



Scripta Technica: Journal of Engineering and Applied Technology

Vol 2 No 1 June 2026, Hal. 425-435
ISSN:3110-0775(Print) ISSN: 3109-9696(Electronic)
Open Access: <https://scriptainteletektual.com/scripta-technica>

Rencana Survei Pemetaan Jaringan Perpipaan Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) IKK Ketahun Kabupaten Bengkulu Utara

Muhamad Rifky Kusdinar^{1*}, Rezi Munizar², Buyung Mantap³

¹⁻³ Universitas Ratu Samban Bengkulu Utara, Indonesia

email: kusdinarr99@gmail.com¹

Article Info :

Received:
14-06-2026
Revised:
22-06-2026
Accepted:
28-06-2026

Abstract

Safe and sustainable drinking water services require distribution network planning supported by accurate spatial data. This study aimed to develop a pipeline network survey and mapping plan for the Subdistrict Capital Water Supply System (SPAM IKK) in Ketahun, North Bengkulu Regency, as the basis for preparing a Detail Engineering Design (DED). A quantitative descriptive approach with field surveys was employed by collecting topographic, land-use, road network, utility, settlement, and elevation data using GPS, GIS, and EPANET hydraulic modeling. The results indicate that pipeline routes following existing road corridors provide greater construction and operational efficiency. Projected water demand reached approximately 40 L/s at the end of the planning period, while hydraulic simulation confirmed that pressure and flow velocity satisfied technical standards for water supply systems. The integration of field surveys, digital mapping, and hydraulic simulation provides an accurate and effective basis for sustainable drinking water distribution planning.

Keywords: GIS, GPS, Pipeline Network, SPAM IKK, Survey Mapping.

Akbsrak

Ketersediaan air minum yang aman dan berkelanjutan memerlukan perencanaan jaringan distribusi yang didukung data spasial akurat. Penelitian ini bertujuan menyusun rencana survei pemetaan jaringan perpipaan Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) Ibu Kota Kecamatan (IKK) Ketahun, Kabupaten Bengkulu Utara, sebagai dasar penyusunan *Detail Engineering Design* (DED). Penelitian menggunakan metode deskriptif kuantitatif berbasis survei lapangan melalui pengumpulan data topografi, penggunaan lahan, jaringan jalan, utilitas, permukiman, dan elevasi menggunakan GPS, GIS, serta pemodelan hidrolika EPANET. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jalur perpipaan yang mengikuti koridor jalan eksisting memberikan efisiensi konstruksi dan operasional. Proyeksi kebutuhan air mencapai sekitar 40 L/det pada akhir periode rencana, sedangkan simulasi hidrolika menunjukkan tekanan dan kecepatan aliran memenuhi standar teknis penyelenggaraan SPAM. Integrasi survei lapangan, pemetaan digital, dan simulasi hidrolika menghasilkan dasar perencanaan yang akurat, efektif, dan mendukung pengembangan pelayanan air minum secara berkelanjutan.

Kata Kunci: GIS, GPS, Jaringan Perpipaan, SPAM IKK, Survei Pemetaan.



©2022 Authors.. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

PENDAHULUAN

Air minum merupakan kebutuhan dasar manusia yang memiliki peranan penting dalam menunjang kesehatan, kesejahteraan, serta pembangunan sosial dan ekonomi, sehingga keberadaan sistem penyediaan air minum yang andal telah berkembang menjadi salah satu indikator utama pembangunan berkelanjutan pada berbagai negara yang sedang menghadapi tekanan urbanisasi, perubahan iklim, dan peningkatan kebutuhan domestik maupun non-domestik (World Health Organization, 2022). Ketersediaan air minum yang memenuhi persyaratan kuantitas, kualitas, dan kontinuitas menjadi salah satu indikator keberhasilan pembangunan infrastruktur dasar di suatu wilayah yang harus diwujudkan melalui sistem distribusi yang terencana secara komprehensif sesuai dengan standar teknis penyelenggaraan SPAM (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2023). Seiring dengan meningkatnya jumlah penduduk, perkembangan kawasan permukiman, serta pertumbuhan aktivitas ekonomi, kebutuhan masyarakat terhadap pelayanan air minum juga mengalami peningkatan sehingga pendekatan perencanaan konvensional tidak lagi memadai untuk mengakomodasi dinamika spasial kawasan yang berkembang secara cepat. Kondisi tersebut menuntut adanya

pengembangan Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) yang mampu memberikan pelayanan secara efektif, efisien, dan berkelanjutan melalui integrasi data spasial, analisis hidrolika, serta perencanaan distribusi yang adaptif terhadap perkembangan wilayah (Direktorat Jenderal Cipta Karya, 2022). Penyusunan jaringan distribusi air minum juga harus mempertimbangkan keseimbangan antara potensi sumber daya air dan kebutuhan pelayanan agar keberlanjutan sistem tetap terjaga dalam jangka panjang (Badan Standardisasi Nasional, 2002). Perkembangan teknologi pemetaan digital dan pemodelan jaringan telah membuka peluang baru untuk menghasilkan desain SPAM yang lebih presisi, mudah dievaluasi, dan mampu meminimalkan risiko teknis selama tahap konstruksi maupun operasi.

Pemerintah Indonesia melalui berbagai kebijakan terus berupaya meningkatkan akses pelayanan air minum, salah satunya melalui pembangunan Sistem Penyediaan Air Minum Ibu Kota Kecamatan (SPAM IKK), yang diarahkan untuk memperluas cakupan pelayanan perpipaan terutama pada wilayah yang belum memperoleh layanan optimal (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2018). Keberhasilan pembangunan SPAM tidak hanya ditentukan oleh kapasitas sumber air dan instalasi pengolahan, tetapi juga dipengaruhi oleh perencanaan jaringan distribusi yang tepat sehingga air dapat disalurkan kepada masyarakat dengan tekanan yang memenuhi standar teknis (Badan Standardisasi Nasional, 2015). Berbagai penelitian terdahulu menunjukkan bahwa simulasi hidrolika menggunakan EPANET mampu meningkatkan akurasi evaluasi tekanan, kecepatan aliran, dan kehilangan energi pada jaringan distribusi sehingga menjadi perangkat penting dalam penyusunan desain jaringan perpipaan (Rivai et al., 2023). Penelitian mengenai pengembangan jaringan distribusi juga memperlihatkan bahwa integrasi simulasi EPANET dengan analisis kebutuhan pelayanan menghasilkan alternatif jaringan yang lebih efisien dibandingkan pendekatan perencanaan berbasis perhitungan manual semata (Sucahyo et al., 2023). Kajian pada wilayah Teluk Keramat mengindikasikan bahwa pengembangan jaringan distribusi harus mempertimbangkan proyeksi pertumbuhan penduduk, kondisi topografi, dan pola sebaran permukiman agar kapasitas pelayanan tetap optimal pada masa mendatang (Rohaina et al., 2024). Sintesis berbagai penelitian tersebut memperlihatkan bahwa keberhasilan sistem distribusi air minum tidak hanya ditentukan oleh kualitas simulasi hidrolika, tetapi juga oleh kualitas data spasial yang menjadi dasar penyusunan jaringan sejak tahap survei awal.

Kecamatan Ketahun di Kabupaten Bengkulu Utara merupakan salah satu wilayah yang mengalami perkembangan permukiman dan peningkatan jumlah penduduk setiap tahun sehingga kebutuhan pelayanan air minum diproyeksikan terus meningkat seiring berkembangnya aktivitas sosial dan ekonomi masyarakat (Badan Pusat Statistik, 2025). Sebagian masyarakat masih memanfaatkan sumur gali, sumur bor, maupun sumber air permukaan yang sangat dipengaruhi oleh kondisi musim sehingga pengembangan jaringan perpipaan menjadi kebutuhan strategis untuk meningkatkan keandalan pelayanan air minum. Penelitian mengenai evaluasi jaringan distribusi di berbagai daerah menunjukkan bahwa kombinasi EPANET dengan Quantum GIS mampu menghasilkan pemetaan jaringan yang lebih akurat sekaligus mempermudah identifikasi jalur distribusi yang efisien (Reza et al., 2025). Hasil simulasi jaringan distribusi pada lingkungan kampus maupun kawasan permukiman juga membuktikan bahwa analisis hidrolika berbasis EPANET mampu mengidentifikasi titik-titik tekanan kritis sebelum jaringan dibangun sehingga potensi kesalahan desain dapat diminimalkan (Komala et al., 2025). Perencanaan jaringan perpipaan pada proyek SPAM Regional Umbulan memperlihatkan bahwa kualitas survei lapangan dan validitas data spasial sangat menentukan keberhasilan penyusunan desain distribusi yang memenuhi standar pelayanan teknis (Ghozali & Santoso, 2025). Karakteristik wilayah Ketahun yang terus berkembang menjadikan kebutuhan terhadap survei pemetaan yang sistematis semakin penting sebagai fondasi dalam penyusunan Detail Engineering Design (DED).

Dalam perencanaan jaringan perpipaan, ketersediaan data spasial yang akurat menjadi faktor utama karena informasi mengenai topografi, jaringan jalan, penggunaan lahan, utilitas eksisting, lokasi permukiman, dan elevasi wilayah menentukan efektivitas jalur distribusi yang akan dibangun. Kesalahan dalam penentuan jalur distribusi dapat meningkatkan biaya konstruksi, kehilangan tekanan, potensi kebocoran, serta menurunkan tingkat pelayanan kepada masyarakat sehingga tahap survei tidak dapat diposisikan hanya sebagai aktivitas pendukung proyek. Penelitian mengenai pembentukan District Meter Area menunjukkan bahwa optimalisasi jaringan distribusi sangat bergantung pada ketelitian identifikasi kondisi eksisting jaringan sejak tahap perencanaan (Safira et al., 2023). Kajian mengenai manajemen risiko SPAM perpipaan juga menegaskan bahwa sebagian besar potensi

kegagalan sistem berasal dari ketidakakuratan informasi teknis pada tahap awal perencanaan sehingga diperlukan pendekatan survei yang lebih komprehensif (Bitty et al., 2024). Penelitian jaringan perpipaan di Kecamatan Kota Atambua masih berfokus pada analisis kapasitas distribusi setelah data tersedia sehingga belum memberikan perhatian yang memadai terhadap metodologi penyusunan rencana survei sebagai fondasi penyediaan data primer (Bunganaen et al., 2022). Celah empiris tersebut menunjukkan bahwa literatur lebih banyak menitikberatkan evaluasi jaringan yang telah dirancang dibandingkan pengembangan kerangka survei pemetaan yang mampu menjamin kualitas data sebelum proses desain dilakukan.

Perkembangan teknologi survei dan pemetaan seperti Global Positioning System (GPS), Geographic Information System (GIS), wahana udara nirawak (Unmanned Aerial Vehicle/UAV), serta perangkat lunak analisis hidrolika EPANET telah meningkatkan kemampuan perencana dalam menghasilkan representasi spasial yang lebih presisi dibandingkan pendekatan konvensional (EPANET, 2020). Platform GIS modern memungkinkan integrasi berbagai lapisan data spasial secara simultan sehingga proses analisis jalur perpipaan dapat dilakukan secara lebih efisien dan berbasis bukti (Esri, 2024). Pemanfaatan perangkat lunak QGIS juga memperluas akses terhadap analisis spasial terbuka yang mendukung penyusunan peta digital dengan tingkat akurasi tinggi untuk berbagai kebutuhan infrastruktur air minum (QGIS Development Team, 2024). Meskipun demikian, sebagian besar penelitian masih berorientasi pada simulasi hidrolika dan evaluasi jaringan sehingga belum mengembangkan model rencana survei yang mengintegrasikan tahapan pengumpulan data lapangan, pemetaan digital, dan kebutuhan penyusunan DED secara utuh. Kondisi tersebut menjadi semakin penting pada wilayah berkembang seperti Kabupaten Bengkulu yang sedang mengalami percepatan pembangunan infrastruktur dan peningkatan konektivitas kawasan sehingga kebutuhan terhadap data spasial berkualitas menjadi semakin mendesak (Munizar, 2025). Kebutuhan akan kerangka survei yang sistematis bukan hanya memiliki nilai praktis bagi pelaksanaan proyek, tetapi juga memberikan kontribusi ilmiah terhadap pengembangan metodologi perencanaan jaringan perpipaan SPAM yang lebih adaptif terhadap karakteristik wilayah.

Penelitian ini menempatkan tahap perencanaan survei pemetaan sebagai komponen utama dalam penyusunan Detail Engineering Design jaringan perpipaan SPAM IKK Ketahun, bukan sekadar sebagai aktivitas pendahuluan sebelum proses desain teknis dilakukan. Pendekatan yang digunakan mengintegrasikan kebutuhan data spasial, karakteristik topografi, kondisi eksisting wilayah, serta kebutuhan analisis hidrolika ke dalam suatu kerangka survei yang sistematis sehingga mampu menghasilkan basis data yang valid untuk proses perencanaan jaringan distribusi. Posisi penelitian ini berada pada irisan antara bidang survei dan pemetaan, teknik sumber daya air, serta perencanaan infrastruktur perpipaan dengan menitikberatkan pentingnya kualitas data sebagai determinan utama keberhasilan desain jaringan. Penelitian ini bertujuan menyusun rencana survei pemetaan jaringan perpipaan SPAM IKK Ketahun Kabupaten Bengkulu Utara sebagai dasar penyusunan Detail Engineering Design yang efektif, efisien, dan memenuhi standar teknis penyelenggaraan sistem penyediaan air minum. Kontribusi penelitian diharapkan tidak hanya menghasilkan kerangka operasional survei yang dapat diterapkan pada pembangunan SPAM di wilayah penelitian, tetapi juga memperkaya pendekatan metodologis dalam perencanaan jaringan perpipaan melalui integrasi survei lapangan, analisis spasial, dan kebutuhan desain hidrolika secara terpadu.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan studi empiris dengan pendekatan deskriptif kuantitatif berbasis survei lapangan yang dirancang untuk menghasilkan rencana survei pemetaan jaringan perpipaan Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) Ibu Kota Kecamatan (IKK) Ketahun sebagai dasar penyusunan *Detail Engineering Design* (DED). Arsitektur penelitian disusun dalam empat tahapan yang saling terintegrasi, yaitu persiapan, akuisisi data lapangan, pengolahan data spasial, dan pemodelan hidrolika. Tahap persiapan meliputi identifikasi wilayah pelayanan, penyusunan rencana lintasan survei, penentuan titik kontrol, serta inventarisasi kebutuhan data teknis berdasarkan standar penyelenggaraan SPAM. Akuisisi data dilakukan melalui observasi lapangan dengan memanfaatkan Global Positioning System (GPS) untuk pengambilan koordinat, pengukuran topografi dan elevasi, inventarisasi jaringan jalan, utilitas eksisting, kondisi drainase, penggunaan lahan, kawasan permukiman, serta dokumentasi visual pada lokasi penelitian. Data primer tersebut dipadukan dengan data sekunder yang meliputi peta RBI, RTRW, RDTR, data hidrologi, data pelayanan SPAM eksisting, data kependudukan Badan Pusat

Statistik (BPS), serta standar teknis penyelenggaraan SPAM. Seluruh data spasial diintegrasikan menggunakan perangkat lunak Geographic Information System (GIS) untuk menghasilkan basis data geospasial dan alternatif jalur jaringan perpipaan. Proyeksi jumlah penduduk dilakukan menggunakan metode geometrik, kemudian digunakan sebagai dasar perhitungan kebutuhan air dengan mempertimbangkan kebutuhan domestik, non-domestik, kehilangan air (*Non-Revenue Water*), faktor hari maksimum, dan faktor jam puncak sebelum dilakukan pemodelan hidrolika menggunakan EPANET 2.2.

Proyeksi jumlah penduduk dihitung menggunakan persamaan:

$$P_n = P_0(1 + r)^n$$

P_n = jumlah penduduk pada tahun ke- n ;

P_0 = jumlah penduduk tahun dasar;

r = laju pertumbuhan penduduk;

n = periode proyeksi (tahun).

Kebutuhan air dihitung menggunakan persamaan:

$$Q = P \times q$$

dengan:

Q = kebutuhan air (L/hari atau L/det);

P = jumlah penduduk yang dilayani;

q = kebutuhan air per kapita.

Prosedur pengujian dilakukan melalui simulasi hidrolika terhadap setiap alternatif jaringan yang dihasilkan dari analisis spasial untuk mengevaluasi kesesuaian desain dengan kondisi eksisting wilayah penelitian. Validasi teknis dilakukan secara bertahap melalui pemeriksaan konsistensi data koordinat hasil survei terhadap peta dasar, verifikasi kesesuaian elevasi dan trase jaringan dengan kondisi lapangan, serta pengecekan parameter hidrolika terhadap ketentuan dalam standar perencanaan SPAM. Simulasi menggunakan EPANET 2.2 menghasilkan parameter operasional berupa tekanan (*pressure*), kecepatan aliran (*velocity*), debit (*flow rate*), kehilangan energi (*headloss*), diameter pipa, dan arah aliran pada setiap ruas jaringan sehingga dapat diidentifikasi titik-titik kritis yang memerlukan penyesuaian desain. Evaluasi kinerja sistem dilakukan berdasarkan keterpenuhan tekanan pelayanan, kecepatan aliran yang masih berada pada rentang operasional, kontinuitas distribusi, efisiensi panjang jaringan, serta kesesuaian diameter pipa terhadap debit rencana dan karakteristik topografi. Hasil simulasi kemudian dibandingkan dengan standar teknis penyelenggaraan SPAM untuk menentukan alternatif jaringan yang paling efektif, efisien, dan layak diterapkan sebagai dasar penyusunan *Detail Engineering Design* jaringan perpipaan SPAM IKK Ketahun Kabupaten Bengkulu Utara, sehingga prosedur penelitian dapat direplikasi pada wilayah lain dengan karakteristik spasial yang sebanding.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi Wilayah Penelitian

Kecamatan Ketahun merupakan salah satu wilayah di Kabupaten Bengkulu Utara yang memiliki peranan strategis sebagai pusat pelayanan kawasan di bagian utara kabupaten dengan karakteristik penggunaan lahan yang didominasi oleh kawasan permukiman, lahan perkebunan, fasilitas umum, dan ruang terbuka. Berdasarkan hasil survei lapangan, perkembangan permukiman menunjukkan kecenderungan memanjang mengikuti koridor jalan nasional maupun jalan kabupaten sehingga membentuk pola pertumbuhan linear yang berpengaruh terhadap arah pengembangan jaringan distribusi air minum. Kondisi topografi wilayah penelitian secara umum relatif datar hingga bergelombang ringan, meskipun pada beberapa lokasi ditemukan perubahan elevasi yang cukup signifikan sehingga perlu dipertimbangkan dalam penyusunan trase jaringan perpipaan. Hasil observasi juga memperlihatkan bahwa aksesibilitas antarwilayah cukup baik karena didukung oleh jaringan jalan yang telah berkembang, sehingga memberikan keuntungan dalam proses konstruksi maupun pemeliharaan jaringan distribusi pada masa operasional. Karakteristik fisik wilayah hasil survei

disajikan pada Tabel 3.1 sebagai dasar identifikasi awal dalam penyusunan rencana survei pemetaan jaringan perpipaan SPAM IKK Ketahun.

Tabel 1. Karakteristik Wilayah Penelitian Hasil Survei

Parameter	Hasil Survei
Kondisi Topografi	Relatif datar hingga bergelombang ringan
Penggunaan Lahan Dominan	Permukiman, perkebunan, fasilitas umum
Pola Perkembangan Permukiman	Mengikuti koridor jalan utama
Aksesibilitas	Baik melalui jalan nasional dan jalan kabupaten
Hambatan Fisik	Sungai, saluran irigasi, jembatan, variasi elevasi

Data pada Tabel 1 menunjukkan bahwa karakteristik spasial wilayah memberikan peluang untuk mengembangkan jaringan distribusi yang mengikuti koridor jalan eksisting sehingga dapat mengurangi kebutuhan pembebasan lahan sekaligus meningkatkan efisiensi pelaksanaan konstruksi. Kondisi tersebut sejalan dengan pedoman penyelenggaraan SPAM yang menekankan pentingnya pemanfaatan kondisi eksisting wilayah sebagai dasar penyusunan jaringan distribusi yang efektif dan mudah dioperasikan (Direktorat Jenderal Cipta Karya, 2022).

Hasil identifikasi kondisi eksisting memperlihatkan bahwa pelayanan SPAM perpipaan di Kecamatan Ketahun masih memerlukan pengembangan untuk mengakomodasi peningkatan kebutuhan masyarakat. Sebagian penduduk masih memanfaatkan sumur gali, sumur bor, serta sumber air permukaan sebagai sumber air utama, sehingga kontinuitas pelayanan sangat dipengaruhi oleh kondisi musim dan ketersediaan air baku. Survei lapangan juga mengidentifikasi keberadaan jaringan jalan, utilitas eksisting, drainase, sungai, jembatan, dan bangunan pelayanan publik yang harus dipetakan secara detail karena berpotensi memengaruhi penentuan trase jaringan perpipaan. Hambatan-hambatan tersebut dicatat beserta koordinat dan kondisi geometrinya menggunakan perangkat GPS untuk menghasilkan basis data spasial yang akurat sebelum proses perencanaan dilakukan. Informasi hasil inventarisasi tersebut menjadi acuan dalam menentukan jalur perpipaan yang tidak hanya memenuhi aspek hidrolika, tetapi juga mempertimbangkan kemudahan konstruksi, operasi, dan pemeliharaan jaringan sesuai ketentuan teknis penyelenggaraan SPAM (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2023).

Berdasarkan data kependudukan dan hasil proyeksi menggunakan metode geometrik, jumlah penduduk Kecamatan Ketahun diperkirakan meningkat dari sekitar 15.000 jiwa pada tahun dasar menjadi sekitar 20.190 jiwa pada akhir periode perencanaan selama dua puluh tahun. Pertumbuhan jumlah penduduk tersebut berimplikasi terhadap peningkatan kebutuhan air domestik maupun non-domestik sehingga kapasitas sistem distribusi harus dirancang untuk mampu melayani kebutuhan hingga akhir umur rencana. Perhitungan kebutuhan air menunjukkan bahwa kebutuhan domestik mencapai sekitar 23,37 L/det dan meningkat menjadi sekitar 40,00 L/det setelah memperhitungkan kebutuhan non-domestik, Non-Revenue Water (NRW), faktor hari maksimum, serta faktor jam puncak. Ringkasan hasil proyeksi penduduk dan kebutuhan air disajikan pada Tabel 3.2 sebagai dasar dalam penentuan kapasitas instalasi pengolahan air serta dimensi awal jaringan distribusi. Peningkatan kebutuhan pelayanan tersebut menunjukkan bahwa pengembangan sistem distribusi harus dirancang secara adaptif agar tetap mampu memenuhi kebutuhan masyarakat pada masa mendatang (Badan Pusat Statistik, 2025).

Tabel 2. Proyeksi Penduduk dan Kebutuhan Air Rencana

Parameter	Nilai
Penduduk Tahun Dasar	15.000 jiwa
Penduduk Tahun Rencana	20.190 jiwa
Kebutuhan Air Domestik	23,37 L/det
Debit Kebutuhan Rencana	40,00 L/det
Periode Perencanaan	20 tahun

Analisis terhadap kondisi wilayah menunjukkan bahwa karakteristik topografi, perkembangan permukiman, distribusi fasilitas umum, dan keberadaan berbagai hambatan fisik memberikan pengaruh langsung terhadap strategi pelaksanaan survei pemetaan jaringan perpipaan. Kondisi tersebut mengharuskan proses survei tidak hanya berorientasi pada pengumpulan koordinat lokasi, tetapi juga menghasilkan informasi spasial yang mampu menggambarkan hubungan antara kondisi eksisting dengan kebutuhan pengembangan jaringan distribusi secara menyeluruh. Basis data hasil survei selanjutnya menjadi masukan utama dalam penyusunan Detail Engineering Design (DED), terutama untuk menentukan alternatif trase, dimensi jaringan, kebutuhan struktur penunjang, dan evaluasi kelayakan teknis sebelum dilakukan simulasi hidrolika. Pendekatan tersebut memungkinkan proses perencanaan dilakukan secara lebih sistematis karena setiap keputusan desain didasarkan pada data lapangan yang terukur dan dapat diverifikasi. Hasil identifikasi kondisi wilayah pada tahap ini menjadi fondasi bagi proses perencanaan jaringan perpipaan yang dibahas pada subbab berikutnya.

Perencanaan Jaringan Perpipaan

Tahap perencanaan jaringan perpipaan dilakukan setelah seluruh data hasil survei lapangan diintegrasikan ke dalam sistem informasi geografis (Geographic Information System/GIS) untuk menghasilkan basis data spasial yang menggambarkan kondisi eksisting wilayah secara komprehensif. Pengolahan data meliputi koordinat hasil pengukuran GPS, data topografi, jaringan jalan, penggunaan lahan, utilitas eksisting, batas kawasan permukiman, serta lokasi fasilitas umum yang berpotensi menjadi pusat pelayanan air minum. Hasil analisis spasial menunjukkan bahwa jalur perpipaan yang mengikuti koridor jalan eksisting memberikan tingkat efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan alternatif lainnya karena mampu mengurangi kebutuhan pembebasan lahan, mempermudah akses konstruksi, serta mendukung kegiatan operasi dan pemeliharaan jaringan pada masa pelayanan. Penentuan trase juga mempertimbangkan keberadaan sungai, saluran drainase, jembatan, dan perubahan elevasi sehingga jalur perpipaan dapat dirancang dengan risiko gangguan teknis yang lebih rendah. Pendekatan tersebut sejalan dengan prinsip perencanaan jaringan distribusi air minum yang menempatkan kondisi eksisting wilayah sebagai dasar utama dalam menentukan konfigurasi sistem distribusi yang efektif dan berkelanjutan (Badan Standardisasi Nasional, 2015).

Tabel 3. Hasil Perencanaan Awal Jaringan Perpipaan SPAM IKK Ketahun

Komponen Jaringan	Hasil Perencanaan
Jalur Transmisi	IPA menuju reservoir utama
Jalur Distribusi Utama	Mengikuti koridor jalan utama
Jalur Distribusi Sekunder	Menuju kawasan permukiman
Acuan Penentuan Trase	Jalan eksisting dan kondisi topografi
Pertimbangan Teknis	Efisiensi konstruksi, kemudahan operasi, dan pemeliharaan

Berdasarkan Tabel 3, jaringan distribusi dirancang dalam tiga komponen utama, yaitu jaringan transmisi dari instalasi pengolahan air menuju reservoir, jaringan distribusi utama menuju pusat pelayanan, serta jaringan distribusi sekunder yang melayani kawasan permukiman. Pembagian tersebut bertujuan untuk menjaga kontinuitas pelayanan sekaligus mempermudah pengembangan jaringan apabila terjadi peningkatan kebutuhan air pada masa mendatang. Struktur jaringan yang mengikuti pola perkembangan permukiman juga memberikan fleksibilitas dalam penambahan sambungan rumah tanpa memerlukan perubahan konfigurasi utama secara signifikan. Hasil perencanaan ini memiliki kesesuaian dengan penelitian Rohaina et al. (2024) yang menyatakan bahwa penentuan trase berdasarkan karakteristik spasial kawasan mampu meningkatkan efisiensi distribusi dan mempermudah pengembangan sistem pada wilayah yang mengalami pertumbuhan permukiman.

Perencanaan dimensi awal jaringan dilakukan berdasarkan hasil perhitungan debit rencana yang telah diperoleh pada tahap sebelumnya, kemudian disesuaikan dengan karakteristik topografi dan panjang jalur distribusi pada masing-masing kawasan pelayanan. Setiap ruas jaringan dirancang agar mampu mengalirkan debit rencana tanpa menimbulkan kehilangan tekanan yang berlebihan, sehingga pemilihan diameter pipa dilakukan secara bertahap sebelum proses simulasi hidrolika menggunakan EPANET. Penyusunan jaringan juga memperhatikan kemungkinan pengembangan kawasan pada masa mendatang sehingga konfigurasi sistem tetap memiliki kapasitas cadangan untuk melayani

pertumbuhan jumlah pelanggan. Pendekatan tersebut memberikan fleksibilitas terhadap perubahan kebutuhan pelayanan sekaligus mengurangi potensi rekonstruksi jaringan pada tahap pengembangan berikutnya. Konsep perencanaan seperti ini sejalan dengan hasil penelitian Ghozali dan Santoso (2025) yang menunjukkan bahwa penyusunan jaringan perpipaan sejak tahap awal harus mempertimbangkan proyeksi perkembangan kawasan agar investasi infrastruktur tetap efisien sepanjang umur rencana.

Hasil perencanaan menunjukkan bahwa integrasi data survei lapangan dengan analisis spasial mampu menghasilkan konfigurasi jaringan yang lebih rasional dibandingkan pendekatan yang hanya mengandalkan peta dasar atau interpretasi visual. Informasi koordinat hasil pengukuran GPS, data topografi, dan penggunaan lahan memberikan dasar yang kuat dalam menentukan alternatif trase dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi sehingga potensi perubahan desain pada tahap konstruksi dapat diminimalkan. Pendekatan berbasis GIS juga mempermudah proses evaluasi terhadap setiap alternatif jalur karena seluruh informasi spasial tersimpan dalam satu basis data yang saling terhubung dan mudah diperbarui apabila terjadi perubahan kondisi lapangan. Temuan tersebut mendukung hasil penelitian Reza et al. (2025) yang menyatakan bahwa integrasi GIS dengan pemodelan jaringan mampu meningkatkan ketelitian perencanaan distribusi air minum, sekaligus memperkuat pemanfaatan teknologi geospasial sebagai dasar penyusunan *Detail Engineering Design* (DED). Hasil perencanaan jaringan ini selanjutnya menjadi data masukan utama dalam simulasi hidrolika untuk mengevaluasi kinerja sistem distribusi pada berbagai kondisi operasional.

Analisis Hidrolika Jaringan

Analisis hidrolika dilakukan menggunakan perangkat lunak EPANET 2.2 untuk mengevaluasi kinerja jaringan perpipaan yang telah dirancang berdasarkan hasil survei lapangan dan analisis spasial. Simulasi dilakukan dengan memasukkan parameter berupa debit kebutuhan rencana, elevasi setiap simpul (*node*), panjang ruas pipa, diameter awal pipa, koefisien kekasaran pipa, serta konfigurasi jaringan hasil perencanaan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem distribusi mampu mengalirkan debit rencana ke seluruh wilayah pelayanan dengan tekanan yang masih berada dalam batas operasional yang dipersyaratkan untuk jaringan distribusi air minum. Tekanan pada setiap simpul berada pada kisaran 10–60 mH₂O, sedangkan kecepatan aliran berkisar antara 0,60–2,50 m/det, sehingga masih memenuhi kriteria perencanaan teknis jaringan distribusi air minum. Nilai tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi jaringan yang dirancang telah mampu menjaga keseimbangan antara kapasitas distribusi, efisiensi energi, dan kontinuitas pelayanan sebagaimana direkomendasikan dalam pedoman teknis penyelenggaraan SPAM (EPANET, 2020).

Tabel 4. Hasil Simulasi Hidrolika Jaringan Perpipaan

Parameter	Hasil Simulasi	Kriteria Teknis
Tekanan jaringan	10–60 mH ₂ O	Memenuhi
Kecepatan aliran	0,60–2,50 m/det	Memenuhi
Debit distribusi	±40,00 L/det	Memenuhi
Kondisi aliran	Kontinu	Memenuhi
Headloss	Dalam batas desain	Memenuhi

Hasil pada Tabel 4 menunjukkan bahwa tidak terdapat ruas jaringan yang mengalami kehilangan tekanan secara berlebihan sehingga distribusi air tetap dapat menjangkau seluruh kawasan pelayanan sesuai kapasitas rencana. Beberapa simpul yang berada pada elevasi lebih tinggi memperlihatkan kecenderungan penurunan tekanan dibandingkan simpul lainnya, namun nilainya masih berada pada batas yang dapat diterima sehingga belum memerlukan perubahan konfigurasi jaringan secara signifikan. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa penentuan trase berdasarkan hasil survei topografi telah memberikan pengaruh positif terhadap kinerja hidrolika sistem. Temuan ini memiliki kesesuaian dengan penelitian Harahap et al. (2026) yang menyatakan bahwa pemodelan hidrolika menggunakan EPANET mampu mengidentifikasi titik-titik kritis jaringan sebelum pelaksanaan konstruksi sehingga potensi kegagalan distribusi dapat diminimalkan.

Evaluasi terhadap kehilangan energi (*headloss*) memperlihatkan bahwa setiap ruas pipa masih mampu mengalirkan debit rencana tanpa menimbulkan penurunan tekanan yang mengganggu kontinuitas pelayanan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pemilihan diameter awal pipa telah sesuai

dengan kebutuhan debit dan kondisi topografi wilayah penelitian sehingga tidak diperlukan modifikasi dimensi pipa pada sebagian besar ruas jaringan utama. Simulasi juga memperlihatkan bahwa konfigurasi jaringan memberikan fleksibilitas terhadap peningkatan kebutuhan pelayanan apabila terjadi pertumbuhan jumlah pelanggan pada masa mendatang. Kinerja hidrolika yang stabil menunjukkan bahwa integrasi hasil survei lapangan, analisis spasial, dan pemodelan jaringan mampu menghasilkan rancangan distribusi yang lebih adaptif terhadap karakteristik wilayah. Temuan ini mendukung hasil penelitian Komala et al. (2025) dan Rivai et al. (2023) yang menunjukkan bahwa simulasi EPANET merupakan instrumen yang efektif untuk mengevaluasi performa jaringan distribusi sebelum tahap implementasi fisik dilakukan.

Secara keseluruhan, hasil simulasi mengonfirmasi bahwa rancangan jaringan perpipaan SPAM IKK Ketahun telah memenuhi persyaratan teknis dari aspek tekanan, kecepatan aliran, kontinuitas distribusi, serta efisiensi hidrolika sehingga layak dijadikan dasar dalam penyusunan *Detail Engineering Design* (DED). Penggunaan simulasi pada tahap perencanaan memberikan keuntungan karena berbagai alternatif konfigurasi jaringan dapat dievaluasi tanpa memerlukan perubahan fisik di lapangan, sehingga risiko kesalahan desain dapat ditekan sejak awal proses pembangunan. Integrasi data GPS, GIS, dan pemodelan EPANET juga meningkatkan keandalan proses pengambilan keputusan karena setiap parameter teknis dianalisis berdasarkan kondisi spasial yang diperoleh dari hasil survei lapangan. Pendekatan tersebut memperlihatkan bahwa proses perencanaan jaringan perpipaan tidak hanya berorientasi pada pemenuhan kebutuhan debit, tetapi juga mempertimbangkan efisiensi operasional, keberlanjutan sistem, dan kemudahan pengembangan jaringan pada masa mendatang. Hasil analisis hidrolika ini menjadi dasar ilmiah dalam merumuskan pembahasan mengenai efektivitas pendekatan survei pemetaan dan integrasi teknologi geospasial pada perencanaan SPAM IKK Ketahun.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kegiatan survei pemetaan merupakan tahapan yang menentukan kualitas penyusunan *Detail Engineering Design* (DED) jaringan perpipaan SPAM karena seluruh keputusan teknis pada tahap perencanaan sangat bergantung pada akurasi data lapangan yang diperoleh. Informasi mengenai kondisi topografi, pola penggunaan lahan, perkembangan kawasan permukiman, jaringan jalan, serta keberadaan hambatan fisik memberikan dasar yang kuat dalam menentukan alternatif trase yang layak diterapkan pada wilayah pelayanan. Ketelitian proses survei tidak hanya memengaruhi ketepatan posisi jaringan, tetapi juga berkontribusi terhadap efisiensi biaya konstruksi dan kemudahan pelaksanaan operasi maupun pemeliharaan sistem pada masa mendatang. Pendekatan tersebut sesuai dengan pedoman perencanaan SPAM yang menempatkan survei teknis sebagai tahapan awal dalam menghasilkan sistem distribusi yang memenuhi aspek teknis, ekonomi, dan keberlanjutan (Direktorat Jenderal Cipta Karya, 2022). Temuan ini memperlihatkan bahwa kualitas data awal memiliki hubungan langsung dengan kualitas rancangan jaringan yang dihasilkan sehingga proses survei tidak dapat dipandang sebagai kegiatan administratif semata.

Pemanfaatan teknologi Global Positioning System (GPS) dan Geographic Information System (GIS) memberikan peningkatan akurasi dalam proses identifikasi kondisi eksisting dibandingkan pendekatan pemetaan konvensional yang hanya mengandalkan interpretasi peta dasar. Integrasi koordinat hasil pengukuran lapangan dengan data spasial memungkinkan setiap objek seperti jalan, sungai, utilitas, maupun kawasan permukiman direpresentasikan secara digital sehingga proses analisis trase dapat dilakukan secara lebih objektif. Kemampuan perangkat lunak GIS dalam mengelola berbagai lapisan informasi spasial juga mempermudah evaluasi terhadap beberapa alternatif jalur tanpa harus melakukan pengukuran ulang di lapangan. Hasil tersebut memperkuat pemanfaatan teknologi geospasial modern sebagai instrumen utama dalam penyusunan perencanaan infrastruktur air minum sebagaimana direkomendasikan dalam dokumentasi ArcGIS Pro dan QGIS (Esri, 2024; QGIS Development Team, 2024). Penelitian Reza et al. (2025) juga menunjukkan bahwa integrasi GIS dengan pemodelan jaringan mampu meningkatkan ketelitian perencanaan distribusi air minum sekaligus mempercepat proses evaluasi alternatif desain.

Pemilihan jalur perpipaan yang mengikuti koridor jalan eksisting menunjukkan tingkat efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan alternatif jalur yang melintasi lahan terbuka atau kawasan yang memerlukan pembebasan lahan. Pendekatan tersebut mampu mengurangi kompleksitas konstruksi, mempermudah mobilisasi peralatan, serta memberikan kemudahan akses ketika dilakukan inspeksi maupun pemeliharaan jaringan pada masa operasional. Karakteristik perkembangan permukiman di Kecamatan Ketahun yang cenderung mengikuti jaringan jalan turut mendukung efektivitas strategi tersebut karena distribusi air dapat menjangkau kawasan pelayanan dengan panjang jaringan yang

relatif lebih efisien. Temuan ini memiliki kesesuaian dengan penelitian Bunganaen et al. (2022) dan Rohaina et al. (2024) yang menjelaskan bahwa pemanfaatan koridor jalan sebagai jalur perpipaan memberikan keuntungan dari aspek teknis maupun ekonomi. Penelitian Ghozali dan Santoso (2025) juga menegaskan bahwa konfigurasi jaringan yang mempertimbangkan perkembangan wilayah mampu meningkatkan fleksibilitas sistem terhadap kebutuhan pengembangan pada masa mendatang.

Proyeksi jumlah penduduk dan kebutuhan air memberikan dasar kuantitatif dalam menentukan kapasitas instalasi pengolahan air, dimensi pipa, serta konfigurasi jaringan distribusi yang direncanakan. Pertumbuhan jumlah penduduk selama periode perencanaan menunjukkan bahwa sistem distribusi harus memiliki kapasitas yang tidak hanya memenuhi kebutuhan saat ini, tetapi juga mampu mengakomodasi peningkatan kebutuhan pelayanan pada masa mendatang. Perhitungan debit rencana dengan memasukkan kebutuhan domestik, kebutuhan non-domestik, kehilangan air, faktor hari maksimum, dan faktor jam puncak menghasilkan pendekatan yang lebih representatif terhadap kondisi operasional sebenarnya. Pendekatan tersebut sesuai dengan tata cara perencanaan jaringan distribusi air minum yang mensyaratkan adanya proyeksi kebutuhan pelayanan berdasarkan perkembangan penduduk dan karakteristik kawasan (Badan Standardisasi Nasional, 2015). Dari perspektif pelayanan publik, kecukupan kuantitas dan kontinuitas distribusi air juga merupakan aspek penting dalam penyediaan air minum yang aman dan berkelanjutan (World Health Organization, 2022).

Simulasi hidrolika menggunakan EPANET 2.2 memperlihatkan bahwa konfigurasi jaringan yang dirancang mampu menghasilkan tekanan dan kecepatan aliran yang berada pada rentang operasional sehingga distribusi air dapat berlangsung secara stabil. Evaluasi terhadap parameter tekanan, kecepatan aliran, debit, dan *headloss* memberikan gambaran mengenai kondisi jaringan sebelum pelaksanaan konstruksi sehingga potensi permasalahan dapat diidentifikasi sejak tahap perencanaan. Pendekatan simulasi seperti ini memberikan keuntungan karena setiap perubahan diameter pipa atau konfigurasi jaringan dapat dianalisis terlebih dahulu tanpa menimbulkan konsekuensi biaya konstruksi. Hasil penelitian ini memiliki kesesuaian dengan penelitian Rivai et al. (2023), Komala et al. (2025), dan Harahap et al. (2026) yang menunjukkan bahwa EPANET merupakan perangkat yang efektif dalam mengevaluasi performa jaringan distribusi air minum pada berbagai kondisi operasional. Penggunaan simulasi hidrolika juga meningkatkan keandalan proses pengambilan keputusan karena setiap alternatif desain dapat dibandingkan berdasarkan parameter teknis yang terukur.

Kualitas hasil perencanaan tidak hanya dipengaruhi oleh ketepatan analisis hidrolika, tetapi juga oleh kemampuan mengidentifikasi berbagai potensi risiko sejak tahap survei pemetaan. Hambatan berupa sungai, saluran drainase, perubahan elevasi, maupun utilitas bawah tanah dapat menimbulkan perubahan trase dan peningkatan biaya apabila tidak teridentifikasi pada tahap awal. Integrasi hasil survei dengan analisis spasial memberikan peluang untuk meminimalkan risiko tersebut melalui penyesuaian jalur sebelum proses konstruksi dimulai. Pendekatan ini mendukung konsep manajemen risiko pada sistem penyediaan air minum yang menekankan pentingnya identifikasi potensi kegagalan sejak fase perencanaan sebagai upaya meningkatkan keandalan sistem distribusi (Bitty et al., 2024). Risiko teknis yang dapat dikendalikan sejak awal pada akhirnya akan memberikan dampak positif terhadap efisiensi investasi maupun keberlanjutan pengelolaan infrastruktur.

Penelitian ini juga memiliki relevansi terhadap pengembangan infrastruktur dasar di Kabupaten Bengkulu Utara yang menunjukkan kecenderungan peningkatan jumlah penduduk dan aktivitas pembangunan kawasan. Perubahan karakteristik wilayah tersebut menuntut adanya sistem penyediaan air minum yang mampu berkembang secara bertahap mengikuti kebutuhan masyarakat tanpa mengurangi kualitas pelayanan. Penyusunan rencana survei pemetaan yang sistematis memberikan dasar bagi pemerintah daerah maupun penyelenggara SPAM dalam merancang jaringan distribusi yang lebih adaptif terhadap perkembangan wilayah. Kebutuhan tersebut sejalan dengan arah pembangunan infrastruktur daerah yang menempatkan peningkatan kualitas pelayanan dasar sebagai salah satu prioritas pembangunan wilayah (Badan Pusat Statistik, 2025; Munizar, 2025). Implementasi hasil penelitian juga mendukung penyelenggaraan SPAM yang memenuhi ketentuan teknis sebagaimana diatur dalam regulasi nasional mengenai sistem penyediaan air minum (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2023).

Secara keseluruhan, penelitian ini memperlihatkan bahwa integrasi survei lapangan, teknologi GPS, sistem informasi geografis, serta simulasi hidrolika menghasilkan proses perencanaan jaringan perpipaan yang lebih akurat, sistematis, dan dapat dipertanggungjawabkan secara teknis. Setiap tahapan

saling melengkapi mulai dari pengumpulan data spasial, penyusunan alternatif trase, evaluasi hidrolika, hingga penyusunan dasar *Detail Engineering Design* sehingga kualitas hasil perencanaan tidak hanya ditentukan oleh satu komponen analisis saja. Pendekatan yang diterapkan juga memberikan peluang untuk direplikasi pada wilayah lain dengan karakteristik yang serupa karena menggunakan prosedur yang terstruktur dan berbasis data lapangan. Kontribusi penelitian ini terletak pada penyusunan kerangka survei pemetaan yang mengintegrasikan analisis spasial dan pemodelan hidrolika sebagai dasar pengembangan jaringan distribusi air minum yang efektif, efisien, dan berkelanjutan.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa penyusunan rencana survei pemetaan jaringan perpipaan SPAM IKK Ketahun memberikan dasar teknis yang komprehensif dalam mendukung penyusunan Detail Engineering Design (DED) sistem distribusi air minum. Hasil survei lapangan berhasil mengidentifikasi kondisi eksisting wilayah pelayanan yang meliputi karakteristik topografi, pola penggunaan lahan, jaringan jalan, utilitas, kawasan permukiman, serta berbagai hambatan fisik yang berpengaruh terhadap penentuan trase jaringan perpipaan. Integrasi data hasil pengukuran menggunakan Global Positioning System (GPS) dengan analisis Geographic Information System (GIS) menghasilkan basis data spasial yang akurat sehingga proses penentuan jalur perpipaan dapat dilakukan secara lebih efektif dan efisien. Analisis kebutuhan air berdasarkan proyeksi pertumbuhan penduduk menunjukkan bahwa debit rencana sistem distribusi mencapai sekitar 40 L/det, sehingga pengembangan jaringan perpipaan menjadi kebutuhan yang harus diakomodasi untuk menjamin kontinuitas pelayanan pada periode perencanaan. Konfigurasi jaringan yang dirancang mengikuti koridor jalan eksisting mampu meningkatkan efisiensi pelaksanaan konstruksi sekaligus memberikan kemudahan dalam kegiatan operasi dan pemeliharaan sistem. Hasil tersebut menegaskan bahwa kualitas data hasil survei menjadi faktor utama dalam menghasilkan perencanaan jaringan distribusi yang memenuhi aspek teknis dan mendukung pengembangan pelayanan air minum secara berkelanjutan.

Simulasi hidrolika menggunakan EPANET 2.2 menunjukkan bahwa jaringan perpipaan yang direncanakan mampu memenuhi persyaratan teknis dari aspek tekanan, kecepatan aliran, debit distribusi, dan kehilangan energi sehingga layak dijadikan dasar dalam penyusunan DED SPAM IKK Ketahun. Integrasi antara survei lapangan, pemetaan digital, analisis spasial, dan pemodelan hidrolika menghasilkan proses perencanaan yang lebih sistematis serta mampu meminimalkan potensi kesalahan desain sebelum tahap konstruksi dilaksanakan. Pendekatan tersebut memberikan manfaat praktis berupa peningkatan akurasi pengambilan keputusan teknis sekaligus efisiensi biaya pengembangan jaringan distribusi air minum. Kerangka survei pemetaan yang dihasilkan dalam penelitian ini juga memiliki potensi untuk diterapkan pada wilayah lain yang memiliki karakteristik geografis dan kebutuhan pelayanan yang sebanding. Kontribusi penelitian tidak hanya terletak pada penyusunan rencana jaringan perpipaan, tetapi juga pada penguatan pendekatan metodologis melalui integrasi teknologi geospasial dan simulasi hidrolika dalam perencanaan infrastruktur SPAM. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi referensi bagi pemerintah daerah, perencana, maupun penyelenggara SPAM dalam mengembangkan sistem penyediaan air minum yang efektif, efisien, adaptif, dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Pusat Statistik. (2025). Kabupaten Bengkulu Utara Dalam Angka. BPS Kabupaten Bengkulu Utara.
- Badan Standardisasi Nasional. (2002). SNI 19-6728.1-2002 Penyusunan Neraca Sumber Daya Air. BSN: Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. (2015). SNI 7509:2011 Tata Cara Perencanaan Teknik Jaringan Distribusi dan Unit Pelayanan Sistem Penyediaan Air Minum. Jakarta: BSN.
- Bitty, S. E., Hendratta, L. A., Thambas, A. H., & Malingkas, G. (2024). Manajemen risiko pada sistem penyediaan air minum (SPAM) perpipaan dengan metode failure mode and effect analysis dan fault tree analysis di Kabupaten Minahasa Utara. *PADURAKSA: Jurnal Teknik Sipil Universitas Warmadewa*, 13(2), 138-147. <https://doi.org/10.22225/pd.13.2.10108.138-147>
- Bunganaen, W., Moruk, M., & Udiana, I. (2022). Analisis Jaringan Perpipaan Air Bersih Kecamatan Kota Atambua Kabupaten Belu. *JURNAL FORUM TEKNIK SIPIL (J-ForTekS)*, 2 (2), 55-65. <https://doi.org/10.35508/forteks.v2i2.8330>

- Direktorat Jenderal Cipta Karya. (2022). *Pedoman Teknis Sistem Penyediaan Air Minum*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat: Jakarta.
- EPANET. (2020). *EPANET 2.2 User Manual*. U.S. Environmental Protection Agency.
- Esri. (2024). *ArcGIS Pro Documentation*. <https://pro.arcgis.com>
- Ghozali, B., & Santoso, S. B. (2025). Perencanaan Jaringan Perpipaan pada Proyek SPAM Regional Umbulan Jawa Timur untuk Lokasi Sidoarjo. *Jurnal KaLIBRASI: Karya Lintas Ilmu Bidang Rekayasa Arsitektur, Sipil, Industri*, 8(1), 46-57. <https://doi.org/10.37721/kalibrasi.v8i1.1534>
- Harahap, M. P., Rambe, M. R., & Pohan, R. F. (2026). Pemodelan dan Evaluasi Jaringan Distribusi Air Bersih Menggunakan EPANET 2.2 pada PDAM Tirta Ayumi Kota Padangsidempuan. *Mutiara: Jurnal Penelitian dan Karya Ilmiah*, 4(2), 01-14. <https://doi.org/10.59059/mutiara.v4i2.2960>
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2018). *Modul Perencanaan Sistem Penyediaan Air Minum*. Kementerian PUPR: Jakarta.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2023). *Peraturan Menteri PUPR Nomor 13 Tahun 2023 tentang Penyelenggaraan Sistem Penyediaan Air Minum*. Kementerian PUPR: Jakarta.
- Komala, P. S., Nur, A., Ridwan, R., & Emida, S. (2025). Simulasi Sistem Jaringan Distribusi Air Minum di Kampus Unand Menggunakan EPAnet. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 23(3), 703-711. <https://doi.org/10.14710/jil.23.3.703-711>
- Munizar, R. (2025). Identifikasi Faktor dan Model Tahapan Pengembangan Infrastruktur Pariwisata Terintegrasi di Provinsi Bengkulu. *Journal of Engineering and Applied Technology*, 1(2), 248-260.
- QGIS Development Team. (2024). *QGIS Documentation*. <https://docs.qgis.org>
- Reza, M. I. A., Purnomo, D. A., & Sujatmiko, H. (2025). Evaluation of the Distribution Pipe Network System in Adi Mas Giri Housing, Banyuwangi, using E-PANET 2.0 and Quantum GIS. *Jurnal Teknik Sipil*, 25(1), 1677-1687. <https://doi.org/10.26418/jts.v25i1.90313>
- Rivai, M., Gasali, M., & Jusatria, J. (2023). Analisis Jaringan Distribusi Air Bersih Menggunakan Software Epanet 2.0. *SAINSTEK*, 11(1), 72–78. <https://doi.org/10.35583/js.v11i1.184>
- Rohaina, I., Utomo, K. P., & Kadaria, U. (2024). Perencanaan Pengembangan Sistem Jaringan Distribusi Air Bersih di Kecamatan Teluk Keramat Kabupaten Sambas. *Casuarina: Environmental Engineering Journal*, 2(1), 60–66. <https://doi.org/10.33506/ceej.v2i1.3772>
- Safira, A. N. N., Badriani, R. E., & Rohman, A. (2023). Pembentukan Dan Analisis District Meter Area dalam Perencanaan Jaringan Perpipaan di Kecamatan Sukowono. *Jurnal Universal Technic*, 2(1), 19-32. <https://doi.org/10.58192/unitech.v2i1.623>
- Sucahyo, S. E., Badaruddin, M., & Suheby, A. (2023). Perencanaan Pengembangan Jaringan Distribusi Air Bersih dengan Menggunakan Simulasi EPANET 2.0 Tahun 2023–2027. *Jurnal Georafflesia*, 8(2), 149-155. <https://doi.org/10.32663/georaf.v8i2.4289>
- World Health Organization. (2022). *Guidelines for Drinking-water Quality (4th ed.)*. Geneva: World Health Organization.