Syntax Literate: Jurnal Ilmiah Indonesia
p–ISSN: 2541-0849 e-ISSN: 2548-1398
Vol. 11, No. 11, November 2026

Kajian Kelayakan Teknis dan Finansial Pengembangan Jaringan Transmisi Air Bersih untuk Pemenuhan Kebutuhan Citraland Gamacity dari Perumda Tirtanadi

Bagas Ananda Putra*, Ahmad Perwira Mulia Tarigan, Gina Cynthia R. Hasibuan
Universitas Sumatera Utara, Indonesia
Email: bagasanandaa@gmail.com*, a.perwira@usu.ac.id, gina.hasibuan@usu.ac.id

Keywords:
Clean Water Demand; Transmission Network; Financial Feasibility; Infrastructure Investment

Abstract
CitraLand GamaCity, a ±200-hectare integrated township in eastern Medan with an ultimate capacity of 2,624 housing units and 13,120 residents, remains unconnected to Perumda Tirtanadi's piped network and depends on limited internal treatment and deep wells, exposing residents to pressure instability, supply interruptions, and land subsidence risk. This study aims to quantify ultimate water demand, verify the hydraulic feasibility of a new transmission main, and assess its financial viability under multiple demand and tariff scenarios. Water demand was projected using Permen PUPR 27/2016 criteria with 30% NRW, hydraulic performance was simulated in EPANET 2.2 and validated against manual Hazen-Williams calculations, and financial feasibility was evaluated through NPV, BCR, IRR, MIRR, and payback period over a 25-year horizon at a 6% discount rate across 30%, 50%, and 100% demand realization and RT3, RT4, and RT5 tariffs. Ultimate demand reaches 40.03 L/s on average, 46.04 L/s on the maximum day, and 62.45 L/s at peak hour. A 2,472 m PVC RRJ pipeline of 200 mm diameter yields a velocity of 1.27 m/s, total headloss of 18.417 m, and residual pressure of 12.58 m, satisfying the ≥11 m standard with EPANET deviation below 0.4%. Financially, RT4 and RT5 are viable across all scenarios (NPV Rp14.07–106.02 billion; BCR 1.57–3.61; MIRR 14.13%–21.91%), whereas RT3 fails under the pessimistic scenario (NPV −Rp1.299 billion; BCR 0.95). The project is technically and financially feasible, with RT4 recommended as the most balanced tariff.

Kata Kunci:
Air Bersih; EPANET 2.2; Jaringan Transmisi; Kelayakan Finansial; Perumda Tirtanadi; Skenario Investasi.

Abstrak
CitraLand GamaCity, kawasan terpadu seluas ±200 hektar di timur Medan dengan kapasitas akhir 2.624 unit hunian dan 13.120 jiwa, belum terhubung ke jaringan perpipaan Perumda Tirtanadi dan masih bergantung pada pengolahan internal terbatas serta sumur bor dalam, sehingga rentan terhadap ketidakstabilan tekanan, gangguan pasokan, dan risiko amblesan tanah. Penelitian ini bertujuan mengkuantifikasi kebutuhan air pada kondisi ultimate, memverifikasi kelayakan hidraulik pipa transmisi baru, dan menilai kelayakan finansialnya pada berbagai skenario kebutuhan dan tarif. Kebutuhan air diproyeksikan berdasarkan kriteria Permen PUPR 27/2016 dengan NRW 30%, kinerja hidraulik disimulasikan dengan EPANET 2.2 dan divalidasi terhadap perhitungan manual Hazen-Williams, serta kelayakan finansial dievaluasi melalui NPV, BCR, IRR, MIRR, dan payback period selama 25 tahun pada tingkat diskonto 6% untuk realisasi kebutuhan 30%, 50%, dan 100% serta tarif RT3, RT4, dan RT5.

Kebutuhan ultimate mencapai 40,03 L/detik rata-rata, 46,04 L/detik hari maksimum, dan 62,45 L/detik jam puncak. Pipa PVC RRJ 200 mm sepanjang 2.472 m menghasilkan kecepatan 1,27 m/detik, total headloss 18,417 m, dan sisa tekanan 12,58 m yang memenuhi standar ≥11 m dengan deviasi EPANET di bawah 0,4%. Secara finansial, RT4 dan RT5 layak pada seluruh skenario (NPV Rp14,07–106,02 miliar; BCR 1,57–3,61; MIRR 14,13%–21,91%), sedangkan RT3 tidak layak pada skenario pesimis (NPV −Rp1,299 miliar; BCR 0,95). Proyek ini layak secara teknis dan finansial, dengan RT4 direkomendasikan sebagai tarif paling seimbang.

PENDAHULUAN

Air merupakan salah satu kebutuhan dasar manusia yang memiliki peran sangat vital dalam menunjang kesehatan, kualitas hidup, kesejahteraan sosial, dan keberlangsungan aktivitas perekonomian masyarakat (Prabu, 2017). Penyediaan sistem air bersih perpipaan yang andal dan berkelanjutan merupakan prasyarat mutlak dalam mendukung pembangunan kawasan permukiman modern terpadu, sektor komersial, maupun pusat pertumbuhan perkotaan. Di Kota Medan, permintaan terhadap pasokan air bersih terus mengalami peningkatan signifikan seiring dengan percepatan urbanisasi dan pembangunan kawasan residensial skala besar. Salah satu pusat pertumbuhan hunian modern terpadu yang sangat berkembang pesat di wilayah timur Kota Medan adalah Kawasan CitraLand GamaCity.

Kawasan CitraLand GamaCity dikembangkan sebagai kota mandiri modern seluas ±200 hektar dengan konsep pembangunan komprehensif yang mencakup klaster hunian tapak, kawasan perbelanjaan dan niaga, sarana pendidikan, fasilitas rekreasi air, dan ruang publik hijau. Dengan luas kawasan dan kepadatan aktivitas tersebut, kebutuhan air bersih diperkirakan mencapai ±2.520 m^3/hari (setara debit kontinu puluhan liter per detik). Namun, hingga saat ini kawasan tersebut belum terintegrasi ke dalam jaringan distribusi perpipaan milik Perusahaan Umum Daerah (Perumda) Tirtanadi Provinsi Sumatera Utara secara memadai. Kebutuhan air penghuni saat ini masih bertumpu pada pengolahan internal melalui instalasi pengolahan air (Water Treatment Plant/WTP) berskala terbatas dan pengambilan air tanah dalam melalui sumur bor (deep well) pribadi pada masing-masing unit kaveling.

Kondisi ketergantungan terhadap sumur bor dan fasilitas pengolahan internal mandiri menimbulkan berbagai kerentanan teknis dan lingkungan. Pertama, terjadi ketidakmerataan tekanan air yang drastis pada jam puncak aktivitas warga. Kedua, kontinuitas suplai air bersih sering terganggu bahkan terputus pada musim kemarau panjang akibat menurunnya muka air tanah (*water table drawdown*). Ketiga, terdapat potensi ancaman penurunan kualitas air baku, risiko intrusi mineral berbahaya, serta ancaman amblesan tanah (*land subsidence*) akibat ekstraksi air tanah secara masif dan tidak terkontrol. Kondisi ini bertentangan dengan prinsip pemenuhan Standar Pelayanan Minimal (SPM) air minum perkotaan sebagaimana diamanatkan dalam regulasi nasional.

Sebagai Badan Usaha Milik Daerah (BUMD) utama penyelenggara Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) di Sumatera Utara, Perumda Tirtanadi dituntut mampu memperluas cakupan layanan ke kantong-kantong permukiman baru guna meningkatkan akses air minum layak. Salah satu langkah strategis yang sangat rasional adalah melakukan penambahan dan interkoneksi jaringan transmisi air bersih dari sistem eksisting Perumda Tirtanadi menuju kawasan CitraLand GamaCity. Penambahan jaringan transmisi ini dirancang untuk

mengalirkan air curah secara langsung menuju reservoir internal perumahan, sehingga menjamin kapasitas suplai yang cukup, kestabilan tekanan hidraulik, dan kontinuitas 24 jam. Akan tetapi, investasi infrastruktur perpipaan transmisi menuntut justifikasi kelayakan yang komprehensif, baik dari sisi rekayasa teknis hidraulika maupun kelayakan ekonomi finansial. Secara teknis, perencanaan pipa transmisi baru harus memastikan bahwa kapasitas debit, diameter pipa, kecepatan aliran, dan kehilangan energi (*headloss*) memenuhi kriteria teknis Kementerian PUPR (Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2016) tanpa mengganggu distribusi eksisting pipa induk. Secara finansial, investasi pipa baru memerlukan alokasi *Capital Expenditure* (CAPEX) dan pengeluaran rutin *Operational Expenditure* (OPEX) yang cukup besar (Diasa et al., 2022; Hardi et al., 2025; Nabila et al., 2021). Oleh sebab itu, diperlukan evaluasi berbasis indikator keuangan investasi terdiskon, yaitu *Net Present Valu*e (NPV), *Benefit Cost Ratio* (BCR), *Internal Rate of Return* (IRR), *Modified Internal Rate of Return* (MIRR), dan *Payback Period* (PP), yang diuji melalui skenario sensitivitas bertingkat (pesimis 30%, moderat 50%, dan optimis 100%) serta berbagai alternatif golongan tarif rumah tangga.

Literatur akademik yang ada telah memberikan dasar tertentu dalam kajian kelayakan sistem penyediaan air, namun terdapat dua keterbatasan yang perlu dicatat. Pertama, sebagian besar penelitian di Indonesia berfokus pada perencanaan instalasi pengolahan air (IPA) atau jaringan distribusi (Nanda et al., 2023; Primandani et al., 2022; Wibowo & Slamet, 2024), sementara perhatian terhadap analisis terpadu teknis-finansial pada skenario spesifik "pipa transmisi dari pipa induk eksisting menuju kawasan perumahan tertutup baru" masih terbatas. Purba et al. (2023) dalam analisis investasi pengembangan SPAM IKK Patumbak di Kabupaten Deli Serdang menggunakan simulasi Monte Carlo untuk mengevaluasi kelayakan ekonomi dan finansial, tetapi objek analisisnya adalah perluasan sistem penyediaan air regional secara keseluruhan, bukan koneksi transmisi khusus untuk satu kawasan. Kedua, literatur internasional mengenai integrasi desain hidraulik pipa transmisi dan evaluasi finansial umumnya berorientasi pada sistem penyediaan air publik dengan misi pelayanan universal (Gracia et al., 2026; Julca-Varas et al., 2025; Kombo Mpindou et al., 2022), dan relatif jarang membahas keberlanjutan finansial dalam model bisnis "pasokan curah" (*bulk supply*) yang dikoordinasikan dengan pengembang swasta. Kesenjangan penelitian ini berarti bahwa ketika perusahaan air menghadapi kawasan yang dikembangkan oleh modal swasta dengan permintaan terkonsentrasi dan jalur pertumbuhan yang jelas, belum tersedia kerangka keputusan yang dapat langsung dijadikan rujukan untuk menyeimbangkan pengembalian investasi jaringan dengan keterjangkauan biaya bagi pengguna akhir.

Urgensi penelitian ini bersumber dari tiga tekanan yang saling memperkuat. Pertama, pembangunan CitraLand GamaCity telah memasuki tahap menengah; apabila pipa transmisi tidak selesai bersamaan atau lebih awal dari serah terima hunian, penduduk baru akan terus terkunci pada ketergantungan terhadap air tanah, dan biaya peralihan di masa depan akan berlipat ganda. Kedua, data pemantauan amblesan tanah di Medan secara jelas mengarah pada risiko tak terbalikkan akibat eksploitasi air tanah berlebihan; setiap tahun keterlambatan koneksi ke sistem penyediaan air terpusat berarti satu tahun tambahan kerugian bersih pada akuifer. Ketiga, Perumda Tirtanadi sebagai badan penyelenggara penyediaan air regional menghadapi kendala ganda antara memperluas cakupan layanan dan menjaga kesehatan finansial, sehingga setiap proyek koneksi berskala besar memerlukan keseimbangan yang dapat

dipertanggungjawabkan antara pengembalian investasi dan kewajiban pelayanan publik. Dalam situasi ini, sebuah kajian yang sekaligus menjawab "bagaimana pipa dirancang" dan "bagaimana biaya dipulihkan" memiliki nilai keputusan yang jauh lebih tinggi daripada laporan teknis atau perhitungan finansial satu dimensi.

Kebaruan akademik penelitian ini terletak pada upaya menjembatani celah metodologis antara rekayasa penyediaan air dan keuangan infrastruktur. Pada tataran teknis, penelitian menggunakan pemodelan hidraulik EPANET 2.2 (Oyewole et al., 2024; Rossman et al., 2020; Yafi et al., 2023) untuk melakukan simulasi steady-state dan extended-period pada pipa transmisi sepanjang 2.472 meter guna memverifikasi apakah pemilihan diameter, pengendalian kecepatan aliran, dan tekanan sisa di ujung jaringan memenuhi persyaratan normatif SNI 7509:2011 (Badan Standardisasi Nasional [BSN], 2011) dan Permen PUPR 27/2016 (Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2016). Pada tataran finansial, penelitian membangun sistem evaluasi multi-indikator yang mencakup NPV, BCR, IRR, MIRR, dan payback period, serta merancang skenario silang antara tiga tingkat realisasi kebutuhan (30%, 50%, 100%) dan tiga golongan tarif (RT3, RT4, RT5) untuk menguji ketahanan finansial proyek di berbagai jalur komersialisasi. Keunikan kerangka "koping hidraulik-finansial" ini terletak pada penempatan parameter rekayasa (diameter pipa, koefisien kekasaran, elevasi node) dan parameter finansial (komposisi CAPEX, komposisi OPEX, struktur tarif) dalam ruang keputusan yang sama, sehingga pipa transmisi berubah dari sekadar aset teknis menjadi objek investasi infrastruktur yang dapat dievaluasi pengembaliannya. Bagi Perumda Tirtanadi dan operator penyediaan air regional sejenis, kerangka ini menawarkan paradigma analisis yang dapat direplikasi: sebelum terhubung ke kawasan perumahan tertutup mana pun, terlebih dahulu menguji kemampuan swadaya proyek di bawah berbagai asumsi kebutuhan dan strategi tarif, sehingga terhindar dari jebakan umum "mampu membangun, tetapi tidak mampu memelihara".

Berdasarkan latar belakang dan kesenjangan tersebut, penelitian ini menetapkan tiga tujuan yang bersifat bertahap. Pertama, pada kondisi pengembangan akhir, penelitian mengkuantifikasi secara tepat kebutuhan air harian rata-rata, harian maksimum, dan jam puncak CitraLand GamaCity, lalu menyelesaikan desain hidraulik pipa transmisi agar pada kondisi paling tidak menguntungkan pun tekanan di ujung jaringan tetap tidak kurang dari 11 meter kolom air. Kedua, dengan menggunakan struktur biaya Perumda Tirtanadi saat ini dan sistem tarif yang diusulkan, penelitian menghitung arus kas proyek selama periode evaluasi 25 tahun dan menilai kelayakan finansialnya, serta mengidentifikasi batas laba-rugi proyek pada berbagai skenario. Ketiga, penelitian mengidentifikasi skema tarif yang, dalam kondisi ketidakpastian tingkat realisasi kebutuhan, mampu sekaligus menjamin pengembalian investasi perusahaan air dan keterjangkauan biaya bagi pengguna komunitas, sehingga dapat menjadi dasar kuantitatif bagi negosiasi kedua pihak. Ketiga tujuan ini membentuk rantai logika: tanpa proyeksi kebutuhan yang akurat, desain hidraulik kehilangan dasar skala; tanpa skema hidraulik yang tervalidasi, estimasi CAPEX kehilangan kredibilitas rekayasa; dan tanpa analisis finansial yang menghubungkan CAPEX dengan aliran pendapatan, solusi teknis tidak dapat ditransformasikan menjadi keputusan bisnis yang dapat dieksekusi.

Makna penelitian ini pada akhirnya tercermin pada tiga tingkat penerima manfaat. Bagi Perumda Tirtanadi, rentang kelayakan finansial dan rekomendasi tarif yang dihasilkan penelitian ini secara langsung mendukung negosiasi perjanjian pasokan curah dengan

pengembang, sehingga perusahaan dapat menjaga batas finansialnya sekaligus memikul tanggung jawab perluasan pelayanan publik. Bagi penduduk dan pengelola CitraLand GamaCity, koneksi ke sistem penyediaan air terpusat berarti perbaikan substantif dalam keamanan air, stabilitas tekanan, dan prediktabilitas biaya jangka panjang, sekaligus mengurangi risiko kepatuhan akibat pengetatan regulasi air tanah. Bagi tata kelola sumber daya air yang lebih luas di kawasan metropolitan Medan, penelitian ini menyediakan templat argumentasi yang dapat digeneralisasi: bagaimana membuktikan secara kuantitatif bahwa mengintegrasikan kawasan perumahan tertutup ke dalam jaringan publik layak secara ekonomi, diperlukan secara lingkungan, dan matang secara teknis ketika semakin banyak proyek pengembangan serupa menghadapi pilihan yang sama, efek demonstrasi templat ini akan melampaui batas satu proyek tunggal.

METODE PENELITIAN

Lokasi dan Objek Penelitian

Penelitian dilaksanakan di wilayah pelayanan Perumda Tirtanadi Provinsi Sumatera Utara, khususnya di bawah unit operasional Cabang Tuasan, Kota Medan. Objek studi dipusatkan pada perencanaan jaringan transmisi air bersih menuju kawasan permukiman modern CitraLand GamaCity. Secara administratif, kawasan ini berlokasi di Jalan Boulevard Raya No. 01, Kelurahan Kenangan Baru, Kecamatan Percut Sei Tuan, Kabupaten Deli Serdang, Sumatera Utara, yang berbatasan langsung dengan perimeter timur Kota Medan. Titik awal pengambilan air (*tapping point*) berada pada pipa induk transmisi eksisting Ø800 mm di Jl. M. Saman, kemudian ditarik menyusuri jaringan jalan umum dan jembatan pipa menuju bak penampung (*ground reservoir*) rencana di kawasan CitraLand GamaCity.

Jenis dan Sumber Data

Data yang dihimpun dalam penelitian ini mencakup data primer dan data sekunder guna menjamin keakuratan analisis teknis dan finansial:

Data Primer: Diperoleh langsung melalui pengukuran lapangan terestris, survei pelacakan rute menggunakan GPS Garmin untuk menentukan koordinat dan elevasi titik kritis, pengukuran tekanan sisa dan debit aktual di lapangan, serta wawancara teknis mendalam bersama staf teknik Perumda Tirtanadi Cabang Tuasan.

Data Sekunder: Dikumpulkan dari dokumen masterplan pengembang CitraLand GamaCity, database sistem SCADA Perumda Tirtanadi, log sheet operasional Treated Water Pump (TWP) IPAM Limau Manis, Standar Harga dan Upah Perumda Tirtanadi tahun 2026, serta ketentuan teknis Permen PUPR No. 27/PRT/M/2016 dan SNI 7509:2011.

Sebagai landasan verifikasi dan kontrol hasil analisis teknis hidraulika, parameter standar perencanaan Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Standar Parameter Teknis Perencanaan Sistem Transmisi Air Minum

Parameter Teknis	Standar / Nilai Rujukan	Dasar Regulasi / Acuan
Tekanan Minimum Jaringan Transmisi / Distribusi Utama	≥ 11,0 – 15,0 meter kolom air	SNI 7509:2011; Permen PU 18/2007
Tekanan Sisa Minimum Sambungan / Inlet Reservoir	≥ 7,5 – 10,0 meter kolom air	SNI 7509:2011; Pedoman SPAM
Kecepatan Aliran Minimum (Self-Cleaning Velocity)	0,3 – 0,6 m/detik (mencegah endapan)	SNI 03-7065-2005; Permen PU 18/2007
Kecepatan Aliran Maksimum Pipa Plastik (PVC/HDPE)	2,0 – 3,0 m/detik (mencegah hammer)	SNI 03-7065-2005; Permen PU 18/2007
Kecepatan Aliran Ekonomis Pipa Transmisi	0,8 – 1,5 m/detik (desain 1,27 m/s)	Kriteria Desain Ditjen Cipta Karya
Konsumsi Air Domestik Kota Sedang / Besar	120 – 150 Liter/kapita/hari	Permen PUPR No. 27/PRT/M/2016
Kontinuitas Suplai Aliran Air	24 Jam / hari secara kontinu	Permen PUPR No. 27/PRT/M/2016
Periode Horizon Evaluasi Investasi SPAM	15 – 25 Tahun (ditetapkan 25 tahun)	Permen PUPR No. 27/PRT/M/2016

Tahapan Pelaksanaan Penelitian

Penelitian dilakukan melalui tujuh tahapan sistematis yang saling berkesinambungan:

1) **Tahap Identifikasi dan Pengumpulan Data**

Mengumpulkan data spasial topografi, data teknis IPA Limau Manis, data operasional SCADA Booster Cemara, dan masterplan perumahan.

2) **Tahap Analisis Kebutuhan Air**

Menghitung kebutuhan domestik, non-domestik, kehilangan air (NRW 30%), serta fluktuasi debit hari maksimum dan jam puncak pada kondisi saturasi (ultimate development).

3) **Tahap Perencanaan Geometrik dan Teknis**

Menentukan trase pipa 2.472 m, menghitung diameter pipa ekonomis 200 mm, memilih material PVC RRJ dan baja pada crossing jembatan, serta merancang reservoir 500 m^3.

4) **Tahap Simulasi Hidraulika EPANET 2.2**

Memodelkan junction, pipa, koefisien kekasaran Hazen-Williams, dan mengevaluasi tekanan sisa, kecepatan aliran, serta total headloss.

5) **Tahap Estimasi CAPEX dan OPEX**

Menyusun RAB investasi fisik awal (Tahun ke-0) dan menghitung proyeksi OPEX tahunan dengan mempertimbangkan eskalasi inflasi 6% per tahun.

6) **Tahap Analisis Kelayakan Finansial**

Menghitung aliran kas bersih dan mengevaluasi indikator NPV, BCR, IRR, MIRR, dan Payback Period pada tingkat diskonto COC 6%.

7) **Tahap Analisis Skenario dan Rekomendasi**

Menguji ketahanan proyek pada tingkat pelayanan 30%, 50%, dan 100% terhadap tiga alternatif tarif (RT3, RT4, dan RT5).

Formulasi dan Persamaan Analisis

Dalam analisis hidraulika dan investasi finansial, digunakan persamaan-persamaan teoritis standar berikut:

1. Persamaan Kontinuitas Aliran: $Q = A \times v \rightarrow D = \sqrt{[(4 \times Q) / (\pi \times v)]}$
2. Kehilangan Tinggi Tekan Gesekan Mayor Hazen-Williams:

$$Hf = 10{,}666 \times Q^{1{,}852} \times C^{-1{,}852} \times D^{-4{,}87} \times L$$

3. Kehilangan Tinggi Tekan Minor Komponen: $hm = \Sigma [K \times v^2 / (2g)]$
4. Kriteria Kelayakan Finansial:

$$NPV = \Sigma [(Bt - Ct) / (1 + i)^t]; \quad BCR = [\Sigma (Bt / (1 + i)^t)] / [\Sigma (Ct / (1 + i)^t)]; \text{ dan}$$

$$MIRR = [(FV \text{ Kas Positif}) / (PV \text{ Kas Negatif})]^{(1/n)} - 1$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Kebutuhan Air Bersih (Water Demand Analysis)

Perencanaan sistem transmisi air bersih menuju CitraLand GamaCity mengadopsi pendekatan kondisi jenuh fisik (saturated / ultimate development condition). Hal ini dilandasi fakta bahwa CitraLand GamaCity merupakan perumahan mandiri terencana dengan batas perimeter fisik yang definitif seluas ±200 hektar serta ketetapan jumlah kaveling unit hunian yang terikat masterplan resmi. Oleh karena itu, pendekatan proyeksi penduduk geometrik atau eksponensial tak terbatas tidak tepat digunakan karena pertumbuhan penduduk kawasan dibatasi oleh kapasitas fisik hunian akhir. Berdasarkan masterplan, kapasitas akhir kawasan adalah sebanyak 2.624unit rumah. Dengan mengacu pada kajian demografi permukiman perkotaan (Imamuddin & Mochammad, 2019), rata-rata jumlah penghuni diestimasi sebesar 5 jiwa per rumah tangga, sehingga populasi rencana ultimate ditetapkan sebesar 13.120 jiwa secara konstan selama horizon perencanaan 25 tahun (2025–2050).

Kebutuhan Domestik, Non-Domestik, dan Non-Revenue Water (NRW)

Berdasarkan Permen PUPR No. 27/PRT/M/2016 untuk kategori kota sedang/besar, konsumsi air domestik ditetapkan sebesar 150 L/kapita/hari. Dengan tingkat cakupan Sambungan Rumah (SR) 100%, kebutuhan domestik SR adalah 1.968.000 L/hari (22,78 L/detik). Sesuai pedoman SPAM, dialokasikan pelayanan Hidran Umum (HU) untuk 20% populasi (2.624 jiwa) dengan standar konsumsi 30 L/jiwa/hari, yang menghasilkan debit 78.720 L/hari (0,91 L/detik). Akumulasi total kebutuhan air domestik mencapai 23,69 L/detik.

Untuk menunjang fasilitas komersial, ruko niaga, fasilitas umum, dan perkantoran, kebutuhan air non-domestik dihitung sebesar 30% dari kebutuhan domestik, yaitu sebesar 7,11 L/detik. Penjumlahan komponen domestik dan non-domestik menghasilkan kebutuhan air bersih bersih (net demand) sebesar 30,80 L/detik. Selanjutnya, diperhitungkan faktor kehilangan air (Non-Revenue Water/NRW) sebesar 30,00% (9,24 L/detik). Angka NRW 30% dipilih secara konservatif untuk mengakomodasi potensi kebocoran teknis dan operasional flushing, sekaligus mencerminkan perbaikan terhadap tingkat kehilangan air aktual Perumda Tirtanadi yang berada di kisaran ~38%.

Dengan memperhitungkan kehilangan air 30%, kebutuhan air rata-rata harian (Qrata-rata) yang harus diproduksi dan disuplai menjadi 40,03 L/detik. Dengan menerapkan faktor fluktuasi hari maksimum sebesar 1,15 dan faktor jam puncak sebesar 1,56, diperoleh kebutuhan harian maksimum (Qmax-day) sebesar 46,04 L/detik dan kebutuhan jam puncak (Qpeak-hour) sebesar 62,45 L/detik. Rekapitulasi proyeksi kebutuhan air disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Rekapitulasi Proyeksi Kebutuhan Air Bersih Kawasan CitraLand GamaCity

No	Komponen Parameter Kebutuhan Air	Satuan	Nilai Kebutuhan Rencana
1	Jumlah Penduduk Rencana (Ultimate Saturated)	Jiwa	13.120
2	Tingkat Cakupan Pelayanan Sambungan Rumah (SR)	%	100 %
3	Jumlah Sambungan Rumah Terlayani (5 jiwa/SR)	Unit SR	2.624
4	Tingkat Konsumsi Air Domestik SR	L/orang/hari	150,00
5	Debit Kebutuhan Sambungan Rumah (Qsr)	L/detik	22,78
6	Debit Kebutuhan Hidran Umum (Qhu, 20% terlayani)	L/detik	0,91
7	Total Kebutuhan Air Domestik (Qsr + Qhu)	L/detik	23,69
8	Kebutuhan Air Non-Domestik (Komersial/Fasum, 30%)	L/detik	7,11
9	Total Kebutuhan Air Bersih (Net Demand)	L/detik	30,80
10	Faktor Kehilangan Air (Non-Revenue Water / NRW)	%	30,00 %
11	Debit Kehilangan Air (NRW)	L/detik	9,24
12	Kebutuhan Air Baku Rata-rata Harian (Qrata-rata)	L/detik	40,03
13	Faktor Kebutuhan Hari Maksimum (Fmax-day)	Koefisien	1,15
14	Kebutuhan Air Hari Maksimum (Qmax-day)	L/detik	46,04
15	Faktor Kebutuhan Jam Puncak (Fpeak-hour)	Koefisien	1,56
16	Kebutuhan Air Jam Puncak (Qpeak-hour)	L/detik	62,45

Analisis Teknis dan Simulasi Hidraulika EPANET 2.2

Penyediaan air baku dialirkan dari pipa transmisi eksisting baja Ø800 mm milik Perumda Tirtanadi di koridor Jl. M. Saman yang menerima pasokan dari IPAM Limau Manis (debit 800–900 L/detik). Tekanan kerja di titik tapping tercatat sebesar 3,0 kg/cm² (~3,0 bar atau 30 m kolom air). Rute pipa transmisi baru yang diajukan memiliki panjang total 2.472 meter menuju ground reservoir rencana CitraLand GamaCity (kapasitas 500 m³ berdimensi 12,5 m × 10 m × 4 m, elevasi +16,00 m dpl).

4.2.1 Penentuan Dimensi Diameter Pipa dan Kecepatan Aliran

Berdasarkan debit hari maksimum Qmax = 0,04003 m³/s dan kecepatan ekonomis v = 1,3 m/s, diameter hidraulik teoritis terhitung D = 0,198 m, sehingga ditetapkan diameter

nominal pipa 200 mm (8 inci). Dengan diameter 200 mm (luas penampang A = 0,0314 m²), kecepatan aliran aktual terhitung v = 1,274 m/detik. Nilai kecepatan ini sangat ideal karena berada dalam koridor standar SNI 03-7065-2005 (0,3–2,5 m/s), di mana aliran cukup kencang untuk mencegah pengendapan sedimen (> 0,3 m/s) sekaligus aman dari bahaya pukulan air water hammer.

Material pipa utama yang dipilih adalah pipa PVC RRJ kelas S-12,5 (tekanan kerja 10 bar) dan kombinasi pipa HDPE PE-100 pada segmen tertanam. Untuk segmen crossing jembatan melintasi sungai (panjang 22 m), digunakan pipa baja Galvanized Iron Pipe (GIP) / Steel SCH 40 Ø200 mm yang diperkuat struktur penopang kuda-kuda dan blok angkur beton. Hasil simulasi hidraulika menggunakan EPANET 2.2 untuk ke-12 ruas pipa disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Karakteristik Kecepatan Aliran dan Unit Headloss Pipa Transmisi (EPANET 2.2)

Link ID	Panjang (m)	Diameter (mm)	Material Pipa	Velocity (m/s)	Headloss (m/km)	Status Kriteria
Pipe P1	167	200	Titik Tapping / PVC	1,27	7,41	Memenuhi Syarat
Pipe P2	42	200	Pipa HDPE PE100	1,27	7,41	Memenuhi Syarat
Pipe P3	25	200	Pipa HDPE PE100	1,27	7,41	Memenuhi Syarat
Pipe P4	10	200	Pipa HDPE PE100	1,27	7,41	Memenuhi Syarat
Pipe P5	155	200	Pipa HDPE PE100	1,27	7,41	Memenuhi Syarat
Pipe P6	22	200	Pipa Jembatan GIP/Baja	1,27	9,86	Memenuhi Syarat
Pipe P7	32	200	Pipa HDPE PE100	1,27	7,41	Memenuhi Syarat
Pipe P8	35	200	Pipa HDPE PE100	1,27	7,41	Memenuhi Syarat
Pipe P9	78	200	Pipa HDPE PE100	1,27	7,41	Memenuhi Syarat
Pipe P10	272	200	Pipa HDPE PE100	1,27	7,41	Memenuhi Syarat
Pipe P11	1.512	200	Pipa PVC RRJ / HDPE	1,27	7,41	Memenuhi Syarat
Pipe P12	122	200	Inlet Reservoir HDPE	1,27	7,41	Memenuhi Syarat

Evaluasi Headloss Mayor-Minor dan Validasi Tekanan Sisa

Kehilangan tinggi tekan akibat gesekan dinding pipa (major headloss) sepanjang 2.472meter dihitung sebesar 17,998 meter. Kehilangan energi minor akibat turbulensi pada komponen aksesoris (clamp tapping K=1,8 sebesar 0,148 m; bend 22,5° sebesar 0,019 m; bend 45° sebesar 0,024 m; bend 90° sebesar 0,053 m; gate valve; dan exit pipe reservoir K=1,0

sebesar 0,082 m) terhitung kumulatif sebesar 0,419 meter. Total kehilangan tinggi tekan sepanjang transmisi adalah 18,417 meter.

Pada inlet reservoir CitraLand GamaCity, sisa tinggi energi hidraulik yang tersedia tercatat sebesar 12,58meter kolom air. Nilai ini melampaui batas minimum SPAM (≥ 11,0 meter) dan batas sambungan reservoir (≥ 7,5 meter). Komparasi antara perhitungan manual analitis dengan hasil simulasi numerik EPANET 2.2 menunjukkan keselarasan yang sangat tinggi dengan selisih head hanya 0,05 m (< 0,4%), membuktikan bahwa rancangan transmisi layak secara teknis (Tabel 4).

Tabel 4. Verifikasi Perbandingan Analisis Hidraulika Manual dan EPANET 2.2

Parameter Evaluasi Hidraulika	Kalkulasi Manual Analitis	Simulasi Numerik EPANET 2.2	Deviasi / Keterangan
Total Panjang Pipa Transmisi (L)	2.472 meter	2.472 meter	0,00 % (Sesuai)
Diameter Nominal Pipa (D)	200 mm (8 inci)	200 mm (8 inci)	0,00 % (Sesuai)
Debit Pengaliran Rencana (Q)	40,03 L/detik	40,03 L/detik	0,00 % (Sesuai)
Kecepatan Aliran Pipa (Velocity)	1,274 m/detik	1,270 m/detik	< 0,31 % (Akurat)
Kehilangan Energi Gesekan (Major Headloss)	17,998 meter	18,310 meter	Toleransi Numerik
Kehilangan Energi Aksesoris (Minor Headloss)	0,419 meter	Termasuk fitting	Toleransi
Total Headloss Jaringan Transmisi	18,417 meter	18,310 meter	< 0,58 % (Valid)
Sisa Tekanan / Head di Reservoir Tujuan	12,58 meter	12,63 meter (Pres: 12,59 m)	Deviasi 0,05 m (<0,4%)
Status Kelayakan Teknis Hidraulika	LAYAK (Tekanan > 11 m)	LAYAK (Tekanan > 11 m)	Memenuhi Standar SPAM

Analisis Biaya Investasi (CAPEX) dan Operasional (OPEX)

Rincian Biaya Investasi Awal (Capital Expenditure / CAPEX)

Penyusunan Rencana Anggaran Biaya (RAB) investasi awal mengacu pada daftar harga dan upah resmi Perumda Tirtanadi tahun 2026. Biaya investasi awal (Tahun ke-0) mencakup pengadaan material pipa & fitting, pelaksanaan galian & pemasangan pipa, pekerjaan struktur jembatan pipa crossing sungai, serta rekondisi permukaan jalan. Total nilai CAPEX terhitung sebesar Rp2.110.450.515,02 (Tabel 5).

Tabel 5. Rekapitulasi Rencana Anggaran Biaya Investasi Awal (CAPEX)

No	Kelompok Komponen Pekerjaan Investasi (CAPEX)	Nilai Biaya (Rp)	Proporsi (%)
1	Pengadaan Material Pipa PVC RRJ, Pipa Baja, Valve, dan Aksesoris	1.288.948.832,00	61,07 %
2	Pelaksanaan Pekerjaan Galian, Penimbunan, dan Pemasangan Pipa	496.882.234,40	23,54 %
3	Konstruksi Khusus Jembatan Pipa Baja, Kuda-kuda, dan Angkur	41.802.308,06	1,98 %
4	Pekerjaan Perbaikan dan Rekondisi Permukaan Jalan / Trotoar	282.817.140,56	13,40 %
TOTAL	**TOTAL BIAYA INVESTASI AWAL (CAPEX TAHUN KE-0)**	**2.110.450.515,02**	**100,00 %**

Rincian Biaya Operasi dan Pemeliharaan (Operational Expenditure / OPEX)

Biaya operasional tahunan (OPEX) mencakup tiga komponen utama: biaya pemeliharaan jaringan tetap (Rp545.762.503/tahun berdasarkan rasio historis aset 25,86%), biaya penambahan 1 orang personil teknisi (Rp116.866.548/tahun), dan biaya pokok produksi air baku sebesar Rp0,75 per liter air yang bervariasi menurut volume penjualan pada masing-masing skenario. Dalam analisis arus kas jangka panjang 25 tahun, OPEX diproyeksikan mengalami kenaikan akibat inflasi sebesar 6% per tahun (Tabel 6).

Tabel 6. Komposisi Biaya Operasional dan Pemeliharaan (OPEX) per Skenario

Komponen Biaya Operasional (OPEX)	Skenario Pesimis (30%)	Skenario Moderat (50%)	Skenario Optimis (100%)
Biaya Pemeliharaan Jaringan (Tetap)	Rp 545.762.503	Rp 545.762.503	Rp 545.762.503
Biaya Personil Tambahan 1 Orang (Tetap)	Rp 116.866.548	Rp 116.866.548	Rp 116.866.548
Biaya Pokok Produksi Air Baku (Variabel)	Rp 290.919.600	Rp 484.866.000	Rp 969.732.000
Total OPEX Tahun Pertama (Tahun ke-1)	**Rp 953.548.651**	**Rp 1.147.495.051**	**Rp 1.632.361.051**
Total OPEX Tahun ke-25 (Inflasi 6%/thn)	**Rp 3.860.856.166**	**Rp 4.646.132.463**	**Rp 6.609.323.207**

Analisis Pendapatan Penjualan Air dan Struktur Tarif

Penerimaan proyek bersumber dari penjualan air bersih kepada konsumen CitraLand GamaCity. Mengacu pada Keputusan Direksi Perumda Tirtanadi No. KEP-67/DIR/DIHBL/2026 (Perumda Tirtanadi Sumatera Utara, 2026), analisis keuangan membandingkan tiga alternatif tarif: Rumah Tangga 3 (RT3), Rumah Tangga 4 (RT4), dan Rumah Tangga 5 (RT5). Proyeksi pendapatan tahunan pada kombinasi skenario pesimis (30%), moderat (50%), dan optimis (100%) disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Proyeksi Pendapatan Penjualan Air Tahunan Berdasarkan Variasi Tarif dan Skenario

Golongan Tarif Pelanggan	Skenario Pesimis (30%)	Skenario Moderat (50%)	Skenario Optimis (100%)
Rumah Tangga 3 (Tarif RT3)	Rp 1.822.688.160	Rp 3.039.213.600	Rp 6.077.707.200
Rumah Tangga 4 (Tarif RT4)	Rp 3.024.777.840	Rp 5.043.692.400	Rp 10.086.298.800
Rumah Tangga 5 (Tarif RT5)	Rp 3.439.821.936	Rp 5.735.690.160	Rp 11.470.038.720

Evaluasi Komprehensif Parameter Kelayakan Finansial

Analisis kelayakan investasi dilakukan melalui arus kas terdiskon (discounted cash flow) dengan tingkat suku bunga Cost of Capital (COC) 6% per tahun selama 25 tahun operasional. Parameter yang dihitung mencakup NPV, BCR, IRR, MIRR, dan Payback Period. Rekapitulasi hasil analisis disajikan secara komparatif pada Tabel 8.

Tabel 8. Rekapitulasi Hasil Analisis Kelayakan Finansial Seluruh Skenario Investasi

Skenario	Tarif	NPV (Miliar Rp)	BCR	IRR (%)	MIRR (%)	Payback	Status Kelayakan
Pesimis (30%)	**RT3**	**-1,299**	**0,95**	**9,79 %**	**4,93 %**	**3 Tahun**	**TIDAK LAYAK**
Pesimis (30%)	RT4	+14,067	1,57	95,10 %	14,13 %	2 Tahun	**LAYAK**
Pesimis (30%)	RT5	+19,372	1,79	115,33 %	15,99 %	1 Tahun	**LAYAK**
Moderat (50%)	RT3	+9,677	1,33	85,53 %	10,63 %	2 Tahun	**LAYAK**
Moderat (50%)	RT4	+35,301	2,21	182,77 %	16,68 %	1 Tahun	**LAYAK**
Moderat (50%)	RT5	+44,147	2,51	215,85 %	17,74 %	1 Tahun	**LAYAK**
Optimis (100%)	RT3	+37,084	1,91	208,34 %	16,70 %	1 Tahun	**LAYAK**
Optimis (100%)	RT4	+88,327	3,18	399,40 %	21,01 %	1 Tahun	**LAYAK**
Optimis (100%)	RT5	+106,016	3,61	465,13 %	21,91 %	1 Tahun	**LAYAK**

Kinerja Finansial Skenario Pesimis (Realisasi 30%)

Pada skenario pesimis (penyerapan pelanggan 30%), Tarif RT3 menghasilkan NPV defisit sebesar -Rp1,299 miliar, BCR 0,95 (< 1,0), dan MIRR 4,93% (< COC 6%). Walaupun nominal IRR tercatat 9,79%, aliran kas bersih terdiskonto membuktikan bahwa Tarif RT3 defisit mulai tahun ke-13 akibat beban inflasi operasional. Maka Tarif RT3 TIDAK LAYAK pada skenario pesimis. Sebaliknya, Tarif RT4 membukukan NPV Rp14,067 miliar (BCR 1,57; MIRR 14,13%; PP 2 tahun) dan Tarif RT5 membukukan NPV Rp19,372 miliar (BCR 1,79; MIRR 15,99%; PP 1 tahun), sehingga keduanya dinyatakan LAYAK.

Kinerja Finansial Skenario Moderat (Realisasi 50%)

Pada skenario moderat (penyerapan pelanggan 50%), seluruh struktur tarif dinyatakan LAYAK. Tarif RT3 menghasilkan NPV Rp9,677 miliar (BCR 1,33; MIRR 10,63%; PP 2 tahun). Tarif RT4 dan RT5 menghasilkan profitabilitas yang sangat tinggi dengan NPV masing-masing Rp35,301 miliar (BCR 2,21; MIRR 16,68%; PP 1 tahun) dan Rp44,147 miliar (BCR 2,51; MIRR 17,74%; PP 1 tahun). Kedua tarif ini memberikan bantalan keuangan yang sangat kuat terhadap kenaikan beban operasional.

Kinerja Finansial Skenario Optimis (Realisasi 100%)

Pada tingkat pelayanan 100%, seluruh struktur tarif mencapai performa finansial terbaik. Tarif RT3 menghasilkan NPV Rp37,084 miliar (BCR 1,91; MIRR 16,70%; PP 1 tahun). Tarif RT4 menghasilkan NPV Rp88,327 miliar (BCR 3,18; MIRR 21,01%; PP 1 tahun), sedangkan Tarif RT5 mencapai NPV tertinggi Rp106,016 miliar (BCR 3,61; MIRR 21,91%; PP 1 tahun). Seluruh modal investasi terpulihkan sepenuhnya hanya dalam tempo 1 tahun operasional.

Pembahasan Fenomena Tingginya Nilai IRR dan Relevansi MIRR

Nilai IRR pada beberapa skenario mencapai puluhan hingga ratusan persen (9,79%–465,13%). Tingginya nilai IRR ini wajar pada proyek transmisi air minum perkotaan karena nilai modal awal (CAPEX Rp2,110 miliar) relatif kecil dibandingkan volume penjualan air curah tahunan yang bernilai puluhan miliar rupiah. Karakteristik rasio laba terhadap investasi yang tinggi ini konsisten dengan pembukuan resmi Perumda Tirtanadi Cabang Tuasan tahun 2025 (pendapatan Rp81,18 miliar; laba operasi Rp68,66 miliar; terhadap total investasi Rp11,99 miliar atau rasio laba/investasi 572,55%).

Hasil ini juga sejalan dengan penelitian Evidiani (2021) pada SPAM Kota Tarakan yang mencatat IRR 425%. Untuk mengatasi kelemahan teoritis IRR yang mengasumsikan reinvestasi pada bunga internal yang ekstrem, diaplikasikan parameter Modified Internal Rate of Return (MIRR) dengan tingkat diskonto 6%. Nilai MIRR yang berada pada rentang 4,93% hingga 21,91% memberikan estimasi imbal hasil riil yang terukur, rasional, dan realistis bagi para pembuat kebijakan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis teknis dan kelayakan finansial pengembangan jaringan transmisi air bersih menuju CitraLand GamaCity Medan, kebutuhan air bersih pada kondisi ultimate dengan populasi 13.120 jiwa dari 2.624 sambungan rumah mencapai 40,03 L/detik untuk kebutuhan rata-rata harian, 46,04 L/detik untuk kebutuhan harian maksimum, dan 62,45 L/detik pada jam puncak, dengan memperhitungkan kehilangan air (Non-Revenue Water/NRW) sebesar 30%. Secara teknis, jaringan pipa transmisi PVC RRJ sepanjang 2.472 m dengan diameter 200 mm dinyatakan layak, dengan kecepatan aliran 1,27 m/detik, total headloss 18,417 m, dan sisa tekanan pada reservoir sebesar 12,58 m yang memenuhi batas minimum 11 m. Hasil pemodelan menggunakan EPANET 2.2 juga menunjukkan kesesuaian dengan perhitungan manual, dengan deviasi kurang dari 0,4%.

Dari aspek finansial, investasi pengembangan jaringan dinyatakan layak dengan Tarif RT4 dan RT5 sebagai pilihan yang paling tangguh pada seluruh skenario. Tarif RT4 menghasilkan NPV sebesar Rp14,07–88,33 miliar, BCR 1,57–3,18, MIRR 14,13%–21,01%, dan periode pengembalian 1–2 tahun. Sementara itu, Tarif RT5 menghasilkan NPV sebesar

Rp19,37–106,02 miliar, BCR 1,79–3,61, MIRR 15,99%–21,91%, dan periode pengembalian 1 tahun. Tarif RT3 hanya layak pada skenario moderat dan optimistis, sedangkan pada skenario pesimistis menghasilkan NPV negatif sebesar Rp1,29 miliar, BCR 0,95, dan MIRR 4,93%. Dengan demikian, pengembangan jaringan transmisi air bersih ini layak secara teknis dan finansial, dengan Tarif RT4 dan RT5 sebagai alternatif yang paling tangguh berdasarkan hasil analisis.

Berdasarkan hasil penelitian, Tarif RT4 direkomendasikan sebagai alternatif tarif yang dapat menyeimbangkan kelayakan finansial Perumda Tirtanadi dan keterjangkauan biaya bagi konsumen CitraLand GamaCity. Untuk mengendalikan kehilangan air, Perumda Tirtanadi disarankan memasang bulk meter digital terkalibrasi pada titik tapping di Jalan M. Saman dan inlet reservoir CitraLand agar neraca air dapat dipantau secara real-time serta kehilangan air dapat ditekan di bawah target 30%. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan simulasi Monte Carlo untuk menganalisis risiko perubahan biaya bahan kimia dan listrik, serta mengkaji pentahapan pembangunan jaringan retikulasi sekunder di dalam kawasan perumahan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada jajaran pimpinan dan staf teknik Perumda Tirtanadi Cabang Tuasan serta manajemen pengembang CitraLand GamaCity Medan atas izin penelitian, asistensi teknis, dan keterbukaan data demi kelancaran penyusunan naskah ini.

PERNYATAAN KONTRIBUSI PENULIS

Pendanaan : Penelitian ini dibiayai secara mandiri tanpa pendanaan khusus dari pihak luar.
Konflik Kepentingan : Para penulis menyatakan tidak memiliki benturan kepentingan finansial maupun hubungan personal yang mempengaruhi objektivitas penelitian ini.
Kontribusi Penulis : Bagas Ananda Putra menyusun konsep, survei data, pemodelan hidraulika EPANET, kalkulasi finansial, dan draf naskah. Ahmad Perwira Mulia Tarigan dan Gina Cynthia R. Hasibuan melakukan penelaahan kritis, supervisi metodologi, dan persetujuan akhir naskah.

REFERENSI

Badan Standardisasi Nasional. (2005). *Tata cara perencanaan sistem plambing* (SNI 03-7065-2005). Badan Standardisasi Nasional.

Badan Standardisasi Nasional. (2011). *Tata cara perencanaan pemasangan pipa transmisi dan distribusi air minum* (SNI 7509:2011). Badan Standardisasi Nasional.

Diasa, I. W., Ardana, P. D. H., Widarmawa, I. K., & Pamungkas, T. H. (2022). Analisis kelayakan investasi sistem penyediaan air minum (SPAM) di Desa Wanagiri, Kecamatan Sukasada, Kabupaten Buleleng. *Jurnal Ilmiah Kurva Teknik, 11*(2), 1–9. https://doi.org/10.36733/jikt.v11i2.5354

Direktorat Jenderal Cipta Karya. (2007). *Petunjuk teknis perencanaan sistem penyediaan air minum perkotaan*. Departemen Pekerjaan Umum.

Evidiani. (2021). *Efektivitas kebijakan investasi sektor publik: Pembangunan infrastruktur air minum di Kota Tarakan* [Tesis magister, Universitas Gadjah Mada]. http://etd.repository.ugm.ac.id/

Gracia, M. D., Mar-Ortiz, J., Luna-Domínguez, C. R., & Pancardo, J. (2026). A methodological approach for risk assessment of municipal water supply projects. *Mathematics, 14*(5), 1–19. https://doi.org/10.3390/math14050890

Hardi, E. L., Witjaksana, B., & Patriadi, A. (2025). Analisis kelayakan investasi pembangunan sistem penyediaan air bersih untuk penambahan debit sumber air. *Jurnal Rekayasa Teknik Sipil, 17*(1), 1–12.

Imamuddin, M., & Mochammad, A. (2019). Analisis kebutuhan air bersih dan air kotor (Studi kasus kompleks Perumahan Taman Sari Persada, Kota Bogor). *Jurnal Ilmiah Rekayasa Sipil, 16*(1), 33–42.

Julca-Varas, C., García-Segura, T., Torres-Machi, C., & Montalbán-Domingo, L. (2025). Primary risks for delays and cost overruns in the construction of drinking water supply and sanitation projects in Peru. *Journal of Management in Engineering, 41*(3). https://doi.org/10.1061/JMENEA.MEENG-6496

Kombo Mpindou, G. O. M., Escuder Bueno, I., & Chordà Ramón, E. (2022). Risk analysis methods of water supply systems: Comprehensive review from source to tap. *Applied Water Science, 12*(4), Article 56. https://doi.org/10.1007/s13201-022-01586-7

Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2016). *Peraturan Menteri PUPR Nomor 27/PRT/M/2016 tentang Penyelenggaraan Sistem Penyediaan Air Minum*. Kementerian PUPR.

Menteri Pekerjaan Umum. (2007). *Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 18/PRT/M/2007 tentang Penyelenggaraan Pengembangan Sistem Penyediaan Air Minum*. Kementerian Pekerjaan Umum.

Nabila, A. A., Kustiani, I., & Siregar, A. M. (2021). Analisis investasi pembangunan proyek SPAM (sistem penyediaan air minum) Kota Bandar Lampung. *Jurnal Rekayasa Sipil dan Desain, 9*(2), 240–250. https://doi.org/10.23960/jrsdd.v9i2.1772

Nanda, F. A., Masduqi, A., Ahyar, A., & Rachman, A. S. (2023). Analysis of non-revenue water reduction using the FAVAD method in DMA planning: Case study in Palangka Raya drinking water supply system. *Sustinere: Journal of Environment and Sustainability, 7*(3), 248–265. https://doi.org/10.22515/sustinere.jes.v7i3.364

Oyewole, O. T., Akinmusere, O. K., Fasuba, A. O., Fakorede, E. O., Daramola, A. A., Akanni, A. O., & Oke, I. A. (2024). A systematic hydraulic analysis and evaluation of the EPANET software and techniques on the water network of Elizade University. *FUDMA Journal of Sciences, 8*(2), 345–363. https://doi.org/10.33003/fjs-2024-0802-2306

Perumda Tirtanadi Sumatera Utara. (2026). *Keputusan Direksi Nomor KEP-67/DIR/DIHBL/2026 tentang Penyesuaian Tarif Air Minum dan Retribusi Air Limbah di Kota Medan dan Sekitarnya*.

Primandani, V. C., Purwono, N. A. S., & Barkah, A. (2022). Analisis kebutuhan dan ketersediaan air bersih di wilayah pelayanan instalasi pengolahan air Gunung Tugel PDAM Tirta Satria Banyumas. *Paduraksa: Jurnal Teknik Sipil Universitas Warmadewa, 11*(1), 112–121. https://doi.org/10.22225/pd.11.1.4469.112-121

Purba, T. N., Tarigan, A. P. M., & Hasibuan, G. C. R. (2023). Analisis kelayakan investasi pengembangan sistem penyediaan air minum IKK Patumbak di Kabupaten Deli Serdang (Studi kasus). *Jurnal Syntax Admiration, 4*(2), 248–263. https://doi.org/10.46799/jsa.v4i2.548

Rossman, L. A., Woo, H., Tryby, M., Shang, F., Janke, R., & Haxton, T. (2020). *EPANET 2.2 user manual* (EPA/600/R-20/133). U.S. Environmental Protection Agency.

Wibowo, A. K., & Slamet, A. (2024). Pengendalian non-revenue water menggunakan manajemen tekanan pada zona pelayanan pompa Junok di Perumda Air Minum Sumber Sejahtera Kabupaten Bangkalan. *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah, 12*(1). https://doi.org/10.26418/jtllb.v12i1.74304

Yafi, M., Azmeri, A., Kasury, A. R., Rahmawati, T., & Fauzi, M. (2023). Pemenuhan kekurangan air melalui simulasi jaringan pipa transmisi air bersih SPAM Lhokseumawe. *Jurnal Teknik Sipil, 30*(2), 225–232. https://doi.org/10.5614/jts.2023.30.2.10