

Pengembangan Model Pemrograman Linear Berbasis Kapasitas Jaringan Optimasi Distribusi Air PDAM Cimahi

Euis Sartika^{1*}, Anie Lusiani², Neneng Nuryati³, Hedi⁴

^{1,2,3,4} Politeknik Negeri Bandung, Jl. Gegerkalong Hilir Ds. Ciwaruga, Bandung, Jawa Barat, Indonesia

E-mail: ¹sartikaeuis1965@gmail.com, ²anie.lusiani@polban.ac.id, ³neneng.nuryati@polban.ac.id, ⁴hedi@polban.ac.id

*Corresponding Author

ABSTRACT

The Cimahi City Water Company (PDAM) faces challenges in optimally distributing clean water due to limited pipe network capacity and increasing water demand in each service area. Previous research has been dominated by descriptive analysis, while the development of mathematical optimization models that simultaneously integrate network capacity, supply flow, distribution costs, and customer demand is still limited. This study aims to develop an optimization model for clean water distribution using linear programming methods to minimize distribution costs while still meeting water demand in each service area. The decision variables are expressed as the volume of water flowing through each distribution line, namely x_1 , x_2 , x_3 , and x_4 . The results show that the optimization model produces more efficient water distribution with a minimum total cost of Rp82,466.6/L, and optimal discharge allocations at J1 of 5 L/s, J2 of 25 L/s, J3 of 20 L/s, and J4 of 10 L/s. The optimization results also indicate that water needs in each region can be met according to the available distribution capacity, thus effectively using the linear programming method as a basis for decision-making in optimizing clean water distribution at the Cimahi City PDAM.

Keywords: Water distribution, optimization, linear programming, cimahi PDAM

ABSTRAK

PDAM Kota Cimahi menghadapi tantangan dalam mendistribusikan air bersih secara optimal akibat keterbatasan kapasitas jaringan pipa dan meningkatnya kebutuhan air pada setiap wilayah layanan. Penelitian terdahulu masih didominasi analisis deskriptif, sedangkan pengembangan model matematis optimasi yang mengintegrasikan kapasitas jaringan, debit suplai, biaya distribusi, dan kebutuhan pelanggan secara simultan masih terbatas. Penelitian ini bertujuan mengembangkan model optimasi distribusi air bersih menggunakan metode pemrograman linear untuk meminimalkan biaya distribusi dengan tetap memenuhi kebutuhan air pada setiap wilayah layanan. Variabel keputusan dinyatakan sebagai volume air yang dialirkan pada setiap jalur distribusi, yaitu x_1 , x_2 , x_3 , dan x_4 . Hasil penelitian menunjukkan bahwa model optimasi menghasilkan distribusi air yang lebih efisien dengan total biaya minimum sebesar Rp82.466,6/L, serta alokasi debit optimal pada J1 sebesar 5 L/det, J2 sebesar 25 L/det, J3 sebesar 20 L/det, dan J4 sebesar 10 L/det. Hasil optimasi juga menunjukkan bahwa kebutuhan air pada setiap wilayah dapat terpenuhi sesuai kapasitas distribusi yang tersedia, sehingga metode pemrograman linear efektif digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam optimalisasi distribusi air bersih PDAM Kota Cimahi.

Kata kunci: Distribusi air, optimalisasi, PDAM Cimahi, pemrograman linear

Dikirim: 21 Oktober 2025; Diterima: 22 Juni 2026; Dipublikasikan: 27 Juli 2026

Cara sitasi: Sartika, E., Lusiani, A., Nuryati, E., & Hedi. (2026). Pengembangan model pemrograman linear berbasis kapasitas jaringan untuk mengoptimalkan distribusi air bersih pada PDAM Kota Cimahi. *Teorema: Teori dan Riset Matematika*, 11(2), 163–175. DOI: <http://dx.doi.org/10.25157/teorema.v11i2.21756>

This is an open access article under the [CC-BY-SA](#) license



PENDAHULUAN

Air bersih merupakan kebutuhan dasar masyarakat yang pengelolaannya memerlukan sistem distribusi yang efisien, terutama di wilayah perkotaan padat seperti Kota Cimahi. Permasalahan distribusi air tidak hanya berkaitan dengan ketersediaan sumber air, tetapi juga kapasitas jaringan, pemerataan distribusi, serta efisiensi biaya operasional. Pengelolaan distribusi air bersih membutuhkan perencanaan yang optimal agar pelayanan dapat berjalan efektif (Purnawan, 2022). Selain itu, PDAM sebagai penyedia layanan air bersih menghadapi tantangan dalam memenuhi kebutuhan pelanggan secara merata tanpa menyebabkan pemborosan sumber daya dan tingginya biaya distribusi (Firmansyah & Kusmana, 2025). Berdasarkan data Dinas Perumahan dan Kawasan Permukiman (DPKP), Kota Cimahi memiliki sekitar 189,471 rumah tangga, namun cakupan layanan air bersih perpipaan masih terbatas. Sebanyak 79,16% rumah tangga telah memiliki akses air bersih melalui berbagai sumber, sedangkan 20,84% lainnya masih menggunakan sumur dangkal yang rentan terhadap pencemaran. Dari 145,129 kepala keluarga yang telah terlayani air bersih, hanya 27,75% yang menggunakan jaringan perpipaan, terdiri atas 18,45% layanan PDAM/BLUD dan 9,3% layanan KP2A. Sementara itu, sekitar 60,37% masyarakat masih bergantung pada sumber non-perpipaan seperti sumur, tangki air, maupun pembelian air secara mandiri. Hal ini menunjukkan bahwa cakupan dan kontinuitas layanan air bersih masih rendah. Selain itu, pentingnya memperkuat jaringan, meningkatkan kapasitas, dan mengurangi kekeringan semakin ditunjukkan oleh ribuan SR yang terdampak di beberapa wilayah dan gangguan selama musim kemarau, saat distribusi PDAM dapat menurun hingga 52-59% (Mustikawati, 2022).

Penyediaan air bersih di Kota Cimahi dilakukan oleh PDAM atau Perumda Air Minum Tirta Raharja melalui sistem jaringan pipa primer dan sekunder yang berfungsi mendistribusikan air ke berbagai wilayah pelayanan (Zahra, 2022). Seiring dengan meningkatnya jumlah penduduk dan kebutuhan air bersih, sistem distribusi yang ada dituntut mampu bekerja secara lebih efisien dan optimal. Permasalahan yang sering muncul pada jaringan distribusi meliputi kehilangan air akibat kebocoran, ketidakseimbangan tekanan, tingginya biaya operasional, serta distribusi debit yang belum merata pada setiap wilayah layanan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pengelolaan jaringan perpipaan memerlukan perencanaan dan pengendalian yang lebih efektif agar kebutuhan masyarakat dapat terpenuhi secara berkelanjutan (Darmasetiawan, 2025). Sistem jaringan distribusi air harus mampu mengatur tekanan dan debit air secara optimal pada setiap titik simpul jaringan sehingga aliran air dapat menjangkau seluruh pelanggan sesuai kebutuhan (Triarmadja, 2019). Pemerintah Kota Cimahi juga terus meningkatkan cakupan layanan air bersih melalui penambahan sambungan rumah (SR) hingga mencapai 7.000 SR baru sebagai dampak peningkatan kapasitas SPAM. Namun, peningkatan cakupan layanan tersebut belum sepenuhnya diiringi dengan kajian optimasi jaringan distribusi yang mempertimbangkan efisiensi aliran, kapasitas pipa, dan biaya distribusi secara matematis. (JDIH Kota Cimahi, 2024). Berbagai penelitian sebelumnya umumnya berfokus pada pengembangan infrastruktur, evaluasi teknis jaringan, atau analisis kualitas layanan air bersih. Sedangkan penelitian yang mengintegrasikan pendekatan optimasi matematis untuk menentukan distribusi aliran air yang paling efisien masih relatif terbatas, khususnya pada jaringan distribusi air di Kota Cimahi. Selain itu, penggunaan metode pemrograman linear dalam pengelolaan distribusi air bersih belum banyak diterapkan untuk menganalisis hubungan antara kapasitas jaringan, kebutuhan pelanggan, dan efisiensi biaya operasional secara simultan. Oleh karena itu, penelitian ini penting dilakukan untuk menghasilkan model optimasi distribusi air bersih yang lebih efisien dengan memanfaatkan pendekatan pemrograman linear sebagai dasar pengambilan keputusan dalam pengelolaan jaringan distribusi air. Pendekatan pemrograman linear dapat membantu merancang sistem distribusi yang optimal, dengan mempertimbangkan berbagai batasan seperti kapasitas jaringan, biaya operasional, dan permintaan pelanggan (Taha, 2017).

Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa optimasi jaringan distribusi air bersih telah banyak dilakukan dengan berbagai pendekatan. Penelitian pada PDAM Tirta Kahuripan membuktikan bahwa kombinasi perangkat lunak EPANET dan metode *Linear Programming* mampu mengoptimalkan diameter pipa sehingga tekanan jaringan tetap stabil sekaligus menekan biaya operasional (Nuryani & Santosa, 2020). Penelitian lain menegaskan bahwa optimalisasi distribusi air tidak hanya berfokus pada aspek teknis jaringan, tetapi juga harus mempertimbangkan peningkatan layanan pelanggan dan pengembangan infrastruktur distribusi secara menyeluruh (Putri & Ernawati, 2025). Selain itu, tingginya tingkat kehilangan air sebesar 42,34% menunjukkan bahwa sistem distribusi air bersih masih menghadapi permasalahan serius, sehingga diperlukan perbaikan pada sistem jaringan maupun manajemen pengolahan air dari sumber hingga proses pendistribusian kepada masyarakat (Udin *et al.*, 2024). Penelitian ini juga menunjukkan bahwa metode program linear dapat digunakan untuk menentukan diameter pipa optimum (3–8 inci) guna meminimalkan biaya dan menjaga *energy head* pada setiap simpul jaringan (Saleh & Anandy, 2017).

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada optimasi teknis jaringan pipa secara parsial, seperti pemilihan diameter pipa, stabilitas tekanan, atau efisiensi biaya distribusi. Penelitian terdahulu juga belum banyak mengintegrasikan aspek kebutuhan air penduduk, kapasitas distribusi, kehilangan air (*water loss*), dan keterbatasan debit ke dalam satu model optimasi yang komprehensif. Selain itu, penerapan metode *Linear Programming* dalam konteks optimasi distribusi air pada wilayah perkotaan dengan tingkat kepadatan penduduk tinggi, seperti Kota Cimahi, masih relatif terbatas. Padahal, karakteristik Kota Cimahi yang memiliki kebutuhan air tinggi dan keterbatasan kapasitas distribusi memerlukan model optimasi yang tidak hanya meminimalkan biaya, tetapi juga mampu menentukan alokasi distribusi air yang optimal berdasarkan kapasitas jaringan dan kebutuhan masyarakat.

Linear Programming merupakan salah satu metode optimasi yang digunakan untuk menyelesaikan masalah yang dapat dimodelkan dalam bentuk fungsi linear. Metode ini terdiri atas fungsi tujuan dan fungsi pembatas, yang keduanya harus berbentuk linear. Dalam optimasi jaringan distribusi air, fungsi tujuan digunakan untuk meminimalkan biaya distribusi, sedangkan fungsi pembatas merepresentasikan keterbatasan sumber daya, seperti kapasitas debit air pada setiap elemen pipa dan kapasitas distribusi jaringan (Bazaraa *et al.*, 2011; Hillier, 2005). Oleh karena itu, penelitian ini berupaya mengisi kesenjangan penelitian dengan mengembangkan model optimasi distribusi air bersih yang mengintegrasikan kebutuhan penduduk, kapasitas distribusi, dan kehilangan air menggunakan pendekatan *Linear Programming* pada sistem distribusi PDAM Kota Cimahi.

Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan pemilihan jaringan pipa distribusi air dari reservoir menuju beberapa blok pelayanan, yaitu blok A, B, C, dan D, dengan biaya serendah mungkin tanpa mengabaikan pemenuhan kebutuhan air sesuai standar teknis dan kapasitas pipa yang tersedia. Optimasi jaringan distribusi air menjadi sangat penting karena peningkatan jumlah penduduk perkotaan berdampak langsung terhadap meningkatnya kebutuhan air bersih, sementara kapasitas jaringan dan efisiensi distribusi masih terbatas. Berdasarkan klasifikasi kota menurut jumlah penduduk, Kota Cimahi termasuk kategori kota sedang dengan jumlah penduduk antara 500.000–1.000.000 jiwa. Pada kategori tersebut, kebutuhan konsumsi air domestik berkisar antara 120–150 liter/orang/hari dengan rata-rata sebesar 135 liter/orang/hari. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem distribusi air harus dirancang secara optimal agar mampu memenuhi kebutuhan masyarakat secara merata, efisien, dan berkelanjutan. Namun, pada praktiknya, sistem distribusi air sering menghadapi berbagai permasalahan, terutama tingginya tingkat kehilangan air pada jaringan perpipaan (Nugroho, 2024).

Kehilangan air merupakan selisih antara volume air yang diproduksi dengan volume air yang berhasil diterima atau tercatat pada pelanggan. Dalam sistem penyediaan air minum, tidak seluruh air hasil produksi dapat sampai ke konsumen karena adanya kebocoran pipa, kerusakan sambungan, tekanan yang tidak stabil, serta kehilangan nonteknis lainnya. Kondisi tersebut menyebabkan

meningkatnya biaya operasional dan menurunkan efisiensi pelayanan distribusi air. Menurut Ditjen Cipta Karya, tingkat kehilangan air pada jaringan distribusi air minum di Indonesia umumnya berada pada kisaran 20%–30%, dengan rata-rata sekitar 25%. Persentase tersebut menunjukkan bahwa kehilangan air masih menjadi permasalahan serius yang memerlukan penanganan secara sistematis dan terukur (Departemen Pekerjaan Umum, 1996). Tingginya tingkat kehilangan air ini menjadi indikasi bahwa efisiensi jaringan distribusi masih rendah, baik akibat kebocoran fisik pada pipa maupun kehilangan nonteknis seperti kesalahan pencatatan dan sambungan ilegal. Apabila kondisi tersebut tidak segera ditangani, maka akan meningkatkan biaya operasional, menurunkan kualitas pelayanan air bersih, serta mengurangi kemampuan sistem dalam memenuhi kebutuhan masyarakat yang terus meningkat.

Salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk mengurangi tingkat kehilangan air adalah pengendalian *Non-Revenue Water* (NRW). NRW merupakan volume air yang telah diproduksi dan terukur, tetapi tidak memberikan pendapatan bagi perusahaan penyedia air. Pengukuran NRW dapat dilakukan menggunakan metode *Infrastructure Leakage Index* (ILI) dengan bantuan perangkat lunak WBEasyCalc 3 untuk mengetahui tingkat efisiensi jaringan distribusi air. Melalui metode tersebut, tingkat kehilangan air dapat dianalisis secara lebih akurat sehingga dapat menjadi dasar dalam menentukan strategi perbaikan jaringan perpipaan (Nanda *et al.*, 2024). Meskipun penelitian mengenai optimasi jaringan distribusi air dan analisis kehilangan air telah banyak dilakukan, sebagian besar penelitian masih berfokus pada analisis teknis kehilangan air atau hanya membahas optimasi jaringan secara parsial. Penelitian terdahulu umumnya belum mengintegrasikan aspek kebutuhan air berdasarkan kategori kota, kapasitas jaringan pipa, biaya distribusi, dan pengendalian kehilangan air (*Non-Revenue Water*) dalam satu model optimasi yang komprehensif. Selain itu, penggunaan pendekatan optimasi jaringan yang dikombinasikan dengan analisis NRW berbasis metode ILI masih relatif terbatas, khususnya pada studi kasus jaringan distribusi air di Kota Cimahi.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini memiliki kebaruan dengan mengintegrasikan optimasi pemilihan jaringan pipa berbiaya minimum dengan analisis kehilangan air menggunakan pendekatan *Non-Revenue Water* (NRW) dan metode *Infrastructure Leakage Index* (ILI). Integrasi tersebut diharapkan mampu menghasilkan model distribusi air yang lebih efisien, ekonomis, dan sesuai dengan kebutuhan pelayanan air bersih di wilayah perkotaan (Rakhmad & Yuniarto, 2024). Pendekatan ini tidak hanya mempertimbangkan aspek biaya distribusi, tetapi juga memperhatikan efisiensi jaringan perpipaan melalui pengendalian kehilangan air secara terukur.

Berdasarkan jumlah penduduk, Kota Cimahi termasuk kategori kota sedang dengan jumlah penduduk antara 500.000–1.000.000 jiwa. Pada kategori tersebut, faktor harian maksimum (*Factor of Maximum Day Demand*) berada pada kisaran 1,15–1,25 dengan nilai yang digunakan sebesar 1,2. Nilai tersebut menunjukkan bahwa pada hari dengan tingkat konsumsi tertinggi, kebutuhan air meningkat sebesar 20% dibandingkan kebutuhan rata-rata harian. Selain itu, faktor jam puncak (*Peak Hour Factor*) untuk Kota Cimahi mencapai 1,75 dengan standar berkisar antara 1,75–2,00. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada jam-jam puncak, umumnya pada pagi hari pukul 06.00–09.00 dan sore hari pukul 17.00–20.00, konsumsi air dapat meningkat hingga 75% lebih tinggi dibandingkan rata-rata kebutuhan per jam. Sistem distribusi air di Kota Cimahi juga beroperasi selama 24 jam, sehingga jaringan perpipaan harus mampu mempertahankan kontinuitas pelayanan dalam berbagai kondisi beban distribusi. Faktor Jam Puncak (FJP) merupakan perbandingan antara kebutuhan air maksimum pada jam puncak terhadap kebutuhan air rata-rata per jam dalam satu hari (Pulo, 2018). Secara matematis, hubungan tersebut dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$FJP = \frac{\text{Kebutuhan air jam puncak}}{\text{Kebutuhan rata-rata air per jam}} \dots\dots\dots (1)$$

Selain itu, komposisi pelayanan distribusi air di Kota Cimahi menggunakan rasio Sambungan Rumah (SR) dan Hidran Umum (HU) sebesar 50:50. Rasio tersebut menunjukkan bahwa 50% kebutuhan air dialokasikan melalui sambungan rumah, sedangkan 50% lainnya disalurkan melalui hidran umum sebagai titik pelayanan masyarakat (Refwendy, 2022). Secara umum, kondisi eksisting jaringan distribusi air di Kota Cimahi menunjukkan bahwa peningkatan kebutuhan air akibat pertumbuhan penduduk belum

sepenuhnya diimbangi dengan efisiensi jaringan perpipaan. Tingginya tingkat kehilangan air, variasi kebutuhan pada jam puncak, serta keterbatasan kapasitas distribusi menjadi permasalahan utama yang memerlukan solusi optimasi jaringan secara komprehensif. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada pengembangan model optimasi jaringan pipa yang tidak hanya mempertimbangkan biaya minimum, tetapi juga memperhatikan efisiensi distribusi dan pengendalian kehilangan air agar sistem pelayanan air bersih menjadi lebih optimal dan berkelanjutan.

Secara garis besar, kondisi kebutuhan air bersih di Kota Cimahi disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Perencanaan Kebutuhan Air Bersih

No	Parameter	Besaran	Satuan
1	Jumlah Penduduk	6000000	Jiwa
2	Kategori kota	500000-1000000	Jiwa
3	Konsumsi Sambungan Air (SR)	120-150	L/orang/hari
4	Konsumsi Hidran Umum (HU)	21-40	L/orang/hari
5	Rata-rata konsumsi SR	135	L/orang/hari
6	Rata-rata konsumsi HU	30	L/orang/hari
7	Jumlah jiwa per SR	5	Orang
8	Jumlah jiwa per HU	100	Orang
9	Kehilangan Air	25	%
10	Jam Operasional	24	Jam
11	Faktor Harian Maksimum (FHM)	1,2	
12	Faktor JamPuncak (FJP)	1,75	

Kota Cimahi termasuk kategori kota dengan jumlah penduduk antara 500.000–1.000.000 jiwa, sehingga standar kebutuhan air bersih mengacu pada konsumsi Sambungan Rumah (SR) sebesar 120–150 liter/orang/hari dan Hidran Umum (HU) sebesar 21–40 liter/orang/hari.

Tabel 2. Distribusi Pelayanan Penduduk

No	Jenis Pelayanan	Persentase	Jumlah Penduduk (Jiwa)
1	Sambungan Rumah (SR)	50%	300.000
2	Total	50%	300.000
		100%	600.000

Dalam penelitian ini digunakan rata-rata konsumsi sebesar 135 liter/orang/hari untuk SR dan 30 liter/orang/hari untuk HU. Adapun tingkat kehilangan air diasumsikan sebesar 25% dengan jam operasional distribusi selama 24 jam. Berdasarkan jumlah penduduk sebesar 600.000 jiwa, distribusi pelayanan diasumsikan terdiri atas 50% penduduk yang dilayani melalui Sambungan Rumah (SR) dan 50% melalui Hidran Umum (HU). Dengan demikian, jumlah penduduk yang dilayani masing-masing sistem adalah 300.000 jiwa. Perhitungan kebutuhan air untuk Sambungan Rumah (SR) diperoleh dengan mengalikan jumlah penduduk yang dilayani dengan rata-rata konsumsi air, yaitu:

Tabel 3. Perhitungan Kebutuhan Air Bersih

No	Komponen Perhitungan	Rumus	Hasil L/hari
1	Kebutuhan Air SR	300.000×135	40.500.000 L/hari
2	Kebutuhan Air HU	300.000×30	9.000.000 L/hari
3	Total kebutuhan rata-rata	$40.500.000 + 9.000.000$	49.500.000 L/hari
4	Konversi ke m ³ /hari	$49.500.000 \div 1000$	49.500 m ³ /hari
5	Kebutuhan harian maksimum Debit jam puncak	$1,2 \times 49.500$	59.400 m ³ /hari
6	Debit jam puncak (m ³ /detik)	$(59.400 \div 24) \times 1,75$	4.331,25 m ³ /jam
7	Debit jam puncak (L/detik)	$4.331,25 \div 3600$	1,203 m ³ /detik
8	Debit setelah kehilangan air (25%)	$1,203 \times 1000$	1.203 L/detik
9	Kebutuhan Air SR	$1.203 \times (1 - 0,25)$	902,25 L/detik

Hasil perhitungan menunjukkan kebutuhan air SR sebesar $Q(SR)=300000 \times 135=40.500.000$ liter per hari. Sementara itu, kebutuhan air untuk Hidran Umum (HU) dihitung sebagai berikut: $Q(HU)=300000 \times 30 = 9.000.000$ liter per hari. Total kebutuhan air rata-rata merupakan penjumlahan kebutuhan SR dan HU sebesar 49.500.000 liter per hari atau setara dengan 49.500 m³ per hari. Untuk mengantisipasi peningkatan kebutuhan harian, digunakan Faktor Harian Maksimum (FHM) sebesar 1,2 sehingga diperoleh kebutuhan harian maksimum sebesar 59.400 m³ per hari. Selanjutnya, dengan menggunakan

Faktor Jam Puncak (FJP) sebesar 1,75, diperoleh debit jam puncak sebesar 4.331,25 m³ per jam atau setara dengan 1.203 liter per detik. Setelah memperhitungkan kehilangan air sebesar 25%, debit efektif yang tersedia menjadi 902,25 liter per detik. Hasil perhitungan tersebut menunjukkan bahwa sistem distribusi air bersih di Kota Cimahi memerlukan kapasitas distribusi yang cukup besar agar mampu memenuhi kebutuhan masyarakat secara optimal, terutama pada kondisi jam puncak pemakaian. Komposisi tersebut menjadi dasar dalam menentukan kebutuhan distribusi air dan kapasitas jaringan perpipaan pada setiap wilayah pelayanan.

Secara umum, kondisi eksisting jaringan distribusi air di Kota Cimahi menunjukkan bahwa peningkatan kebutuhan air akibat pertumbuhan penduduk belum sepenuhnya diimbangi dengan efisiensi jaringan perpipaan. Tingginya tingkat kehilangan air, variasi kebutuhan pada jam puncak, serta keterbatasan kapasitas distribusi menjadi permasalahan utama yang memerlukan solusi optimasi jaringan secara komprehensif. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada pengembangan model optimasi jaringan pipa yang tidak hanya mempertimbangkan biaya minimum, tetapi juga memperhatikan efisiensi distribusi dan pengendalian kehilangan air agar sistem pelayanan air bersih menjadi lebih optimal dan berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif deskriptif berbasis model matematika untuk menganalisis dan mengoptimalkan jaringan distribusi air bersih pada sistem perpipaan Perumda Air Minum Tirta Raharja. Pendekatan kuantitatif digunakan karena penelitian berfokus pada pengolahan data numerik, perhitungan kebutuhan air, kapasitas aliran, biaya distribusi, serta penyelesaian model optimasi menggunakan *linear programming*. Pendekatan deskriptif digunakan untuk menggambarkan kondisi eksisting jaringan distribusi air secara sistematis dan terukur (Ali, 2022). Data yang digunakan dalam penelitian terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh secara langsung melalui observasi lapangan, wawancara dengan pihak Perumda Air Minum Tirta Raharja, serta survei lokasi jaringan perpipaan. Data tersebut meliputi kondisi jaringan distribusi, jenis pipa, kapasitas aliran, dan kondisi pelayanan air bersih di wilayah penelitian. Sementara itu, data sekunder diperoleh dari Badan Pusat Statistik (BPS) Kota Cimahi, gambar teknis jaringan perpipaan dalam format DWG, serta dokumen pendukung lainnya yang berkaitan dengan kebutuhan air dan jumlah penduduk (Kota Cimahi dalam Angka, 2024).

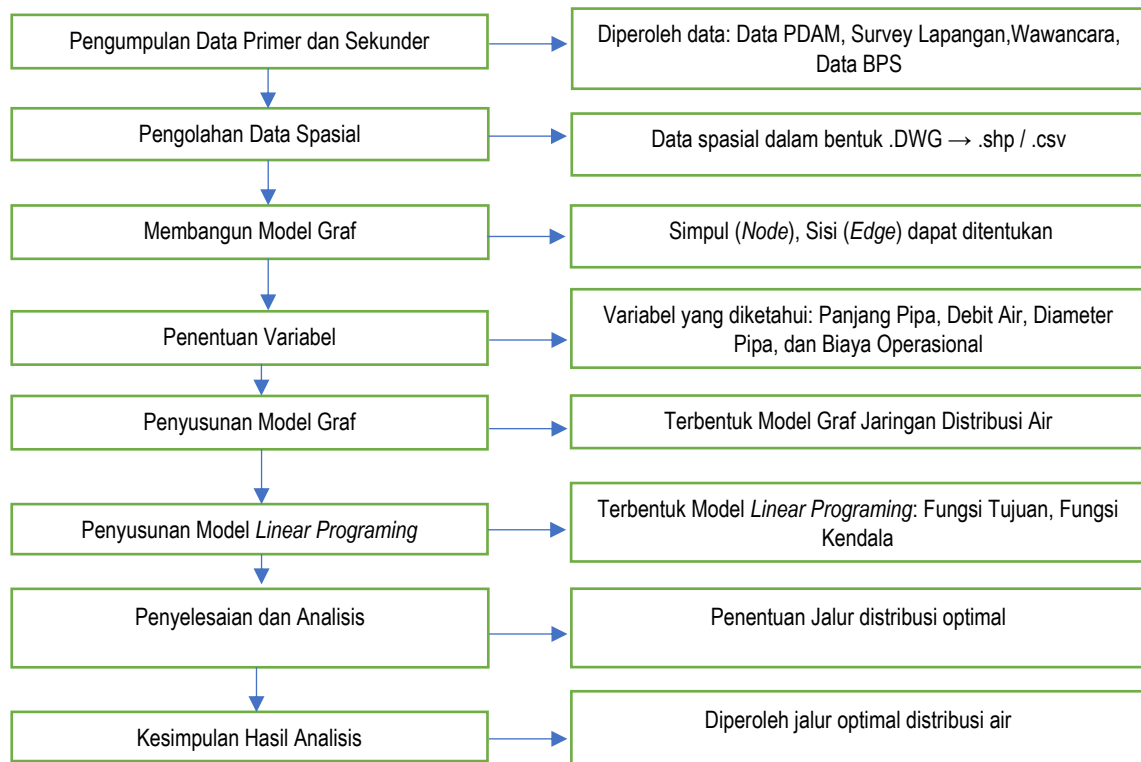
Variabel yang digunakan dalam penelitian ini didefinisikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Operasional Variabel

No	Variabel	Definisi Variabel	Satuan
1	Diameter dan jenis pipa	(HDPE, PVC, ACP, dsb.)	buah
2	Panjang Pipa	Panjang pipa yang digunakan PDAM	Meter (m)
3	Banyak Sambungan Rumah (SR)	Sambungan pipa air yang langsung dihubungkan dengan rumah	buah
4	Debit air	Kapasitas aliran air	m ³ / hari
5	Biaya operasional	Biaya yang harus dikeluarkan (Rp)	m ³ / hari

Tahap awal penelitian dilakukan melalui pengumpulan data jaringan pipa dari gambar teknis, survei lapangan, dan perangkat lunak QGIS. Data spasial tersebut kemudian dikonversi ke dalam format .shp atau .csv agar dapat digunakan dalam analisis spasial dan pembentukan graf jaringan (Setiawan *et al.*, 2024). Setelah itu, dilakukan identifikasi simpul (*node*) dan sisi (*edge*) yang merepresentasikan blok pelayanan dan jalur pipa distribusi (Nita & Marpaung, 2023). Tahap berikutnya adalah penentuan variabel penelitian, meliputi panjang pipa, kapasitas aliran air, diameter pipa, serta biaya operasional berdasarkan jenis pipa yang digunakan. Variabel-variabel tersebut kemudian digunakan dalam penyusunan model graf jaringan distribusi air. Model graf dibangun untuk menggambarkan hubungan antarjalur distribusi sehingga dapat dianalisis jalur yang paling efisien dalam menyalurkan air dari reservoir menuju wilayah pelayanan. Selanjutnya dilakukan penyusunan model matematika optimasi menggunakan metode *linear*

programming. Fungsi tujuan (*objective function*) digunakan untuk meminimalkan biaya operasional distribusi air, sedangkan fungsi kendala (*constraint function*) digunakan untuk memastikan bahwa kapasitas aliran, panjang pipa, debit air, dan diameter pipa tetap memenuhi kebutuhan distribusi air pada setiap wilayah pelayanan. Model optimasi tersebut kemudian diselesaikan menggunakan aplikasi POM-QM (*Production and Operations Management – Quantitative Methods*) untuk memperoleh jalur distribusi air yang paling optimal (Marendra *et al.*, 2023). Tahap akhir penelitian adalah interpretasi hasil optimasi untuk menentukan jalur distribusi air yang memiliki biaya minimum, kapasitas distribusi yang memadai, serta tingkat efisiensi jaringan yang lebih baik. Hasil analisis diharapkan dapat menjadi rekomendasi dalam pengembangan sistem distribusi air bersih yang lebih efisien dan berkelanjutan di Kota Cimahi. Lebih jelasnya, tahap-tahap penelitian digambarkan dalam diagram alir pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Tahap-tahap Penelitian

Fungsi tujuan dalam pemecahan masalah optimasi jaringan pipa berperan sebagai ukuran untuk mengurangi biaya. Formulasi fungsi tujuan dinyatakan sebagai berikut (Bazaraa *et al.*, 2011):

$$Z_{min} = C_{11} \cdot X_{11} + C_{12} \cdot X_{12} + C_{13} \cdot X_{13} + \dots + C_{1n} \cdot X_{1n} \quad \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:

C_{11} : Biaya debit air pada jalur 1

X_{11} : Kebutuhan air pada jalur 1

C_{12} : Biaya debit air pada jalur 2

X_{12} : Kebutuhan air pada jalur 2

C_{13} : Biaya debit air pada jalur 3

X_{13} : Kebutuhan air pada jalur 3

:

C_{1n} : Biaya debit air pada jalur n

X_{1n} : Kebutuhan air pada jalur n

Fungsi pembatas pertama adalah volume aliran pada pipa yang bertujuan agar volume aliran pada pipa setiap elemen tetap memiliki nilai yang konsisten atau tidak berubah.

$$\begin{aligned}
 X_{11} + X_{12} + X_{13} + \dots + X_{1n} &= X_1 \\
 X_{21} + X_{22} + X_{23} + \dots + X_{2n} &= X_2 \\
 X_{31} + X_{32} + X_{33} + \dots + X_{3n} &= X_3 \\
 &\vdots \\
 X_{41} + X_{42} + X_{43} + \dots + X_{4n} &= X_n
 \end{aligned}
 \dots\dots\dots (3)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan peta jaringan distribusi air bersih PDAM Kota Cimahi dari Perumda Air Minum Tirta Raharja (Gambar 2), dapat diketahui bahwa sistem distribusi air terdiri atas beberapa jalur pipa utama yang menghubungkan sumber suplai dengan wilayah pelayanan pelanggan. Setiap jalur distribusi memiliki kapasitas aliran, panjang jaringan, dan tingkat kebutuhan air yang berbeda pada masing-masing wilayah layanan. Kondisi tersebut menyebabkan proses pendistribusian air memerlukan pengelolaan yang optimal agar kebutuhan pelanggan dapat terpenuhi tanpa melebihi kapasitas jaringan yang tersedia. Peta jaringan ini digunakan sebagai dasar dalam menyusun model matematis optimasi distribusi air menggunakan metode pemrograman linear. Melalui peta jaringan, setiap jalur distribusi direpresentasikan sebagai variabel keputusan yang menunjukkan besarnya debit air yang dialirkan pada masing-masing jalur. Selain itu, informasi kapasitas pipa, debit suplai, dan kebutuhan air pada setiap wilayah digunakan sebagai fungsi kendala dalam model optimasi. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan menentukan alokasi distribusi air yang paling efisien untuk meminimalkan biaya distribusi sekaligus memenuhi kebutuhan air pada seluruh wilayah pelayanan PDAM Kota Cimahi.



Gambar 2. Jaringan Pipa PDAM Kota Cimahi

Berikut adalah model graf jaringan pipa PDAM berdasarkan zona wilayah tertentu yang digunakan untuk merepresentasikan hubungan antarjalur distribusi air bersih pada setiap wilayah layanan. Model graf ini menggambarkan aliran distribusi air dari sumber suplai menuju beberapa zona pelayanan melalui jaringan pipa yang saling terhubung. Setiap simpul (*node*) menunjukkan titik distribusi atau wilayah pelayanan, sedangkan setiap sisi (*edge*) merepresentasikan jalur pipa yang memiliki kapasitas dan biaya distribusi tertentu.

Model graf jaringan digunakan sebagai dasar dalam membangun model matematis optimasi distribusi air menggunakan metode pemrograman linear. Melalui representasi graf, alokasi debit air pada setiap jalur distribusi dapat dianalisis secara lebih sistematis sehingga diperoleh distribusi air yang optimal, efisien, dan sesuai dengan kapasitas jaringan yang tersedia pada masing-masing zona wilayah.

Graf Jaringan Pipa PDAM (Model Linear Programming)

**Gambar 3.** Visual Jaringan Pipa PDAM Berdasarkan Harga Jenis Pipa

Berdasarkan Gambar 3 menunjukkan bahwa proses optimasi distribusi air memerlukan beberapa data pendukung yang berkaitan dengan jaringan distribusi PDAM. Data tersebut meliputi kapasitas aliran pada setiap jalur pipa, kebutuhan air pada masing-masing zona wilayah, debit suplai yang tersedia, serta biaya distribusi pada setiap jalur distribusi. Data-data tersebut digunakan sebagai dasar dalam penyusunan fungsi tujuan dan fungsi kendala pada model pemrograman linear. Proses analisis dan pengolahan model matematis, serta kebutuhan data penelitian disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Data Berdasarkan Tipe Pipa, Panjang, Kapasitas Max (liter/detik), dan Biaya

Kode/Node	Lokasi/Blok	Tipe Pipa, Diameter	Panjang (m)	Kapasitas Max (ltr/detik)	Biaya (/m)	Biaya Total (Rp)
R ₁	Reservoir	ACP, 12 inch	-	100	-	-
J ₁	Blok A	HDPE, 2 inch	200	30	250.000	50.000.000
J ₂	Blok B	HDPE, 32 mm	150	25	200.000	30.000.000
J ₃	Blok C	HDPE, 25 mm	180	20	180.000	32.400.000
J ₄	Blok D	PVC, 1 inch	100	10	120.000	12.000.000
SR _x	Sambungan Rumah	PVC, 1 inch	20	1	100.000	2.000.000

Data kondisi fisik di lapangan diperlukan untuk menggambarkan keadaan aktual jaringan distribusi air PDAM pada wilayah penelitian. Data ini meliputi kondisi jaringan pipa, kapasitas aliran, panjang jalur distribusi, serta kebutuhan air pada setiap zona pelayanan. Informasi tersebut menjadi dasar dalam penyusunan model matematis optimasi distribusi air agar hasil analisis sesuai dengan kondisi nyata di lapangan. Adapun data kondisi fisik di lapangan disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Data Kondisi di Lapangan

No	Uraian	Satuan	Kategori Berdasarkan Penduduk
			500.000 s.d. 1.000.000
1	Konsumsi unit Sambungan Rumah (SR)	L/orang/hari	120 - 150
2	Konsumsi unit Hidran Umum (HU)	L/orang/hari	21 - 40
3	Kehilangan Air	%	20 - 30
4	Faktor Harian Maksimum		1,15 - 1,25
5	Faktor Jam Puncak		1,75 - 2,0
6	Jumlah jiwa per SR	Jiwa	5
7	Jumlah jiwa per HU	Jiwa	100
8	Jam Operasional	Jam	24
9	SR : HU		50 : 50 s.d. 80 : 20

*Sumber: Ditjen Cipta Karya PU, 1996

Kota Cimahi termasuk kategori kota sedang dengan jumlah penduduk antara 500.000–1.000.000 jiwa. Berdasarkan kategori tersebut, kebutuhan konsumsi air domestik diasumsikan sebesar 135 liter/orang/hari atau menggunakan nilai rata-rata dari standar kebutuhan air perkotaan. Jumlah penghuni pada setiap Sambungan Rumah (SR) diasumsikan sebanyak lima orang, sehingga kebutuhan air untuk satu SR dapat dihitung sebagai berikut:

$$1 \text{ SR} = 135 \times 5 = 675 \text{ liter/hari}$$

Dengan sistem distribusi air yang beroperasi selama 24 jam per hari, maka kebutuhan air per SR dalam satuan liter/detik diperoleh melalui konversi berikut:

$$\frac{675}{86400} \approx 0,0078 \times 1,25 \times 1,2 \times 2 = 0,0234 \text{ liter/detik}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kebutuhan air aktual untuk setiap SR sebesar 0,0234 liter/detik. Nilai tersebut kemudian digunakan sebagai dasar dalam penyusunan model optimasi jaringan distribusi air menggunakan model pemrograman linear.

Model Pemrograman Linear

Model optimasi disusun untuk menentukan jalur distribusi air dengan biaya minimum tanpa melanggar batas kapasitas jaringan pipa. Fungsi tujuan (*objective function*) digunakan untuk meminimalkan total biaya distribusi air pada setiap jalur pipa. Biaya distribusi diasumsikan proporsional terhadap biaya pemasangan pipa per meter. Model fungsi tujuan dinyatakan sebagai berikut

$$\text{Min } Z = 250.000X_1 + 200.000X_2 + 180.000X_3 + 120.000X_4 \quad \dots\dots\dots (4)$$

Keterangan:

X_1 = panjang pipa pada jalur J_1 (Blok A)

X_2 = panjang pipa pada jalur J_2 (Blok B)

X_3 = panjang pipa pada jalur J_3 (Blok C)

X_4 = panjang pipa pada jalur J_4 (Blok D)

Berdasarkan panjang pipa yang telah diketahui, diperoleh total biaya distribusi sebagai berikut:

$$\text{Min } Z = 50.000.000 + 30.000.000 + 32.400.000 + 12.000.000 = 124.400.000$$

Namun, untuk memperoleh model distribusi yang lebih realistis, optimasi dilakukan berdasarkan debit air yang mengalir pada setiap jalur. Oleh karena itu, fungsi tujuan disusun kembali menjadi:

$$\text{Min } Z = c_1y_1 + c_2y_2 + c_3y_3 + c_4y_4 \quad \dots\dots\dots (5)$$

Keterangan:

c_i = biaya distribusi per liter/detik

y_1 = debit air pada jalur distribusi

Fungsi Kendala

Fungsi kendala digunakan untuk memastikan bahwa distribusi air tidak melebihi kapasitas reservoir dan kapasitas maksimum setiap jalur pipa. Fungsi kendala dituliskan sebagai berikut:

Kapasitas Total Reservoir:

$$y_1 + y_2 + y_3 + y_4 \leq 100 \quad \dots\dots\dots (6)$$

Kapasitas Maksimal Setiap Jalur:

$$y_1 \leq 30 \text{ (Blok A)} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$y_2 \leq 25 \text{ (Blok B)} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$y_3 \leq 20 \text{ (Blok C)} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$y_4 \leq 10 \text{ (Blok D)} \quad \dots\dots\dots (10)$$

Kebutuhan Air Minimum

Apabila terdapat 500 Sambungan Rumah (SR), maka kebutuhan air minimum adalah:

Kebutuhan air total:

$$500 + 0,0234 = 11,7 \text{ L/detik}$$

$$y_1 + y_2 + y_3 + y_4 \geq 11,7 \quad \dots\dots\dots (11)$$

Sehingga kendalanya menjadi:

$$y_1, y_2, y_3, y_4 \geq 0 \quad \dots\dots\dots (12)$$

Perhitungan Bobot Biaya Distribusi

Untuk menentukan efisiensi setiap jalur distribusi, dilakukan perhitungan bobot biaya per liter/detik berdasarkan perbandingan biaya total jalur dengan kapasitas maksimum pipa. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa jalur J_2 dan J_4 memiliki biaya distribusi yang lebih rendah dibandingkan jalur lainnya, sehingga lebih ekonomis untuk digunakan sebagai jalur utama distribusi air. Namun, nilai bobot awal yang terlalu besar menyebabkan proses optimasi pada aplikasi POM-QM menjadi kurang stabil. Oleh karena itu, dilakukan normalisasi nilai bobot agar skala antarvariabel menjadi lebih seimbang tanpa mengubah rasio biaya antarjalur. Setelah normalisasi, model fungsi tujuan menjadi:

$$\text{Min } Z = 1666,67y_1 + 1333,33y_2 + 1440y_3 + 1200y_4$$

Hasil optimasi pertama menunjukkan nilai solusi optimal sebesar 14.266,66 dengan distribusi debit:

$$y_1 = 0; y_2 = 1,7; y_3 = 0; y_4 = 10$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa kebutuhan minimum air untuk 500 SR telah terpenuhi dan tidak terdapat jalur yang melebihi kapasitas maksimum. Akan tetapi, distribusi air belum merata karena hanya jalur J_2 dan J_4 yang digunakan secara dominan, sedangkan jalur J_1 dan J_3 tidak dimanfaatkan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa solusi minimum biaya belum tentu menghasilkan pemerataan pelayanan distribusi air. Pada skenario kedua, diperoleh solusi optimal sebesar 82.466,6 dengan distribusi debit:

$$y_1 = 5; y_2 = 25; y_3 = 20; y_4 = 10$$

Hasil ini menunjukkan bahwa jalur J_2 dan J_4 digunakan secara maksimal karena memiliki biaya distribusi yang relatif lebih rendah. Sementara itu, jalur J_1 dan J_3 tetap digunakan untuk mendukung pemerataan distribusi air dan menjaga kontinuitas pelayanan pada seluruh wilayah. Jalur J_1 menuju Blok A tetap dipertahankan karena wilayah tersebut merupakan area strategis dan dekat dengan sumber distribusi, sedangkan jalur J_3 digunakan untuk menjaga kestabilan distribusi menuju Blok C.

Secara keseluruhan, hasil optimasi menunjukkan bahwa pemilihan jalur distribusi tidak hanya dipengaruhi oleh faktor biaya, tetapi juga mempertimbangkan kapasitas jaringan, pemerataan pelayanan, kebutuhan minimum air, dan kondisi teknis distribusi. Oleh karena itu, strategi distribusi air yang optimal harus mampu menyeimbangkan aspek ekonomis dan aspek pelayanan agar seluruh blok wilayah dapat memperoleh pasokan air secara merata dan berkelanjutan.

Berdasarkan hasil analisis, beberapa rekomendasi yang dapat diberikan adalah sebagai berikut:

- 1) Jalur dengan biaya distribusi rendah, seperti J_2 dan J_4 , perlu dioptimalkan sebagai jalur utama distribusi air.
- 2) Jalur dengan biaya lebih tinggi tetap perlu digunakan untuk menjaga pemerataan distribusi dan tekanan air pada wilayah tertentu.
- 3) Kapasitas jaringan harus disesuaikan dengan kebutuhan minimum sistem agar seluruh blok pelayanan dapat terlayani secara optimal.
- 4) Pengembangan jaringan distribusi air perlu dirancang secara modular agar mudah diperluas apabila terjadi peningkatan kebutuhan air di masa mendatang.
- 5) Analisis hidrolis perlu dilakukan secara lebih mendalam untuk memetakan tekanan air dan kehilangan tekanan (*headloss*), terutama pada wilayah yang berada di ujung jaringan distribusi.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, model pemrograman linear mampu digunakan untuk mengoptimalkan sistem distribusi air bersih pada jaringan perpipaan PDAM Kota Cimahi secara lebih efisien dan ekonomis. Hasil optimasi menunjukkan bahwa kombinasi jalur distribusi tertentu dapat menghasilkan biaya operasional minimum sebesar Rp82.466,6 dengan tetap memenuhi kebutuhan air, kapasitas jaringan pipa, dan pemerataan pelayanan pada setiap blok wilayah. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa tingginya tingkat kehilangan air (*Non-Revenue Water/NRW*) menjadi faktor penting yang memengaruhi efisiensi distribusi air sehingga diperlukan pengendalian kebocoran dan pengelolaan jaringan secara terintegrasi. Pemanfaatan teknologi berbasis QGIS, SCADA, dan model optimasi matematis dapat membantu PDAM dalam meningkatkan kualitas pelayanan, efisiensi operasional, serta perencanaan pengembangan jaringan distribusi air bersih secara lebih terukur dan berkelanjutan. PDAM Kota Cimahi disarankan untuk mengoptimalkan jalur distribusi berbiaya rendah tanpa mengabaikan pemerataan pelayanan air. Pengendalian kehilangan air (NRW) perlu ditingkatkan melalui pemantauan kebocoran dan evaluasi jaringan secara berkala. Penelitian selanjutnya disarankan menambahkan variabel lain, seperti kualitas air, kehilangan tekanan (*headloss*), dan faktor lingkungan agar model optimasi distribusi air menjadi lebih komprehensif dan realistis.

REKOMENDASI

Berdasarkan hasil analisis pemodelan pemrograman linear dan pembahasan mengenai efisiensi jaringan perpipaan pada PDAM Kota Cimahi, direkomendasikan agar Perumda Air Minum Tirta Raharja memprioritaskan alokasi debit pada jalur J2 dan J4 sebagai rute utama karena efisiensi biayanya yang tinggi, dengan tetap mempertahankan operasional jalur J1 dan J3 demi menjamin kestabilan tekanan serta pemerataan pelayanan antarblok wilayah. Selain itu, manajemen perlu mengimplementasikan program pengendalian *Non-Revenue Water* (NRW) berbasis metode *Infrastructure Leakage Index* (ILI) secara berkala guna menekan tingkat kehilangan air yang saat ini mencapai 25%, melakukan kajian hidrolik lanjutan terkait kehilangan tekanan (*headloss*) pada jam puncak pemakaian, serta mengintegrasikan teknologi QGIS dan sistem SCADA untuk mewujudkan digitalisasi pemantauan jaringan distribusi yang adaptif, modular, dan berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Politeknik Negeri Bandung, khususnya P3M yang telah memberi kesempatan untuk melakukan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, M. M. (2022). Metodologi penelitian kuantitatif dan penerapan nya dalam penelitian. *JPIB: Jurnal Penelitian Ibnu Rusyd*, 1(2), 1–5.
- Kota Cimahi Dalam Angka 2024., (2024).
- Bazaraa, M. S., Jarvis, J. J., & Serali, H. D. (2011). *Linear programming and network flows*. John Wiley & Sons.
- Darmasetiawan, I. M. (2025). *Sistem Perpipaan Distribusi Air Minum*. PT KIMHSAFI ALUNG CIPTA.
- Departemen Pekerjaan Umum. (1996). *Direktorat Jenderal Cipta Karya. Kriteria Perencanaan Sistem Penyediaan Air Bersih*.
- Firmansyah, M. F., & Kusmana, D. (2025). *Aksesibilitas Pelayanan Air Minum Layak Bagi MAasyarakat Di Kabupaten Lombok Tengah*. IPDN.
- Hillier, F. S. (2005). *Introduction to operations research*. McGrawHill.
- Kapasitas Produksi Air Bersih Milik BLUD Air Minum Kota Cimahi Bertambah, (2024). <https://jdih.cimahikota.go.id/berita/cimahi-82550>
- Marendra, I. G., Aryata, I. M., & Afgani, I. (2023). POM QM for Windows Training for Industrial Engineering Students at the University of Serang Raya (UNSERA) in Solving Linear Programming Problems in Everyday Life and the World of Work. *Jurnal Pengabdian Masyarakat Bestari (JPMB)*, 2(2), 125–138.
- Mustikawati, I. (2022). Strategi Peningkatan Pelayanan Air Bersih Kota Cimahi Secara Berkelanjutan. *Jurnal Perencanaan Wilayah Dan Kota*, 17(1), 47–61.
- Nanda, F. A., Masduqi, A., Ahyar, A., & Adhi, B. W. (2024). ANALISIS TINGKAT NON-REVENUE WATER (NRW) PADA JARINGAN DISTRIBUSI SPAM PUSAT PERUMDA AIR MINUM PALANGKA RAYA. *Jurnal Teknik Sipil Giratory UPGRIS*, 5(1), 37–46.
- Nita, A. F., & Marpaung, F. (2023). *Penerapan Minimum Spanning Tree Pada Jaringan Pipa Distribusi Air PDAM Tirta Bengi Di Simpang Tiga Redelong dengan Menggunakan Algoritma Floyd-Warshall*.
- Nugroho, O. M. (2024). *Kajian Penerapan Water Safety Plan Pada Sistem Penyediaan Air Minum Regional Kartamantul Sistem Bantar*. Universitas Islam Indonesia.
- Nuryani, N., & Santosa, B. (2020). Analisa Optimasi Diameter Jaringan Pipa Distribusi Air Bersih Dengan Menggunakan Software EPANET, LINGO di Jalur Sentul City PDAM Tirta Kahuripan Kabupaten Bogor. *Rekayasa Sipil*, 14(2), 136–142.
- Pulo, K. S. S. (2018). Perencanaan Jaringan Pipa Distribusi Air Bersih di Desa Loa Lepu Kec. Tenggarong Seberang Kab. Kutai Kartanagara. *KURVA MAHASISWA*, 1(2), 1557–1579.
- Purnawan, M. Y. (2022). *Pemanfaatan Sumber Daya Air Secara Konjungtif (Air Permukaan dan Air Tanah)*. Penerbit Adab.

- Putri, R. A. R., & Ernawati, D. (2025). Analisis Optimalisasi Sistem Pendistribusian Air Bersih PDAM Tirta Jaya Kabupaten Pamekasan (Sumber Trasak). *Jurnal Serambi Engineering*, 10(1).
- Rakhmad, G. I., & Yuniarto, A. (2024). Analisis Kehilangan Air dengan Metode Neraca Air dan Infrastructure Leakage Index (ILI) pada Perumda Air Minum Kota Surakarta. *Jurnal Serambi Engineering*, 9(4).
- Refwendi, A. (2022). *Perencanaan Air Bersih Unit Pelayanan Sungai Duren PERUMDA Air Minum irta Muaro Jambi (Sudi kasus: Kelurahan Pijoan)*. Universitas Batanghari.
- Saleh, C., & Anandy, F. (2017). Optimasi Diameter Jaringan Pipa Dalam Sistem Penyediaan Air Bersih (Pdam) Di Kec. Bululawang Kab. Malang Menggunakan Linear Programming. *Media Teknik Sipil*, 15(1), 20–33.
- Setiawan, E. I., Santoso, J., & Purnomo, M. H. (2024). *Social Network Analysis dengan Python NetworkX dan Pajek: Dilengkapi AI/ML dan Implementasi serta Deployment ke Google Cloud Menggunakan Express.js dan Node.js*. Jakad Media Publishing.
- Taha.H.A. (2017). *Operations Research: An Introduction (10th ed.)*. Buku klasik dan komprehensif dalam riset operasi, termasuk pemrograman linear. Pearson Education.
- Triarmadja, R. (2019). *Teknik penyediaan air minum perpipaan*. Ugm Press.
- Udin, M., Latief, R., & Nasution, M. A. (2024). Optimalisasi Sistem Distribusi Air Bersih Perpipaan Di Kecamatan Watang Sawitto, Kabupaten Pinrang. *Urban and Regional Studies Journal*, 6(2), 174–180.
- Zahra, N. A. (2022). *Sistem Pengolahan Air Minum di IPA Perumda Air Minum Tirta Raharja Cimahi*.