.D., IPM.

NIK 015220101

HALAMAN PERSEMBAHAN

Segala puji dan syukur atas kehadiran Allah SWT. Tugas akhir ini saya persembahkan kepada diri saya sendiri, Zahwa Putri Aghniya, yang telah bertahan, berjuang, dan terus melangkah hingga mampu menyelesaikan perjalanan sejak pertama kali mengenal bangku pendidikan hingga menyelesaikan pendidikan tinggi. Terima kasih karena telah tetap kuat, bangkit dalam setiap tantangan, dan berkomitmen untuk tidak menyerah hingga sampai pada titik ini. Dengan penuh cinta dan rasa syukur, karya ini juga saya persembahkan kepada Ayah dan Ibu tercinta, atas doa yang tidak pernah terputus, kasih sayang yang tulus, serta dukungan lahir dan batin yang senantiasa menyertai setiap langkah saya. Semoga tugas akhir ini menjadi akhir dari satu fase perjuangan sekaligus pembuka bagi hal baik, keberkahan, dan kesempatan baru di masa depan.

MOTTO

“Tidaklah mungkin bagi matahari mengejar bulan dan malam pun tidak dapat mendahului siang. Masing-masing beredar pada garis edarnya.”
(QS. Yasin (36): 40)

“Apa yang ditakdirkan untukmu akan menemukan jalannya kepadamu.”
(Umar bin Khattab)

“It always seems impossible until it is done.”
(Nelson Mandela)

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Puji syukur kehadiran Allah SWT. atas limpahan rahmat, taufik, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “Optimasi *Facility Location Problem* Sebagai Upaya Peningkatan Efektivitas Cakupan Wilayah Manajemen Kebakaran di Daerah Istimewa Yogyakarta” dengan baik tepat waktu.

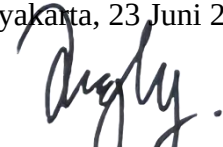
Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Industri pada Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia. Penulis menyadari bahwasanya penyusunan tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan, bimbingan, serta dukungan dari berbagai pihak. Untuk itu, dengan segala ketulusan hati, penulis menyampaikan ucapan terima kasih dan apresiasi sebesar-besarnya kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Sri Kusumadewi, S.Si., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia.
2. Bapak Dr. Drs. Imam Djati Widodo M.Eng.Sc., selaku Ketua Jurusan Teknik Industri Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia.
3. Bapak Ir. Muhammad Ridwan Andi Purnomo, S.T., M.Sc., Ph.D., IPM., selaku Ketua Program Studi Teknik Industri Program Sarjana Universitas Islam Indonesia.
4. Ibu Putri Dwi Annisa, S.T., M.Sc., selaku Dosen Pembimbing yang senantiasa memberikan bimbingan, arahan, dan motivasi dengan penuh kesabaran, serta meluangkan waktu selama proses penyusunan tugas akhir ini.
5. Kedua orang tua saya yang tidak pernah berhenti memberikan cinta, dukungan, dan doa terbaik. Terima kasih atas segala pengorbanan dan ketulusan yang telah menjadi penyemangat serta kekuatan utama bagi penulis untuk menyelesaikan studi ini.
6. Saudara kandung penulis, yang kehadirannya senantiasa sebagai teman dan penyemangat dalam menjalani setiap proses serta tantangan selama studi ini.
7. Pihak Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Daerah Istimewa Yogyakarta, Bapak Eko dan Bapak Mahujud. Terima kasih atas bantuan, waktu, serta kesediaannya dalam memberikan informasi dan data yang diperlukan sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.
8. Sahabat-sahabat penulis sejak masa sekolah, Sulis dan Angel yang telah menjadi bagian dari perjalanan penulis sejak bangku sekolah dasar, serta Danis, Ririn, dan Lulu yang menemani perjalanan sejak masa sekolah menengah. Terima kasih karena selalu hadir dalam setiap fase kehidupan penulis, baik suka maupun duka.
9. Sahabat-sahabat penulis selama masa perkuliahan, Feybia, Caca, Yanti, Nabila, Maura, Muthia, Najwa, Putri, keluarga kecil “Laa Haula”, Tim Chielmont, serta teman-teman lain yang tidak dapat disebutkan satu per satu. Terima kasih atas setiap kebersamaan, dukungan, dan cerita yang telah dibagikan. Kehadiran kalian menjadi salah satu penyemangat dalam setiap proses yang penulis jalani selama masa perkuliahan.
10. Seluruh Dosen, Tendik, dan Student Staff Teknik Industri Periode 2024-2026. Terima kasih atas ilmu, bimbingan, dukungan, serta pengalaman berharga yang telah diberikan kepada penulis selama masa perkuliahan.
11. Segenap keluarga besar Teknik Industri Universitas Islam Indonesia Angkatan 2022 atas kebersamaan yang telah mewarnai perjalanan selama masa perkuliahan.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih memiliki keterbatasan dan belum sepenuhnya sempurna. Oleh karena itu, penulis dengan terbuka mengharapkan kritik dan saran yang membangun sebagai bahan evaluasi dan perbaikan di masa yang akan datang. Penulis berharap karya ini dapat memberikan manfaat serta menjadi referensi yang berguna bagi pengembangan ilmu pengetahuan maupun bagi pihak-pihak yang membutuhkan.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Yogyakarta, 23 Juni 2026



Zahwa Putri Aghniya
22522329

ABSTRAK

Ketimpangan jangkauan layanan darurat dari 15 pos pemadam kebakaran atau Wilayah Manajemen Kebakaran (WMK) di Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY) memunculkan urgensi pemerataan layanan keselamatan publik di seluruh wilayah. penelitian ini bertujuan mengevaluasi efektivitas jangkauan pelayanan eksisting serta merekomendasikan lokasi penempatan pos WMK baru yang optimal secara spasial. permasalahan ini diformulasikan dalam tiga model *Facility Location Problem* (FLP), yaitu *Set Covering Problem* (SCP), *Partial Set Covering Problem* (PSCP), dan *Maximal Covering Location Problem* (MCLP). Analisis dilakukan menggunakan data *centroid* kecamatan dan matriks waktu tempuh jaringan jalan nyata pada *peak hour*. Seluruh model diselesaikan menggunakan algoritma eksak. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa kondisi eksisting hanya mampu melayani 43 kecamatan (55,13%) dari 78 kecamatan, dengan populasi sebesar 62,66% dalam standar waktu tanggap 15 menit. Model SCP merekomendasikan pembangunan 28 pos baru dengan cakupan wilayah 100% dan biaya Rp84.000.000.000. Model PSCP mengusulkan 18 WMK baru dengan cakupan 87,18% wilayah dan biaya Rp54.000.000.000. Sementara itu, MCLP menjadi alternatif paling ideal dengan penambahan 23 pos baru yang mampu menjangkau 93,59% wilayah dan 96,20% populasi dengan biaya Rp69.000.000.000. Berdasarkan analisis komparatif, MCLP dipilih sebagai model rekomendasi karena memberikan keseimbangan terbaik antara efektivitas cakupan layanan, kebutuhan pembangunan fasilitas, dan efisiensi biaya. Implementasi pembangunan WMK direkomendasikan dilakukan secara bertahap dengan memprioritaskan Kabupaten Gunungkidul dan Kulon Progo pada jangka pendek, Kabupaten Sleman pada jangka menengah, serta Kabupaten Bantul pada jangka panjang.

Kata Kunci: Optimasi, *Set Covering Problem*, *Partial Set Covering Problem*, *Maximal Covering Location Problem*, Stasiun Pemadam Kebakaran.

DAFTAR ISI

TUGAS AKHIR.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN	ii
SURAT BUKTI PENELITIAN.....	iii
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING.....	iv
LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI	v
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	vi
MOTTO.....	vii
KATA PENGANTAR	viii
ABSTRAK.....	x
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Batasan Penelitian.....	5
1.6 Asumsi Penelitian	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Kajian Literatur.....	7
2.2 Landasan Teori	11
2.2.1 <i>Set Covering Problem (SCP)</i>	11
2.2.2 <i>Partial Set Covering Problem (PSCP)</i>	12
2.2.3 <i>Maximal Covering Location Problem (MCLP)</i>	13
2.2.4 Metode Eksak dalam Penyelesaian Permasalahan Integer.....	14
2.2.5 Sistem Informasi Geografis (SIG).....	15
2.2.6 Pengukuran Waktu Tempuh (<i>Travel Time</i>).....	15
2.2.7 Waktu Tanggap Pada Layanan Darurat.....	17
BAB III METODE PENELITIAN	18
3.1 Objek Penelitian.....	18
3.2 Instrumen Penelitian	18
3.3 Sumber Data Primer dan Sekunder.....	19
3.4 Metode Pengumpulan Data.....	19
3.5 Populasi dan Sampel.....	20
3.5.1 Populasi	20
3.5.2 Sampel.....	20

3.6 Perancangan Model Optimasi.....	20
3.6.1 Perhitungan Waktu Tempuh dengan Google Maps Distance Matrix API	20
3.6.2 Model Matematis Facility Location Problem (FLP)	21
3.8 Alur Penelitian	25
BAB IV PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA	30
4.1 Pengumpulan Data	30
4.1.1 Gambaran Wilayah Penelitian.....	30
4.1.2 Data Lokasi Wilayah Manajemen Kebakaran (WMK)	33
4.1.3 Penerapan Batasan (<i>Threshold</i>) Jangkauan Layanan	35
4.1.4 Data Pendukung	35
4.2 Pengolahan Data	36
4.2.1 Perhitungan Matriks Waktu Tempuh	36
4.2.2 Skenario 1: Evaluasi Jangkauan Layanan Eksisting	40
4.2.3 Skenario 2: Optimasi Berbasis <i>Set Covering Problem</i> (SCP).....	43
4.2.4 Skenario 3: Optimasi Berbasis <i>Partial Set Covering Problem</i> (PSCP)	45
4.2.5 Skenario 4: Optimasi Berbasis <i>Maximal Covering Location Problem</i> (MCLP)	46
BAB V PEMBAHASAN	49
5.1 Analisis Kondisi Eksisting Wilayah Manajemen Kebakaran (WMK)	49
5.1.1 Tingkat Cakupan Layanan Eksisting.....	49
5.1.2 Distribusi Underserved Area	50
5.1.3 Analisis Kesenjangan Terhadap Target BPBD DIY	51
5.2 Analisis Hasil Optimasi	52
5.2.1 Optimasi Penempatan WMK dengan <i>Set Covering Problem</i> (SCP).....	52
5.2.2 Optimasi Penempatan WMK dengan <i>Partial Set Covering Problem</i> (PSCP).....	53
5.2.3 Optimasi Penempatan WMK dengan <i>Maximal Covering Location Problem</i> (MCLP)	54
5.3 Perbandingan Antar Hasil Optimasi	56
5.4 Pemilihan Model Rekomendasi	58
5.4.1 Dampak Penerapan Rekomendasi MCLP	58
5.4.2 Pertimbangan Strategis Implementasi Hasil Optimasi	59
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	61
6.1 Kesimpulan	61
6.2 Saran	62
DAFTAR PUSTAKA	64
LAMPIRAN	A-1

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Alur Penelitian.....	26
Gambar 5. 1 Peta Sebaran WMK Beserta Cakupannya	50
Gambar 5. 2 Peta Sebaran WMK dan Cakupan Layanan Hasil Optimasi SCP	52
Gambar 5. 3 Peta Sebaran WMK dan Cakupan Layanan Hasil PSCP.....	53
Gambar 5. 4 Peta Sebaran WMK dan Cakupan Wilayah Hasil MCLP	55

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Posisi Penelitian	9
Tabel 4. 1 Koordinat dan Populasi Seluruh Kecamatan di DIY	30
Tabel 4. 2 Koordinat WMK Eksisting di DIY	33
Tabel 4. 3 Perbandingan Target Jumlah WMK dengan Kondisi Eksisting.....	34
Tabel 4. 4 Parameter <i>Threshold</i> Jangkauan Layanan.....	35
Tabel 4. 5 Frekuensi Kejadian Kebakaran Bangunan di DIY Tahun 2021-2025	35
Tabel 4. 6 Laju Pertumbuhan Penduduk 2026	36
Tabel 4. 7 <i>Code</i> Inisialisasi Parameter Kendaraan.....	36
Tabel 4. 8 <i>Code</i> Konfigurasi Permintaan Rute.....	37
Tabel 4. 9 <i>Code</i> Pengambilan Data Rute	37
Tabel 4. 10 <i>Code</i> Ekstraksi Ringkasan Rute	37
Tabel 4. 11 <i>Code</i> Konversi dan Luaran.....	37
Tabel 4. 12 Matriks Waktu Tempuh (menit).....	39
Tabel 4. 13 Matriks Biner Cakupan	41
Tabel 4. 14 Hasil Evaluasi Cakupan Layanan WMK Eksisting.....	42
Tabel 4. 15 Daftar Kecamatan <i>Underserved</i> per Kabupaten/Kota.....	42
Tabel 4. 16 Hasil Optimasi <i>Set Covering Problem</i> (SCP)	43
Tabel 4. 17 Lokasi WMK Baru Terpilih Berdasarkan SCP	44
Tabel 4. 18 Jumlah WMK Baru Per Kabupaten/Kota (SCP).....	44
Tabel 4. 19 Hasil Optimasi <i>Partial Set Covering Problem</i> (PSCP).....	45
Tabel 4. 20 Lokasi WMK Baru Terpilih Berdasarkan PSCP	45
Tabel 4. 21 Jumlah WMK Baru Per Kabupaten/Kota (PSCP).....	46
Tabel 4. 22 Hasil Optimasi <i>Maximal Covering Location Problem</i> (MCLP).....	47
Tabel 4. 23 Lokasi WMK Baru Terpilih Berdasarkan MCLP	47
Tabel 4. 24 Jumlah WMK Baru Per Kabupaten/Kota (MCLP)	48
Tabel 5. 1 Distribusi Kecamatan <i>Underserved</i> per Kabupaten/Kota	50
Tabel 5. 2 Perbandingan Antar Hasil Optimasi.....	56
Tabel 5. 3 Kelebihan dan Kekurangan Seluruh Skenario	57
Tabel 5. 4 Prioritas Implementasi Pembangunan WMK DIY	59

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebakaran merupakan salah satu bencana yang sering terjadi di wilayah perkotaan maupun permukiman padat penduduk. Potensi meningkatnya risiko bencana kebakaran terutama di wilayah perkotaan diakibatkan oleh peningkatan aktivitas ekonomi, pertumbuhan kawasan pemukiman, serta kepadatan bangunan yang semakin tinggi (Osman et al., 2022). Berdasarkan Peraturan Badan Nasional Penanggulangan Bencana (2012) tentang Pedoman Umum Pengkajian Risiko Bencana, kebakaran berpotensi menimbulkan berbagai dampak kerugian, baik kerugian material, kerusakan fisik bangunan, ancaman keselamatan jiwa, hingga hilangnya rasa aman di lingkungan masyarakat. Kondisi ini menjadikan pengelolaan sistem pelayanan darurat sebagai kebutuhan mendasar bagi penyelenggara layanan publik di tingkat daerah.

Penyelenggaraan urusan pencegahan, pengendalian, dan pemadaman kebakaran di tingkat daerah dilakukan melalui pembentukan Wilayah Manajemen Kebakaran (WMK), yaitu unit operasional yang berfungsi sebagai salah satu indikator kesejahteraan masyarakat dalam era desentralisasi (Fikri, 2021). Di dalam setiap WMK, terdapat satu unit operasional dalam bentuk stasiun pemadam kebakaran yang merupakan fasilitas operasional bagian dari perangkat daerah yang bertugas menyelenggarakan urusan pencegahan, pengendalian, pemadaman kebakaran serta penyelamatan masyarakat dari bahaya kebakaran dan keadaan darurat lainnya (Kementerian Dalam Negeri, 2020). Setiap stasiun pemadam kebakaran dilengkapi dengan personel ahli, kendaraan pemadam, dan peralatan darurat, sehingga dapat menangani kejadian secara cepat. Keberadaan stasiun pemadam kebakaran yang tersebar secara strategis sangat penting untuk memastikan waktu tanggap ke lokasi kebakaran dapat memenuhi standar pelayanan.

Efektivitas WMK diukur berdasarkan waktu tanggap (*response time*), di mana Menteri Pekerjaan Umum Nomor 20 Tahun 2009 menetapkan Standar Pelayanan Minimal (SPM) bahwa petugas harus tiba di lokasi dan siap memberikan layanan dalam maksimal 15 menit sejak laporan diterima. Mengingat bahwa jarak fisik tidak selalu merepresentasikan aksesibilitas nyata di lapangan, analisis waktu tempuh dari pos pemadam kebakaran ke wilayah layanan menjadi aspek yang lebih relevan dalam evaluasi dan perencanaan sistem pelayanan kebakaran.

Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY) terdiri atas empat kabupaten dan satu kota dengan total 78 kecamatan, luas wilayah sekitar 3.185,80 km², dan jumlah penduduk sekitar 3.734.945 (Badan Pusat Statistik, 2025). Tingginya jumlah penduduk ini berbanding lurus dengan kebutuhan terhadap layanan penanggulangan kebakaran yang memadai, yang juga didukung oleh data kejadian di lapangan. Berdasarkan *platform* PAMOR JOGJA milik Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) DIY, pada periode 2021-2025 tercatat 1.029 kejadian kebakaran bangunan dengan total 1.024.588 objek terdampak. Data ini menunjukkan bahwa risiko kebakaran merupakan ancaman nyata yang membutuhkan respons sistem layanan yang andal.

Meskipun DIY telah memiliki 15 WMK yang tersebar di empat kabupaten dan satu kota, persebaran tersebut belum menjamin cakupan layanan yang merata. Berdasarkan hasil pengamatan awal, efektivitas WMK saat ini masih di bawah target ideal, yaitu kurang dari 70%. Kondisi ini diperparah oleh ketimpangan yang signifikan dalam jumlah WMK antar kabupaten/kota, di mana beberapa kabupaten hanya memiliki sedikit WMK operasional dibandingkan kebutuhan berdasarkan luas wilayah dan tingkat risikonya. Akibatnya, banyak wilayah pemukiman berada di luar jangkauan standar waktu tanggap 15 menit sehingga meningkatkan risiko kerugian material dan ancaman keselamatan jiwa masyarakat.

Berbagai penelitian sebelumnya telah mengkaji permasalahan aksesibilitas layanan pemadam kebakaran menggunakan pendekatan Sistem Informasi Geografis (SIG). Penelitian oleh Evalianto et al. (2024) menggunakan analisis jaringan dan *overlay* untuk mengidentifikasi wilayah yang belum tercover oleh stasiun pemadam kebakaran. Sementara itu, Vieri et al. (2023) dan Huda et al. (2026) menerapkan analisis pola sebaran spasial untuk mengevaluasi keseimbangan persebaran fasilitas publik. Meskipun efektif dalam memetakan kondisi eksisting dan tingkat aksesibilitas, pendekatan tersebut bersifat evaluatif-deskriptif dan tidak mampu menghasilkan kombinasi lokasi fasilitas baru yang optimal secara matematis. Oleh karena itu, dibutuhkan pendekatan yang tidak hanya mampu menjelaskan kesenjangan cakupan, tetapi juga secara eksplisit menentukan jumlah dan lokasi fasilitas yang paling efisien berdasarkan kriteria terukur.

Dalam literatur riset operasi, kerangka *Facility Location Problem* (FLP) menyediakan berbagai model matematis untuk menjawab permasalahan tersebut (Hazami & Zulkarnain, 2022). Model *Set Covering Problem* (SCP) meminimalkan jumlah fasilitas dengan syarat seluruh permintaan terlayani penuh (Idayani et al., 2020). *Partial Set Covering Problem*

(PSCP) merupakan pengembangan SCP yang mengakomodasi batasan biaya dan cakupan minimum per sub-wilayah, sehingga lebih sesuai terhadap kondisi ketimpangan layanan antar wilayah (Cordeau et al., 2019). Sementara itu, *Maximal Covering Location Problem* (MCLP) berfokus pada memaksimalkan cakupan permintaan di bawah keterbatasan jumlah fasilitas (Firmansyah et al., 2024). Untuk menyelesaikan model-model tersebut, metode eksak berbasis *Integer Linear Programming* (ILP) dapat diterapkan untuk menghasilkan solusi optimal global yang krusial dalam perencanaan fasilitas darurat yang bersifat statis dibandingkan pendekatan heuristik yang hanya menghasilkan solusi aproksimasi (Efiyanti & Idayani, 2025).

Berdasarkan kompleksitas permasalahan WMK di DIY, pendekatan berbasis FLP dengan kombinasi beberapa model dinilai relevan untuk dieksplorasi. Kondisi kesenjangan jumlah WMK yang signifikan antar kabupaten/kota menunjukkan bahwa satu model tunggal kemungkinan tidak cukup untuk merepresentasikan berbagai skenario kebijakan yang mungkin ada pada pemerintah daerah. Model SCP digunakan untuk mengidentifikasi kebutuhan minimum fasilitas guna mencapai cakupan layanan secara menyeluruh, PSCP digunakan untuk merepresentasikan skenario pembangunan dengan target cakupan minimum, sedangkan MCLP digunakan untuk memaksimalkan cakupan layanan dengan mempertimbangkan keterbatasan jumlah fasilitas yang dapat dibangun.

Berdasarkan uraian permasalahan di atas, terdapat urgensi untuk mengkaji pendekatan optimasi lokasi fasilitas yang mampu mengakomodasi kompleksitas kondisi WMK di DIY. Penelitian ini bertujuan mengeksplorasi penerapan model-model FLP dalam konteks perencanaan WMK melalui pendekatan multi-skenario. Pemodelan ini memanfaatkan data waktu tempuh berbasis kondisi jaringan jalan nyata dari *Google Maps Distance Matrix API* sebagai representasi aksesibilitas wilayah. Melalui pendekatan ini, diharapkan dapat menghasilkan rekomendasi penempatan WMK baru yang lebih efektif dan adaptif terhadap berbagai alternatif kebijakan sehingga dapat menjadi bahan pertimbangan bagi pemerintah daerah dalam mewujudkan pemerataan layanan penanggulangan kebakaran.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang tersebut, maka permasalahan pada penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana tingkat cakupan layanan serta sebaran wilayah yang belum terlayani (*underserved area*) oleh fasilitas Wilayah Manajemen Kebakaran (WMK) eksisting di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY)?
2. Bagaimana rekomendasi lokasi dan jumlah alokasi penambahan WMK baru di Provinsi DIY menggunakan model optimasi *Set Covering Problem* (SCP), *Partial Set Covering Problem* (PSCP), dan *Maximal Covering Location Problem* (MCLP) yang diselesaikan dengan algoritma eksak?
3. Bagaimana pemilihan model rekomendasi berdasarkan analisis komparatif antar skenario eksisting, SCP, PSCP, dan MCLP ditinjau dari efektivitas cakupan layanan, kebutuhan pembangunan fasilitas, efisiensi biaya, serta prioritas implementasinya di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY)?

1.3 Tujuan Penelitian

Berikut merupakan tujuan dan penelitian ini:

1. Menganalisis tingkat cakupan layanan aktual serta memetakan wilayah yang belum terlayani (*underserved area*) berdasarkan sebaran 15 WMK eksisting di Provinsi DIY.
2. Menentukan rekomendasi lokasi dan jumlah alokasi penambahan WMK baru di Provinsi DIY menggunakan model optimasi *Set Covering Problem* (SCP), *Partial Set Covering Problem* (PSCP), dan *Maximal Covering Location Problem* (MCLP) berbasis algoritma eksak.
3. Menentukan model optimasi yang paling sesuai berdasarkan analisis komparatif antar-skenario eksisting, SCP, PSCP, dan MCLP ditinjau dari efektivitas cakupan layanan, kebutuhan pembangunan fasilitas, dan efisiensi biaya, serta menyusun rekomendasi implementasi pembangunan WMK secara bertahap di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY).

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini yaitu:

1. Bagi Akademisi dan Peneliti
 - a. Memberikan pemahaman komprehensif mengenai integrasi model *Facility Location Problem* (FLP), khususnya *Set Covering Problem* (SCP), *Partial Set Covering Problem*

(PSCP), dan *Maximal Covering Location Problem* (MCLP), dalam menyelesaikan masalah alokasi fasilitas publik darurat.

- b. Menjadi referensi akademik bagi penelitian selanjutnya dalam melakukan pemodelan spasial fasilitas layanan darurat menggunakan data jaringan jalan nyata.
 - c. Memberikan wawasan mengenai pentingnya perencanaan distribusi fasilitas layanan darurat yang optimal guna meminimalkan waktu tanggap penanganan bencana.
 - d. Mengimplementasikan keilmuan Teknik Industri, khususnya pada bidang Riset Operasi dan Perancangan Tata Letak Fasilitas, untuk menyelesaikan permasalahan nyata di sektor publik.
 - e. Meningkatkan keahlian praktis dalam mengolah data spasial menggunakan Sistem Informasi Geografis (SIG) serta menyelesaikan model *Integer Linear Programming* (ILP) dengan algoritma eksak.
2. Bagi Pengambil Kebijakan
- a. Memberikan rekomendasi matematis mengenai jumlah dan alternatif lokasi optimal pembangunan WMK baru yang adaptif terhadap berbagai skenario kebijakan pemerintah daerah.
 - b. Menjadi bahan evaluasi kritis terhadap kinerja sebaran 15 WMK eksisting dalam melayani wilayah terdampak.
 - c. Mendukung proses pengambilan keputusan berbasis data serta penyusunan anggaran mitigasi bencana kebakaran yang lebih efisien dan tepat sasaran.

1.5 Batasan Penelitian

Batasan-batasan yang ditetapkan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Ruang lingkup optimasi difokuskan pada penempatan fasilitas WMK statis tingkat kecamatan di seluruh wilayah administratif Provinsi DIY dengan menggunakan pendekatan multi-skenario (SCP, PSCP, dan MCLP).
2. Parameter ambang batas (*threshold*) jangkauan pelayanan darurat yang digunakan adalah waktu tempuh seragam selama 15 menit di seluruh kabupaten/kota, sesuai dengan regulasi Peraturan Menteri Pekerjaan Umum No. 20/PRT/M/2009.
3. Unit permintaan direpresentasikan melalui titik tengah atau *centroid* administratif dari seluruh kecamatan di Provinsi DIY yang diekstraksi menggunakan perangkat lunak QGIS.

4. Perhitungan matriks waktu tempuh antar titik diekstraksi menggunakan data jaringan jalan nyata dari *Google Maps Distance Matrix API* dengan pengambilan data pada waktu sore hari, tanpa mempertimbangkan hambatan temporer yang tidak terduga, seperti penutupan jalan mendadak, demonstrasi, atau kerusakan jalan akibat bencana alam.
5. Data historis yang digunakan dibatasi pada kejadian kebakaran bangunan periode 2021–2025, sehingga analisis hanya mencakup pelayanan terhadap insiden kebakaran bangunan dan tidak mempertimbangkan jenis kejadian darurat lainnya.
6. Data historis kejadian kebakaran dan laju pertumbuhan penduduk digunakan sebagai informasi pendukung dalam penyusunan rekomendasi implementasi hasil optimasi dan tidak dimasukkan ke dalam formulasi model matematis FLP.

1.6 Asumsi Penelitian

Penelitian ini menetapkan beberapa asumsi yang diperlukan untuk mengatasi keterbatasan data yang tersedia, sebagai berikut:

1. Estimasi biaya pembangunan fisik pos pemadam kebakaran diasumsikan seragam untuk setiap WMK baru, yaitu sebesar Rp3.000.000.000 per unit armada, tanpa mempertimbangkan perbedaan harga lahan, kondisi topografi, dan biaya operasional.
2. Setiap kejadian kebakaran bangunan diasumsikan ditangani oleh satu unit armada pemadam kebakaran.
3. Armada dan personel pemadam kebakaran diasumsikan selalu siap beroperasi dengan tangka air penuh saat menerima laporan kejadian.
4. Seluruh fasilitas WMK, baik stasiun induk, pos, maupun sektor, diasumsikan memiliki kemampuan operasional yang setara dalam memberikan layanan penanganan kebakaran.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Literatur

Penelitian ini didasarkan pada berbagai referensi dari studi terdahulu yang digunakan sebagai dasar teoritis dan konseptual. Referensi tersebut dianalisis melalui kajian induktif dengan merangkum penelitian yang memiliki kesamaan topik dan metode. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi pola yang ada serta membandingkan temuan penelitian ini dengan penelitian yang relevan. Pada bagian kajian literatur juga dijelaskan mengenai *state of the art* dari penelitian serta perbedaannya dengan studi terdahulu.

Set Covering Problem (SCP) merupakan salah satu model pada *Facility Location Problem*, yang berfokus pada minimalisasi jumlah fasilitas untuk mencapai cakupan layanan penuh di seluruh wilayah permintaan. Model SCP banyak diimplementasikan dalam konteks layanan darurat, seperti penentuan lokasi pos pemadam kebakaran (Idayani et al., 2020) dan fasilitas kesehatan (Efiyanti & Idayani, 2025; Idayani, 2025), serta dalam optimasi lokasi *charging station* (Aslan Özşahin & Erdebilli, 2023; Sagar et al., 2024), hingga alokasi tempat pengolahan sampah di perkotaan (Firmansyah et al., 2024). Keunggulan model ini terletak pada efisiensi biaya dan sumber daya, sebagaimana dibuktikan oleh Idayani et al. (2020) yang menggunakan biaya pembangunan sebagai fungsi tujuan, SCP berhasil merekomendasikan 6 pos pemadam kebakaran dengan biaya pembangunan 6 miliar rupiah, dimana lebih rendah dibandingkan dengan kondisi eksisting yang menghabiskan 7 miliar rupiah dengan cakupan yang terbatas. Meskipun demikian, penerapan SCP mengasumsikan bahwa seluruh wilayah harus terlayani tanpa mempertimbangkan keterbatasan anggaran, sehingga model ini perlu dikombinasikan dengan pendekatan lain ketika terdapat batasan jumlah fasilitas yang dibangun.

Sebagai pengembangan dari SCP, model *Partial Set Covering Problem* (PSCP) diperkenalkan oleh Daskin & Owen (1999) sebagai respons terhadap solusi SCP dengan tujuan meminimalkan total biaya melalui minimasi jumlah fasilitas yang dibuka dengan batasan cakupan permintaan yang disyaratkan (parsial). Meskipun pemodelan matematisnya yang berbasis *Mixed Integer Linear Programming* (MILP), optimasi ini menghasilkan kombinasi penentuan lokasi fasilitas berbiaya paling efisien, di mana dibuktikan oleh Chen et al. (2023) pada penelitiannya sehingga terbukti dapat memecahkan alokasi fasilitas dengan titik permintaan yang luas.

Dalam kondisi keterbatasan anggaran atau jumlah fasilitas, model *Maximal Covering Location Problem* (MCLP) menjadi alternatif yang relevan karena bertujuan memaksimalkan cakupan layanan pada titik permintaan dengan jumlah fasilitas atau anggaran yang telah ditetapkan (Hartini et al., 2021). Firmansyah et al. (2024) menguji efektivitas MCLP dalam mengalokasikan fasilitas pengolahan sampah, di mana penempatan fasilitas pada lokasi optimal mampu memenuhi seluruh permintaan dengan kapasitas maksimal. Kombinasi beberapa model FLP secara sekuensial terbukti menghasilkan rekomendasi yang lebih komprehensif, sebagaimana ditunjukkan oleh Julia et al. (2024) yang mengintegrasikan SCP, MCLP, dan P-Median untuk optimasi stasiun pemadam kebakaran, di mana setiap model berkontribusi pada aspek yang berbeda, yaitu efisiensi jumlah fasilitas, jaminan cakupan, dan minimasi waktu tempuh secara berturut-turut. Labita & Namoco, (2023) juga membuktikan bahwa kombinasi MCLP dengan pemodelan berlapis mampu mengatasi populasi yang sebelumnya tidak terjangkau dalam standar waktu yang ditetapkan.

Dalam penyelesaian *Facility Location Problem* (FLP), terutama pada model permasalahan integer, penggunaan algoritma eksak menjadi krusial untuk menemukan solusi optimal global melalui pemangkasan skenario yang tidak efisien secara sistematis (Aziz, 2025). Keunggulan metode ini dibuktikan oleh Idayani (2025), di mana penggunaan *Branch and Bound* pada model SCP menghasilkan jumlah fasilitas statis, seperti pemadam kebakaran, yang paling efisien (36 unit) dengan distribusi yang lebih merata dibandingkan skenario lainnya. Berbeda dengan pendekatan heuristik seperti *Greedy Adding* dan *Saving Matrix* yang hanya menghasilkan solusi pendekatan, algoritma eksak menjamin ditemukannya solusi optimal global, dimana ini merupakan karakteristik yang sangat penting untuk penempatan fasilitas statis seperti pos pemadam kebakaran yang bersifat jangka panjang dan tidak direlokasi dalam jangka pendek (Muslim & Supriyono, 2025; Sari et al., 2021).

Penetapan ambang batas (*threshold*) jarak atau waktu tempuh merupakan parameter krusial yang menentukan jumlah serta cakupan optimal fasilitas dalam model FLP. Pribadi et al. (2022) menunjukkan bahwa *threshold* 15 menit dengan model SCP mampu merekomendasikan 6 pos strategis untuk menjangkau 100% wilayah di Kabupaten Tabanan. Pentingnya *threshold* juga terlihat pada optimasi berbasis GIS di Jakarta, di mana perubahan standar waktu anggap secara drastis dapat mempengaruhi persentase cakupan layanan (Zainal et al., 2022). Julia et al. (2024) menetapkan standar waktu maksimal 15 menit dengan jangkauan 7,5 km sebagai parameter cakupan layanan pemadam kebakaran. Secara keseluruhan, ketepatan penentuan ambang batas sangat mempengaruhi keberhasilan model dalam menghasilkan rekomendasi lokasi fasilitas yang efektif dan efisien, sesuai dengan kondisi geografis wilayah penelitian.

Tabel 2. 1 Posisi Penelitian

No	Penulis	Objek			Model			Algoritma		
		<i>Fire Station</i>	Fasilitas Kesehatan	<i>Charging Station</i>	SCP	PSCP	MCLP	Eksak	Heuristik	Metaheuristik
1	(Efiyanti & Idayani, 2025)		√		√			√		
2	(Idayani et al., 2020)	√			√			√		
3	(Aktaş et al., 2013)	√			√		√	√		
4	(Firmansyah et al., 2024)						√		√	
5	(Julia et al., 2024)	√			√		√			
6	(Rahman et al., 2021)	√	√		√		√			
7	(Labita & Namoco, 2023)	√					√			
8	(Idayani, 2025)		√		√			√		
9	(Pribadi et al., 2022a)	√			√					
10	(Aslan Özşahin & Erdebilli, 2023)			√	√				√	
11	(Sagar et al., 2024)			√	√					
12	(Zainal et al., 2022)	√								
13	(Hartini et al., 2021)						√			

No	Penulis	Objek			Model			Algoritma		
		<i>Fire Station</i>	Fasilitas Kesehatan	<i>Charging Station</i>	SCP	PSCP	MCLP	Eksak	Heuristik	Metaheuristik
14	(Sari et al., 2021)						√			√
15	(Chen et al., 2023)					√	√	√		
16	Usulan	√			√	√	√	√		

Berdasarkan pemetaan studi terdahulu pada tabel 2.1, sebagian besar penelitian cenderung menggunakan satu model optimasi tunggal dalam menyelesaikan lokasi fasilitas pelayanan. Perencanaan fasilitas pelayanan publik di lapangan sering dihadapkan pada situasi yang kompleks dan dinamis. Guna mengisi celah penelitian tersebut, penelitian ini mengusulkan solusi yang lebih komprehensif dengan mengintegrasikan tiga model utama dalam *Facility Location Problem* (FLP), yaitu *Set Covering Problem* (SCP) dan *Maximal Covering Location Problem* (MCLP). Selain itu, penelitian ini juga mempertimbangkan penggunaan *Partial Set Covering Problem* (PSCP) sebagai pengembangan dari SCP untuk merepresentasikan kondisi yang lebih realistis dengan kondisi lapangan, mengingat pemenuhan cakupan layanan seringkali terkendala oleh keterbatasan sumber daya dan anggaran.

Ketiga model ditetapkan sebagai permasalahan integer dan diselesaikan menggunakan algoritma eksak melalui *Solver CBC* pada *Python PuLP*. Penelitian ini memanfaatkan data waktu tempuh dari *Google Maps Distance Matrix API*. Melalui perbandingan hasil ketiga model, penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan alternatif rekomendasi lokasi WMK yang sesuai, baik dari sisi cakupan pelayanan maupun keterbatasan sumber daya yang dimiliki daerah.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 *Set Covering Problem* (SCP)

Set Covering Problem (SCP) merupakan model optimasi lokasi fasilitas yang bertujuan menentukan jumlah minimum fasilitas yang diperlukan untuk mencakup seluruh titik permintaan dalam batas jarak atau waktu pelayanan tertentu (C. S. ReVelle et al., 2002). Model ini banyak diterapkan pada perencanaan fasilitas pelayanan publik, seperti rumah sakit (Efiyanti & Idayani, 2025), stasiun pemadam kebakaran (Pribadi et al., 2022), dan fasilitas darurat lainnya. Dalam model ini, setiap titik permintaan dianggap terlayani apabila berada dalam jarak atau waktu tempuh tertentu dari lokasi fasilitas yang dipilih (Aktaş et al., 2013). Oleh karena itu, konsep cakupan (*coverage*) menjadi aspek utama dalam analisis model ini. Model matematika SCP yang ditetapkan adalah sebagai berikut:

$$\min \sum_{j \in J} x_j \quad (2.1)$$

$$\sum_{j \in N_p} x_j \geq 1 \quad p \in P \quad (2.2)$$

$$x_j \in \{0, 1\} \forall j \in J \quad (2.3)$$

Di mana:

J : himpunan lokasi kandidat stasiun pemadam kebakaran

j : lokasi kandidat stasiun pemadam kebakaran dalam himpunan J

P : himpunan titik permintaan

p : titik permintaan dalam himpunan P

N_p : himpunan lokasi fasilitas yang dapat menjangkau titik permintaan p dalam batas waktu atau jarak tertentu

Model SCP pertama kali diperkenalkan oleh C. ReVelle et al. (1976) dengan tujuan meminimalkan jumlah fasilitas yang dibangun sekaligus memastikan seluruh titik permintaan tercakup. Kelebihan model ini adalah mampu menghasilkan cakupan penuh dengan jumlah fasilitas minimum. Namun, SCP mengharuskan seluruh titik permintaan tercakup sehingga kurang fleksibel ketika terdapat keterbatasan sumber daya atau anggaran.

2.2.2 Partial Set Covering Problem (PSCP)

Partial Set Covering Problem (PSCP) merupakan pengembangan oleh Daskin & Owen (1999) dari *Set Covering Problem* (SCP) yang bertujuan menentukan lokasi fasilitas dengan biaya minimum sehingga sejumlah permintaan yang telah ditentukan dapat tercakup. PSCP hanya mensyaratkan sebagian permintaan tercakup sesuai target cakupan yang ditetapkan. Oleh karena itu, model ini lebih fleksibel untuk diterapkan pada kondisi dengan keterbatasan sumber daya atau anggaran. Formulasi matematis PSCP ditunjukkan pada persamaan:

$$\min \sum_{i \in I} f_i y_i \quad (2.4)$$

$$\sum_{i \in I_j} y_i \geq z_j \quad (2.5)$$

$$\sum_{j \in J} d_j z_j \geq D \quad (2.6)$$

$$y_i, z_j \in \{0, 1\} \quad (2.7)$$

Dengan:

I : himpunan lokasi kandidat fasilitas

i : lokasi kandidat fasilitas dalam himpunan (I)

J : himpunan titik permintaan

j : titik permintaan dalam himpunan (J)

- I_j : himpunan fasilitas yang dapat mencakup titik permintaan (j)
 f_i : biaya pembukaan fasilitas pada lokasi (i)
 d_j : besarnya permintaan pada titik (j)
 D : total minimum permintaan yang harus tercakup
 y_i : variabel biner yang bernilai 1 jika fasilitas dibuka pada lokasi i; 0 jika tidak
 z_j : variabel biner yang bernilai 1 jika titik permintaan j tercakup; 0 jika tidak

Kelebihan dari PSCP adalah kemampuannya menghasilkan solusi fleksibel karena tidak mengharuskan seluruh titik permintaan tercakup. Akan tetapi, model ini tidak menjamin cakupan penuh sehingga masih terdapat kemungkinan sebagian titik permintaan tidak terlayani.

2.2.3 Maximal Covering Location Problem (MCLP)

Maximal Covering Location Problem (MCLP) merupakan model optimasi lokasi fasilitas yang bertujuan memaksimalkan jumlah permintaan atau populasi yang tercakup dalam batas jarak atau waktu pelayanan tertentu dengan jumlah fasilitas yang terbatas (C. S. ReVelle et al., 2002). Model ini dikembangkan untuk mengatasi kondisi ketika sumber daya yang tersedia tidak memungkinkan seluruh titik permintaan dilayani secara penuh, sehingga lokasi fasilitas dipilih untuk menghasilkan cakupan pelayanan yang maksimum. Model matematika MCLP dirumuskan sebagai berikut:

$$\max \sum_{i \in I} w_i y_i \quad (2.8)$$

$$\sum_{j \in N_i} x_j \geq y_i \quad \forall i \in I \quad (2.9)$$

$$\sum_{j \in J} x_j \geq p \quad (2.10)$$

$$x_{jk} \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J \quad (2.11)$$

$$y_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I \quad (2.12)$$

Di mana:

- I : himpunan titik permintaan
 J : himpunan kandidat lokasi fasilitas
 p : jumlah fasilitas yang akan dibuka
 w_i : bobot atau populasi yang dilayani pada titik permintaan i
 N_i : himpunan lokasi kandidat fasilitas j yang dapat melayani titik permintaan i dalam standar waktu S, $N_i = \{j | d_{ij} \leq S\}$, dimana d_{ij} merupakan waktu tempuh dari lokasi i ke lokasi j

Kelebihan MCLP adalah mampu menghasilkan cakupan pelayanan maksimum pada kondisi jumlah fasilitas yang terbatas. Akan tetapi, model ini tidak menjamin seluruh titik permintaan tercakup karena fokus utamanya adalah memaksimalkan cakupan berdasarkan sumber daya yang tersedia.

2.2.4 Metode Eksak dalam Penyelesaian Permasalahan Integer

Integer Linear Programming (ILP) merupakan pengembangan dari program linier, di mana variabel keputusan dibatasi bernilai bilangan bulat atau integer (Basriati, 2018). Pembatasan ini diperlukan karena solusi program linier umumnya berupa bilangan pecahan, yang kurang relevan ketika variabel merepresentasikan entitas yang tidak dapat dibagi, seperti jumlah fasilitas atau unit layanan (Dali et al., 2022). Apabila seluruh variabel keputusan bersifat integer atau biner, model dikategorikan sebagai ILP. Sementara itu, apabila terdapat kombinasi antara variabel integer dan kontinu dalam satu model, maka model dikategorikan sebagai *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) (Wolsey, 2020). Dalam penentuan lokasi fasilitas, variabel keputusan umumnya dinyatakan dalam bentuk biner (0-1), di mana nilai 1 menunjukkan bahwa suatu lokasi dipilih sebagai fasilitas, sedangkan nilai 0 menunjukkan sebaliknya. Pada model tertentu seperti PSCP, terdapat tambahan variabel kontinu yang merepresentasikan proporsi permintaan yang tidak terlayani sehingga model tersebut tergolong MILP.

Metode eksak yang umum digunakan untuk menyelesaikan ILP maupun MILP adalah *Branch and Bound* (B&B). Algoritma ini bekerja dengan membagi permasalahan menjadi sub masalah yang lebih kecil (*branching*), kemudian mengeliminasi cabang yang tidak mungkin menghasilkan solusi optimal melalui proses *bounding* menggunakan relaksasi LP (Liu et al., 2023). Pada setiap node pohon pencarian, nilai *bound* dibandingkan dengan solusi apabila *bound* suatu cabang lebih buruk, cabang tersebut dipangkas tanpa perlu dieksplorasi lebih lanjut (B et al., 2024). Pengembangan dari *Branch and Bound* adalah metode *Branch and Cut*, yang menambahkan *cutting plane* sebelum dilakukan *branching* lebih lanjut. *Cutting plane* adalah pertidaksamaan valid yang ditambahkan ke dalam formulasi LP untuk memperketat *relaxation gap* antara solusi relaksasi LP dan solusi integer optimal (Cornuéjols, 2008). Pada model MILP, *relaxation gap* cenderung lebih besar karena adanya interaksi variabel biner dan kontinu, sehingga penguatan melalui *cutting plane* menjadi semakin penting. Jenis *cutting plane* yang umumnya digunakan meliputi *cover inequalities*, *Gomory cuts*, dan *facility-client consistency*

cuts. Solver COIN-OR *Branch and Cut* (CBC) mengimplementasikan algoritma *Branch and Cut* secara otomatis (Forrest & Lougee-Heimer, 2005).

2.2.5 Sistem Informasi Geografis (SIG)

Sistem Informasi Geografis (SIG) merupakan teknologi berbasis komputer yang digunakan untuk mengumpulkan, menyimpan, mengelola, menganalisis, dan menampilkan data spasial maupun nonspasial yang berkaitan dengan berbagai lokasi di permukaan bumi (Perrina, 2021). SIG banyak dimanfaatkan dalam berbagai bidang, seperti perencanaan wilayah, pengelolaan sumber daya, hingga analisis lokasi fasilitas publik (Erkamim et al., 2023). Secara operasional, implementasi sistem ini didukung oleh lima komponen utama, yaitu perangkat keras, perangkat lunak (seperti QGIS), data geografis, metode analisis, dan sumber daya manusia yang mengoperasikannya (Tinambunan & Sintaro, 2021).

Dalam proses analisisnya, SIG memanfaatkan basis data spasial yang menyajikan lokasi geografis mengenai suatu objek di permukaan bumi dalam bentuk titik, garis, maupun *polygon*. Pada data berbentuk *polygon*, salah satu konsep yang sering digunakan adalah *centroid*, yaitu titik pusat geometris dari suatu wilayah yang digunakan untuk merepresentasikan suatu wilayah menjadi satu titik koordinat (Deakin et al., 2002). Representasi ini bertujuan untuk menyederhanakan suatu wilayah sehingga dapat digunakan dalam berbagai analisis berbasis lokasi (Smith et al., 2025). Melalui perangkat lunak QGIS, koordinat geografis (*latitude* dan *longitude*) dari *centroid* setiap kecamatan dapat dihitung secara otomatis untuk kemudian digunakan sebagai basis data permintaan dalam perhitungan jarak atau waktu tempuh (Sulaiman et al., 2025).

2.2.6 Pengukuran Waktu Tempuh (*Travel Time*)

Jarak merupakan salah satu parameter penting dalam analisis aksesibilitas yang digunakan untuk menggambarkan tingkat keterjangkauan suatu lokasi terhadap lokasi lainnya (Yenisetty & Bahadure, 2020). Selain jarak, waktu tempuh (*travel time*) juga merupakan parameter penting yang menunjukkan durasi perjalanan dari titik asal menuju titik tujuan melalui suatu jaringan transportasi (Tahmasbi & Haghshenas, 2019). Waktu tempuh dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti jarak perjalanan, kecepatan kendaraan, kondisi jalan, dan lalu lintas. Berdasarkan Pedoman Kapasitas Jalan Indonesia Direktorat Jenderal Bina Marga (2023), waktu tempuh dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$WT = \frac{P}{Vp} \quad (2.13)$$

Keterangan:

WT : waktu tempuh (jam)

P : panjang ruas atau jarak (km)

Vp : kecepatan tempuh rata-rata arus lalu lintas untuk kendaraan tertentu (km/jam)

Google Maps Distance Matrix API merupakan layanan pemetaan digital yang dikembangkan oleh Google untuk menghitung jarak dan estimasi waktu tempuh antara titik asal (*origin*) dan titik tujuan (*destination*) berdasarkan jaringan jalan nyata (Google Developers, 2026). Berbeda dengan pendekatan jarak lurus yang hanya mengukur jarak geometris, layanan ini menggunakan data jaringan jalan aktual beserta kondisi lalu lintas sehingga menghasilkan estimasi yang lebih representatif terhadap kondisi perjalanan nyata di lapangan (Umam et al., 2025).

Secara teknis *Google Maps Distance Matrix* API menggunakan algoritma *Contraction Hierarchies* yang dikombinasikan dengan algoritma Dijkstra dan A-Star untuk menemukan jalur dengan bobot minimum pada jaringan jalan yang dimodelkan sebagai graf $G = (V, E)$, di mana V merepresentasikan simpul (*node*) berupa persimpangan jalan dan E merepresentasikan sisi (*edge*) berupa segmen jalan dengan bobot tertentu. Pencarian jalur terpendek dilakukan dengan meminimalkan total bobot lintasan dari simpul asal s ke simpul tujuan t :

$$d(s, t) = \min \sum_{i=1}^{m-1} w(n_i, n_{i+1}) \quad (2.14)$$

Di mana

$w(n_i, n_{i+1})$: bobot segmen jalan antara simpul n_i dan n_{i+1}

m : jumlah simpul pada lintasan yang ditempuh

Estimasi waktu tempuh dihitung menggunakan fungsi heuristik A-star dengan persamaan:

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (2.15)$$

Di mana

$g(n)$: biaya aktual dari simpul asal ke simpul n

$h(n)$: estimasi heuristik biaya dari simpul n ke tujuan.

Bobot segmen jalan ditentukan berdasarkan data lalu lintas dinamis sehingga estimasi waktu tempuh yang dihasilkan sudah memperhitungkan variasi kecepatan kendaraan pada kondisi jalan yang berbeda. Luaran yang dihasilkan dari *Google Maps Distance Matrix* API berupa nilai *distance* dalam satuan meter dan *duration* dalam satuan detik untuk setiap pasangan titik asal dan tujuan.

2.2.7 Waktu Tanggap Pada Layanan Darurat

Response time atau waktu tanggap dalam layanan darurat merupakan waktu yang dibutuhkan sejak laporan kejadian diterima hingga unit layanan darurat tiba di lokasi kejadian (Wan Jusoh et al., 2022). Waktu tanggap menjadi salah satu indikator penting dalam menilai kinerja layanan pemadam kebakaran karena menunjukkan seberapa cepat unit tanggap darurat dapat mencapai lokasi kejadian setelah menerima laporan insiden, sehingga berpengaruh terhadap efektivitas penanganan keadaan darurat (Al-Jarallah & And Eid Al Dossary, 2015). Dapat disimpulkan bahwa semakin cepat unit layanan darurat dapat mencapai lokasi kejadian, maka semakin besar peluang untuk meminimalkan dampak yang ditimbulkan dari suatu kejadian darurat, seperti kecelakaan, kebakaran, maupun kondisi medis yang memerlukan penanganan segera.

Dalam pelayanan pemadam kebakaran, kecepatan waktu tanggap sangat penting untuk meminimalkan dampak kerugian akibat kebakaran. Oleh karena itu, dalam perencanaan dan evaluasi layanan pemadam kebakaran digunakan standar waktu tanggap sebagai acuan kinerja pelayanan. Berdasarkan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 20/PRT/M/2009 tentang Pedoman Teknis Manajemen Proteksi Kebakaran di Perkotaan, waktu tanggap respon untuk menjangkau lokasi kejadian kebakaran ditetapkan maksimal 15 menit sejak laporan kejadian diterima hingga unit pemadam kebakaran tiba di lokasi kejadian (Menteri Pekerjaan Umum, 2009). Standar waktu tanggap tersebut digunakan sebagai indikator untuk menilai kemampuan layanan pemadam kebakaran dalam menjangkau lokasi kejadian secara cepat dan efektif.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Objek Penelitian

Objek penelitian merupakan fokus kajian ilmiah yang digunakan sebagai dasar dalam pengumpulan data untuk mencapai tujuan penelitian secara objektif, valid, dan reliabel. Dalam penelitian ini, penentuan jumlah dan lokasi optimal Wilayah Manajemen Kebakaran (WMK) atau stasiun pemadam kebakaran di Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY) merupakan objek yang diteliti. Adapun objek tersebut melibatkan koordinat *centroid* tingkat kecamatan yang direpresentasikan menjadi titik-titik permintaan, serta waktu tempuh antar titik asal dan titik tujuan.

3.2 Instrumen Penelitian

Dalam penelitian ini, beberapa instrumen diperlukan untuk mendukung pengumpulan dan analisis data. Berikut merupakan instrumen penelitian yang digunakan:

1. *Dataset*, terdiri dari data-data yang dibutuhkan dalam proses pengolahan data. Data tersebut meliputi peta wilayah administrasi Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY), titik koordinat pos pemadam kebakaran Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY), data historis kebakaran bangunan di Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY) dalam lima tahun terakhir, data jumlah penduduk menurut kecamatan di Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY), Standar Pelayanan Minimal penanganan kejadian kebakaran, serta biaya pembangunan dan kapasitas layanan pemadam kebakaran.
2. Layanan pemetaan digital *Google Maps Distance Matrix API*, digunakan untuk menghitung jarak dan waktu tempuh antara titik asal (*origin*) dan titik tujuan (*destination*).
3. Bahasa pemrograman Python, digunakan untuk mengeksekusi proses optimasi melalui *Solver CBC* oleh Python PuLP.
4. *Tools* pendukung, yaitu QGIS untuk memetakan wilayah administrasi dan titik koordinat *centroid* kecamatan, *Google Spreadsheet* untuk menghitung jarak dan waktu tempuh dengan dukungan *Google Maps Distance Matrix API*, Microsoft Excel untuk merekapitulasi data yang telah dikumpulkan dan diolah, serta *Google Colaboratory* untuk melakukan pemrograman optimasi dengan Python.

3.3 Sumber Data Primer dan Sekunder

Berikut merupakan jenis dan sumber data yang digunakan dalam penelitian ini:

1. Data primer, merupakan informasi yang diperoleh dan dikumpulkan secara langsung. Pada penelitian ini, data primer didapatkan melalui observasi dan wawancara. Data yang didapatkan melalui observasi di internet yaitu data wilayah administrasi DIY per kecamatan, titik koordinat pos pemadam kebakaran DIY eksisting, data kejadian kebakaran bangunan di DIY dalam lima tahun terakhir, dan Standar Pelayanan Minimal kejadian kebakaran. Sedangkan, data yang diperoleh melalui wawancara yaitu data target Wilayah Manajemen Kebakaran (WMK) di DIY, kondisi cakupan dan kebijakan target WMK di DIY saat ini, serta estimasi biaya unit pemadam kebakaran.
2. Data sekunder diperoleh melalui kajian literatur maupun perantara, seperti buku, jurnal penelitian terdahulu, artikel, *website*, dan sumber tertulis lainnya. Data ini digunakan untuk mendukung dan memvalidasi kualitatif dalam penelitian serta membantu sebagai data pendukung terhadap data primer yang telah diperoleh.

3.4 Metode Pengumpulan Data

Pengumpulan data bertujuan untuk memperoleh informasi yang tepat, relevan, serta mendukung tujuan penelitian. Pada penelitian ini, data dikumpulkan melalui dua metode utama, di antaranya:

1. Wawancara

Dalam penelitian ini, wawancara dilakukan dengan Kepala Bagian Pemadam Kebakaran dan Keselamatan (Damkarmat) Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) DIY. Tujuan dari metode ini adalah memperoleh informasi mengenai tantangan operasional dalam memenuhi permintaan layanan penanggulangan kebakaran, khususnya kebakaran bangunan. Tantangan operasional dikhususkan dalam konteks keterbatasan cakupan stasiun pemadam kebakaran akibat minimnya jumlah WMK eksisting. Selain itu, wawancara dilakukan untuk menggali informasi mengenai kebijakan penanggulangan, standar minimal pelayanan, serta estimasi biaya unit pemadam kebakaran.

2. Studi Literatur

Observasi tidak langsung dilakukan melalui kajian literatur serta mencari berbagai sumber informasi atau data secara daring yang relevan dengan topik penelitian. Sumber informasi tersebut terdiri dari jurnal ilmiah, laporan penelitian sebelumnya, artikel, data spasial,

dokumen yang berkaitan mengenai peran pemadam kebakaran di Indonesia, penerapan model *Facility Location Problem* (FLP) dan algoritma eksak pada fasilitas layanan darurat, serta analisis spasial dalam penyelesaian masalah aksesibilitas layanan.

3.5 Populasi dan Sampel

3.5.1 Populasi

Populasi merupakan seluruh elemen yang menjadi objek penelitian, yang dapat berupa individu, objek, peristiwa, maupun data yang memiliki karakteristik tertentu sesuai dengan tujuan penelitian. Populasi dalam penelitian ini mencakup seluruh wilayah geografis Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY) yang memiliki potensi risiko kebakaran bangunan dan memerlukan proteksi layanan darurat, di mana pada penelitian ini digambarkan dalam batas wilayah administratif tingkat kecamatan. Data kependudukan serta data historis kejadian kebakaran bangunan juga digunakan sebagai parameter populasi untuk menggambarkan intensitas permintaan layanan yang harus dipenuhi oleh fasilitas pemadam kebakaran.

3.5.2 Sampel

Sampel dalam penelitian ini terdiri dari dua komponen utama, yaitu unit permintaan (*demand points*) dan unit fasilitas. Unit permintaan direpresentasikan oleh 78 kecamatan di wilayah DIY, di mana setiap kecamatan diwakili oleh titik koordinat *centroid* masing-masing wilayah. Penggunaan kecamatan sebagai unit analisis didasarkan pada pembagian Wilayah Manajemen Kebakaran (WMK) yang telah ditetapkan oleh BPBD DIY serta beberapa penelitian terdahulu dengan unit analisis yang sama. Sementara itu, unit fasilitas terdiri dari 15 pos pemadam kebakaran eksisting serta kandidat lokasi baru yang dihasilkan melalui pemetaan lokasi tidak terlayani atau *underserved*. Pendekatan tersebut digunakan untuk menentukan titik koordinat rekomendasi guna memenuhi target pemenuhan WMK di tiap kabupaten/kota yang saat ini masih memiliki kesenjangan antara jumlah WMK eksisting dengan target kebutuhan layanan.

3.6 Perancangan Model Optimasi

3.6.1 Perhitungan Waktu Tempuh dengan Google Maps *Distance Matrix* API

Data waktu tempuh antar titik lokasi diperoleh melalui Google Maps *Distance Matrix* API, yaitu layanan yang menghitung estimasi jarak dan waktu tempuh berdasarkan kondisi jaringan jalan nyata (Google Developers, 2026). Penggunaan API ini dipilih karena mampu mengakomodasi hambatan lalu lintas aktual di lapangan, sehingga lebih representatif

dibandingkan pendekatan jarak lurus maupun *Euclidean* yang mengabaikan kondisi jaringan jalan.

Pengambilan data waktu tempuh dilakukan pada rentang waktu sore hari yang merepresentasikan kondisi lalu lintas puncak (*peak hour*), dengan merujuk pada metodologi analisis aksesibilitas dinamis oleh Ma et al. (2025). Pemilihan skenario lalu lintas terpadat didasarkan pada pertimbangan bahwa kondisi kemacetan lalu lintas merupakan skenario kritis paling realistis yang harus diatasi untuk menjamin keandalan dan kestabilan respons penyelamatan darurat. Pengambilan waktu tempuh pada API berupa nilai *distance* (meter) dan *duration* (detik), yang selanjutnya *duration* dikonversi menjadi menit sebagai satuan akhir yang digunakan dalam proses optimasi. Data waktu tempuh ini dihitung untuk setiap pasangan titik kandidat pos WMK dan pusat kecamatan yang belum terlayani atau *underserved* sehingga menghasilkan matriks waktu tempuh sebagai data masukan utama model optimasi lokasi.

3.6.2 Model Matematis *Facility Location Problem* (FLP)

Permasalahan penentuan lokasi fasilitas berkembang dari model dasar *Facility Location Problem* (FLP) ke dalam berbagai varian seiring dengan kompleksitas kebutuhan layanan publik. Penelitian ini memformulasikan pendekatan komparatif multi-skenario melalui tiga model FLP utama, yaitu *Set Covering Problem* (SCP), *Partial Set Covering Problem* (PSCP), dan *Maximal Covering Location Problem* (MCLP).

Kerangka kerja model SCP pada penelitian ini diadaptasi dari teori C. S. ReVelle et al. (2002) dalam penelitian Aktaş et al. (2013) yang berorientasi pada pemenuhan cakupan penuh dengan kuantitas fasilitas paling minimum. Untuk menyesuaikan kondisi di lapangan, penelitian ini juga menggunakan model *Partial Set Covering Problem* (PSCP) guna meminimalkan jumlah pos WMK yang dapat memenuhi layanan berdasarkan jumlah cakupan tertentu (Cordeau et al., 2019). Model MCLP juga diadaptasi dari penelitian yang dilakukan oleh Aktaş et al. (2013) dengan fokus memaksimalkan cakupan permintaan berdasarkan keterbatasan jumlah fasilitas. Ketiga model matematika tersebut dikategorikan sebagai permasalahan integer dan diselesaikan secara eksak menggunakan algoritma eksak yang dijalankan melalui *Solver CBC* pada Python PuLP.

3.6.2.1 Komponen Dasar Model Matematis

Sebelum menyusun fungsi tujuan dan kendala dari masing-masing skenario, diperlukan pendefinisian mengenai komponen dasar model yang meliputi notasi himpunan, parameter jaringan jalan, serta variabel keputusan sebagai berikut:

a. Notasi Himpunan dan Indeks

- i : indeks untuk wilayah kecamatan yang berstatus tidak terlayani oleh pos kesisting I *underserved* ($i \in \text{Kecamatan underserved}$)
- j : indeks untuk alternatif lokasi kandidat pos pemadam kebakaran (WMK) baru ($j \in \text{Kandidat}$)
- N_i : Himpunan kandidat j yang dapat menjangkau kecamatan I dalam kurang dari standar waktu tempuh
- kab : indeks untuk wilayah administrative kabupaten atau kota di Provinsi DIY ($kab \in \text{Kabupaten}$)

b. Parameter Jaringan dan Kebijakan

- d_{ij} : Jarak waktu tempuh nyata (menit) dari kandidat pos j menuju pusat kecamatan i berdasarkan pengumpulan data jaringan jalan nyata.
- P_{kab} : Batasan kuota maksimal jumlah pos WMK baru yang diizinkan untuk dibangun pada masing-masing wilayah kabupaten/kota.
- a : Persentase jaminan jangkauan pelayanan minimum untuk kelompok kecamatan yang belum terlayani

c. Variabel Keputusan

- w_i : Variabel bobot permintaan atau populasi yang dilayani pada titik permintaan
- x_j : Variabel biner untuk status pembangunan pos WMK; bernilai 1 jika alternatif lokasi kandidat j dipilih untuk dibangun pos baru, dan bernilai 0 jika tidak dibangun.
- y_i : Variabel biner untuk status jangkauan wilayah; bernilai 1 jika kecamatan i berhasil terlayani dalam standar waktu tanggap ≤ 15 menit, dan bernilai 0 jika tidak terlayani.
- z_{ij} : Variabel biner untuk plot alokasi pelayanan; bernilai 1 jika aktivitas cakupan kebakaran di kecamatan i dialokasikan secara khusus ke pos pelayanan j , dan bernilai 0 jika tidak dialokasikan.

3.6.2.2 Set Covering Problem (SCP)

Model ini mengadopsi formulasi dasar *Set Covering Problem* (SCP) dari teori C. S. ReVelle et al. (2002) dalam Aktaş et al. (2013) yang disesuaikan untuk kondisi wilayah penelitian. Perbedaan dengan model pada landasan teori terletak pada pembatasan ruang lingkup wilayah permintaan, di mana fungsi tujuan dan kendala pada skenario model ini disesuaikan agar berfokus pada menyelesaikan optimasi pada kelompok kecamatan yang belum terlayani oleh pos WMK eksisting.

a. Fungsi Tujuan

Fungsi tujuan dari model SCP diformulasikan untuk meminimalkan jumlah fasilitas pos WMK baru yang dibangun pada lokasi kandidat:

$$\text{Min } Z = \sum_{j \in \text{Kandidat}} x_j \quad (3.1)$$

b. Kendala 1: Jaminan Cakupan Wilayah

Memastikan setiap titik permintaan harus dilayani setidaknya satu kandidat fasilitas pemadam (WMK) yang berada dalam *threshold* 15 menit.

$$\sum_{j \in \text{Kandidat}} x_j \geq 1 \quad \forall i \in \text{Kecamatan } \textit{Underserved} \quad (3.2)$$

c. Kendala 2: Sifat Biner Variabel

Membatasi nilai dari variabel keputusan pembangunan fasilitas agar hanya berupa keputusan biner bulat:

$$x_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in \text{Kandidat} \quad (3.3)$$

3.6.2.3 Partial Set Covering Problem (PSCP)

Model *Partial Set Covering Problem* (PSCP) mengadopsi formulasi dikembangkan oleh Daskin & Owen (1999) serta Cordeau et al. (2019) yang disesuaikan untuk kondisi wilayah penelitian. Model ini memiliki fungsi tujuan meminimalkan jumlah fasilitas dengan syarat minimum tertentu dari seluruh permintaan harus terlayani guna meminimalkan total biaya pembangunan.

a. Fungsi Tujuan

Fungsi tujuan dari model PSCP diformulasikan untuk meminimalkan jumlah fasilitas pos WMK baru yang dibangun pada lokasi kandidat

$$\text{Min } Z = \sum_{j \in \text{Kandidat}} x_j \quad (3.4)$$

b. Kendala 1: Jaminan Cakupan Wilayah

Memastikan setiap titik permintaan harus dilayani setidaknya satu kandidat fasilitas pemadam (WMK) yang berada dalam *threshold* 15 menit

$$\sum_{j \in \text{Kandidat}} x_j \geq 1 \quad \forall i \in \text{Kecamatan } \textit{Underserved} \quad (3.5)$$

c. Kendala 2: Pemenuhan Cakupan Minimum

Total kecamatan *underserved* yang terlayani harus memenuhi proporsi minimum α dari kecamatan *underserved*.

$$\sum_{j \in \text{Kandidat}} y_i \geq \alpha \cdot \text{Kecamatan Underserved} \quad (3.6)$$

d. Kendala 3: Keterbatasan Target Pembangunan

Kendala ini membatasi agar total fasilitas pos WMK baru per kabupaten/kota tidak melampaui nilai batas target *gap* yang telah ditetapkan oleh pemerintah daerah.

$$\sum_{j \in \text{KandidatKab}} x_j \leq P_{kab} \quad \forall kab \in \text{Kabupaten} \quad (3.7)$$

e. Kendala 4: Sifat Biner Variabel

Memastikan variabel keputusan penempatan pos dan status keterlayanan wilayah berada dalam domain bilangan biner:

$$x_j, y_i \in \{0, 1\} \quad \forall j \in \text{Kandidat}, \forall i \in \text{Kecamatan Underserved} \quad (3.8)$$

3.6.2.4 Maximal Covering Location Problem (MCLP)

Model ini diadaptasi dari penelitian Aktaş et al. (2013) dengan fungsi tujuan memaksimalkan cakupan permintaan dengan batasan jumlah pos WMK baru yang dapat dibangun. Kendala tersebut ditetapkan berdasarkan *gap* target WMK pada masing-masing kabupaten/kota sebagai representasi keterbatasan anggaran pemerintah daerah.

a. Fungsi Tujuan

Fungsi tujuan dari model MCLP yaitu memaksimalkan permintaan pada kecamatan *underserved* yang dapat dilayani melalui penempatan pos WMK baru berdasarkan keterbatasan jumlah fasilitas yang tersedia.

$$\text{Max } Z = \sum_{i \in \text{Kecamatan Underserved}} w_i y_i \quad (3.9)$$

b. Kendala 1: Keterbatasan Target Pembangunan

Kendala ini membatasi agar total fasilitas pos WMK baru per kabupaten/kota tidak melampaui nilai batas target *gap* yang telah ditetapkan oleh pemerintah daerah.

$$\sum_{j \in \text{KandidatKab}} x_j \leq P_{kab} \quad \forall kab \in \text{Kabupaten} \quad (3.10)$$

c. Kendala 2: Pembatasan Jangkauan Pelayanan

Status keterlayanan suatu kecamatan ($y_i = 1$) hanya diizinkan terwujud apabila terdapat minimal satu kandidat pos di sekitarnya yang aktif dibangun ($x_i = 1$) serta berada di dalam batas jangkauan regulasi ($a_{ij} = 1$)

$$\sum_{j \in N_i} x_j \geq y_i \quad \forall i \in \text{Kecamatan } \textit{Underserved} \quad (3.11)$$

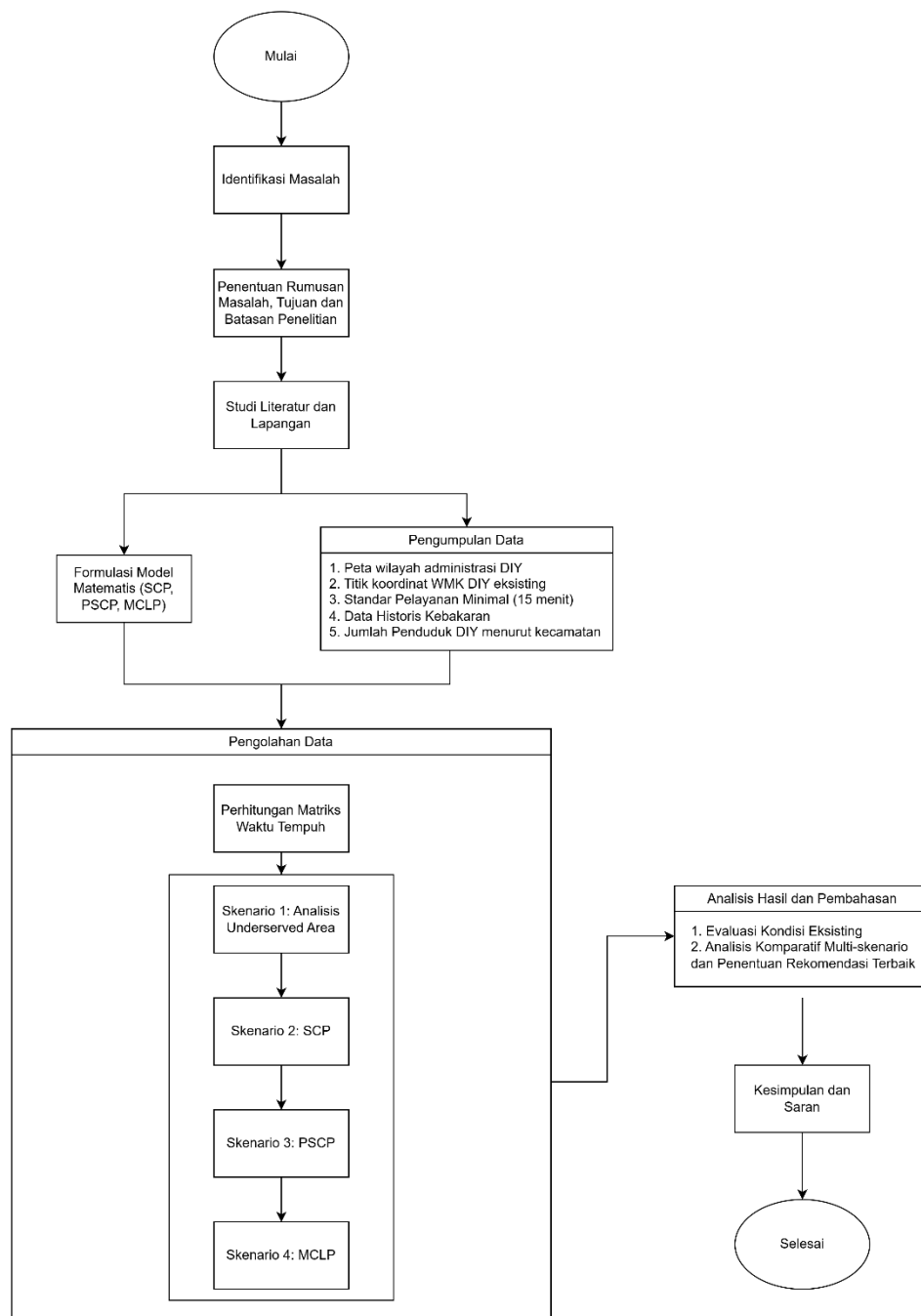
d. Kendala 3: Sifat Biner Variabel

Memastikan variabel keputusan penempatan pos dan status keterlayanan wilayah berada dalam domain bilangan biner:

$$x_j, y_i \in \{0, 1\} \quad \forall j \in \text{Kandidat}, \forall i \in \text{Kecamatan } \textit{Underserved} \quad (3.12)$$

3.8 Alur Penelitian

Alur penelitian bertujuan untuk merepresentasikan langkah-langkah dalam menjalankan penelitian ini. Alur pada penelitian ini dijabarkan melalui *flowchart* sebagai berikut:



Gambar 3. 1 Alur Penelitian

Berikut merupakan penjelasan mengenai alur penelitian pada gambar 3.1:

1. Mulai
2. Identifikasi Masalah

Peneliti mengidentifikasi adanya kesenjangan antara cakupan layanan Wilayah Manajemen Kebakaran (WMK) eksisting dengan kebutuhan pelayanan kebakaran di

Provinsi DIY. Permasalahan tersebut ditunjukkan oleh belum meratanya jangkauan layanan pemadam kebakaran karena adanya keterbatasan jumlah WMK, sehingga masih terdapat wilayah yang belum mampu dijangkau sesuai standar waktu tanggap. Kondisi tersebut diperkuat oleh tingginya kepadatan penduduk dan frekuensi kejadian kebakaran bangunan yang tinggi di beberapa kecamatan.

3. Penentuan Rumusan Masalah, Tujuan, Batasan, dan Asumsi Penelitian

Berdasarkan identifikasi masalah, peneliti merumuskan pertanyaan penelitian, menetapkan tujuan yang ingin dicapai, serta menentukan batasan dan asumsi penelitian agar pembahasan tetap terarah dan sesuai dengan ruang lingkup yang ditetapkan.

4. Studi Literatur dan Lapangan

Tahap penguatan fondasi teoretis dengan mengkaji berbagai literatur mengenai *Facility Location Problem* (FLP), karakteristik model *Set Covering*, *Maximal Covering*, dan pengembangan model seperti *Partial Set Covering Problem*. Selain itu, dilakukan pendalaman terhadap cara kerja algoritma eksak *Branch and Bound* dan *Branch and Cut*, ekstraksi data spasial menjadi titik *centroid*, penggunaan Google Maps *Distance Matrix* API, serta regulasi teknis nasional mengenai standar proteksi kebakaran publik.

5. Pengumpulan Data dan Formulasi Model Matematis

Kedua tahap ini dilakukan secara paralel. Pengumpulan data mencakup penghimpunan seluruh data sekunder dan spasial riil yang bersumber dari instansi serta platform resmi, meliputi:

- a. Data spasial batas administrasi 78 kecamatan di DIY dalam format shapefile.
- b. Titik koordinat lokasi 15 pos pemadam kebakaran (WMK) eksisting.
- c. Data historis frekuensi kejadian kebakaran bangunan periode 2021-2025 dari platform PAMOR JOGJA.
- d. Data jumlah penduduk per kecamatan di Provinsi DIY dari Badan Pusat Statistik (BPS).
- e. Standar Pelayanan Minimum waktu tanggap kebakaran
- f. Data dokumen rencana strategis target pembangunan pos WMK baru dari BPBD DIY.

Secara bersamaan, peneliti merancang formulasi matematis untuk tiga model optimasi, yaitu SCP, PSCP, dan MCLP, yang disesuaikan dengan batasan parameter kondisi di DIY sebagai kerangka logika sebelum program dijalankan.

6. Pengolahan Data

Tahap ini mencakup serangkaian proses komputasi yang dilakukan secara berurutan sebagai berikut:

- a. Pra-pemrosesan Spasial: Menentukan titik permintaan (*demand points*) dengan mengekstraksi *centroid* dari 78 kecamatan sebagai representasi lokasi kebutuhan layanan menggunakan perangkat lunak QGIS.
- b. Perhitungan Matriks Waktu Tempuh: Menghitung waktu berkendara nyata dari 15 pos eksisting menuju seluruh 78 titik *centroid* kecamatan menggunakan integrasi *Google Maps Distance Matrix API*, menghasilkan matriks waktu tempuh dalam satuan menit.
- c. Skenario 1 (Analisis *Underserved Area*): Mengevaluasi cakupan 15 WMK eksisting menggunakan *threshold* waktu tanggap 15 menit untuk memetakan kecamatan mana yang berstatus belum terlayani (*underserved*) sebagai penentuan wilayah kandidat pembangunan WMK baru.
- d. Skenario 2 (SCP): Menjalankan model SCP untuk mencari jumlah minimal pos baru yang dibutuhkan guna mencapai target cakupan layanan 100% di seluruh DIY.
- e. Skenario 3 (PSCP): Menjalankan model PSCP untuk meminimalkan jumlah pos baru yang dibutuhkan dengan memenuhi *threshold* cakupan layanan tertentu sekaligus memenuhi *gap* target tiap kabupaten/kota berdasarkan data pemerintah daerah.
- f. Skenario 4 (MCLP): Menjalankan model MCLP untuk memaksimalkan cakupan permintaan di bawah batasan jumlah fasilitas, di mana alokasi pos maksimum dibatasi pada *gap* target tiap kabupaten/kota berdasarkan data pemerintah daerah.

7. Analisis Hasil dan Pembahasan

Peneliti melakukan verifikasi kondisi eksisting terhadap efektivitas cakupan layanan WMK saat ini. Selanjutnya dilakukan analisis komparatif terhadap hasil ketiga skenario optimasi berdasarkan jumlah WMK yang dibutuhkan, peningkatan cakupan layanan, cakupan permintaan, kebutuhan anggaran pembangunan, serta distribusi lokasi WMK yang dihasilkan. Hasil analisis digunakan untuk menentukan skenario yang paling sesuai sebagai rekomendasi pembangunan WMK di DIY.

8. Kesimpulan dan Saran

Peneliti menyusun kesimpulan berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan serta pemberian saran bagi penelitian selanjutnya maupun rekomendasi implementasi kepada BPBD DIY dalam perencanaan pembangunan WMK..

9. Selesai

BAB IV

PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA

4.1 Pengumpulan Data

4.1.1 Gambaran Wilayah Penelitian

Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY) terletak di bagian tengah selatan Pulau Jawa dengan luas wilayah mencapai 3.185,80 km². Secara administratif, wilayah ini terdiri atas empat kabupaten dan satu kota, yaitu Kabupaten Sleman, Kabupaten Bantul, Kabupaten Gunungkidul, Kabupaten Kulon Progo, dan Kota Yogyakarta. Provinsi ini memiliki karakteristik wilayah yang beragam, mulai dari kawasan perkotaan dengan kepadatan penduduk tinggi hingga kawasan perbukitan dan pedesaan dengan aksesibilitas yang lebih rendah. Kondisi geografis tersebut menyebabkan kebutuhan layanan publik pada setiap wilayah menjadi berbeda-beda.

Dalam penelitian ini, unit analisis yang digunakan dalam penelitian ini adalah seluruh kecamatan di wilayah DIY yang diwakili oleh titik *centroid* administratifnya. Pemilihan kecamatan sebagai unit permintaan didasarkan pada regulasi pembagian Wilayah Manajemen Kebakaran (WMK) oleh pemerintah daerah. Data spasial titik permintaan ini diolah menggunakan perangkat lunak QGIS untuk menghasilkan koordinat wilayah yang akan dihitung waktu tempuh dan cakupan layanannya terhadap pos pemadam kebakaran. Untuk mendukung analisis non-spasial, data kependudukan bersumber dari Badan Pusat Statistik (BPS) untuk menggambarkan estimasi beban kebutuhan layanan kebakaran di setiap wilayah, yang akan digunakan sebagai salah satu kriteria pembobotan. Seluruh data penunjang tersebut ditunjukkan dalam Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Koordinat dan Populasi Seluruh Kecamatan di DIY

Kabupaten/Kota	Kecamatan	Jumlah Penduduk	Koordinat	
			<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>
Kulon Progo	Temon	29.095	-7.888917	110.072018
	Wates	49.508	-7.890414	110.132342
	Panjatan	39.381	-7.916283	110.156102
	Galur	32.755	-7.95261	110.202719
	Lendah	41.410	-7.913934	110.230874
	Sentolo	50.514	-7.860071	110.219951

Kabupaten/Kota	Kecamatan	Jumlah Penduduk	Koordinat	
			<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>
Bantul	Pengasih	53.561	-7.830627	110.154153
	Kokap	35.658	-7.830902	110.095437
	Girimulyo	24.735	-7.750844	110.158868
	Nanggulan	31.314	-7.787644	110.200962
	Samigaluh	29.730	-7.682716	110.169736
	Kalibawang	27.657	-7.686782	110.233076
	Srandakan	31.171	-7.961094	110.241605
	Sanden	31.945	-7.980632	110.265729
	Kretek	30.941	-7.99511	110.305837
	Pundong	36.344	-7.969027	110.341993
	Bambanglipuro	42.284	-7.94439	110.312847
	Pandak	52.927	-7.924352	110.287629
	Pajangan	67.116	-7.870616	110.287536
	Bantul	60.240	-7.895426	110.332964
	Jetis	65.229	-7.910759	110.365147
	Imogiri	40.602	-7.937291	110.39766
	Dlingo	31.171	-7.920953	110.458761
	Banguntapan	118.712	-7.829394	110.407546
Gunungkidul	Pleret	50.536	-7.876701	110.414094
	Piyungan	54.957	-7.843193	110.462766
	Sewon	103.738	-7.857506	110.357029
	Kasihan	109.474	-7.828881	110.324436
	Sedayu	50.453	-7.82429	110.258335
	Gedangsari	38.670	-7.828921	11.059403
	Girisubo	24.640	-8.166301	110.758503
	Karangmojo	56.250	-7.938364	110.667317
	Ngawen	34.230	-7.83056	110.691353
	Nglipar	32.790	-7.874907	110.633465
Gunungkidul	Paliyan	32.270	-8.013819	110.529905
	Panggang	29.220	-8.030803	110.439623

Kabupaten/Kota	Kecamatan	Jumlah Penduduk	Koordinat	
			<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>
	Patuk	34.520	-7.861322	110.524803
	Playen	60.910	-7.940689	110.522323
	Ponjong	54.930	-7.971774	110.729807
	Purwosari	20.870	-8.023477	11.037582
	Rongkop	28.780	-8.087135	110.744182
	Saptosari	38.600	-8.077495	110.510076
	Semanu	59.030	-8.032188	110.657367
	Semin	55.980	-7.861478	110.742459
	Tanjungsari	28.410	-8.091955	110.589802
	Tepus	35.310	-8.121035	110.656664
	Wonosari	87.790	-7.976973	110.590867
Sleman	Berbah	58.919	-7.807.379	110.450.458
	Cangkringan	32.780	-7.627.847	110.449.913
	Depok	127.918	-7.766.888	110.410.751
	Gamping	98.203	-77.903	110.320.218
	Godean	73.322	-7.768.063	110.295.684
	Kalasan	88.958	-7.746.634	110.464.108
	Minggir	32.894	-7.731.779	110.248.404
	Mlati	96.948	-7.739.384	110.345.865
	Moyudan	34.007	-7.777.415	110.247.817
	Ngaglik	105.793	-7.711.867	11.039.923
	Ngemplak	67.833	-7.706.854	110.443.567
	Pakem	39.898	-7.627.468	110.415.681
	Prambanan	55.989	-7.797.185	110.504.924
	Seyegan	53.607	-7.726.522	110.300.312
	Sleman	73.630	-769.378	110.349.031
	Tempel	55.769	-7.665.712	110.317.951
	Turi	39.028	-7.628.518	110.381.696
Yogyakarta	Tegalrejo	37.429	-7.778524	110.357
	Jetis	26.999	-7.7827	110.36428

Kabupaten/Kota	Kecamatan	Jumlah Penduduk	Koordinat	
			<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>
	Gondokusuman	43.265	-7.786047	110.381425
	Danurejan	21.088	-7.793049	110.372159
	Gedongtengen	18.973	-7.791877	110.361006
	Ngampilan	17.850	-7.800949	110.357787
	Wirobrajan	28.168	-7.803224	110.350412
	Mantrijeron	35.424	-7.818763	110.359137
	Kraton	21.269	-7.809062	110.362833
	Gondomanan	14.496	-7.801875	110.367145
	Pakualaman	10.526	-7.799955	110.375494
	Mergangsan	31.708	-7.813744	110.373531
	Umbulharjo	72.729	-7.813696	110.387055
	Kotagede	35.855	-7.818749	110.398773
Total		3.734.945		

4.1.2 Data Lokasi Wilayah Manajemen Kebakaran (WMK)

Data lokasi pos pemadam kebakaran (WMK) eksisting digunakan untuk mengidentifikasi sebaran fasilitas pelayanan kebakaran yang saat ini beroperasi di wilayah DIY. Data ini diperoleh dari dua sumber, yaitu situs Geoportal DIY untuk data spasial dalam format *shapefile*, serta hasil wawancara dengan pihak Badan Penanggulangan Bencana Daerah DIY untuk konfirmasi status operasional masing-masing pos. Data yang dihimpun mencakup nama pos, lokasi administratif, serta koordinat geografis (*latitude* dan *longitude*) dari 15 WMK yang saat ini aktif beroperasi di empat kabupaten dan satu kota di DIY.

Data lokasi WMK eksisting dimanfaatkan dalam beberapa tahap pengolahan data dan analisis. Koordinat geografis digunakan sebagai titik asal dalam perhitungan matriks waktu tempuh. Selain itu, data ini menjadi dasar evaluasi cakupan pelayanan eksisting pada skenario 1, yaitu untuk mengidentifikasi kecamatan yang belum terlayani (*underserved*) berdasarkan *threshold* waktu tanggap 15 menit. Hasil identifikasi *underserved area* tersebut selanjutnya menjadi *input* utama dalam proses optimasi, dimana hanya kecamatan berstatus *underserved* yang menjadi kandidat penempatan WMK baru.

Tabel 4. 2 Koordinat WMK Eksisting di DIY

WMK	Alamat	Koordinat	
		<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>
Pos Induk Wonosari	Besari, Siraman, Kec. Wonosari, Gunungkidul	-7.9714	110.58032
Damkar Kulon Progo	Kemiri, Margosari, Kec. Pengasih, Kulon Progo	-7.85635	110.16498
Pos Damkar Unit 2	Jl. Sentolo Nanggulan, Jati Ngarang Lor, Kec. Nanggulan, Kulon Progo	-7.7612	110.21019
Pos Kyai Mojo	Jl. Kyai Mojo No.70C, Bener, Kec. Tegalrejo, Yogyakarta	-7.7821	110.35513
Mako Induk	Komplek Balaikota Yogyakarta, Jl. Kenari No.56 Yogyakarta	-7.80096	110.39191
Mako Damkar Sleman	Jln. Candi Gebang, Beran Kidul, Tridadi, Sleman	-7.71766	110.35524
Pos Damkar Godean	Senuko, Sidoagung, Godean, Sleman	-7.76994	110.30042
Sektor Banguntapan	Bumiwetan, Baturetno, Banguntapan, Bantul	-7.8297	110.41767
Sektor Piyungan	Onggopatan, Srimulyo, Piyungan, Bantul	-7.83442	110.46641
Sektor Sedayu	Jl. Sedayu-Pajangan, Semampir, Argorejo, Sedayu, Bantul	-7.81635	110.25676
Sektor Kasihan	Kembaran, Tamantirto, Kasihan, Bantul	-7.82939	110.33579
Sektor Imogiri	Jl. Pramuka, Singosaren, Wukirsari, Imogiri, Bantul	-7.90948	110.38676
Sektor Pundong	Piring, Srihardono, Pundong, Bantul	-7.95742	110.34371
Sektor Bantul	Jl. K.H. Wakhid Hasyim, Sumuran, Palbapang, Bantul	-7.89953	110.32194
Pos Damkar Karangmojo	Munggur, Ngipak, Kec. Karangmojo, Gunungkidul	-7.95934	110.67317

Berdasarkan hasil wawancara dengan Kepala Bidang Pemadam Kebakaran dan Penyelamatan (Damkarmat) BPBD DIY, instansi ini memiliki fungsi strategis dalam penyusunan prosedur tetap, koordinasi penyelenggaraan, serta penetapan standarisasi kebutuhan urusan kebakaran di wilayah DIY. Salah satu instrumen utama yang dikelola adalah pembentukan Wilayah Manajemen Kebakaran (WMK) sebagai unit operasional stasiun pemadam kebakaran yang tersebar secara strategis guna memastikan standar waktu tanggap dapat terpenuhi secara merata. Saat ini terdapat 15 WMK aktif yang beroperasi di bawah koordinasi BPBD DIY, dengan koordinat lokasi yang direpresentasikan pada Tabel 4.2.

Meskipun demikian, efektivitas layanan pemadam kebakaran di DIY saat ini masih berada di bawah 70%, dengan masih terdapatnya kesenjangan antara jumlah WMK eksisting dan target yang ditetapkan. Rincian *gap* antara jumlah WMK eksisting dan target per kabupaten/kota disajikan pada Tabel 4.3, yang selanjutnya digunakan sebagai parameter pembatas jumlah maksimal pembangunan WMK baru pada model PSCP dan MCLP.

Tabel 4. 3 Perbandingan Target Jumlah WMK dengan Kondisi Eksisting

Kabupaten/Kota	Target	Eksisting	<i>Gap</i> (P _k)
Bantul	9	7	2
Sleman	9	2	11

Kabupaten/Kota	Target	Eksisting	Gap (P_k)
Kulon Progo	6	2	4
Gunungkidul	13	2	7
Kota Yogyakarta	3	2	1
Total	40	15	25

4.1.3 Penerapan Batasan (*Threshold*) Jangkauan Layanan

Standar Pelayanan Minimal (SPM) merupakan ketentuan mengenai jenis dan mutu pelayanan dasar yang berhak diperoleh setiap warga negara secara minimal. Dalam konteks penanggulangan kebakaran, SPM digunakan sebagai parameter acuan untuk menentukan tingkat efektivitas jangkauan layanan dari suatu pos pemadam kebakaran. Berdasarkan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum (2009) serta hasil wawancara dengan Bagian Damkarmat BPBD DIY, terdapat dua parameter *threshold* yang relevan sebagaimana disajikan pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Parameter *Threshold* Jangkauan Layanan

Parameter	Keterangan
<i>Response Time</i>	Standar waktu maksimal 15 menit mulai dari diterimanya laporan hingga petugas tiba di lokasi kebakaran
Jangkauan Layanan	Area pelayanan berbasis jarak ditentukan dalam rentang 2,5 hingga 7 kilometer (km) dari lokasi pos pemadam kebakaran

Pada penelitian ini, parameter yang ditetapkan sebagai *threshold* cakupan layanan adalah waktu tanggap maksimal 15 menit. Pemilihan parameter waktu tempuh dibandingkan jarak didasarkan pada pertimbangan bahwa waktu tempuh lebih merepresentasikan aksesibilitas nyata di lapangan, mengingat kondisi jaringan jalan dan hambatan lalu lintas di setiap wilayah DIY tidak seragam.

4.1.4 Data Pendukung

Penelitian ini menggunakan data pendukung berupa data historis kejadian kebakaran bangunan dan laju pertumbuhan penduduk di DIY. Kedua data tersebut digunakan sebagai informasi pendukung dalam penyusunan rekomendasi implementasi hasil optimasi. Data historis kejadian kebakaran bangunan periode 2021-2025 diambil dari PAMOR JOGJA, *platform* milik BPBD DIY, sedangkan data laju pertumbuhan penduduk tahun 2026 pada tingkat kabupaten/kota diperoleh dari BPS DIY.

Tabel 4. 5 Frekuensi Kejadian Kebakaran Bangunan di DIY Tahun 2021-2025

No	Kabupaten/Kota	2021	2022	2023	2024	2025	Total
1	Bantul	78	10	111	62	45	306

No	Kabupaten/Kota	2021	2022	2023	2024	2025	Total
2	Gunungkidul	25	22	57	43	40	187
3	Kota Yogyakarta	17	17	104	12	3	153
4	Kulon Progo	29	30	68	59	23	209
5	Sleman	14	27	110	20	3	174
		163	106	450	196	114	1029

Selain data historis kejadian kebakaran, penelitian ini juga menggunakan data laju pertumbuhan penduduk sebagai salah satu pertimbangan dalam mengidentifikasi wilayah yang berpotensi mengalami peningkatan kebutuhan layanan kebakaran pada masa mendatang.

Tabel 4. 6 Laju Pertumbuhan Penduduk 2026

Kabupaten/Kota	Laju Pertumbuhan Penduduk
Kulon Progo	0,52
Bantul	0,83
Gunungkidul	0,16
Sleman	0,10
Yogyakarta	0,63

4.2 Pengolahan Data

4.2.1 Perhitungan Matriks Waktu Tempuh

Tahap awal pengolahan data spasial dalam penelitian ini dilakukan dengan mentransformasikan basis data spasial titik koordinat menjadi matriks waktu tempuh. Proses ini bertujuan untuk memetakan hambatan dan durasi perjalanan secara nyata dari setiap pos WMK menuju seluruh titik permintaan tingkat kecamatan di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY). Perhitungan matriks ini diekstraksi secara otomatis menggunakan bantuan *Google Maps Distance Matrix* API yang diintegrasikan melalui *script* pemrograman dengan menetapkan parameter mode berkendara truk (mode = “truck”). Perhitungan matriks jarak dan waktu tempuh ini menggunakan rumus sebagai berikut:

1. Inisialisasi Parameter Kendaraan

Tabel 4. 7 Code Inisialisasi Parameter Kendaraan

Code	Fungsi
<pre>function GMAPS_ROUTE_INFO(start_address, end_address, vehicle_type) { if (!vehicle_type) { vehicle_type = "truck"; } }</pre>	Menerima tiga <i>input</i> yaitu koordinat asal, koordinat tujuan, dan jenis kendaraan. Apabila jenis kendaraan tidak dapat ditentukan, secara otomatis diterapkan sebagai kendaraan truk.

2. Konfigurasi Permintaan Rute

Tabel 4. 8 Code Konfigurasi Permintaan Rute

Code	Fungsi
<pre>var finder = Maps.newDirectionFinder() .setOrigin(start_address) .setDestination(end_address) .setMode(Maps.DirectionFinder.Mode.DRIVING) .setAvoid(Maps.DirectionFinder.Avoid.TOLLS); if (vehicle_type.toLowerCase() === "truck") { finder.setAvoid(Maps.DirectionFinder.Avoid.HIGHWAYS); }</pre>	Permintaan rute dikonfigurasi menggunakan layanan <i>Google Maps Direction</i> dengan mode berkendara (<i>driving</i>) dan pengaturan menghindari jalan tol. Untuk jenis kendaraan truk, ditambahkan pengaturan menghindari jalan bebas hambatan.

3. Pengambilan Data Rute

Tabel 4. 9 Code Pengambilan Data Rute

Code	Fungsi
<pre>var directions = finder.getDirections(); var route = directions.routes[0]; var leg = route.legs[0];</pre>	Permintaan dikirimkan ke API dalam mengambil rute pertama yang direkomendasikan beserta segmen perjalanannya (<i>leg</i>)

4. Ekstraksi Ringkasan Rute

Tabel 4. 10 Code Ekstraksi Ringkasan Rute

Code	Fungsi
<pre>var summary = route.summary ? "via " + route.summary : "via recommended route";</pre>	Nama jalan utama yang dilalui diekstraksi sebagai ringkasan rute. Apabila informasi tidak tersedia, ditampilkan keterangan “<i>via recommended route</i>”

5. Konversi dan Luaran

Tabel 4. 11 Code Konversi dan Luaran

<i>Code</i>	<i>Fungsi</i>
<pre>// NUMERIC outputs var distance_km = leg.distance.value / 1000; // meters → km var duration_hrs = leg.duration.value / 3600; // seconds → hours // Return as 1-row array → spills into 3 columns return [[summary, distance_km, duration_hrs]]; }</pre>	Nilai jarak dikonversi dari meter menjadi kilometer, dan nilai durasi dikonversi dari detik menjadi jam. Fungsi mengembalikan tiga nilai, yaitu ringkasan rute, jarak (km), dan waktu tempuh (jam), dalam satu baris yang tersebar ke tiga kolom.

Angka waktu tempuh yang dihasilkan dari matriks ini berfungsi untuk tahapan optimasi berikutnya, yaitu sebagai dasar penentuan *coverage area*. Tabel 4.11 merupakan matriks waktu tempuh yang dihasilkan dari titik asal yaitu WMK eksisting (I) menuju titik permintaan kecamatan (J), di mana satuannya telah dikonversi dari jam menjadi menit.

Tabel 4. 12 Matriks Waktu Tempuh (menit)

WMK (J) / Kecamatan (I)	Bambanglipuro	Banguntapan	Bantul	Dlingo	Imogiri	Jetis (Bantul)	Kasihan	Kretek	Pajangan	...	Wirobrajan
Sektor Banguntapan	42,7	3,4	30,8	42,9	30,7	26,8	23,7	45,9	37,2		24,3
Pos Damkar Godean	47,5	34,9	37,5	71,7	52,0	44,0	18,7	58,2	30,1		18,5
Sektor Imogiri	24,4	19,6	16,4	29,3	9,7	7,8	30,3	27,6	27,9		30,9
Pos Damkar Karangmojo	41,1	58,2	44,9	79,2	59,5	49,8	42,3	45,2	43,1		43,9
Sektor Kasihan	30,2	18,4	19,0	55,2	35,6	26,1	4,1	40,0	20,2		11,8
Pos Damkar Nanggulan	52,0	52,4	48,4	82,7	63,0	53,2	36,4	57,7	37,3		36,5
Sektor Bantul	11,2	28,6	4,7	41,8	22,1	12,2	20,6	22,6	14,3		26,3
Pos Damkar Kulon Progo	41,1	58,1	45,0	79,3	59,6	49,8	41,9	44,3	42,7		43,7
Sektor Piyungan	52,0	14,2	41,5	32,3	37,0	35,2	34,5	55,3	48,0		34,4
Sektor Pundong	10,3	34,9	17,6	42,4	22,6	12,9	34,4	13,5	29,5		36,9
Sektor Sedayu	34,2	35,4	30,6	64,9	45,3	35,4	19,2	45,6	19,2		21,0
Mako Damkar Sleman	55,8	34,4	44,6	75,1	59,1	51,2	25,8	65,3	41,9		23,8
Pos Induk Wonosari	70,5	54,8	64,5	31,6	50,4	53,8	75,2	70,9	77,7		75,1
Mako Induk	50,8	14,1	38,9	56,0	40,6	35,3	30,0	54,0	45,0		19,0
Pos Kyai Mojo	44,2	26,3	33,0	66,8	47,1	39,1	19,0	53,3	35,1		8,0

4.2.2 Skenario 1: Evaluasi Jangkauan Layanan Eksisting

Skenario pertama dilakukan untuk mengevaluasi sejauh mana kemampuan jangkauan pelayanan dari 15 pos WMK eksisting yang saat ini aktif beroperasi di Provinsi DIY. Pengolahan data dilakukan dengan menguji matriks waktu tempuh 78×15 yang telah diperoleh pada tabel 4.6 menggunakan logika biner di dalam *Solver* Python. Parameter *threshold* digunakan secara seragam selama 15 menit sesuai dengan standar regulasi nasional BPBD DIY.

4.2.2.1 Pembentukan Matriks Cakupan Eksisting

Secara teknis, *Solver* Python memeriksa setiap baris kecamatan dimana jika waktu tempuh minimum dari pos terdekat kurang dari atau sama dengan 15 menit, maka kecamatan tersebut dikategorikan terlayani. Sebaliknya, jika waktu tempuh minimum lebih dari 15 menit, kecamatan dimasukkan ke dalam daftar wilayah belum terlayani (*underserved area*). Hasil dari pemrosesan ini menghasilkan rekapitulasi keterlayanan aktual untuk seluruh 78 kecamatan di DIY sebagaimana tercantum pada tabel 4.12.

4.2.2.2 Hasil Evaluasi Cakupan Eksisting

Hasil evaluasi matriks cakupan eksisting disajikan pada Tabel 4.13.

Tabel 4. 14 Hasil Evaluasi Cakupan Layanan WMK Eksisting

Parameter	Nilai
Kecamatan terlayani (≤ 15 menit)	43 kecamatan (55,13%)
Kecamatan tidak terlayani	35 kecamatan (44,87%)
Populasi Terlayani	2.161.272 jiwa (57,87%)
Populasi Tidak Terlayani	1.573.663 jiwa (42,13%)

Berdasarkan hasil evaluasi, sebanyak 43 kecamatan atau 55,13% dari seluruh wilayah DIY telah terlayani oleh WMK eksisting dalam standar waktu tanggap 15 menit. Sementara itu, 35 kecamatan teridentifikasi sebagai kecamatan tidak terlayani atau *underserved area*. Daftar kecamatan *underserved* disajikan pada tabel 4.14.

Tabel 4. 15 Daftar Kecamatan *Underserved* per Kabupaten/Kota

No	Kecamatan	Kabupaten	Koordinat	
			Latitude	Longitude
1	Dlingo	Bantul	-7,92095	110,4588
2	Sanden		-7,98063	110,2657
3	Srandakan		-7,96109	110,2416
4	Cangkringan	Sleman	-7,62785	110,4499
5	Depok		-7,76689	110,4108
6	Kalasan		-7,74663	110,4641
7	Ngaglik		-7,71187	110,3992
8	Ngemplak		-7,70685	110,4436
9	Pakem		-7,62747	110,4157
10	Prambanan		-7,79719	110,5049
11	Tempel		-7,66571	110,318
12	Turi		-7,62852	110,3817
13	Galur	Kulon Progo	-7,95261	110,2027
14	Kalibawang		-7,68678	110,2331
15	Kokap		-7,8309	110,0954
16	Lendah		-7,91393	110,2309
17	Samigaluh		-7,68272	110,1697
18	Sentolo		-7,86007	110,22
19	Temon		-7,88892	110,072
20	Gedangsari	Gunungkidul	-7,82892	110,594
21	Girisubo		-8,1663	110,7585
22	Ngawen		-7,83056	110,6914
23	Nglipar		-7,87491	110,6335
24	Paliyan		-8,01382	110,5299

No	Kecamatan	Kabupaten	Koordinat	
			<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>
25	Panggang		-8,0308	110,4396
26	Patuk		-7,86132	110,5248
27	Playen		-7,94069	110,5223
28	Ponjong		-7,97177	110,7298
29	Purwosari		-8,02348	110,3758
30	Rongkop		-8,08714	110,7442
31	Saptosari		-8,0775	110,5101
32	Semanu		-8,03219	110,6574
33	Semin		-7,86148	110,7425
34	Tanjungsari		-8,09196	110,5898
35	Tepus		-8,12104	110,6567
Total <i>Underserved</i>			35	

Hasil evaluasi ini selanjutnya menjadi dasar penentuan kandidat lokasi WMK baru yang akan dioptimasi pada skenario model selanjutnya. Seluruh 35 kecamatan yang tidak terlayani ditetapkan sebagai kandidat lokasi WMK baru yang akan dimasukkan ke dalam model optimasi.

4.2.3 Skenario 2: Optimasi Berbasis *Set Covering Problem* (SCP)

Model *Set Covering Problem* (SCP) pada skenario ini bertujuan memastikan seluruh 78 kecamatan di Provinsi DIY terlayani dalam standar waktu tanggap 15 menit. Skenario ini menghasilkan rekomendasi lokasi WMK baru secara optimal yang dapat melayani seluruh permintaan, Model SCP diselesaikan menggunakan *Solver* pada *library* PuLP Python. Kendala pertama memastikan bahwa setiap kecamatan *underserved* harus terlayani oleh minimal satu WMK baru. Kendala kedua menetapkan bahwa variabel keputusan bersifat biner.

4.2.3.1 Hasil Optimasi *Set Covering Problem* (SCP)

Hasil penyelesaian model SCP menggunakan *Solver* disajikan pada tabel 4.15.

Tabel 4. 16 Hasil Optimasi *Set Covering Problem* (SCP)

Parameter	Nilai
WMK baru minimum	28 pos
Kecamatan Terlayani	35 kecamatan
Total WMK	43 pos
Total Kecamatan Terlayani	78 kecamatan (100%)
Populasi Terlayani	3.734.935 jiwa (100%)
Estimasi Biaya Pembangunan	Rp84.000.000.000

Model SCP berhasil menemukan solusi optimal dengan 28 WMK baru sebagai jumlah minimum yang diperlukan untuk memastikan seluruh 78 kecamatan di DIY terlayani dalam waktu tanggal 15 menit. Dengan penambahan 28 WMK baru, total WMK di DIY menjadi 43

pos dengan cakupan kecamatan dan populasi mencapai 100%. Lokasi 28 WMK baru yang terpilih disajikan pada tabel 4.16.

Tabel 4. 17 Lokasi WMK Baru Terpilih Berdasarkan SCP

No	Lokasi WMK Baru	Kabupaten	Koordinat	
			Latitude	Longitude
1	Ngaglik	Sleman	-7,711867	110,399230
2	Depok		-7,766888	110,410751
3	Kalasan		-7,746634	110,464.108
4	Prambanan		-7,797185	110,504924
5	Pakem		-7,627468	110,415681
6	Tempel		-7,665712	110,317951
7	Playen	Gunungkidul	-7,940689	110,522323
8	Semanu		-8,032188	110,657367
9	Gedangsari		-7,828921	110,594030
10	Paliyan		-8,013819	110,529905
11	Ponjong		-7,971774	110,729807
12	Nglipar		-7,874907	110,633465
13	Semin		-7,861478	110,742459
14	Patuk		-7,861322	110,524803
15	Tanjungsari		-8,091955	110,589802
16	Saptosari		-8,077495	110,510076
17	Rongkop		-8,087135	110,744182
18	Panggang		-8,030803	110,439623
19	Tepus		-8,121035	110,656664
20	Purwosari		-8,023477	110,375820
21	Girisubo		-8,166301	110,758503
22	Sentolo		-7,860071	110,219951
23	Kokap		-7,830902	110,095437
24	Kalibawang	Kulon Progo	-7,686782	110,233076
25	Temon		-7,888917	110,072018
26	Samigaluh		-7,682716	110,169736
27	Dlingo	Bantul	-7,920953	110,458761
28	Srandakan		-7,961094	110,241605
Jumlah Kandidat			28	

Berdasarkan hasil tersebut yang masih melebihi dari *gap* target pos WMK BPBD DIY, maka model SCP perlu dibatasi guna mendapatkan jumlah minimum penambahan pos WMK baru sesuai dengan batasan *gap* target yaitu 25 pos.

Tabel 4. 18 Jumlah WMK Baru Per Kabupaten/Kota (SCP)

Kabupaten/Kota	<i>Gap</i> (P_k)	WMK Baru (SCP)	Sisa <i>Gap</i>
Bantul	2	2	0
Sleman	7	6	1

Kabupaten/Kota	Gap (P_k)	WMK Baru (SCP)	Sisa Gap
Kulon Progo	4	5	-1
Gunungkidul	11	15	-4
Kota Yogyakarta	1	0	1
Total	25	28	

4.2.4 Skenario 3: Optimasi Berbasis *Partial Set Covering Problem* (PSCP)

Model *Partial Set Covering Problem* (PSCP) pada skenario ini memiliki fungsi tujuan meminimalkan jumlah pos WMK yang dibangun dengan batasan *gap* target pembangunan WMK serta minimum cakupan permintaan tertentu harus terlayani dalam standar waktu tanggap 15 menit. Model PSCP ini diselesaikan menggunakan *Solver* pada *library* PuLP Python. Kendala pertama memastikan setiap titik permintaan terlayani minimal satu WMK dalam batas 15 menit. Kendala kedua memastikan total kecamatan *underserved* yang terlayani memenuhi syarat minimum $\alpha=70\%$. Kendala ketiga membatasi agar jumlah pos WMK baru tidak melebihi target *gap* BPBD DIY per kabupaten. Kendala keempat memastikan seluruh variabel keputusan bersifat biner.

4.2.4.1 Hasil Optimasi *Partial Set Covering Problem* (PSCP)

Hasil penyelesaian optimasi menggunakan PSCP dapat dilihat pada tabel 4.18.

Tabel 4. 19 Hasil Optimasi *Partial Set Covering Problem* (PSCP)

Parameter	Nilai
Cakupan Minimum (70%)	25 dari 36 kecamatan <i>underserved</i>
WMK baru minimum	18 pos
Kecamatan Terlayani	25 kecamatan
Total WMK	33 pos
Total Kecamatan Terlayani	68 kecamatan (87,18%)
Populasi Terlayani	3.361.552 jiwa (90%)
Estimasi Biaya Pembangunan	Rp54.000.000.000

Mengacu pada hasil optimasi, model PSCP berhasil menemukan solusi optimal dengan 18 WMK baru sebagai jumlah minimum yang diperlukan untuk memastikan 70% permintaan layanan pemadam kebakaran di DIY terlayani dalam waktu tanggap 15 menit. Hasil tersebut juga merupakan jumlah optimal yang tidak melebihi dari target yang ditetapkan. Dengan penambahan 18 WMK baru, total WMK di DIY menjadi 33 pos dengan cakupan kecamatan sebesar 87,18% dan populasi sebesar 90%. Lokasi 18 WMK baru yang terpilih disajikan pada tabel 4.19.

Tabel 4. 20 Lokasi WMK Baru Terpilih Berdasarkan PSCP

No	Lokasi WMK Baru	Kabupaten	Koordinat	
			Latitude	Longitude
1	Ngaglik	Sleman	-7,711867	110,39923

No	Lokasi WMK Baru	Kabupaten	Koordinat	
			Latitude	Longitude
2	Depok	Gunungkidul	-7,766888	110,410751
3	Ngemplak		-7,706854	110,443567
4	Pakem		-7,627468	110,415681
5	Playen		-7,940689	110,522323
6	Gedangsari		-7,828921	110,59403
7	Ponjong		-7,971774	110,729807
8	Ngawen		-7,83056	110,691353
9	Saptosari		-8,077495	110,510076
10	Rongkop		-8,087135	110,744182
11	Panggang		-8,030803	110,439623
12	Tepus		-8,121035	110,656664
13	Sentolo	Kulon Progo	-7,860071	110,219951
14	Kokap		-7,830902	110,095437
15	Kalibawang		-7,686782	110,233076
16	Samigaluh		-7,682716	110,169736
17	Dlingo	Bantul	-7,920953	110,458761
18	Srandakan		-7,961094	110,241605
Jumlah Kandidat			18	

Berdasarkan kendala yang ditetapkan, distribusi 18 pos WMK tersebut masih di bawah batas *gap* target BPBD DIY yang ditetapkan. Tabel 4.20 merupakan jumlah 18 pos WMK berdasarkan kabupaten/kota.

Tabel 4. 21 Jumlah WMK Baru Per Kabupaten/Kota (PSCP)

Kabupaten/Kota	Gap (P_k)	WMK Baru (PSCP)	Sisa Gap
Bantul	2	2	0
Sleman	11	8	3
Kulon Progo	4	4	0
Gunungkidul	7	4	3
Kota Yogyakarta	1	0	1
Total	25	18	7

4.2.5 Skenario 4: Optimasi Berbasis *Maximal Covering Location Problem* (MCLP)

Model *Maximal Covering Location Problem* (MCLP) pada skenario ini digunakan untuk menyelesaikan permasalahan penempatan pos WMK baru dengan fungsi tujuan memaksimalkan cakupan permintaan dengan batasan kesenjangan target pos baru di setiap kabupaten dan kota. Proses optimasi ini berjalan di bawah batasan kendala bahwa jumlah total stasiun pemadam kebakaran (WMK) baru yang dibangun dalam suatu kabupaten atau kota tidak boleh melebihi jumlah target kebijakan yang telah ditentukan oleh BPBD DIY. Selain itu, kendala kedua memastikan bahwa kecamatan i hanya dinyatakan terlayani apabila terdapat

minimal satu kandidat j dalam himpunan yang pilih. MCLP memaksimalkan cakupan layanan dalam kondisi anggaran dan target pembangunan yang terbatas. Model MCLP diselesaikan menggunakan *solver* pada *library* PuLP Python.

4.2.5.1 Hasil Optimasi *Maximal Covering Location Problem* (MCLP)

Hasil penyelesaian model MCLP dengan status Solver Optimal disajikan pada tabel 4.21

Tabel 4. 22 Hasil Optimasi *Maximal Covering Location Problem* (MCLP)

Parameter	Nilai
WMK baru dibangun	23 pos
Kecamatan Terlayani	30 kecamatan
Total WMK	38 pos
Total Kecamatan Terlayani	73 kecamatan (93,59%)
Populasi Terlayani	3.604.578 jiwa (96,51%)
Estimasi Biaya Pembangunan	Rp69.000.000.000

Berdasarkan tabel 4.21, model MCLP berhasil menemukan solusi optimal dengan 23 WMK baru yang memaksimalkan cakupan layanan dalam batasan *gap* target BPBD DIY per kabupaten. Dengan penambahan 23 WMK baru, cakupan kecamatan meningkatkan dari 43 kecamatan pada kondisi awalan menjadi 73 kecamatan ketika dilakukan pengoptimalan MCLP, dan cakupan populasi meningkat dari 57,87% menjadi 96,51%. Rincian lokasi WMK baru dari hasil optimasi MCLP per kabupaten disajikan pada tabel 4.22.

Tabel 4. 23 Lokasi WMK Baru Terpilih Berdasarkan MCLP

No	Lokasi WMK Baru	Kabupaten	Koordinat	
			Latitude	Longitude
1	Ngaglik	Sleman	-7,711867	110,39923
2	Depok		-7,766888	110,410751
3	Kalasan		-7,746634	110,464108
4	Prambanan		-7,797185	110,504924
5	Pakem		-7,627468	110,415681
6	Tempel		-7,665712	110,317951
7	Playen	Gunungkidul	-7,940689	110,522323
8	Semanu		-8,03219	110,6574
9	Gedangsari		-7,828921	110,59403
10	Paliyan		-8,013819	110,529905
11	Ponjong		-7,971774	110,729807
12	Nglipar		-7,874907	110,633465
13	Semin		-7,861478	110,,742459
14	Patuk		-7,861322	110,524803
15	Saptosari		-8,0775	110,5101
16	Panggang		-8,0308	110,4396
17	Tepus		-8,12104	110,6567

No	Lokasi WMK Baru	Kabupaten	Koordinat	
			Latitude	Longitude
18	Sentolo	Kulon Progo	-7,860071	110,219951
19	Kokap		-7,830902	110,095437
20	Temon		-7,88892	110,072
21	Samigaluh		-7,682716	110,169736
22	Dlingo	Bantul	-7,920953	110,458761
23	Srandakan		-7,961094	110,241605
Jumlah Kandidat			23	

Berdasarkan kendala yang ditetapkan, distribusi 23 pos WMK tersebut masih di bawah batas *gap* target BPBD DIY yang ditetapkan. Tabel 4.23 merupakan distribusi 23 pos WMK berdasarkan kabupaten/kota

Tabel 4. 24 Jumlah WMK Baru Per Kabupaten/Kota (MCLP)

Wilayah	<i>Gap</i>	WMK Baru	Sisa <i>Gap</i>
Bantul	2	2	0
Gunungkidul	11	11	0
Kulon Progo	4	4	0
Sleman	7	6	1
Yogyakarta	1	0	1
Total	25	23	2

BAB V

PEMBAHASAN

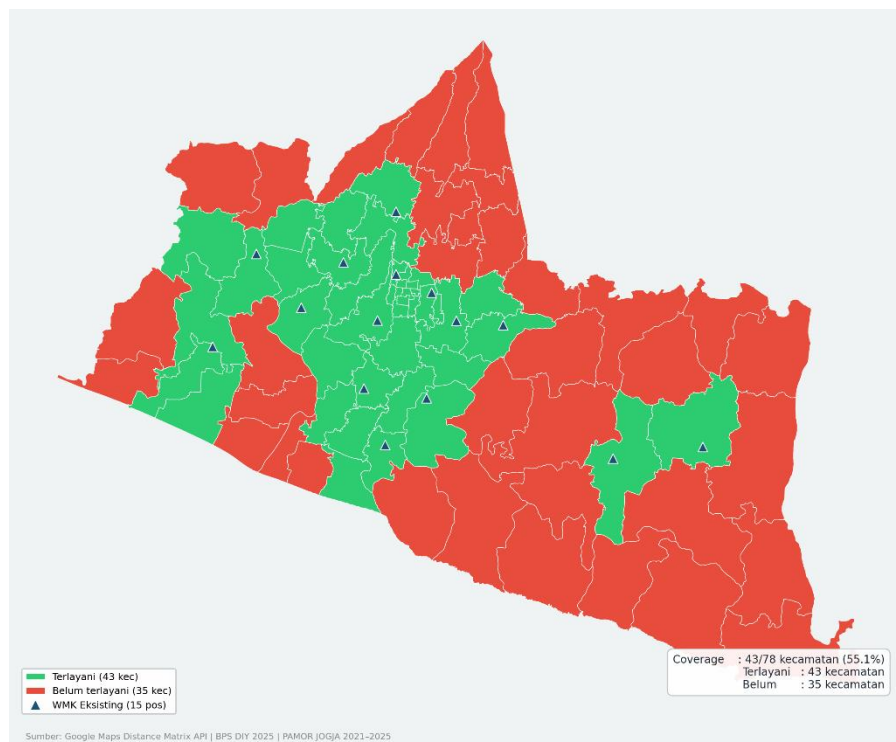
5.1 Analisis Kondisi Eksisting Wilayah Manajemen Kebakaran (WMK)

Evaluasi kondisi eksisting dilakukan sebagai langkah awal untuk mengidentifikasi tingkat efektivitas cakupan layanan 15 Wilayah Manajemen Kebakaran (WMK) yang saat ini beroperasi di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY). Analisis ini menggunakan *threshold* waktu tanggap maksimal 15 menit. Suatu kecamatan dinyatakan terlayani apabila terdapat minimal satu WMK eksisting yang dapat mencapai titik permintaan tingkat kecamatan tersebut dalam waktu kurang dari atau sama dengan 15 menit berdasarkan data waktu tempuh yang telah dihitung melalui *Google Maps Distance Matrix API*. Evaluasi ini juga berfungsi sebagai verifikasi terhadap kondisi eksisting yang disampaikan oleh BPBD DIY yaitu bahwa efektivitas cakupan layanan WMK diperkirakan masih berada di bawah 70%.

5.1.1 Tingkat Cakupan Layanan Eksisting

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa dari 78 kecamatan di Provinsi DIY, sebanyak 43 kecamatan yang terlayani oleh WMK eksisting dalam batas waktu tanggap 15 menit, atau setara dengan 55,13%. Sementara itu, sebanyak 35 kecamatan (44,87%) masih berada di luar jangkauan layanan sehingga dikategorikan sebagai *underserved area*. Hasil ini memverifikasi bahwa kondisi eksisting memang belum memenuhi target efektivitas cakupan layanan 70% sebagaimana disampaikan oleh BPBD DIY. Oleh karena itu, hasil perhitungan ini memberikan bukti kuantitatif yang mendukung kondisi di lapangan dan memvalidasi adanya kesenjangan cakupan layanan pemadam kebakaran di DIY. Temuan tersebut menunjukkan bahwa hampir setengah wilayah di DIY masih belum memperoleh perlindungan layanan pemadam kebakaran sesuai standar waktu tanggap yang ditetapkan.

Dari segi populasi, WMK saat ini mampu menjangkau 2.161.272 jiwa dari total 3.734.935 jiwa penduduk DIY, atau sebesar 57,87%. Hasil ini menunjukkan bahwa kesenjangan pelayanan tidak hanya terjadi secara spasial, tetapi juga berdampak pada akses masyarakat terhadap layanan penanggulangan kebakaran.



Gambar 5. 1 Peta Sebaran WMK Beserta Cakupannya

Pada gambar 5.1, titik pos WMK eksisting ditandai dengan simbol segitiga berwarna biru. Sementara itu, wilayah kecamatan yang terlayani oleh 15 pos WMK eksisting ditandai dengan warna hijau, sedangkan wilayah kecamatan *underserved* ditandai dengan warna merah muda.

5.1.2 Distribusi *Underserved Area*

Distribusi 35 kecamatan tidak terlayani per kabupaten/kota di DIY disajikan pada tabel 5.1 beserta proporsinya terhadap total kecamatan masing-masing wilayah.

Tabel 5. 1 Distribusi Kecamatan *Underserved* per Kabupaten/Kota

Kabupaten/Kota	Total Kecamatan	Terlayani	<i>Underserved</i>	% <i>Underserved</i>
Bantul	17	14	3	17,65%
Gunungkidul	18	2	16	88,88%
Kulon Progo	12	5	7	58,33%
Sleman	17	8	9	52,94%
Kota Yogyakarta	14	14	0	0%

Kabupaten Gunungkidul merupakan wilayah dengan tingkat underserved tertinggi, yaitu sebanyak 16 dari 18 kecamatan (88,88%) belum terlayani dalam waktu tanggap 15 menit. Temuan ini menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah Gunungkidul masih berada di luar jangkauan pelayanan WMK eksisting. Kondisi tersebut dipengaruhi oleh luas wilayah Gunungkidul yang mencapai 1.485,36 km², sehingga jangkauan layanan dari WMK eksisting belum mampu menjangkau kecamatan-kecamatan di wilayah pinggir kabupaten. Selain itu,

karakteristik topografi perbukitan karst menyebabkan waktu tempuh aktual jauh lebih tinggi dibandingkan wilayah dengan kondisi geografis yang relatif datar.

Kabupaten Kulon Progo berada pada posisi kedua dengan 7 dari 12 kecamatan (58,33%) berstatus *underserved*. Sebagian besar kecamatan yang belum terlayani umumnya terletak di bagian utara dan barat kabupaten, sedangkan WMK eksisting masih terkonsentrasi pada wilayah tengah sehingga cakupan layanannya belum mampu menjangkau seluruh kecamatan dalam batas waktu tanggap. Selanjutnya, Kabupaten Sleman memiliki 9 kecamatan *underserved* (52,94%). Meskipun Sleman memiliki tingkat kepadatan penduduk yang tinggi dan berbatasan langsung dengan Kota Yogyakarta, distribusi WMK eksisting yang belum merata menyebabkan beberapa kecamatan di wilayah timur dan utara, seperti Kalasan, Prambanan, Ngemplak, Cangkringan, dan Turi, masih berada di luar cakupan layanan 15 menit.

Sebaliknya, Kota Yogyakarta memiliki tingkat cakupan tertinggi yaitu 100%. Hal ini sesuai dengan karakteristik Kota Yogyakarta sebagai wilayah perkotaan padat dengan jaringan jalan yang baik dan ketersediaan WMK yang lebih merata, sehingga standar waktu tempuh 15 menit lebih merata. Kabupaten Bantul juga menunjukkan kondisi yang relatif baik dengan 3 kecamatan *underserved* (17,65%) yang berlokasi di wilayah selatan dan timur seperti Dlingo, Sanden, dan Srandakan.

5.1.3 Analisis Kesenjangan Terhadap Target BPBD DIY

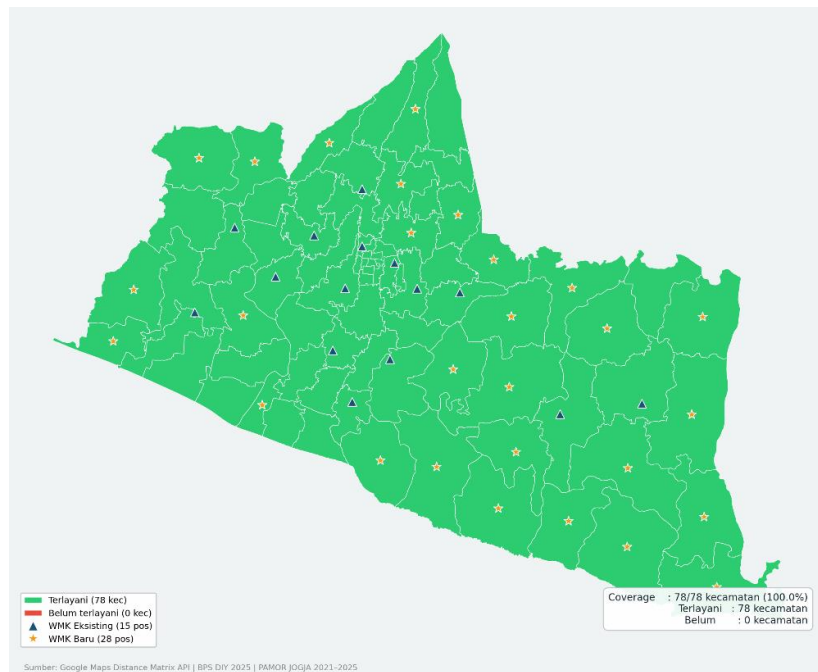
Sebagai bentuk validasi terhadap kebutuhan penambahan fasilitas, hasil evaluasi kondisi eksisting selanjutnya dibandingkan dengan target pembangunan WMK. Berdasarkan data BPBD DIY, jumlah ideal WMK di DIY adalah sebanyak 40 pos WMK, sedangkan yang saat ini beroperasi 15 pos WMK, di mana *gap* sebesar 25 WMK atau sebanyak 62,5% dari kebutuhan ideal.

Kesenjangan paling besar terjadi di Kabupaten Gunungkidul yang membutuhkan 13 WMK namun baru memiliki 2 WMK, serta Kabupaten Sleman yang membutuhkan 9 WMK namun baru tersedia 2 WMK. Kondisi ini konsisten dengan hasil analisis *underserved area*, di mana kedua wilayah memiliki proporsi kecamatan belum terlayani yang tinggi. Oleh karena itu, hasil analisis kondisi eksisting memvalidasi perlunya penambahan WMK baru sebagai upaya meningkatkan pemerataan cakupan layanan dan menjadi dasar untuk dilakukannya optimasi lokasi menggunakan model *Set Covering Problem* (SCP), *Partial Set Covering Problem* (PSCP), dan *Maximal Covering Location Problem* (MCLP) pada skenario berikutnya.

5.2 Analisis Hasil Optimasi

5.2.1 Optimasi Penempatan WMK dengan *Set Covering Problem* (SCP)

Skenario model SCP dirancang sebagai langkah pertama untuk mengatasi masalah banyaknya wilayah *underserved* pada kondisi eksisting. Analisis pada skenario ini menggunakan model *Set Covering Problem* (SCP) dengan tujuan untuk mencari jumlah minimal pos WMK baru yang harus dibangun, dengan seluruh 35 kecamatan yang sebelumnya tidak terlayani harus bisa terlayani 100% tanpa ada yang terlewat. Standar waktu tanggap yang digunakan tetap sama yaitu maksimal 15 menit perjalanan berdasarkan perhitungan data jalan nyata.

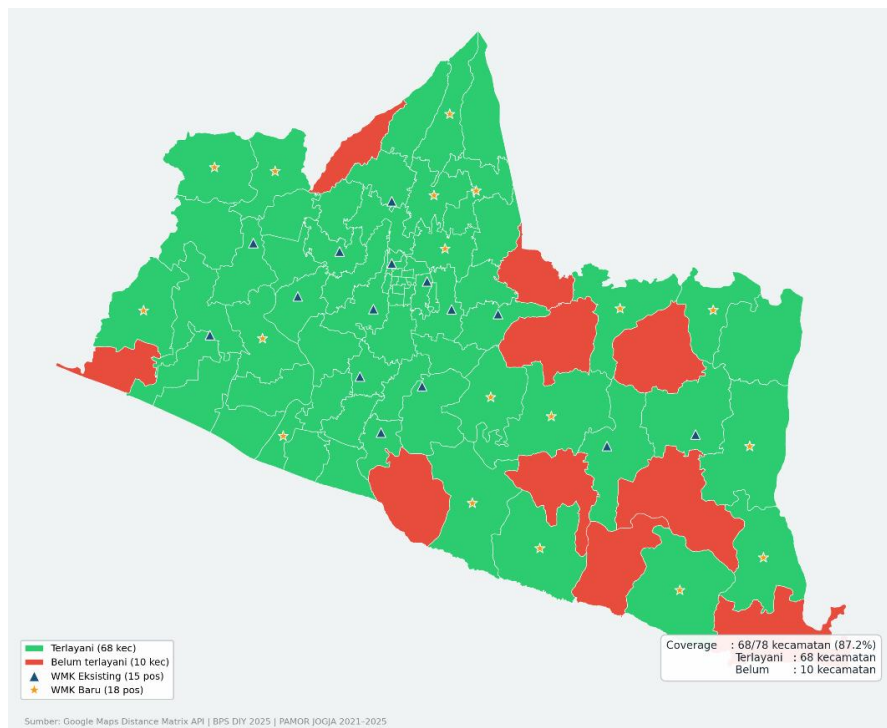


Gambar 5. 2 Peta Sebaran WMK dan Cakupan Layanan Hasil Optimasi SCP

Berdasarkan hasil optimasi SCP, Provinsi DIY perlu ditambahkan minimal 28 pos baru untuk melayani 35 kecamatan *underserved*, sehingga total pos yang beroperasi meningkat menjadi 43 pos dengan estimasi biaya pembangunan sebesar Rp84.000.000.000. Hasil optimasi ini juga menunjukkan adanya efisiensi spasial, di mana satu pos baru di lokasi yang strategis dapat melayani beberapa kecamatan sekaligus dalam batas waktu tanggap 15 menit. Efisiensi tertinggi terjadi di Kota Yogyakarta (1 pos baru untuk 2 kecamatan) sehingga tidak perlu menambah pos baru. Kondisi ini serupa di beberapa wilayah Kabupaten Bantul (2 pos untuk 3 kecamatan) karena faktor kerapatan jaringan jalan yang baik. Sedangkan, Kabupaten Gunungkidul menunjukkan ketidakefisienan karena membutuhkan hingga 13 pos baru akibat luasnya wilayah dan hambatan topografi perbukitan yang membatasi radius pergerakan armada.

5.2.2 Optimasi Penempatan WMK dengan *Partial Set Covering Problem* (PSCP)

Skenario model PSCP dirancang sebagai alternatif solusi yang lebih realistis terhadap kondisi lapangan, dimana memiliki keterbatasan dalam efisiensi anggaran dengan membatasi cakupan layanan serta membatasi jumlah pos baru sesuai *gap* target BPBD DIY per kabupaten/kota. Analisis pada skenario ini menetapkan parameter cakupan minimum 70% yang berarti minimal 25 dari 35 kecamatan *underserved* yang merupakan titik permintaan wajib terlayani dalam standar waktu tanggap 15 menit berdasarkan data waktu tempuh nyata.



Gambar 5. 3 Peta Sebaran WMK dan Cakupan Layanan Hasil PSCP

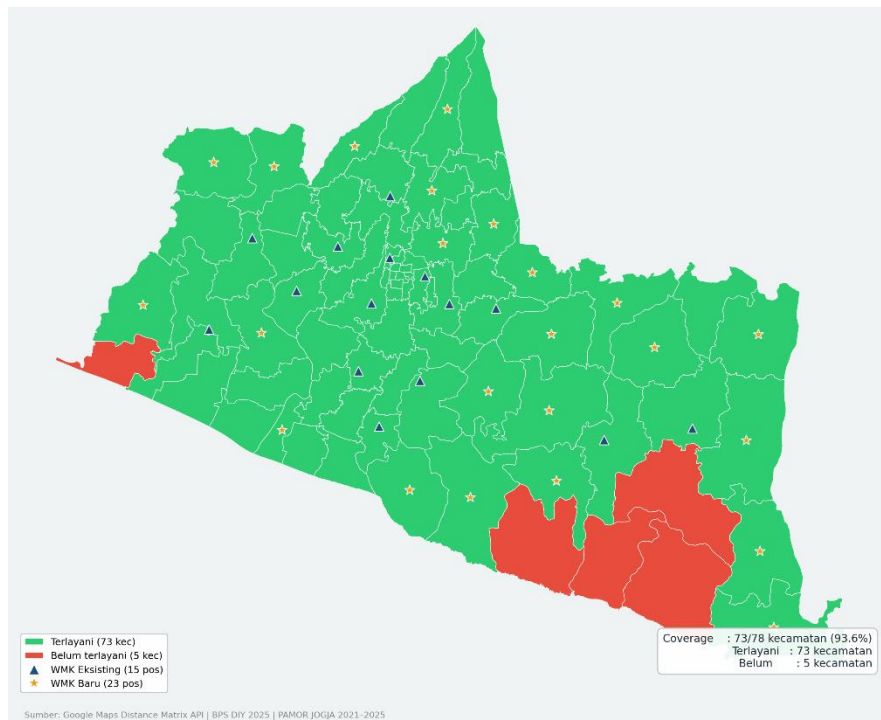
Berdasarkan hasil optimasi PSCP, Provinsi DIY perlu menambah minimal 18 pos baru untuk memenuhi target tersebut, sehingga total pos yang beroperasi meningkat menjadi 33 pos. Hasil optimasi ini mampu melayani 25 kecamatan *underserved*, sehingga total titik permintaan yang terlayani di DIY menjadi 68 kecamatan. Hal ini menunjukkan peningkatan sebesar 87,18%, dan mampu mencakup 90% populasi. Apabila dibandingkan dengan hasil SCP, PSCP menghasilkan biaya yang lebih rendah di mana estimasi biaya pembangunan menjadi hanya Rp54.000.000.000. Berdasarkan perbandingan hasil optimasi terhadap jumlah *gap* target BPBD DIY, jumlah pos baru yang dihasilkan dari PSCP masih berada dalam target tersebut, sehingga kebijakan ini menjadi pilihan yang tepat apabila BPBD DIY ingin menekan biaya penambahan pos baru.

Perbedaan pemilihan lokasi antara PSCP dengan skenario lainnya adalah terpilihnya Ngemplak dan Ngawen, di mana dua lokasi yang tidak dipilih oleh SCP maupun MCLP. Kecamatan Ngemplak dipilih karena posisinya di Sleman bagian timur memungkinkan satu pos tersebut menjangkau beberapa kecamatan sekitarnya sekaligus, sehingga model tidak perlu membangun pos terpisah di Kalasan, Prambanan, dan Tempel. Dalam logika minimasi, pemilihan ini menguntungkan dalam hal efisiensi, di mana satu pos di Kecamatan Ngemplak menggantikan potensi kebutuhan layanan di beberapa pos lain. Begitu pula Kecamatan Ngawen di Gunungkidul, yang dipilih sebagai titik efisien untuk menjangkau wilayah timur Gunungkidul tanpa perlu menambah pos di setiap kecamatan sekitarnya.

Akan tetapi, PSCP menghasilkan 10 kecamatan yang tidak terlayani, yaitu Girisubo, Nglipar, Paliyan, Patuk, Purwosari, Semanu, Tanjungsari, Temon, Prambanan, dan Tempel. Kecamatan-kecamatan ini dapat dikelompokkan menjadi dua kategori. Wilayah dengan hambatan struktural permanen seperti Semanu, Tanjungsari, dan Temon yang tidak dapat dijangkau dari pos manapun dalam 15 menit sehingga membutuhkan pos di lokasi spesifiknya sendiri. Model PSCP memilih untuk tidak membangun di lokasi-lokasi tersebut karena adanya syarat yang harus memenuhi *threshold* 70% dengan pos WMK seminim mungkin. Kemudian, terdapat wilayah yang secara spasial terjangkau oleh pos lain namun dikorbankan karena membangun pos di lokasi tersebut tidak efisien dalam konteks minimasi jumlah pos, yaitu Prambanan dan Tempel yang dapat terjangkau dari Ngemplak namun berada di batas ambang waktu tempuh.

5.2.3 Optimasi Penempatan WMK dengan *Maximal Covering Location Problem* (MCLP)

Skenario MCLP mengoptimalkan kondisi penempatan pos WMK yang lebih realistis dengan kondisi lapangan. Model ini memaksimalkan cakupan permintaan dengan mempertimbangkan batasan jumlah pembangunan fasilitas berdasarkan *gap* kebijakan BPBD DIY di masing-masing kabupaten/kota, dengan total maksimal penambahan sebesar 25 pos baru.



Gambar 5. 4 Peta Sebaran WMK dan Cakupan Wilayah Hasil MCLP

Berdasarkan hasil optimasi MCLP, model ini menghasilkan solusi optimal dengan membangun 23 pos WMK baru dari batas maksimal 25 pos yang ditetapkan untuk memaksimalkan cakupan permintaan, dengan estimasi biaya pembangunan sebesar Rp69.000.000.000. Pembatasan kendala ini menghasilkan total cakupan layanan di Provinsi DIY menjadi 93,59% dan dapat melayani 96,51% populasi DIY. Meskipun demikian, masih terdapat 5 kecamatan yang berada di luar jangkauan standar waktu tanggap, yaitu Ngemplak, Turi, Cangkringan, Ngawen, dan Kalibawang.

Perbedaan utama antara hasil MCLP dan PSCP terletak pada pemilihan lokasi pembangunan WMK baru. MCLP memilih Kalasan, Tempel, Semanu, Paliyan, Ponjong, Nglipar, Semin, Patuk, dan Temon. Sedangkan, PSCP memilih Ngemplak, Ngawen, Rongkop, Purwosari, dan Kalibawang. Perbedaan ini dipengaruhi oleh tujuan optimasi masing-masing model. PSCP bertujuan mencapai target cakupan minimum yang ditetapkan dengan jumlah seminim mungkin, sedangkan MCLP beruaya memaksimalkan permintaan yang dapat dilayani dengan jumlah fasilitas yang dibatasi. Oleh karena itu, MCLP cenderung memilih lokasi yang memberikan kontribusi cakupan permintaan terbesar meskipun membutuhkan jumlah pos yang lebih banyak dibandingkan PSCP.

Sebagai contoh, MCLP memilih Kalasan dan tidak memiliki Ngemplak. Hal ini menunjukkan bahwa dalam konfigurasi solusi optimal, tambahan cakupan permintaan yang

diberikan Kalasan lebih besar dibandingkan Ngemplak, karena sebagian wilayah yang dapat dijangkau Ngemplak telah tercakup oleh kombinasi lokasi lain seperti Depok dan Pakem. MCLP juga memilih Temon dibandingkan Kalibawang karena lokasi tersebut memberikan peningkatan cakupan permintaan yang lebih besar dalam batasan jumlah fasilitas yang tersedia. Dengan demikian, keputusan pemilihan lokasi pada MCLP tidak hanya ditentukan oleh pemerataan wilayah, tetapi juga berdasarkan kontribusi setiap kandidat lokasi terhadap peningkatan permintaan yang dapat dilayani.

Apabila dibandingkan dengan target penambahan 25 pos WMK, model MCLP hanya mengusulkan 23 dari 25 pos. Hal ini terjadi karena pada titik tertentu, penambahan dua pos lainnya tidak lagi memberikan peningkatan cakupan permintaan yang signifikan, di mana kecamatan *underserved* yang tersisa tidak mampu menjangkau kecamatan yang masih berada di luar jangkauan 15 menit. Kondisi tersebut membuktikan bahwa keterbatasan cakupan layanan pada beberapa wilayah dapat dipengaruhi oleh karakteristik spasial dan sebaran kandidat lokasi dibandingkan oleh jumlah fasilitas yang tersedia.

5.3 Perbandingan Antar Hasil Optimasi

Analisis komparatif dilakukan untuk mengevaluasi secara keseluruhan dari model *Set Covering Problem* (SCP), *Partial Set Covering Problem* (PSCP), dan *Maximal Covering Location Problem* (MCLP) yang telah diuji. Melalui perbandingan ini, pengambil kebijakan dapat melihat *trade-off* antara jumlah pembangunan WMK baru, kebutuhan anggaran, serta peningkatan cakupan wilayah dan populasi yang dihasilkan oleh masing-masing model. Ringkasan perbandingan parameter dari skenario disajikan pada tabel 5.2.

Tabel 5. 2 Perbandingan Antar Hasil Optimasi

Skenario	Jumlah WMK			Cakupan (%)		Total Estimasi Biaya (Rp)
	Eksisting	Baru	Total	Kecamatan	Populasi	
Eksisting	15	-	15	55,13	57,9	-
SCP	15	28	43	100	100	84.000.000.000
PSCP	15	18	33	87,18	90	54.000.000.000
MCLP	15	23	38	93,59	96,5	69.000.000.000

Berdasarkan tabel 5.2, model SCP menghasilkan cakupan layanan tertinggi dengan menjangkau 100% wilayah kecamatan dan populasi, namun memerlukan pembangunan 28 pos baru sehingga total WMK menjadi 43 pos dengan estimasi biaya sebesar Rp84.000.000.000.

Hasil ini menunjukkan bahwa pemerataan layanan secara penuh hanya dapat dicapai melalui penambahan fasilitas dalam jumlah yang relatif besar.

Apabila kendala cakupan minimum pada skenario PSCP sebesar 70% dari kecamatan *underserved*, model hanya membutuhkan 18 pos baru sehingga total WMK menjadi 33 pos dengan estimasi biaya Rp54.000.000.000, atau terdapat penghematan sebesar Rp30.000.000.000 (35,71%) dibandingkan SCP. Meskipun demikian, efisiensi tersebut sejalan dengan penurunan cakupan layanan menjadi 87,18% wilayah dan 90% populasi, sehingga masih terdapat beberapa kecamatan yang belum memenuhi standar waktu tanggap 15 menit.

Sementara itu, model MCLP menghasilkan solusi antara pemerataan layanan dan efisiensi biaya. Dengan pembangunan 23 pos WMK baru, total WMK menjadi 38 pos dengan estimasi biaya sebesar Rp69.000.000.000, atau lebih hemat Rp15.000.000.000 (17,86%) dibandingkan SCP. Kombinasi tersebut mampu mencapai cakupan sebesar 93,59% wilayah dan 96,5% populasi sehingga hanya menyisakan 5 kecamatan yang belum terlayani dalam batas waktu tanggap. Hasil ini menunjukkan bahwa MCLP mampu meningkatkan cakupan layanan secara signifikan tanpa memerlukan pembangunan fasilitas sebanyak SCP.

Tabel 5. 3 Kelebihan dan Kekurangan Seluruh Skenario

Skenario	Kelebihan	Kekurangan
Eksisting	Tidak memerlukan biaya pembangunan tambahan.	Distribusi yang tidak merata menyebabkan sebagian besar wilayah dan kabupaten dengan topografi kompleks tidak terjangkau standar waktu tanggap.
<i>Set Covering Problem</i> (SCP)	Menjamin pemerataan layanan secara penuh ke seluruh wilayah tanpa terkecuali.	Beban finansial tertinggi di antara semua skenario, sehingga kurang realistis apabila dihadapkan pada keterbatasan anggaran daerah jangka pendek.
<i>Partial Covering Problem</i> (PSCP)	Paling efisien secara biaya, dengan jumlah penambahan pos paling minimal namun tetap berada dalam batasan target <i>gap</i> BPBD DIY per kabupaten/kota.	Model secara selektif mengorbankan wilayah dengan hambatan geografis tinggi, kecamatan yang tersisa <i>underserved</i> cenderung merupakan wilayah yang paling sulit dijangkau.
<i>Maximal Covering Location Problem</i> (MCLP)	Rasio cakupan terhadap biaya paling optimal dan adaptif terhadap kebijakan alokasi anggaran per kabupaten, dengan cakupan wilayah dan populasi mendekati ideal.	Masih terdapat beberapa kecamatan di luar jangkauan sehingga memerlukan kebijakan lanjutan untuk mengisi <i>gap</i> yang tersisa pada periode perencanaan berikutnya.

Mengacu pada tabel 5.3 ketiga model menawarkan karakteristik yang berbeda sesuai dengan tujuan optimasinya. Model SCP memberikan pemerataan layanan secara penuh sehingga seluruh kecamatan dapat dijangkau, namun membutuhkan investasi pembangunan terbesar. PSCP menjadi alternatif yang paling efisien dari segi biaya karena mampu memenuhi target cakupan dengan jumlah pembangunan WMK paling sedikit, meskipun masih terdapat beberapa kecamatan yang belum terlayani. Sementara itu, MCLP menghasilkan keseimbangan antara peningkatan cakupan layanan dan efisiensi pembangunan WMK, sehingga mampu memberikan cakupan wilayah dan populasi yang mendekati kondisi ideal dengan kebutuhan biaya yang lebih rendah dibandingkan SCP.

5.4 Pemilihan Model Rekomendasi

Berdasarkan analisis komparatif yang telah dilakukan, model MCLP dipilih sebagai rekomendasi utama pembangunan WMK di DIY. Pemilihan model ini didasarkan pada tiga pertimbangan utama berdasarkan hasil penelitian ini. Berdasarkan segi efektivitas layanan, MCLP mampu meningkatkan cakupan permintaan menjadi 93,59%, di mana jauh melampaui target efektivitas minimum 70% yang disampaikan oleh BPBD DIY. Sedangkan, berdasarkan segi kesesuaian kebijakan, jumlah WMK baru yang direkomendasikan sebanyak 23 pos masih berada dalam batas kebutuhan penambahan WMK berdasarkan gap target BPBD DIY, yaitu maksimal 25 pos, sehingga hasil optimasi ini realistis untuk dijadikan acuan perencanaan pembangunan. Dari segi efisiensi biaya, MCLP membutuhkan investasi sebesar Rp69.000.000.000, atau lebih rendah dibandingkan SCP.

Model SCP tidak dipilih sebagai rekomendasi utama karena membutuhkan pembangunan yang melebihi *gap* target, yaitu 28 pos WMK baru dengan kebutuhan biaya terbesar sehingga kurang sesuai dengan kondisi lapangan. Di sisi lain, model PSCP menghasilkan kebutuhan pembangunan paling sedikit, tetapi masih terdapat 10 kecamatan yang belum memenuhi standar waktu tanggap 15 menit sehingga tingkat pemerataan layanan lebih rendah dibandingkan MCLP. Oleh karena itu, MCLP dinilai sebagai alternatif yang paling seimbang antara efektivitas layanan, kebutuhan pembangunan, dan efisiensi biaya

5.4.1 Dampak Penerapan Rekomendasi MCLP

Berdasarkan hasil optimasi, penerapan rekomendasi MCLP berpotensi meningkatkan efektivitas pelayanan kebakaran di DIY secara signifikan. Cakupan wilayah meningkat dari 55,13% menjadi 93,59%, sehingga jumlah kecamatan *underserved* berkurang dari 35

kecamatan menjadi 5 kecamatan. Dari segi populasi, cakupan layanan meningkat dari 57,90% menjadi 96,51%, sehingga sebagian besar penduduk DIY telah berada dalam jangkauan pelayanan standar yang ditetapkan berdasarkan waktu tanggap 15 menit.

Selain itu, implementasi rekomendasi MCLP juga mendukung pemerataan distribusi WMK pada wilayah yang selama ini memiliki kesenjangan terbesar, khususnya Kabupaten Gunungkidul, Sleman, dan Kulon progo. Oleh karena itu, rekomendasi ini dapat meningkatkan jumlah masyarakat yang memperoleh akses layanan kebakaran serta mengurangi ketimpangan pelayanan antarwilayah.

5.4.2 Pertimbangan Strategis Implementasi Hasil Optimasi

Implementasi rekomendasi hasil optimasi MCLP perlu mempertimbangkan kondisi masing-masing wilayah agar pelaksanaan pembangunan dapat dilakukan secara lebih efektif. Dalam penelitian ini, pertimbangan implementasi disusun berdasarkan hasil optimasi dengan mempertimbangkan tiga indikator utama, yaitu tingkat kecamatan *underserved* pada kondisi eksisting, laju pertumbuhan penduduk, dan karakteristik kebutuhan pelayanan pada masing-masing wilayah.

Tingkat *underserved* digunakan untuk mengidentifikasi wilayah yang masih mengalami kesenjangan pelayanan terbesar, sedangkan laju pertumbuhan penduduk digunakan sebagai pertimbangan dalam mengantisipasi peningkatan kebutuhan layanan pada masa mendatang. Ketiga indikator tersebut digunakan sebagai dasar urutan prioritas implementasi pembangunan WMK secara bertahap sehingga rekomendasi yang dihasilkan tidak hanya meningkatkan pemerataan layanan, tetapi juga mendukung pengembangan sistem pelayanan kebakaran yang lebih adaptif terhadap perkembangan wilayah.

Tabel 5. 4 Prioritas Implementasi Pembangunan WMK DIY

Prioritas	Wilayah	Kecamatan <i>Underserved</i>	Laju Pertumbuhan Penduduk	Dasar Penentuan
I	Gunungkidul	88,88%	0,16%	Memiliki tingkat <i>underserved</i> tertinggi sehingga menjadi wilayah dengan kebutuhan peningkatan layanan paling mendesak.
I	Kulon Progo	58,33%	0,52%	Memiliki proporsi <i>underserved</i> cukup tinggi sehingga memerlukan

Prioritas	Wilayah	Kecamatan <i>Underserved</i>	Laju Pertumbuhan Penduduk	Dasar Penentuan
				penambahan cakupan layanan.
II	Sleman	52,94%	0,97%	Memiliki laju pertumbuhan penduduk tertinggi sehingga berpotensi mengalami peningkatan kebutuhan pelayanan kebakaran.
III	Bantul	17,65%	0,83%	Memiliki proporsi <i>underserved</i> relatif rendah dibandingkan kabupaten lainnya.

Berdasarkan tabel 5.4, implementasi tahap awal direkomendasikan untuk fokus pada Kabupaten Gunungkidul dan Kulon Progo ditempatkan sebagai prioritas pertama karena masih memiliki tingkat *underserved* yang tinggi sehingga membutuhkan peningkatan cakupan layanan secara lebih cepat. Selanjutnya, Kabupaten Sleman menjadi prioritas kedua mengingat laju pertumbuhan penduduknya merupakan yang tertinggi di Provinsi DIY, sehingga pembangunan WMK diperlukan untuk mengantisipasi peningkatan kebutuhan pelayanan pada masa mendatang. Adapun Kabupaten Bantul menjadi prioritas ketiga karena proporsi wilayah *underserved* relatif rendah, sehingga pembangunan WMK dapat difokuskan sebagai penyempurnaan pemerataan layanan.

Pada jangka pendek (1-3 tahun), pembangunan diprioritaskan pada Kabupaten Gunungkidul dan Kulon Progo karena memiliki tingkat *underserved* tertinggi sehingga membutuhkan peningkatan cakupan layanan secara lebih cepat. Selanjutnya, pada jangka menengah (4-7 tahun), pembangunan diarahkan pada Kabupaten Sleman untuk mengantisipasi peningkatan kebutuhan layanan seiring laju pertumbuhan penduduk yang tertinggi di DIY. Adapun pada jangka panjang (8-15), pembangunan difokuskan pada Kabupaten Bantul sebagai upaya pemerataan layanan sesuai perkembangan kebutuhan dan kemampuan pendanaan pemerintah daerah.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengolahan data yang telah dianalisis, penelitian ini menghasilkan simpulan yang menjawab rumusan masalah, di antaranya:

1. Evaluasi terhadap 15 WMK eksisting di Provinsi DIY menggunakan *threshold* waktu tanggap 15 menit sesuai kebijakan menunjukkan tingkat cakupan yang masih jauh dari ideal, di mana hanya 43 dari 78 kecamatan (55,13%) yang terlayani, sedangkan 36 kecamatan (44,87%) berstatus tidak terlayani atau *underserved*, dengan populasi terlayani sebesar 62,66% dan 37,34% lainnya berada di luar jangkauan. Berdasarkan hasil perhitungan waktu tempuh, kesenjangan antar kabupaten/kota di DIY sangat tinggi, di mana Kabupaten Gunungkidul menjadi wilayah paling kritis dengan 16 dari 18 kecamatan berstatus *underserved* (88,88%), diikuti Kulon Progo (58,33%), dan Sleman (52,94%), sementara Kota Yogyakarta memiliki cakupan terbaik dengan 2 pos yang dapat melayani seluruh kecamatan secara penuh.
2. Penyelesaian model optimasi menggunakan algoritma eksak menghasilkan tiga rekomendasi yang berbeda sesuai kapasitas anggaran daerah yang direpresentasikan dengan jumlah target pos WMK dari Badan Penanggulangan Bencana Kebakaran (BPBD) DIY. *Set Covering Problem* (SCP) merekomendasikan 28 WMK baru untuk mencapai cakupan 100% dengan estimasi biaya Rp84.000.000.000. *Partial Set Covering Problem* (PSCP), dengan batasan gap PBD per kabupaten dan cakupan minimum 70%, merekomendasikan 18 WMK baru yang lebih efisien dengan biaya lebih rendah dari SCP, yaitu Rp54.000.000.000 namun tetap memenuhi target cakupan minimum yang ditetapkan. *Maximal Covering Location Problem* (MCLP), dengan batasan kuota 25 pos sesuai *gap* target BPBD DIY per kabupaten, merekomendasikan 23 WMK baru yang memperluas cakupan menjadi 73 kecamatan serta dapat melayani 93,59% kecamatan dengan estimasi biaya Rp69.000.000.000.
3. Analisis komparatif menunjukkan adanya *trade-off* antara kebutuhan anggaran dan luas cakupan. PSCP menjadi skenario dengan efisiensi biaya tertinggi, mampu menghemat anggaran sebesar 35,71% dibandingkan SCP, dengan konsekuensi cakupan yang lebih rendah. Sementara itu, MCLP menawarkan solusi yang lebih baik terhadap efisiensi biaya

dan luas cakupan. Selain menghemat 17,86% dibandingkan SCP, model ini memaksimalkan cakupan layanan sebesar 93,59% dalam batasan kebijakan target BPBD DIY per kabupaten. Berdasarkan hasil analisis komparatif tersebut, MCLP direkomendasikan sebagai model implementasi karena memberikan keseimbangan antara kebutuhan pembangunan fasilitas, efektivitas layanan, dan efisiensi biaya. Implementasi pembangunan WMK direkomendasikan dilakukan secara bertahap dengan memprioritaskan Kabupaten Gunungkidul dan Kulon Progo pada jangka pendek, Kabupaten Sleman pada jangka menengah, serta Kabupaten Bantul pada jangka panjang sesuai tingkat *underserved*, laju pertumbuhan penduduk, dan kebutuhan pemerataan layanan.

6.2 Saran

Berdasarkan kesimpulan dan keterbatasan dari penelitian ini, beberapa saran yang dapat diberikan sebagai bahan pertimbangan dan pengembangan ke depannya yaitu:

1. Bagi Pemerintah Daerah

Pemerintah Daerah DIY melalui BPBD disarankan mengadopsi rekomendasi penempatan pos WMK berbasis model MCLP sebagai acuan utama rencana strategis dengan pembangunan fisik secara bertahap. Selain itu, pemerintah daerah perlu memberikan perhatian khusus terhadap kecamatan yang masih berada di luar jangkauan standar waktu tanggap hasil optimasi MCLP, seperti Girisubo, Purwosari, Rongkop, Tanjungsari, dan Kalibawang. Mengingat karakteristik geografis dan keterbatasan jangkauan layanan pada wilayah tersebut, peningkatan pelayanan dapat dipertimbangkan melalui strategi pendukung, seperti pembentukan relawan pemadam kebakaran, pengembangan pos pembantu atau pos siaga, peningkatan kapasitas armada pada WMK terdekat, maupun penguatan sarana dan prasarana penanggulangan kebakaran sesuai kondisi wilayah.

2. Bagi Akademisi dan Penelitian Selanjutnya

Parameter biaya dalam penelitian ini merupakan nilai estimasi pengadaan satu armada mobil pemadam kebakaran dan belum mencakup keseluruhan komponen fisik stasiun, sehingga penelitian selanjutnya disarankan untuk memperdalam rincian dan akurasi parameter investasi dengan menelusuri seluruh komponen pengeluaran fisik pos secara nyata, seperti biaya konstruksi bangunan, sarana, dan prasarana penunjang, guna melengkapi data estimasi pengadaan armada tunggal yang digunakan dalam penelitian ini.

Selain itu, pengembangan model dapat diperluas dengan mempertimbangkan aspek kapasitas operasional WMK, seperti jumlah armada, kapasitas pelayanan, dan ketersediaan personel dalam menangani beberapa kejadian kebakaran secara bersamaan. Mengingat pemodelan waktu tempuh dalam penelitian ini baru menangkap kondisi lalu lintas pada jam sibuk sore hari (*afternoon peak hour*), penelitian mendatang disarankan menggunakan data waktu tempuh yang lebih dinamis dengan mempertimbangkan variasi kondisi lalu lintas pada beberapa periode waktu, seperti pagi, siang, dan malam, sehingga hasil optimasi lebih mencerminkan kondisi operasional yang sebenarnya, juga mengevaluasi kembali penggunaan titik *centroid* administratif kecamatan. Penggunaan *centroid* kecamatan berpotensi menimbulkan bias jangkauan waktu tanggap, terutama pada wilayah dengan area luas atau karakteristik geografis yang kompleks. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan meningkatkan presisi spasial dengan menggunakan unit permintaan yang lebih rinci, seperti *centroid* kelurahan atau pendekatan berbasis *grid* spasial. Penelitian selanjutnya juga disarankan mengeksplorasi metode analisis ketahanan (*robustness*) lebih lanjut yang dapat memproyeksi variasi tren per kecamatan, seperti fungsi logistik atau pendekatan lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Aktaş, E., Özaydın, Ö., Bozkaya, B., Ülengin, F., & Önsel, Ş. (2013). Optimizing Fire Station Locations for the Istanbul Metropolitan Municipality. *Interfaces*, 43(3), 240–255. <https://doi.org/10.1287/inte.1120.0671>
- Al-Jarallah, A. J. & And Eid Al Dossary. (2015). *Analysis of Characteristics and Factors Influencing Fire Incidents Response Times in Urban Areas in Saudi Arabia: Case Study of Dammam City*. Unpublished. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2076.8725>
- Aslan Özşahin, S. G., & Erdebili, B. (2023). Statistical-machine-learning-based intelligent relaxation for set-covering location models to identify locations of charging stations for electric vehicles. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 12, 100118. <https://doi.org/10.1016/j.ejtl.2023.100118>
- Aziz, M. I. A. (2025). Analisa Algoritma Branch and Bound Dalam Efektivitas dan Efisiensinya untuk Menyelesaikan Masalah Pada Ruang Lingkup Kecil Maupun Besar. *Jurnal Sains dan Informatika*, 1(1). <https://ejournal.pelitabina.com/index.php/Jusinfo>
- B, W. A. F., Paranoan, N. R., Allo, C. B. G., & Sumardi, S. R. (2024). Optimasi Keuntungan Produksi menggunakan Metode Simpleks dan Aplikasi POM QM. *Jurnal Riset Dan Aplikasi Matematika (JRAM)*, 8(2), 201–209. <https://doi.org/10.26740/jram.v8n2.p201-209>
- Badan Nasional Penanggulangan Bencana. (2012). *Pedoman Umum Pengkajian Risiko Bencana* (Nomor 02 Tahun 2012; pp. 4–50). Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB).
- Badan Penanggulangan Bencana Daerah DIY. (2026). *Data Kejadian Kebakaran Bangunan*. PAMOR JOGJA. <https://pamor.jogjaprovo.go.id/data-kejadian>
- Badan Pusat Statistik. (2025). *Proyeksi Jumlah Penduduk menurut Kabupaten/Kota di D.I. Yogyakarta (Jiwa)*.
- Basriati, S. (2018). Integer Linear Programming Dengan Pendekatan Metode Cutting Plane dan Branch and Bound untuk Optimasi Produksi Tahu. *Jurnal Sains Matematika Dan Statistika*, 4(2), 95–104.
- Chen, L., Chen, S.-J., Chen, W.-K., Dai, Y.-H., Quan, T., & Chen, J. (2023). Efficient presolving methods for solving maximal covering and partial set covering location problems. *European Journal of Operational Research*, 311(1), 73–87. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.04.044>
- Cordeau, J.-F., Furini, F., & Ljubić, I. (2019). Benders decomposition for very large scale partial set covering and maximal covering location problems. *European Journal of Operational Research*, 275(3), 882–896. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.12.021>
- Cornuéjols, G. (2008). Valid inequalities for mixed integer linear programs. *Mathematical Programming*, 112(1), 3–44. <https://doi.org/10.1007/s10107-006-0086-0>

- Dali, D., Lesnussa, Y. A., & Ilwaru, V. Y. I. (2022). Optimalisasi Keuntungan Menggunakan Metode Branch and Bound Pada Produksi Spring Bed. *Jurnal Matematika*, 12(2), 78–88. <https://doi.org/10.24843/JMAT.2017.v07.i01.p77>
- Daskin, M. S., & Owen, S. H. (1999). Two New Location Covering Problems: The Partial P - Center Problem and the Partial Set Covering Problem. *Geographical Analysis*, 31(3), 217–235. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1999.tb00979.x>
- Deakin, R. E., Bird, S. C., & Grenfell, R. I. (2002). The Centroid? Where would you like it to be be? *Cartography*, 31(2), 153–167. <https://doi.org/10.1080/00690805.2002.9714213>
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2023). *Pedoman Kapasitas Jalan Indonesia Direktorat Jenderal Bina Marga (PKJI)*. Departemen Pekerjaan Umum.
- Efiyanti, R., & Idayani, D. (2025). Optimization of Public Health Centers Location in Bandar Lampung Using Integer Linear Programming. *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, 9(3), 1367–1375. <https://doi.org/10.70609/g-tech.v9i3.7302>
- Erkamim, Moh., Mukhlis, I. R., Putra, P., Adiwarman, M., Rassarandi, F. D., Rumata, N. A., Arrofiqoh, E. N., KN, A. R., Chusnayah, F., Paddiyatu, N., & Erwin Hermawan. (2023). *Sistem Informasi Geografis (SIG): Teori Komprehensif SIG*. PT Green Pustaka Indonesia.
- Evalianto, A. R., Mataburu, I. B., & Jalaludin, M. (2024). Analisis Lokasi Pos Damkar Berdasarkan Peta Kerawanan Kebakaran Menggunakan SIG Di Jakarta Timur. *JPIG (Jurnal Pendidikan Dan Ilmu Geografi)*, 9(2), 160–169. <https://doi.org/10.21067/jpig.v9i2.10301>
- Fikri, K. N. S. (2021). *Pelaksanaan Wilayah Manajemen Kebakaran (WMK) Berdasarkan Kepmeneg PU No. 11/KPTS/2000 di Kabupaten atau Kota (Studi di Badan Penanggulangan Bencana Daerah Kabupaten Indragiri Hilir)*. Open Science Framework. <https://doi.org/10.31219/osf.io/4jd8s>
- Firmansyah, M., Rahmawati, N., & Donoriyanto, D. S. (2024). Alokasi Pengolahan Sampah Anorganik dengan Menggunakan Maximum Covering Location Problem. *Tekmapro*, 19(2). <https://doi.org/10.33005/tekmapro.v19i2.401>
- Forrest, J., & Lougee-Heimer, R. (2005). CBC User Guide. In H. J. Greenberg & J. C. Smith (Eds.), *Emerging Theory, Methods, and Applications* (pp. 257–277). INFORMS. <https://doi.org/10.1287/educ.1053.0020>
- Google Developers. (2026). *Distance Matrix API overview* [Documentation]. Google for Developers. <https://developers.google.com/maps/documentation/distance-matrix/overview>
- Hartini, S., Puspitasari, D., & Utami, A. A. (2021). Design of waste cooking oil collection center in Semarang City using maximal covering location problem: A finding from Semarang, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 623(1), 012100. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/623/1/012100>
- Hazami, M. I. & Zulkarnain. (2022). Optimization of Last Mile Hub Location Determination for Package Delivery using Facility Location Problem. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 1168–1177. <https://doi.org/10.46254/NA07.20220275>

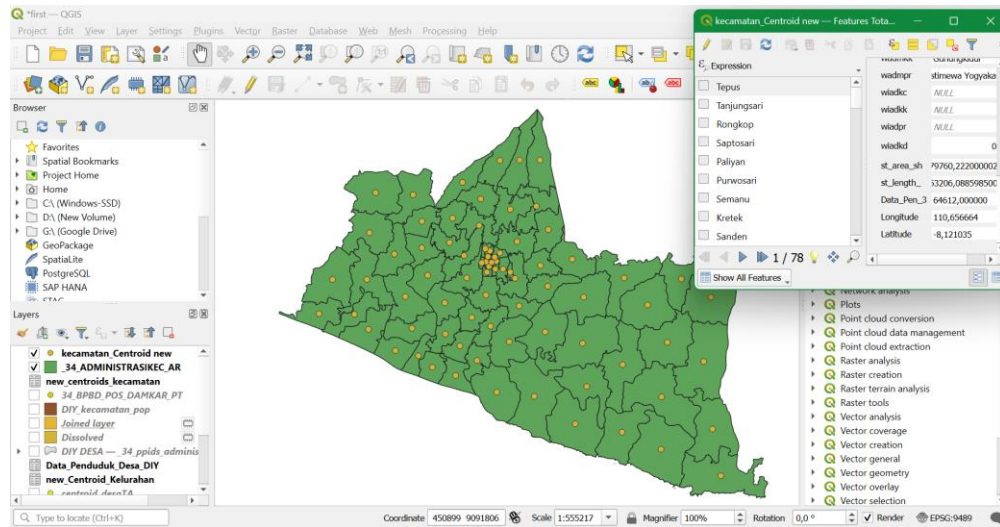
- Huda, M. N., Putri, S. A., Rizqullah, R. S., Anwar, N. K. M., Hidayatullah, M. Y., Solihan, S., Pramono, S. R. R., & Rahma, S. (2026). Analisis Spasial Cakupan Jangkauan Pusat Kesehatan Masyarakat di Kabupaten Seruyan Menggunakan Sistem Informasi Geografis. *Jurnal Penelitian Multidisiplin Bangsa*, 2(8), 1385–1398. <https://doi.org/10.59837/jpnmb.v2i8.708>
- Idayani, D. (2025). Optimizing Public Health Centre Locations: A Comparative Analysis of Travel Time and District Boundaries. *Jurnal Teknik Industri*, 26(1), 13–26. <https://doi.org/10.22219/JTIUMM.Vol26.No1.13-26>
- Idayani, D., Puspitasari, Y., & Sari, L. D. K. (2020). Penggunaan Model Set Covering Problem dalam Penentuan Lokasi dan Jumlah Pos Pemadam Kebakaran. *Jurnal Ilmiah Soulmath : Jurnal Edukasi Pendidikan Matematika*, 8(2), 139–152. <https://doi.org/10.25139/smj.v8i2.3280>
- Julia, E., Ramadhani, D. A., & Hasbiyati, I. (2024). Use of the Discrete Facility Location Model in Optimizing the Number and Location of Fire Stations: A Case Study. *Journal of Mathematical Sciences and Optimization*, 2(1), 104–114. <https://doi.org/10.31258/jomso.v2i1.28>
- Kementerian Dalam Negeri. (2020). *Pedoman Nomenklatur Dinas Pemadam Kebakaran dan Penyelamatan Provinsi dan Kabupaten/Kota*.
- Labita, A. S., & Namoco, R. A. (2023). Location Analysis of Fire Stations in Cagayan de Oro City using Minimum Impedance (P-Median Problem) and Maximal Covering Location Problem (MCLP) with Q-Coverage Requirement Approaches. *Mindanao Journal of Science and Technology*, 21(1). <https://doi.org/10.61310/mndjstimp.0910.23>
- Liu, F., Lu, C., Gui, L., Zhang, Q., Tong, X., & Yuan, M. (2023). *Heuristics for Vehicle Routing Problem: A Survey and Recent Advances* (Version 1). arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2303.04147>
- Ma, C., Song, M., Zeng, W., Wang, X., Chen, T., & Wu, S. (2025). Enhancing urban emergency response: A Euclidean distance-based framework for optimizing rescue facility layouts. *Sustainable Cities and Society*, 118, 106006. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.106006>
- Menteri Pekerjaan Umum. (2009). *Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 20 Tahun 2009 tentang Pedoman Teknis Manajemen Proteksi Kebakaran di Perkotaan*. Republik Indonesia.
- Muslim, K., & Supriyono, T. (2025). Optimalisasi Rute Distribusi Logistik Tanggap Darurat Bencana dengan Menggunakan Algoritma Saving Matrix (Studi Kasus Pada Erupsi Gunung Merapi Di Kabupaten Magelang). *Jurnal Dwija Kusuma*, 12(2). <https://doi.org/10.63824/jdk.v13i2.xxx>
- Osman, W. W., Arifin, M., Akil, A., Ali, M., Ekawati, S. A., Rasyid, A. R., Sutopo, Y. K. D., Lakatupa, G., Mandasari, J., & Triasnita, G. A. (2022). Sosialisasi Kesiapsiagaan Masyarakat dan Arahan Pencegahan Bahaya Kebakaran di Kawasan Permukiman Padat Penduduk (Studi Kasus: Kelurahan Pannampu Kecamatan Tallo Kota Makassar). *JURNAL TEPAT : Teknologi Terapan Untuk Pengabdian Masyarakat*, 5(2), 270–283. https://doi.org/10.25042/jurnal_tepat.v5i2.293

- Perrina, M. G. (2021). Literature Review Sistem Informasi Geografis (SIG). *Journal of Information Technology and Computer Science (JOINTECOMS)*, 10(10), 1–4.
- Pribadi, O. S., Sugianto, S., Suryana, I. K., & Darmaji, A. W. I. (2022a). Optimization of Firefighting Posts in Tabanan District. *RSF Conference Series: Engineering and Technology*, 2(2), 25–36. <https://doi.org/10.31098/cset.v2i2.555>
- Pribadi, O. S., Sugianto, S., Suryana, I. K., & Darmaji, A. W. I. (2022b). Optimization of Firefighting Posts in Tabanan District. *RSF Conference Series: Engineering and Technology*, 2(2), 25–36. <https://doi.org/10.31098/cset.v2i2.555>
- Rahman, M., Chen, N., Islam, M. M., Dewan, A., Pourghasemi, H. R., Washakh, R. M. A., Nepal, N., Tian, S., Faiz, H., Alam, M., & Ahmed, N. (2021). Location-allocation modeling for emergency evacuation planning with GIS and remote sensing: A case study of Northeast Bangladesh. *Geoscience Frontiers*, 12(3), 101095. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.09.022>
- ReVelle, C. S., Williams, J. C., & Boland, J. J. (2002). Counterpart Models in Facility Location Science and Reserve Selection Science. *Environmental Modelling & Assessment*, 7(2), 71–80.
- ReVelle, C., Toregas, C., & Falkson, L. (1976). Applications of the Location Set-covering Problem. *Geographical Analysis*, 8(1), 65–76. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1976.tb00529.x>
- Sagar, M., Espinas, A., & Seif, J. (2024). Enhancing Campus Mobility: A Set Covering Problem for Electric Scooter Charging Stations at Cal Poly Pomona. *IISE Annual Conference & Expo 2024*, 1420–1425. https://doi.org/10.21872/2024IISE_7449
- 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>
- Smith, D. M. J. de, Goodchild, P. M. F., Longley, P. P. A., & Associates. (2025). *A Comprehensive Guide to Principles Techniques and Software Tools* (7th edition).
- Sulaiman, M. Z., Ghofur, A., & Alvianda, F. (2025). *Perancangan Sistem Informasi Geografis (SIG) Untuk Pemetaan Objek Wisata Di Kabupaten Situbondo Berbasis Qgis*. 2(3), 105–115. <https://doi.org/10.63935/akiratech.v2i3.225>
- Tahmasbi, B., & Haghshenas, H. (2019). Public transport accessibility measure based on weighted door to door travel time. *Computers, Environment and Urban Systems*, 76, 163–177. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2019.05.002>
- Tinambunan, M., & Sintaro, S. (2021). Aplikasi Restfull Pada Sistem Informasi Geografis Pariwisata Kota Bandar Lampung. *Jurnal Informatika Dan Rekayasa Perangkat Lunak*, 2(3), 312–323. <https://doi.org/10.33365/jatika.v2i3.1230>
- Umam, J., Umam, K., Wibowo, N. C. H., & Ulinuha, M. A. (2025). *Analisis Perbandingan Algoritma Dijkstra, Haversine, dan Distance Matrix API pada Penentuan Jarak Sekolah di Kota Semarang*. 11(1), 58–68.

- Vieri, C., Adamiri, S. A., & Hirzi, T. Z. (2023). Analisis Peta Sebaran Spasial Pemadan Kebakaran (DAMKAR) Kota Jakarta Pusat. *Jurnal Sains Geografi*, 1(1). <https://doi.org/10.2210/jsg.vx1ix.xxx>
- Wan Jusoh, W. N., Tharima, A. F., Ghani, W., Mohamad Lukman, N. H., Visvasathan, S., Shamsudin, M. H., Mahmud Zuhudi, N. Z., & Mohd Nur, N. (2022). Initial Assessment of Fire Response Time between Different Categories of Fire Stations in Malaysia. *Fire*, 6(1), 6. <https://doi.org/10.3390/fire6010006>
- Wolsey, L. (2020). *Integer Programming* (1st ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119606475>
- Yenisetty, P., & Bahadure, P. (2020). Measuring Accessibility to Various ASFs from Public Transit using Spatial Distance Measures in Indian Cities. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(7), 446. <https://doi.org/10.3390/ijgi9070446>
- Zainal, I., Lestari, F., Gunawan, S., Adiwibowo, A., Kadir, A., & Ramadhan, N. A. (2022). Fire Vehicle Route, Response Time, and Service Coverage Optimizations In Pekojan Urban Villages, Tambora Subdistrict Fire Hotspot of Jakarta City Indonesia. *PREPOTIF : Jurnal Kesehatan Masyarakat*, 6(2), 1454–1468. <https://doi.org/10.31004/prepotif.v6i2.5026>

LAMPIRAN

A-Ekstraksi Koordinat Titik *Centroid* 78 Kecamatan di Daerah Istimewa Yogyakarta



B-Perhitungan Matriks Waktu Tempuh

Data Jarak Fire Station									
File Edit View Insert Format Data Tools Extensions Help									
Q Menu									
A1									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	No	Kecamatan	Tr	Koordinat Kecamatan	Fire Station	Tr	Koordinat Fire Station	Route Summary	
2	1	Tepus	-8.121035,110.658664	Sieman	-7.717657,110.355242	via Jl. Nasional III	73.277	1.986111111	119.1666667
3	2	Tanjungsari	-8.091955,110.589802	Sieman	-7.717657,110.355242	via Jl. Nasional III	67.596	1.851944444	111.1166667
4	3	Rongkop	-8.087135,110.744182	Sieman	-7.717657,110.355242	via Jl. Nasional III	75.492	2.089444444	125.3666667
5	4	Saptosari	-8.077495,110.510076	Sieman	-7.717657,110.355242	via Legundi - Saptosari	60.299	1.647777778	98.8666667
6	5	Paliyan	-8.013819,110.529905	Sieman	-7.717657,110.355242	via Jl. Nasional III	57.263	1.583055556	94.9833333
7	6	Purwasari	-8.023477,110.375820	Sieman	-7.717657,110.355242	via Jl. Imogiri Barat	44.894	1.381111111	82.8666667
8	7	Semanu	-8.032188,110.657367	Sieman	-7.717657,110.355242	via Jl. Nasional III	64.585	1.806111111	108.3666667
9	8	Kretak	-7.990110,110.303637	Sieman	-7.717657,110.355242	via Jl. Parangtritis	39.225	1.080555556	65.2833333
10	9	Sanden	-7.880532,110.265729	Sieman	-7.717657,110.355242	via Jl. Semas/Palibapang - Semas	37.141	1.058611111	63.5166667
11	10	Pundong	-7.998027,110.341993	Sieman	-7.717657,110.355242	via Jl. Nasional III	34.613	0.995277778	59.7166667
12	11	Srandakan	-7.961094,110.241605	Sieman	-7.717657,110.355242	via Jl. Ringroad Barat	35.624	1.006111111	60.3666667
13	12	Galur	-7.932610,110.202719	Sieman	-7.717657,110.355242	via Jl. Ringroad Barat - Wates	38.985	1.029722222	61.7833333
14	13	Piyungan	-7.843193,110.462766	Sieman	-7.717657,110.355242	via Jl. Padjajaran/Jl. Ring Road Utara	26.359	0.8	48
15	14	Patuk	-7.861322,110.524803	Sieman	-7.717657,110.355242	via Jl. Nasional III and Jl. Padjajaran/Jl. Ring Road Utara	35.386	1.055555556	63.3333333
16	15	Bambanglipuro	-7.944390,110.312847	Sieman	-7.717657,110.355242	via Jl. Ringroad Barat	31.629	0.93	55.8
17	16	Porong	-7.971774,110.729807	Sieman	-7.717657,110.355242	via Jl. Nasional III	65.136	1.815277778	108.9166667
18	17	Wonosari	-7.976973,110.590867	Sieman	-7.717657,110.355242	via Jl. Nasional III	50.577	1.405555556	84.3333333
19	18	Imogiri	-7.937291,110.397660	Sieman	-7.717657,110.355242	via Jl. Imogiri Barat and Jl. Nasional III	32.895	0.985833333	59.15
20	19	Pandak	-7.924352,110.287629	Sieman	-7.717657,110.355242	via Jl. Ringroad Barat	28.862	0.860833333	51.65
21	20	Lendah	-7.913934,110.230874	Sieman	-7.717657,110.355242	via Jl. Yogyakarta - Wates	37.644	1.030277778	61.8166667
22	21	Playen	-7.940689,110.522323	Sieman	-7.717657,110.355242	via Jl. Nasional III	48.546	1.346111111	80.7666667
23	22	Karangmojo	-7.938364,110.687317	Sieman	-7.717657,110.355242	via Jl. Nasional III	56.014	1.626666667	97.6
24	23	Jetis	-7.910799,110.363147	Sieman	-7.717657,110.355242	via Jl. Imogiri Barat, Jl. Nasional III and Jl. Ringroad Barat	28.971	0.852777778	51.1666667
25	24	Parijatan	-7.916283,110.156102	Sieman	-7.717657,110.355242	via Jl. Nasional III	40.72	1.05	63
26	25	Dlingo	-7.920938,110.458761	Sieman	-7.717657,110.355242	via Jl. Dlingo-Patuk	41.85	1.251388889	75.0833333
27	26	Bantul	-7.895426,110.332064	Sieman	-7.717657,110.355242	via Jl. Ringroad Barat	24.767	0.743055556	44.3833333
28	27	Temon	-7.889177,110.072018	Sieman	-7.717657,110.355242	via Jl. Nasional III	48.752	1.230833333	73.85

The screenshot shows a Jupyter Notebook environment with the following content:

File Edit View Insert Runtime Tools Help

Commands + Code + Text Run all

RAM Disk

[18] ✓ 4s

```
!pip install pulp

import pulp
import pandas as pd
import numpy as np
```

... Requirement already satisfied: pulp in /usr/local/lib/python3.12/dist-packages (3.3.2)

OPTIMASI WKM DENGAN SCP, PSCP, MCLP

[17] ✓ 0s

```
# KONFIGURASI
NAMA_FILE = 'Data_Optimasi_TA_sorted.xlsx'
THRESHOLD_MENIT = 15 # threshold waktu tempuh (menit)
BIAYA_PER_WKM = 3_000_000_000 # Rp 3 miliar per unit

# Gap target BPBD DIY total (40 target - 15 eksisting)
P = 25

# Gap per kabupaten (untuk constraint MCLP per kabupaten)
P_KAB = {
    'Bantul' : 2,
    'Gunungkidul' : 11,
    'Kulon Progo' : 4,
    'Sleman' : 7,
    'Yogyakarta' : 1,
}
```

Variables Terminal

7:54 PM Python 3

```

(FIX)Optimasi_TA.ipynb
File Edit View Insert Runtime Tools Help
Commands + Code + Text + Run all

# 1. BACA DATA

print("MEMBAKA DATA")

df_eksisting = pd.read_excel(
    NAMA_FILE, sheet_name='Matriks_Eksisting', index_col=0)

df_bobot = pd.read_excel(
    NAMA_FILE, sheet_name='Bobot_Permintaan', index_col=1)
df_bobot = df_bobot.drop(columns=['No'], errors='ignore')

df_kandidat = pd.read_excel(
    NAMA_FILE, sheet_name='TravelTime_Kandidat', index_col=0)
df_kandidat = df_kandidat.dropna(how='all')
df_kandidat = df_kandidat[df_kandidat.index.notna()]

# Standardize 'Mergansan' to 'Mergansan' across DataFrames
if 'Mergansan' in df_eksisting.index:
    df_eksisting = df_eksisting.rename(index={'Mergansan': 'Mergansan'})
if 'Mergansan' in df_bobot.index:
    df_bobot = df_bobot.rename(index={'Mergansan': 'Mergansan'})
if 'Mergansan' in df_kandidat.index:
    df_kandidat = df_kandidat.rename(index={'Mergansan': 'Mergansan'})

Kecamatan = list(df_eksisting.index)
Pos_eksisting = list(df_eksisting.columns)
Kandidat = list(df_kandidat.columns)

print(f"Kecamatan (demand points) : {len(Kecamatan)}")
print(f"MPK eksisting : {len(Pos_eksisting)}")
print(f"Kandidat MPK baru : {len(Kandidat)}")
print(f"Threshold waktu tempuh : {THRESHOLD_MENIT} menit")
print(f"Max MPK baru total (P) : {P}")

```

```

(FIX)Optimasi_TA.ipynb
File Edit View Insert Runtime Tools Help
Commands + Code + Text + Run all

# SKENARIO 1: INITIAL - EVALUASI KONDISI EKSISTING 15 MPK

print("SKENARIO 1: INITIAL (EVALUASI EKSISTING)")

covered_eksisting = set()
uncovered_eksisting = set()

for kec in Kecamatan:
    if any(df_eksisting.loc[kec, pos] <= THRESHOLD_MENIT
          for pos in Pos_eksisting):
        covered_eksisting.add(kec)
    else:
        uncovered_eksisting.add(kec)

n_covered = len(covered_eksisting)
n_uncovered = len(uncovered_eksisting)
Kecamatan_Uncovered = sorted(uncovered_eksisting)
pop_covered_s1 = df_bobot.loc[list(covered_eksisting), 'Populasi'].sum()
total_pop = df_bobot['Populasi'].sum()

print(f"Covered (< {THRESHOLD_MENIT} menit) : {n_covered} kecamatan "
      f"({n_covered / len(Kecamatan) * 100:.2f}%)")
print(f"Underserved (> {THRESHOLD_MENIT} menit): {n_uncovered} kecamatan "
      f"({n_uncovered / len(Kecamatan) * 100:.2f}%)")
print(f"Populasi ter-cover : {pop_covered_s1:.0f} / {total_pop:.0f} = "
      f"({pop_covered_s1 / total_pop * 100:.2f}%)")
print(f"Biaya tambahan : - (evaluasi saja)")
print(f"Kecamatan underserved ({n_uncovered}):")
for kec in Kecamatan_Uncovered:
    print(f" - {kec} ({df_bobot.loc[kec, 'Kabupaten']})")

```

```

(FIX)Optimasi_TA.ipynb
File Edit View Insert Runtime Tools Help
Commands + Code + Text + Run all

# BANGUN MATRIKS CAKUPAN BINER (dipakai S2 & S3)

matriks_cakupan = {}
for kec in Kecamatan_Uncovered:
    for kand in Kandidat:
        matriks_cakupan[kec, kand] = (
            1 if kec in df_kandidat.index
            and df_kandidat.loc[kec, kand] <= THRESHOLD_MENIT
            else 0
        )

# Diagnostik
total_ones = sum(matriks_cakupan.values())
total_sel = len(Kecamatan_Uncovered) * len(Kandidat)
cannot_be_covered = [kec for kec in Kecamatan_Uncovered
                     if sum(matriks_cakupan[kec, j] for j in Kandidat) == 0]
can_be_covered = [kec for kec in Kecamatan_Uncovered
                  if kec not in cannot_be_covered]

print(f"\n--- DIAGNOSTIK COVERAGE MATRIX ---")
print(f"Densitas coverage : {total_ones}/{total_sel} "
      f"f={total_ones / total_sel * 100:.2f}%)")
print(f"Bisa dicover : {len(can_be_covered)} kecamatan")
if cannot_be_covered:
    print(f"Tidak bisa dicover: {len(cannot_be_covered)} kecamatan")
    for kec in cannot_be_covered:
        print(f" {kec} - tidak ada kandidat dalam {THRESHOLD_MENIT} menit")

```

```

(FIX)Optimasi_TA.ipynb
File Edit View Insert Runtime Tools Help
Commands + Code + Text Run all
[9] ✓ On
# SKENARIO 2: FULL COVERAGE – SCP (Branch and Bound)
# Fungsi tujuan : min Σ xj
# Constraint : semua kecamatan uncovered (yang bisa) terlayani ≥ 1 kandidat

print("SKENARIO 2: FULL COVERAGE (SCP – Branch and Bound)")

Kecamatan_SCP = can_be_covered # exclude yang tidak bisa dicover

prob_s2 = pulp.LpProblem("SCP_S2", pulp.LpMinimize)
X_s2 = pulp.LpVariable.dicts("Buka_S2", Kandidat, cat='Binary')

prob_s2 += pulp.lpSum([X_s2[j] for j in Kandidat])

for kec in Kecamatan_SCP:
    prob_s2 += (
        pulp.lpSum([matriks_cakupan[kec, j] * X_s2[j]
                     for j in Kandidat]) >= 1
    )

prob_s2.solve(pulp.PULP_CBC_CMD(msg=False))

n_wmk_s2 = int(pulp.value(prob_s2.objective))
lokasi_s2 = [j for j in Kandidat if X_s2[j].varValue == 1]
kec_cover_s2 = n_covered + len(Kecamatan_SCP)
persen_cover_s2 = kec_cover_s2 / len(Kecamatan) * 100
pop_covered_s2 = (
    df_bobot.loc[list(covered_eksisting), 'Populasi'].sum() +
    df_bobot.loc(Kecamatan_SCP, 'Populasi').sum()
)

```

```

(FIX)Optimasi_TA.ipynb
File Edit View Insert Runtime Tools Help
Commands + Code + Text Run all
[9] ✓ On
prob_s2 = pulp.LpProblem("SCP_S2", pulp.LpMinimize)
for kec in Kecamatan_SCP:
    prob_s2 += (
        pulp.lpSum([matriks_cakupan[kec, j] * X_s2[j]
                     for j in Kandidat]) >= 1
    )

prob_s2.solve(pulp.PULP_CBC_CMD(msg=False))

n_wmk_s2 = int(pulp.value(prob_s2.objective))
lokasi_s2 = [j for j in Kandidat if X_s2[j].varValue == 1]
kec_cover_s2 = n_covered + len(Kecamatan_SCP)
persen_cover_s2 = kec_cover_s2 / len(Kecamatan) * 100
pop_covered_s2 = (
    df_bobot.loc[list(covered_eksisting), 'Populasi'].sum() +
    df_bobot.loc(Kecamatan_SCP, 'Populasi').sum()
)

print(f"Status solver : {pulp.LpStatus[prob_s2.status]}")
print(f"WMK baru minimum : {n_wmk_s2} pos")
print(f"Total WMK : 15 + {n_wmk_s2} = {15 + n_wmk_s2} pos")
print(f"Kecamatan ter-cover : {kec_cover_s2}/78 ({persen_cover_s2:.2f}%)")
if cannot_be_covered:
    print(f"↳ {len(cannot_be_covered)} kecamatan tetap tidak ter-cover: "
          f"{cannot_be_covered}")
print(f"Populasi ter-cover : {pop_covered_s2}/({total_pop:.0f}) "
      f"({pop_covered_s2 / total_pop * 100:.2f}%)")
print(f"Biaya estimasi : Rp {n_wmk_s2 * BIAYA_PER_WMK:.0f}")
print(f"Lokasi terpilih : {lokasi_s2}")

```

```

(FIX)Optimasi_TA.ipynb
File Edit View Insert Runtime Tools Help
Commands + Code + Text Run all
[12] ✓ On
# SKENARIO 3: Partial SCP
# Fungsi tujuan : min Σ xj + minimasi jumlah WMK baru
# Constraint 1 : Σ xj ≤ Pkab + maks gap BPBD per kabupaten
# Constraint 2 : Σ aij xj ≥ yi + kecamatan i terlayani jika ada kandidat j
# Coverage minimum yang harus dipenuhi
ALPHA_S3 = 0.70

print("SKENARIO 3: Partial SCP")
print(f" Fungsi tujuan : Minimasi jumlah WMK baru")
print(f" Constraint gap: Sesuai gap BPBD per kabupaten")
print(f" Coverage min : {ALPHA_S3*100:.0f}% dari {len(Kecamatan_Uncovered)} "
      f"kecamatan uncovered")
print(f"Gap WMK per kabupaten:")
for kab, p_val in P_KAB.items():
    print(f" {kab}<15): maks {p_val} WMK baru")

# Hitung minimum kecamatan yang harus ter-cover
min_cover_s3 = int(np.ceil(ALPHA_S3 * len(Kecamatan_Uncovered)))
print(f"Minimum kecamatan harus ter-cover : "
      f"{min_cover_s3} dari {len(Kecamatan_Uncovered)}")

# Pastikan variabel diagnostik tersedia
can_be_covered = [kec for kec in Kecamatan_Uncovered
                  if sum(matriks_cakupan[kec, j] for j in Kandidat) > 0]
cannot_be_covered = [kec for kec in Kecamatan_Uncovered
                    if sum(matriks_cakupan[kec, j] for j in Kandidat) == 0]

# Formulasi model
prob_s3 = pulp.LpProblem("PSCP_S3", pulp.LpMinimize)

```

```

(FIX)Optimasi_TA.ipynb
File Edit View Insert Runtime Tools Help
Commands + Code + Text Run all
RAM
Disk

(12) # Formulasi model
prob_s3 = pulp.LpProblem("PSCP_S3", pulp.LpMinimize)

X_s3 = pulp.LpVariable.dicts("Buka_S3", Kandidat, cat='Binary')
Y_s3 = pulp.LpVariable.dicts("Cover_S3", Kecamatan_Uncovered, cat='Binary')

# fungsi tujuan: minimasi jumlah WPK baru
prob_s3 += pulp.lpSum([X_s3[j] for j in Kandidat])

# Constraint 1: jumlah WPK baru per kabupaten ≤ gap BPBD
for kab, p_val in P_KAB.items():
    kandidat_kab = [
        j for j in Kandidat
        if j in df_bobot.index
        and df_bobot.loc[j, 'Kabupaten'] == kab
    ]
    if kandidat_kab:
        prob_s3 += (
            pulp.lpSum([X_s3[j] for j in kandidat_kab]) <= p_val,
            f"gapBPBD_{kab}"
        )

# Constraint 2: y_i = 1 hanya jika ada kandidat dalam threshold yang dibuka
for kec in Kecamatan_Uncovered:
    prob_s3 += (
        pulp.lpSum([matriks_cakupan[kec, j] * X_s3[j]
                     for j in Kandidat]) >= Y_s3[kec],
        f"cover_{kec}"
    )

() Variables Terminal 7:59 PM Python 3

```

```

(FIX)Optimasi_TA.ipynb
File Edit View Insert Runtime Tools Help
Commands + Code + Text Run all
RAM
Disk

Files
-
sample_data
Data_Optimasi_TA_sorted.xlsx
Hasil_Optimasi_TA.xlsx

(23) # Constraint 3: total kecamatan ter-cover ≥ coverage minimum
prob_s3 += (
    pulp.lpSum([Y_s3[kec] for kec in Kecamatan_Uncovered]) >= min_cover_s3,
    "MinCoverage"
)

# Selesaikan model
prob_s3.solve(pulp.PULP_CBC_CMD(msg=False))

print(f"\nStatus solver : {pulp.LpStatus[prob_s3.status]}")

# Tangani Infeasible
if pulp.LpStatus[prob_s3.status] == "Infeasible":
    print(f"\nINFEASIBLE: Coverage minimum {ALPHA_S3*100:.0f}% tidak dapat")
    print(f" dicapai dalam batasan gap BPBD yang ada.")
    print(f" Kemungkinan penyebab:")
    print(f" - Terlalu banyak kecamatan yang tidak bisa dicover kandidat manapun")
    print(f" - Gap BPBD terlalu ketat untuk memenuhi target coverage minimum")
    print(f" Saran: turunkan nilai ALPHA_S3")
    print(f" atau hapus constraint gap untuk melihat coverage maksimal")
else:
    # Hasil optimal
    n_wmk_s3 = int(pulp.value(prob_s3.objective))
    lokasi_s3 = [j for j in Kandidat if X_s3[j].varValue == 1]
    n_new_cover_s3 = sum(1 for kec in Kecamatan_Uncovered
                        if Y_s3[kec].varValue == 1)
    total_cover_s3 = n_covered + n_new_cover_s3
    persen_cover_s3 = total_cover_s3 / len(Kecamatan) * 100

() Variables Terminal 8:16 PM Python 3

```

```

(FIX)Optimasi_TA.ipynb
File Edit View Insert Runtime Tools Help
Commands + Code + Text Run all
RAM
Disk

Files
-
sample_data
Data_Optimasi_TA_sorted.xlsx
Hasil_Optimasi_TA.xlsx

(23) pop_covered_s3 = (
    df_bobot.loc[list(covered_eksisting), 'Populasi'].sum() +
    df_bobot.loc[
        [kec for kec in Kecamatan_Uncovered
         if Y_s3[kec].varValue == 1], 'Populasi'
    ].sum()
)

print(f"WPK baru minimum : {n_wmk_s3} pos")
print(f"Total WPK : 15 + {n_wmk_s3} = {15 + n_wmk_s3} pos")
print(f"Kecamatan ter-cover : {total_cover_s3}/78 ({persen_cover_s3:.2f}%)")
print(f" Sudah covered eksisting : {n_covered}")
print(f" Baru covered kandidat : {n_new_cover_s3}")
if cannot_be_covered:
    print(f" Tidak bisa dicover : {len(cannot_be_covered)} kecamatan "
          f"(tidak ada kandidat dalam 15 menit)")
print(f"Populasi ter-cover : {pop_covered_s3:.0f}/{total_pop:.0f} "
      f"({pop_covered_s3/total_pop*100:.2f}%)")
print(f"Biaya estimasi : Rp {n_wmk_s3 * BIAYA_PER_WPK:.0f}")
print(f"Lokasi terpilih : {lokasi_s3}")

# Rincian per kabupaten
print(f"\nRincian WPK per kabupaten:")
for kab, p_val in P_KAB.items():
    lok_kab = [
        j for j in lokasi_s3
        if j in df_bobot.index
        and df_bobot.loc[j, 'Kabupaten'] == kab
    ]
    sisa = p_val - len(lok_kab)

() Variables Terminal 8:16 PM Python 3

```

```

(FIX)Optimasi_TA.ipynb
File Edit View Insert Runtime Tools Help
Commands + Code + Text + Run all
Files
-
sample_data
Data_Optimasi_TA_sorted.xlsx
Hasil_Optimasi_TA.xlsx
Disk 87.41 GB available

print(f" Baru covered kandidat : {n_new_cover_s3}")
if cannot_be_covered:
    print(f" Tidak bisa dicover : {len(cannot_be_covered)} kecamatan "
          f"(tidak ada kandidat dalam 15 menit)")
print(f"Populasi ter-cover : {pop_covered_s3:.0f}/{total_pop:.0f} "
      f"({pop_covered_s3/total_pop*100:.2f}%)")
print(f"Biaya estimasi : Rp {n_wmk_s3 * BIAYA_PER_WMK:.0f}")
print(f"Lokasi terpilih : {lokasi_s3}")

# Rincian per kabupaten
print(f"Rincian WMK per kabupaten:")
for kab, p_val in P_KAB.items():
    lok_kab = []
    for j in lokasi_s3:
        if j in df_bobot.index:
            and df_bobot.loc[j, 'Kabupaten'] == kab
    }
    sisa = p_val - len(lok_kab)
    print(f" (kab:{15}): {len(lok_kab)}/{p_val} WMK dibuka "
          f"(sisa gap: {sisa}) + {lok_kab if lok_kab else ''}")

# Kecamatan yang tidak terlayani
kec_tidak = [kec for kec in Kecamatan_Uncovered
              if V_s3[kec].varValue == 0]
if kec_tidak:
    print(f"Kecamatan tidak terlayani ({len(kec_tidak)}):")
    for kec in kec_tidak:
        kab = df_bobot.loc[kec, 'Kabupaten']
        print(f" X (kec) ({kab})")

```

```

(FIX)Optimasi_TA.ipynb
File Edit View Insert Runtime Tools Help
Commands + Code + Text + Run all
Connect
# SKENARIO 4: MCLP - CONSTRAINT P PER KABUPATEN
# Fungsi tujuan: max Σ wij (jumlah kecamatan uncovered yang ter-cover)
# Constraint : Σ xij ≤ P_kab untuk tiap kabupaten
#              yi ≤ Σ aij xij (kec i hanya covered jika ada kandidat j yg cover)

print("SKENARIO 4: MCLP (Bobot Populasi, Constraint P per Kabupaten)")
print(f" Fungsi tujuan: Maksimasi populasi ter-cover")
print(f"Gap WMK per kabupaten:")
for kab, p_val in P_KAB.items():
    print(f" (kab:{15}): maks {p_val} WMK baru")

prob_s4 = pulp.LpProblem("MCLP_S4", pulp.LpMaximize)
X_s4 = pulp.LpVariable.dicts("Buka_S4", Kandidat, cat='Binary')
Y_s4 = pulp.LpVariable.dicts("Cover_S4", Kecamatan_Uncovered, cat='Binary')

# Fungsi tujuan: Maksimasi populasi ter-cover (menggunakan bobot populasi)
prob_s4 += pulp.lpSum([Y_s4[kec] * df_bobot.loc[kec, 'Populasi'] for kec in Kecamatan_Uncovered])

# Constraint: jumlah WMK baru per kabupaten ≤ gap BPBD per kabupaten
for kab, p_val in P_KAB.items():
    kandidat_kab = [j for j in Kandidat
                    if j in df_bobot.index and df_bobot.loc[j, 'Kabupaten'] == kab]
    if kandidat_kab:
        prob_s4 += (
            pulp.lpSum([X_s4[j] for j in kandidat_kab]) <= p_val,
            f"MaxWMK_{kab}"
        )

```

```

(FIX)Optimasi_TA.ipynb
File Edit View Insert Runtime Tools Help
Commands + Code + Text + Run all
Connect
# Constraint: coverage
for kec in Kecamatan_Uncovered:
    prob_s4 += (
        pulp.lpSum([matriks_cakupan[kec, j] * X_s4[j]
                    for j in Kandidat]) >= Y_s4[kec]
    )

prob_s4.solve(pulp.PULP_CBC_CMD(msg=False))

lokasi_s4 = [j for j in Kandidat if X_s4[j].varValue == 1]
n_new_s4 = sum(1 for kec in Kecamatan_Uncovered if Y_s4[kec].varValue == 1)
total_cover_s4 = n_covered + n_new_s4
pop_covered_s4 = (
    df_bobot.loc[[list(covered_eksisting), 'Populasi']].sum() +
    df_bobot.loc[
        [kec for kec in Kecamatan_Uncovered if Y_s4[kec].varValue == 1],
        'Populasi'
    ].sum()
)

print(f"Status solver : {pulp.LpStatus[prob_s4.status]}")
print(f"WMK baru dibangun : {len(lokasi_s4)} pos")
print(f"Rincian per kabupaten:")
for kab in P_KAB:
    lok_kab = [j for j in lokasi_s4
               if j in df_bobot.index and df_bobot.loc[j, 'Kabupaten'] == kab]
    print(f" (kab:{15}): {len(lok_kab)} WMK + {lok_kab}")
print(f"Kecamatan ter-cover : {total_cover_s4}/78 "
      f"({total_cover_s4/78 * 100:.2f}%)")
print(f" Baru covered kandidat : {n_new_s4}")
print(f"Populasi ter-cover : {pop_covered_s4:.0f}/{total_pop:.0f} "
      f"({pop_covered_s4/total_pop * 100:.2f}%)")
print(f"Biaya estimasi : Rp {len(lokasi_s4) * BIAYA_PER_WMK:.0f}")
print(f"Lokasi terpilih : {lokasi_s4}")

```

```

(FIX)Optimasi_TA.ipynb
File Edit View Insert Runtime Tools Help
Commands + Code + Text + Run all

# TABEL PERBANDINGAN SEMUA SKENARIO

print("TABEL PERBANDINGAN SEMUA SKENARIO")

def rp(n):
    return f"Rp {n * BIAYA_PER_MPK:,.0f}" if n > 0 else "-"

tabel = [
    ["S1: Initial", "Evaluasi", 15, 0,
     n_covered, f"{n_covered/78*100:.1f}%",
     f"{pop_covered_s1:,.0f}", f"{pop_covered_s1/total_pop*100:.1f}%",
     "-"],
    ["S2: SCP", "SCP", 15, n_wmk_s2,
     kec_cover_s2, f"{persen_cover_s2:.1f}%",
     f"{pop_covered_s2:,.0f}", f"{pop_covered_s2/total_pop*100:.1f}%",
     rp(n_wmk_s2)],
    ["S3: PSCP", "PSCP", 15, len(lokasi_s3),
     total_cover_s3, f"{total_cover_s3/78*100:.1f}%",
     f"{pop_covered_s3:,.0f}", f"{pop_covered_s3/total_pop*100:.1f}%",
     rp(len(lokasi_s3))],
    ["S4: MCLP", "MCLP", 15, len(lokasi_s4),
     total_cover_s4, f"{total_cover_s4/78*100:.1f}%",
     f"{pop_covered_s4:,.0f}", f"{pop_covered_s4/total_pop*100:.1f}%",
     rp(len(lokasi_s4))],
]

header_tabel = ["Skenario", "Model", "WKM Eks", "WKM Baru",
               "Kec Cover", "% Kec", "Pop Cover", "% Pop",
               "Est. Biaya"]

print(f"\n{'Skenario':<18} {'Model':<18} {'Eks':>5} {'Baru':>6} "
      f"{'Kec':>6} {'%Kec':>7} {'Pop':>7} {'%Pop':>7} {'Biaya':>25}")
print("-" * 100)
for row in tabel:

```

```

(FIX)Optimasi_TA.ipynb
File Edit View Insert Runtime Tools Help
Commands + Code + Text + Run all

print("TABEL PERBANDINGAN SEMUA SKENARIO")

def rp(n):
    return f"Rp {n * BIAYA_PER_MPK:,.0f}" if n > 0 else "-"

tabel = [
    ["S1: Initial", "Evaluasi", 15, 0,
     n_covered, f"{n_covered/78*100:.1f}%",
     f"{pop_covered_s1:,.0f}", f"{pop_covered_s1/total_pop*100:.1f}%",
     "-"],
    ["S2: SCP", "SCP", 15, n_wmk_s2,
     kec_cover_s2, f"{persen_cover_s2:.1f}%",
     f"{pop_covered_s2:,.0f}", f"{pop_covered_s2/total_pop*100:.1f}%",
     rp(n_wmk_s2)],
    ["S3: PSCP", "PSCP", 15, len(lokasi_s3),
     total_cover_s3, f"{total_cover_s3/78*100:.1f}%",
     f"{pop_covered_s3:,.0f}", f"{pop_covered_s3/total_pop*100:.1f}%",
     rp(len(lokasi_s3))],
    ["S4: MCLP", "MCLP", 15, len(lokasi_s4),
     total_cover_s4, f"{total_cover_s4/78*100:.1f}%",
     f"{pop_covered_s4:,.0f}", f"{pop_covered_s4/total_pop*100:.1f}%",
     rp(len(lokasi_s4))],
]

header_tabel = ["Skenario", "Model", "WKM Eks", "WKM Baru",
               "Kec Cover", "% Kec", "Pop Cover", "% Pop",
               "Est. Biaya"]

print(f"\n{'Skenario':<18} {'Model':<18} {'Eks':>5} {'Baru':>6} "
      f"{'Kec':>6} {'%Kec':>7} {'Pop':>7} {'%Pop':>7} {'Biaya':>25}")
print("-" * 100)
for row in tabel:
    print(f"{row[0]:<18} {row[1]:<18} {row[2]:>5} {str(row[3]):>6} "
          f"{'Kec':>6} {str(row[4]):>6} {str(row[5]):>7} {str(row[6]):>7} {str(row[7]):>25}")

```

D-Data Kejadian Kebakaran Bangunan Tahun 2021-2025

REKAPITULASI KEJADIAN KEBAKARAN BANGUNAN PER KECAMATAN DI DIY TAHUN 2021–2025

Sumber: PAMOR JOGJA (Platform Monitoring Risiko Jogja) | BPBD DIY

No	Kabupaten/Kota	Kecamatan	2021	2022	2023	2024	2025	Total
1	Bantul	Bambanglipuro	2	0	1	5	0	8
2	Bantul	Banguntapan	10	3	21	8	3	45
3	Bantul	Bantul	16	1	19	7	7	50
4	Bantul	Dlingo	2	0	1	1	1	5
5	Bantul	Imogiri	3	0	10	6	0	19
6	Bantul	Jetis (Bantul)	3	0	12	4	3	22
7	Bantul	Kasihan	12	2	13	14	14	55
8	Bantul	Kretek	3	1	0	2	1	7
9	Bantul	Pajangan	1	0	2	1	0	4
10	Bantul	Pandak	1	0	3	1	2	7
11	Bantul	Piyungan	2	0	3	3	3	11
12	Bantul	Pleret	2	2	4	1	1	10
13	Bantul	Pundong	4	0	9	4	2	19
14	Bantul	Sanden	1	0	4	0	0	5
15	Bantul	Sedayu	4	0	2	0	3	9
16	Bantul	Sewon	11	1	7	5	5	29
17	Bantul	Srandakan	1	0	0	0	0	1
Subtotal Bantul			78	10	111	62	45	306
18	Gunungkidul	Gedangsari	2	1	5	2	5	15
19	Gunungkidul	Girisubo	1	0	2	1	0	4
20	Gunungkidul	Karangmojo	2	0	2	3	2	9
21	Gunungkidul	Ngawen	1	0	1	2	3	7
22	Gunungkidul	Nglipar	1	3	1	1	2	8
23	Gunungkidul	Paliyan	2	1	4	3	1	11

REKAPITULASI KEJADIAN KEBAKARAN BANGUNAN PER KECAMATAN DI DIY TAHUN 2021–2025

Sumber: PAMOR JOGJA (Platform Monitoring Risiko Jogja) | BPBD DIY

No	Kabupaten/Kota	Kecamatan	2021	2022	2023	2024	2025	Total
24	Gunungkidul	Panggang	0	0	0	0	1	1
25	Gunungkidul	Patuk	2	2	1	1	0	6
26	Gunungkidul	Playen	1	4	13	7	4	29
27	Gunungkidul	Ponjong	1	0	6	1	1	9
28	Gunungkidul	Purwosari	0	1	2	0	0	3
29	Gunungkidul	Rongkop	0	0	0	1	1	2
30	Gunungkidul	Saptosari	1	3	0	2	0	6
31	Gunungkidul	Semanu	6	2	2	4	7	21
32	Gunungkidul	Semin	0	0	2	4	3	9
33	Gunungkidul	Tanjungsari	1	0	4	1	1	7
34	Gunungkidul	Tepus	0	1	2	0	0	3
35	Gunungkidul	Wonosari	4	4	10	10	9	37
Subtotal Gunungkidul			25	22	57	43	40	187
36	Kota Yogyakarta	Danurejan	1	3	3	2	0	9
37	Kota Yogyakarta	Gedongtengen	1	0	5	0	1	7
38	Kota Yogyakarta	Gondokusuman	0	2	9	1	0	12
39	Kota Yogyakarta	Gondomanan	0	1	8	0	0	9
40	Kota Yogyakarta	Jetis (Yogyakarta)	1	2	10	0	0	13
41	Kota Yogyakarta	Kotagede	1	1	2	1	0	5
42	Kota Yogyakarta	Kraton	0	0	5	1	1	7
43	Kota Yogyakarta	Mantrijeron	2	0	9	0	0	11
44	Kota Yogyakarta	Mergangsan	4	2	5	0	0	11
45	Kota Yogyakarta	Ngampilan	2	2	8	1	0	13
46	Kota Yogyakarta	Pakualaman	1	0	2	0	0	3
47	Kota Yogyakarta	Tegalrejo	0	2	14	3	0	19
48	Kota Yogyakarta	Umbulharjo	4	2	21	2	0	29

REKAPITULASI KEJADIAN KEBAKARAN BANGUNAN PER KECAMATAN DI DIY TAHUN 2021–2025

Sumber: PAMOR JOGJA (Platform Monitoring Risiko Jogja) | BPBD DIY

No	Kabupaten/Kota	Kecamatan	2021	2022	2023	2024	2025	Total
49	Kota Yogyakarta	Wirobrajan	0	0	3	1	1	5
Subtotal Kota Yogyakarta			17	17	104	12	3	153
50	Kulon Progo	Galur	1	3	6	5	1	16
51	Kulon Progo	Girimulyo	2	4	2	4	1	13
52	Kulon Progo	Kalibawang	8	2	7	3	1	21
53	Kulon Progo	Kokap	3	3	9	5	3	23
54	Kulon Progo	Lendah	2	1	7	2	2	14
55	Kulon Progo	Nanggulan	2	2	5	8	3	20
56	Kulon Progo	Panjatan	2	2	3	1	0	8
57	Kulon Progo	Pengasih	3	4	8	10	4	29
58	Kulon Progo	Samigaluh	1	0	2	2	2	7
59	Kulon Progo	Sentolo	3	4	7	5	3	22
60	Kulon Progo	Temon	2	0	1	0	2	5
61	Kulon Progo	Wates	0	5	11	14	1	31
Subtotal Kulon Progo			29	30	68	59	23	209
62	Sleman	Berbah	1	0	3	0	1	5
63	Sleman	Cangkringan	0	0	1	0	0	1
64	Sleman	Depok	5	7	18	6	0	36
65	Sleman	Gamping	1	2	3	2	0	8
66	Sleman	Godean	0	2	15	4	0	21
67	Sleman	Kalasan	0	1	8	0	0	9
68	Sleman	Minggir	0	0	3	0	0	3
69	Sleman	Mlati	1	1	16	1	1	20
70	Sleman	Moyudan	0	0	1	0	0	1
71	Sleman	Ngaglik	0	2	10	0	0	12
72	Sleman	Ngemplak	1	0	4	1	0	6

REKAPITULASI KEJADIAN KEBAKARAN BANGUNAN PER KECAMATAN DI DIY TAHUN 2021–2025

Sumber: PAMOR JOGJA (Platform Monitoring Risiko Jogja) | BPBD DIY

No	Kabupaten/Kota	Kecamatan	2021	2022	2023	2024	2025	Total
73	Sleman	Pakem	0	4	3	2	0	9
74	Sleman	Prambanan	0	1	4	1	0	6
75	Sleman	Seyegan	0	0	2	1	0	3
76	Sleman	Sleman	4	5	10	0	0	19
77	Sleman	Tempel	1	1	3	0	0	5
78	Sleman	Turi	0	1	6	2	1	10
Subtotal Sleman			14	27	110	20	3	174
Total DIY			163	106	450	196	114	1029