

Analisis Potensi Kehilangan Air pada Jaringan Distribusi Perumahan RSS Baumata

Informasi Naskah

Yermias Elvis Lay¹
Ardiansah Lamadaung²
Indradhi Lasmana³

Program Studi Teknik
Perancangan Irigasi dan
Penanganan Pantai, Jurusan
Teknik Sipil, Politeknik
Negeri Kupang, Indonesia

layelvis@gmail.com¹
rianlamadaung@gmail.com²
indraaricadeina@gmail.com³

Abstrak

Kehilangan air pada jaringan distribusi mengurangi volume air yang dapat ditagihkan sekaligus menurunkan efisiensi teknis dan finansial penyedia air minum. Penelitian ini bertujuan menganalisis potensi kehilangan air pada jaringan distribusi Perumahan RSS Baumata, Kabupaten Kupang, berdasarkan data operasional dan neraca air. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif evaluatif dengan data sekunder berupa volume input sistem, konsumsi bermeter berekening, indikasi ketidakakuratan meter pelanggan, karakteristik jaringan, dan jumlah sambungan rumah. Potensi kehilangan air dihitung sebagai selisih antara volume input sistem dan konsumsi bermeter berekening, kemudian dipisahkan menjadi komponen kehilangan nonfisik yang teridentifikasi dan kehilangan fisik residual. Hasil menunjukkan volume input sistem sebesar 15.108,58 m³ per tahun dan konsumsi bermeter berekening 7.361,00 m³ per tahun atau 48,72%. Potensi kehilangan air mencapai 7.747,58 m³ per tahun atau 51,28%. Dari jumlah tersebut, kehilangan nonfisik yang teridentifikasi sebesar 143,52 m³ per tahun atau 0,95%, sedangkan kehilangan fisik residual mencapai 7.604,06 m³ per tahun atau 50,33%. Dominasi kehilangan fisik menunjukkan bahwa prioritas pengendalian perlu diarahkan pada deteksi kebocoran aktif, penataan zona pengukuran, pengelolaan tekanan, perbaikan pipa, dan peningkatan akurasi pencatatan. Temuan ini menyediakan dasar awal untuk penyusunan program pengurangan kehilangan air yang lebih terukur pada zona pelayanan RSS Baumata.

Kata Kunci:

Kehilangan Air, Jaringan Distribusi, Neraca Air, Kehilangan Fisik, RSS Baumata.

Abstract

Water loss in distribution networks reduces billable water volume and lowers the technical and financial efficiency of water utilities. This study aimed to analyze the potential water loss in the distribution network of RSS Baumata Housing, Kupang Regency, using operational data and a water-balance approach. A quantitative evaluative design was applied using secondary data on system input volume, billed metered consumption, identified customer-meter inaccuracy, network characteristics, and the number of service connections. Potential water loss was calculated as the difference between system input volume and billed metered consumption and was then separated into identified apparent losses and residual physical losses. The results showed a system input volume of 15,108.58 m³ per year and billed metered consumption of 7,361.00 m³ per year, equivalent to 48.72%. Potential water loss reached 7,747.58 m³ per year or 51.28%. Identified apparent losses were 143.52 m³ per year or 0.95%, whereas residual physical losses reached 7,604.06 m³ per year or 50.33%. The dominance of physical losses indicates that control priorities should include active leakage detection, establishment of metered zones, pressure management, pipe repair, and improved metering accuracy. These findings provide an initial evidence base for developing a more measurable water-loss reduction program in the RSS Baumata service zone.

Keyword:

Water Loss, Distribution Network, Water Balance, Physical Loss, RSS Baumata.

Information Production:

© 2026 by the authors of this article. This work is licensed under an Attribution-ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0)



PENDAHULUAN

Penyediaan air minum yang andal tidak hanya ditentukan oleh kapasitas sumber dan produksi, tetapi juga oleh kemampuan jaringan distribusi mempertahankan volume air sampai ke pelanggan. Air yang telah diproduksi namun tidak tercatat sebagai konsumsi berekening menimbulkan konsekuensi ganda: berkurangnya air yang tersedia untuk pelayanan dan hilangnya potensi pendapatan utilitas. Dalam literatur pengelolaan sistem penyediaan air minum, kondisi tersebut dibahas melalui konsep kehilangan air dan Non-Revenue Water (NRW), yang mencakup kehilangan fisik, kehilangan nonfisik, serta konsumsi resmi yang tidak ditagihkan. Karena komponen-komponen tersebut memiliki mekanisme penyebab yang berbeda, evaluasi kehilangan air perlu diawali dengan neraca air yang konsisten sebelum intervensi teknis ditentukan (Zafira et al., 2023; Rakhmad & Yuniarto, 2024).

Masalah kehilangan air masih dominan pada banyak utilitas air di Indonesia. Rakhmad dan Yuniarto (2024) melaporkan kehilangan air Perumda Air Minum Kota Surakarta sebesar 42,37%, sedangkan Zafira et al. (2023) menemukan kehilangan air tahunan 23,96% pada jaringan distribusi SPAM Cabang Karawang. Pada Unit Kalianget, Sumenep, Widiyanto dan Hadi (2023) juga menunjukkan bahwa neraca air dan indikator kebocoran dapat digunakan untuk mengarahkan strategi penurunan air tidak berekening. Temuan-temuan tersebut memperlihatkan bahwa tingginya kehilangan air bukan sekadar persoalan volume, melainkan indikator performa operasi, kondisi aset, tekanan, akurasi meter, dan kualitas pengelolaan jaringan.

Studi yang lebih baru memperlihatkan variasi tingkat kehilangan antarwilayah yang cukup besar. Fathani et al. (2025) melaporkan kehilangan air 52,37% pada wilayah pelayanan Pilang Raya di Cirebon, sedangkan Jurmawanti et al. (2025) mencatat NRW 38,63% pada DMA Graha Permata Kota. Patria et al. (2026) menemukan kehilangan air 47,53% pada DMA Plamongan Indah, Semarang. Variasi ini menunjukkan bahwa angka kehilangan air harus dibaca dalam konteks karakteristik jaringan, umur pipa, tekanan operasi, struktur zona pelayanan, pola konsumsi, dan kualitas pengukuran. Dengan demikian, pendekatan evaluasi berbasis zona atau area pelayanan menjadi penting agar keputusan pengendalian tidak hanya bergantung pada angka agregat perusahaan.

Salah satu pendekatan yang banyak digunakan untuk mempersempit area masalah adalah District Metered Area (DMA). Buko et al. (2022) menunjukkan bahwa pembentukan DMA dapat membantu pemisahan zona kehilangan dan sekaligus memberikan dasar teknis-finansial untuk intervensi jaringan. Mahardini dan Tangahu (2023) juga memperlihatkan bahwa kombinasi neraca air, perbaikan, pengendalian kebocoran aktif, dan manajemen tekanan pada DMA Kalipuro 5 menurunkan persentase kehilangan air dari 62,55% menjadi 55,53%. Di tingkat internasional, Spedaletti et al. (2022) menunjukkan bahwa pengelolaan berbasis DMA dan smart metering dapat menekan kehilangan air serta menghasilkan penghematan energi. Artinya, neraca air bukan tujuan akhir, tetapi instrumen diagnosis awal untuk menentukan lokasi, jenis, dan prioritas pengendalian kehilangan.

Tekanan merupakan faktor lain yang sangat berhubungan dengan kebocoran fisik. Wibowo dan Slamet (2024) menegaskan pentingnya manajemen tekanan pada zona pelayanan dengan NRW tinggi. Secara eksperimental dan pemodelan, Price et al. (2022), Mathye et al. (2022), dan Tian et al. (2023) menunjukkan bahwa pengaturan tekanan melalui pressure-reducing valve dan strategi kontrol yang tepat dapat mengurangi debit kebocoran tanpa menurunkan tekanan pelayanan di titik kritis. Oleh karena itu, ketika neraca air mengindikasikan dominasi kehilangan fisik, pemeriksaan distribusi tekanan, kebocoran tersembunyi, kondisi sambungan, dan integritas pipa menjadi langkah lanjutan yang logis.

Penilaian kehilangan air juga berkembang dari indikator statis menuju analisis yang lebih sensitif terhadap dinamika jaringan. Pathirane et al. (2024) menunjukkan bahwa persentase NRW dapat berubah mengikuti variasi konsumsi dan tekanan, sehingga satu nilai rata-rata tahunan perlu ditafsirkan secara hati-hati. Kızılöz et al. (2022) mengembangkan prediksi Infrastructure Leakage Index menggunakan pendekatan machine learning, sedangkan Obunga et al. (2025) memperlihatkan manfaat beberapa indeks kehilangan untuk menilai perubahan kinerja jaringan dalam jangka panjang. Ghobadian dan Mohammadi (2023) menegaskan bahwa desain dan pengoperasian jaringan yang mempertimbangkan leakage-pressure relationship dapat menghasilkan keputusan yang lebih realistis daripada model yang memperlakukan kebocoran sebagai nilai tetap.

Dalam konteks lokal Nusa Tenggara Timur, evaluasi infrastruktur air perlu mempertimbangkan karakter wilayah dan performa sistem secara spesifik. Tallo et al. (2023) menunjukkan bahwa persoalan hidrologi di Kota Kupang terkait erat dengan konfigurasi ruang dan keterbatasan infrastruktur pendukung. Pada sistem jaringan air lain di Kabupaten Kupang, Totu et al. (2026) menegaskan bahwa kinerja jaringan perlu dinilai melalui kondisi fisik serta aspek operasi dan pemeliharaan. Boik et al. (2026) juga menunjukkan pentingnya integrasi pengukuran lapangan dan analisis teknis dalam mengevaluasi perilaku infrastruktur air. Ketiga kajian tersebut tidak membahas NRW secara langsung, tetapi memperkuat argumen bahwa evaluasi jaringan di Kupang perlu berbasis data lokal dan kondisi fisik aktual.

Perumahan RSS Baumata merupakan salah satu zona pelayanan Perusahaan Umum Daerah Air Minum Tirta Lontar Kabupaten Kupang. Data penelitian menunjukkan terdapat 558 sambungan rumah yang dilayani oleh jaringan yang didominasi pipa galvanis. Pada dokumen penelitian, selisih antara volume air yang masuk ke sistem dan konsumsi bermeter berekening menunjukkan kehilangan yang besar, sementara komponen kehilangan nonfisik yang teridentifikasi relatif kecil. Situasi ini mengindikasikan bahwa masalah utama kemungkinan terletak pada kehilangan fisik jaringan. Namun, data yang tersedia belum lengkap untuk menyusun audit NRW penuh sesuai seluruh komponen neraca air internasional, khususnya konsumsi resmi tak

berekening dan validasi rinci ketidakakuratan meter. Karena itu, istilah potensi kehilangan air digunakan untuk mempertahankan ketelitian interpretasi terhadap data yang tersedia.

Berbeda dengan penelitian yang langsung menghitung ILI atau merumuskan skenario optimasi, penelitian ini memusatkan analisis pada satu tujuan, yaitu menganalisis potensi kehilangan air pada jaringan distribusi Perumahan RSS Baumata berdasarkan neraca air operasional. Fokus ini dipilih untuk menghasilkan baseline yang transparan mengenai besarnya air yang tidak tercatat sebagai konsumsi berekening, proporsi kehilangan nonfisik yang telah teridentifikasi, serta besarnya kehilangan fisik residual. Hasilnya diharapkan dapat menjadi dasar penentuan kebutuhan audit jaringan yang lebih rinci, pembentukan zona pengukuran, deteksi kebocoran aktif, dan pengelolaan tekanan pada tahap berikutnya.

METODE PENELITIAN

Penelitian dilaksanakan pada zona pelayanan Perumahan RSS Baumata, Kelurahan Baumata Barat, Kecamatan Taebenu, Kabupaten Kupang, Provinsi Nusa Tenggara Timur. Lokasi penelitian berada pada sekitar 10°11'23" LS dan 123°39'57,7" BT. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif evaluatif dengan satu fokus analisis, yaitu potensi kehilangan air pada jaringan distribusi. Data penelitian berasal dari pengukuran lapangan dan data sekunder Perumda Air Minum Tirta Lontar yang dihimpun dalam penelitian tahun 2026, dengan data operasional utama yang digunakan berasal dari catatan produksi, distribusi, dan konsumsi tahun 2024.

Data sekunder yang digunakan meliputi volume air yang masuk ke sistem, konsumsi bermeter berekening, estimasi ketidakakuratan meter pelanggan, jumlah sambungan rumah, material dan panjang jaringan, serta data teknis reservoir. Data lapangan pada penelitian induk meliputi pengukuran debit dan tekanan pelanggan; namun, dalam artikel ini data tersebut hanya digunakan untuk menjelaskan konteks kondisi jaringan dan tidak dijadikan keluaran utama. Pembatasan ini dilakukan agar struktur artikel konsisten dengan satu tujuan penelitian.

Karakteristik teknis yang relevan disajikan pada Tabel 1. Populasi layanan yang digunakan dalam penelitian adalah 558 sambungan rumah. Jaringan transmisi dan distribusi yang terdokumentasi menggunakan pipa GIP dengan total panjang sekitar 7.023 m. Sistem memiliki reservoir Bonem berkapasitas sekitar 200 m³. Data penelitian juga mencatat debit sumber rata-rata sekitar 9 L/detik dan kapasitas produksi sekitar 6 L/detik. Informasi ini digunakan sebagai konteks untuk memahami potensi kehilangan, bukan sebagai dasar untuk menghitung indeks kebocoran infrastruktur.

Tabel 1. Karakteristik Teknis Jaringan Distribusi Perumahan RSS Baumata

No.	Parameter	Nilai/Keterangan
1	Jumlah sambungan rumah	558 SR
2	Material pipa utama	GIP
3	Total panjang jaringan terdokumentasi	7.023 m
4	Reservoir	1 unit; kapasitas sekitar 200 m ³
5	Debit sumber rata-rata	9 L/detik
6	Kapasitas produksi	6 L/detik
7	Jam operasi produksi	8 jam/hari

Sumber: data teknis Perumda Air Minum Tirta Lontar yang digunakan dalam penelitian (2026).

Analisis potensi kehilangan air dilakukan menggunakan pendekatan neraca air sederhana yang dapat ditelusuri dari data tersedia. Volume kehilangan air dihitung sebagai selisih antara volume input sistem dan konsumsi bermeter berekening. Persamaan yang digunakan adalah:

$$WL = SIV - BMC$$

Dengan WL adalah potensi kehilangan air (m³/tahun), SIV adalah system input volume atau volume air yang masuk ke sistem (m³/tahun), dan BMC adalah billed metered consumption atau konsumsi bermeter berekening (m³/tahun). Persentase potensi kehilangan air dihitung terhadap volume input sistem sebagai berikut:

$$WL (\%) = (WL / SIV) \times 100$$

Komponen kehilangan nonfisik yang telah teridentifikasi pada dataset berasal dari estimasi ketidakakuratan meter pelanggan. Kehilangan fisik residual dihitung sebagai selisih antara total potensi kehilangan air dan kehilangan nonfisik yang teridentifikasi:

$$RL = WL - AL$$

Dengan RL adalah residual physical loss dan AL adalah identified apparent loss. Pemilihan pendekatan residual dilakukan karena data tidak menyediakan seluruh komponen yang diperlukan untuk audit NRW

penuhi. Karena itu, nilai RL dalam artikel ini diperlakukan sebagai indikasi kuat potensi kehilangan fisik, bukan sebagai hasil audit kebocoran lapangan yang telah tervalidasi titik per titik. Analisis deskriptif selanjutnya membandingkan hasil RSS Baumata dengan temuan penelitian terdahulu untuk menilai posisi relatif kehilangan air dan menyusun prioritas pengendalian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Hasil neraca air menunjukkan bahwa volume input sistem yang digunakan dalam analisis sebesar 15.108,58 m³ per tahun. Konsumsi bermeter berekening tercatat 7.361,00 m³ per tahun atau 48,72% dari volume input. Dengan demikian, terdapat selisih sebesar 7.747,58 m³ per tahun atau 51,28% yang tidak muncul sebagai konsumsi bermeter berekening. Besaran ini merupakan potensi kehilangan air total dalam batas definisi data yang tersedia.

Komponen kehilangan nonfisik yang telah teridentifikasi sebesar 143,52 m³ per tahun atau sekitar 0,95% dari volume input sistem. Setelah komponen tersebut dikurangkan dari total potensi kehilangan, diperoleh kehilangan fisik residual sebesar 7.604,06 m³ per tahun atau 50,33% dari volume input sistem. Dengan demikian, lebih dari 98% potensi kehilangan yang teridentifikasi dalam neraca ini berada pada komponen residual fisik. Pola tersebut memperlihatkan bahwa masalah utama jaringan RSS Baumata lebih mungkin berkaitan dengan kondisi fisik jaringan daripada semata-mata kesalahan administrasi atau pembacaan meter yang telah teridentifikasi.

Tabel 2. Neraca Potensi Kehilangan Air Jaringan Distribusi Perumahan RSS Baumata

No.	Komponen	Volume (m ³ /tahun)	Proporsi (%)
1	Volume input sistem	15.108,58	100,00
2	Konsumsi bermeter berekening	7.361,00	48,72
3	Potensi kehilangan air total	7.747,58	51,28
4	Kehilangan nonfisik teridentifikasi	143,52	0,95
5	Kehilangan fisik residual	7.604,06	50,33

Sumber: hasil pengolahan data penelitian (2026).

Besarnya kehilangan fisik residual perlu ditafsirkan bersama karakteristik jaringan. Jaringan pelayanan didominasi pipa GIP dan dokumen penelitian menyebut jaringan telah beroperasi lama serta belum seluruhnya mengalami penggantian. Secara teoritis, jaringan yang menua dapat mengalami kebocoran pada badan pipa, sambungan, fitting, dan pipa dinas. Akan tetapi, artikel ini tidak menyimpulkan lokasi kebocoran tertentu karena tidak tersedia hasil step test, minimum night flow, acoustic leak detection, atau isolasi DMA yang dapat mengonfirmasi titik kebocoran. Dengan demikian, hasil neraca air berfungsi sebagai indikator kebutuhan investigasi lebih lanjut, bukan bukti lokasi kebocoran spesifik.

Pembahasan

Potensi kehilangan air sebesar 51,28% menempatkan RSS Baumata pada kondisi yang memerlukan perhatian serius dari sisi efisiensi distribusi. Nilai ini lebih tinggi daripada kehilangan air yang dilaporkan Zafira et al. (2023) pada Cabang Karawang sebesar 23,96%, NRW DMA Graha Permata Kota sebesar 38,63% (Jurmawanti et al., 2025), serta kehilangan air Surakarta sebesar 42,37% (Rakhmad & Yuniarto, 2024). Nilainya relatif dekat dengan kehilangan air Pilang Raya sebesar 52,37% (Fathani et al., 2025) dan lebih tinggi daripada DMA Plamongan Indah sebesar 47,53% (Patria et al., 2026). Perbandingan ini tidak dimaksudkan untuk menyatakan bahwa sistem-sistem tersebut setara secara hidraulik, tetapi menunjukkan bahwa proporsi air yang tidak menjadi konsumsi berekening di RSS Baumata berada pada kelompok tinggi dibandingkan sejumlah studi kasus Indonesia mutakhir.

Dominasi kehilangan fisik residual sebesar 50,33% menjadi temuan paling penting. Pada Manyaran 1, Buko et al. (2022) menemukan kehilangan fisik sekitar 34% dan kehilangan nonfisik sekitar 2%. Mahardini dan Tangahu (2023) melaporkan bahwa kehilangan fisik Kalipuro 5 menurun dari 62,32% menjadi 55,26% setelah intervensi pengelolaan. Pola ini menunjukkan bahwa pada sistem dengan kehilangan fisik dominan, strategi yang hanya berfokus pada administrasi pelanggan tidak cukup. Prioritas harus mencakup inspeksi kondisi pipa, deteksi kebocoran aktif, perbaikan cepat, penggantian segmen yang berulang kali bocor, serta pembentukan zona yang memungkinkan volume masuk dan konsumsi dibandingkan dalam area yang lebih kecil.

Manajemen tekanan juga relevan sebagai strategi tindak lanjut, tetapi harus dilakukan setelah profil tekanan jaringan dipetakan secara memadai. Wibowo dan Slamet (2024) menunjukkan bahwa tekanan berhubungan erat dengan kehilangan fisik pada zona layanan pompa Junok. Price et al. (2022)

mengembangkan metode penempatan PRV untuk mengurangi tekanan berlebih sambil mempertahankan tekanan pelayanan minimum. Mathye et al. (2022) menunjukkan bahwa kontrol tekanan dapat menurunkan system input volume dan aliran malam minimum, sedangkan Tian et al. (2023) menegaskan bahwa pengaturan PRV yang teroptimasi efektif untuk mengendalikan kebocoran. Implikasinya bagi RSS Baumata adalah bahwa rekomendasi pemasangan PRV tidak seharusnya dilakukan secara generik; keputusan harus didasarkan pada pemetaan tekanan, elevasi, lokasi titik kritis, serta variasi kebutuhan harian.

Pendekatan DMA layak dipertimbangkan karena jaringan RSS Baumata memiliki skala pelayanan yang relatif terdefinisi. Spedaletti et al. (2022) menunjukkan bahwa DMA yang dipadukan dengan smart metering dapat mengurangi kehilangan air sekaligus meningkatkan efisiensi energi. Buko et al. (2022) memperlihatkan manfaat DMA untuk menghubungkan perbaikan teknis dengan potensi peningkatan pendapatan. Pada konteks Indonesia, pengalaman Kalipuro 5 juga memperlihatkan bahwa neraca air pada level DMA dapat digunakan untuk menilai perubahan sebelum dan sesudah intervensi (Mahardini & Tangahu, 2023). Pada RSS Baumata, pembentukan satu atau beberapa subzona dengan meter induk akan memungkinkan perhitungan aliran malam minimum dan step test, sehingga dugaan kehilangan fisik residual dapat dikonfirmasi secara lebih presisi.

Interpretasi nilai 51,28% juga harus mempertimbangkan dinamika konsumsi dan kontinuitas. Pathirane et al. (2024) menunjukkan bahwa persentase NRW dapat berubah akibat fluktuasi konsumsi dan tekanan. Artinya, perubahan konsumsi pelanggan tanpa perubahan kebocoran fisik dapat mengubah persentase NRW. Karena itu, monitoring bulanan dan analisis volume absolut perlu dilakukan bersamaan dengan persentase. Obunga et al. (2025) memperlihatkan manfaat penggunaan beberapa indikator kehilangan secara longitudinal untuk membaca perubahan kondisi jaringan, sedangkan Kızıloğlu et al. (2022) menunjukkan bahwa indikator kebocoran dapat diprediksi menggunakan variabel karakteristik jaringan apabila basis data cukup baik. Untuk RSS Baumata, implikasinya adalah perlunya sistem pencatatan yang konsisten antarbulan dan antarzona sebelum indikator yang lebih kompleks digunakan.

Hubungan antara tekanan dan kebocoran juga menunjukkan bahwa model hidraulik ke depan sebaiknya menggunakan pendekatan pressure-dependent leakage. Ghobadian dan Mohammadi (2023) menunjukkan bahwa desain jaringan yang memasukkan kebocoran bergantung tekanan menghasilkan evaluasi biaya dan kinerja yang lebih realistis. Pada jaringan lama, pemodelan semacam ini penting karena kebocoran tidak selalu konstan ketika tekanan berubah. Data tekanan lapangan pada penelitian induk dapat menjadi titik awal untuk kalibrasi, tetapi dibutuhkan pengukuran yang lebih rapat, elevasi node yang terverifikasi, dan data pola kebutuhan per jam agar model dapat digunakan untuk keputusan investasi.

Temuan RSS Baumata juga sejalan dengan gagasan bahwa evaluasi infrastruktur air harus menggabungkan kondisi fisik, operasi, dan pemeliharaan. Totu et al. (2026), pada jaringan irigasi air tanah di Kabupaten Kupang, menunjukkan bahwa penilaian kondisi jaringan dan operasi-pemeliharaan diperlukan untuk menentukan prioritas peningkatan kinerja. Boik et al. (2026) pada Bendungan Raknamo memperlihatkan pentingnya membandingkan observasi lapangan dengan analisis teknis untuk mengurangi ketidakpastian evaluasi infrastruktur air. Dalam konteks wilayah Kupang, Tallo et al. (2023) juga menegaskan bahwa keterbatasan infrastruktur berinteraksi dengan karakter spasial dan kerentanan hidrologis. Ketiga kajian tersebut mendukung kebutuhan pendekatan lokal yang tidak hanya mengadopsi angka ambang secara mekanis, tetapi mengaitkan hasil pengukuran dengan kondisi aset dan konteks wilayah.

Dari sisi manajemen, hasil penelitian menunjukkan bahwa pengurangan kehilangan air berpotensi menjadi sumber kapasitas pelayanan tambahan tanpa terlebih dahulu menambah produksi. Secara konseptual, setiap meter kubik air yang berhasil diselamatkan dari kebocoran dapat dialihkan menjadi konsumsi yang lebih andal atau volume yang dapat ditagihkan. Namun, penelitian ini tidak menghitung nilai ekonomi karena data tarif, kategori pelanggan, biaya energi, dan biaya perbaikan tidak tersedia secara konsisten dalam dataset. Oleh sebab itu, istilah potensi dalam penelitian ini merujuk pada potensi volume kehilangan, bukan estimasi kerugian finansial.

Strategi tindak lanjut dapat disusun bertahap. Tahap pertama adalah audit data, yaitu verifikasi meter induk, sinkronisasi periode volume produksi-distribusi dengan rekening pelanggan, serta pemisahan konsumsi resmi tak berekening. Tahap kedua adalah zonasi dan pengukuran, melalui pemasangan meter inlet, pencatatan minimum night flow, dan step test. Tahap ketiga adalah intervensi fisik berupa active leakage control, perbaikan sambungan, dan penggantian segmen pipa prioritas. Tahap keempat adalah manajemen tekanan yang berbasis data setelah karakter tekanan harian dipahami. Urutan ini lebih defensibel dibandingkan langsung merekomendasikan pembangunan reservoir atau penambahan kapasitas produksi karena masalah utama yang teridentifikasi justru berada pada efisiensi distribusi.

Penelitian ini memiliki keterbatasan. Pertama, neraca air belum mencakup seluruh komponen audit NRW secara rinci, terutama konsumsi resmi tak berekening dan pengujian akurasi meter yang representatif

untuk seluruh populasi. Kedua, periode data sekunder pada dokumen penelitian belum seluruhnya tersaji dengan label tahun yang konsisten, sehingga artikel menggunakan angka neraca yang dapat direkonsiliasi secara matematis dan memperlakukannya sebagai baseline operasional. Ketiga, kehilangan fisik dihitung secara residual dan belum dikonfirmasi dengan metode lapangan seperti minimum night flow, step test, korelator akustik, atau tracer. Keempat, artikel ini tidak menggunakan Infrastructure Leakage Index karena input panjang pipa layanan, tekanan rata-rata, dan satuan kehilangan pada dokumen sumber belum cukup konsisten untuk menghasilkan UARL/ILI yang dapat dipertanggungjawabkan. Keterbatasan tersebut penting dinyatakan agar hasil tidak ditafsirkan melampaui kapasitas data.

Tabel 3. Posisi Hasil RSS Baumata terhadap Beberapa Studi Kehilangan Air

Studi/Lokasi	Pendekatan Utama	Kehilangan/NRW	Catatan
RSS Baumata (penelitian ini)	Neraca air	51,28%	Dominan residual fisik
Karawang - Zafira et al. (2023)	Neraca air & indikator kinerja	23,96%	Kehilangan tahunan
Surakarta - Rakhmad & Yuniarto (2024)	Neraca air & ILI	42,37%	NRW/kinerja kebocoran
Pilang Raya - Fathani et al. (2025)	Neraca air & indikator kinerja	52,37%	Kehilangan air
DMA GPK - Jurmawanti et al. (2025)	Neraca air & SWOT	38,63%	NRW
Plamongan Indah - Patria et al. (2026)	Neraca air & ILI	47,53%	Kehilangan air

Sumber: sintesis penelitian ini berdasarkan literatur yang dikutip.

Implikasi Pengelolaan dan Prioritas Tindak Lanjut

Hasil neraca air memberikan dasar untuk membedakan tindakan yang perlu dilakukan segera dengan tindakan yang baru layak dilakukan setelah tersedia data tambahan. Pada tahap awal, masalah paling mendasar bukan kekurangan metode analisis, melainkan konsistensi data antara volume masuk, volume yang ditagihkan, periode pencatatan, dan status pelanggan aktif. Apabila basis waktu antara meter induk dan rekening pelanggan tidak sama, selisih volume dapat membesar atau mengecil tanpa mencerminkan perubahan kebocoran sebenarnya. Karena itu, audit data harus ditempatkan sebagai kontrol mutu pertama. Rekonsiliasi bulanan perlu menggunakan tanggal baca meter yang seragam atau dikoreksi terhadap perbedaan periode pencatatan, sehingga setiap perubahan neraca air dapat ditelusuri.

Tahap berikutnya adalah memperkecil area diagnosis. Pada jaringan yang belum memiliki DMA, nilai kehilangan pada tingkat zona pelayanan hanya menunjukkan bahwa masalah ada, tetapi belum menunjukkan di mana masalah tersebut terkonsentrasi. Pembentukan subzona dengan meter inlet memungkinkan utilitas mengisolasi kelompok pelanggan dan segmen pipa tertentu. Data aliran malam minimum kemudian dapat digunakan untuk memperkirakan komponen kebocoran ketika konsumsi pelanggan berada pada tingkat terendah. Pendekatan ini konsisten dengan temuan Spedaletti et al. (2022), Buko et al. (2022), dan Mahardini dan Tangahu (2023), yang menempatkan DMA sebagai instrumen pengelolaan, bukan sekadar pembagian administratif jaringan.

Untuk RSS Baumata, zonasi sebaiknya mempertimbangkan konfigurasi blok perumahan, jalur pipa utama, elevasi, dan kemudahan pemasangan meter. Jaringan yang memiliki satu jalur inlet dominan akan lebih mudah dibentuk menjadi DMA dibandingkan jaringan dengan banyak interkoneksi terbuka. Setelah batas hidraulik ditetapkan, seluruh valve pada batas zona harus dipastikan berfungsi dan tidak menghasilkan aliran lintas batas yang tidak tercatat. Dengan cara ini, selisih antara volume masuk dan konsumsi pelanggan dapat dibandingkan pada unit yang lebih kecil, sehingga prioritas inspeksi tidak tersebar pada seluruh jaringan sepanjang lebih dari tujuh kilometer.

Deteksi kebocoran aktif perlu dilaksanakan setelah pola aliran dasar tersedia. Teknik yang dapat digunakan mencakup survei visual, sounding, korelator akustik, step test, dan pemeriksaan sambungan rumah. Pemilihan alat harus mempertimbangkan material pipa GIP, tingkat kebisingan lingkungan, akses terhadap valve, dan biaya operasional. Ketika kebocoran ditemukan, data lokasi, jenis kerusakan, diameter pipa, waktu respons, dan volume estimasi kehilangan perlu dimasukkan ke dalam basis data aset. Informasi tersebut penting untuk membedakan apakah kehilangan didominasi kebocoran insidental yang dapat diperbaiki cepat atau kegagalan berulang yang memerlukan program penggantian pipa.

Penggantian pipa sebaiknya berbasis risiko, bukan usia semata. Pipa tua tidak selalu menjadi segmen dengan kehilangan terbesar, sementara pipa yang lebih baru dapat mengalami kegagalan akibat sambungan, beban lalu lintas, kualitas pemasangan, atau perubahan tekanan. Karena itu, prioritas penggantian dapat menggabungkan frekuensi kebocoran, volume kehilangan, diameter, konsekuensi gangguan pelayanan, biaya perbaikan berulang, dan aksesibilitas lokasi. Pendekatan berbasis risiko membantu menghindari investasi besar yang tidak langsung menurunkan kehilangan air.

Manajemen tekanan ditempatkan setelah kondisi zonasi dan kebocoran dipahami. Literatur menunjukkan bahwa tekanan yang terlalu tinggi meningkatkan debit kebocoran, tetapi penurunan tekanan yang tidak terkendali dapat memperburuk pelayanan pada titik elevasi tinggi. Price et al. (2022) dan Tian et al. (2023) menekankan pentingnya penempatan serta set-point PRV berdasarkan perilaku hidraulik jaringan, sedangkan Mathye et al. (2022) menunjukkan manfaat pengendalian tekanan terhadap input sistem dan aliran malam minimum. Untuk RSS Baumata, keputusan pemasangan PRV harus didasarkan pada logger tekanan minimum 24 jam, data elevasi, dan simulasi hidraulik terkalibrasi.

Pengendalian kehilangan nonfisik tetap diperlukan walaupun proporsinya dalam dataset lebih kecil. Nilai 0,95% hanya merepresentasikan komponen yang telah teridentifikasi, sehingga tidak dapat dianggap sebagai keseluruhan apparent loss. Program kalibrasi atau penggantian meter pelanggan perlu mempertimbangkan umur meter, volume kumulatif yang telah tercatat, kondisi pemasangan, dan kelas akurasi. Selain itu, audit sambungan tidak resmi serta konsistensi antara database pelanggan dan kondisi lapangan tetap diperlukan. Dengan demikian, pengendalian kehilangan fisik dan nonfisik berjalan paralel, tetapi proporsi sumber daya dapat diprioritaskan pada komponen fisik yang secara residual jauh lebih besar.

Prioritas tindakan operasional berdasarkan temuan penelitian dirangkum dalam Tabel 4. Urutan prioritas disusun dari tindakan yang paling mendasar untuk meningkatkan keandalan data menuju tindakan yang memerlukan investasi dan informasi teknis lebih besar. Kerangka ini tidak dimaksudkan sebagai desain teknis final, tetapi sebagai roadmap pengelolaan berbasis bukti yang dapat diuji melalui indikator perubahan volume kehilangan dari waktu ke waktu.

Tabel 4. Prioritas Pengendalian Potensi Kehilangan Air di RSS Baumata

Tahap	Fokus	Tindakan Utama	Indikator Hasil
1	Audit data	Sinkronisasi periode meter induk dan rekening; verifikasi pelanggan aktif; validasi meter utama	Neraca air bulanan konsisten
2	Zonasi pengukuran	Pembentukan DMA/sub-DMA; pemasangan meter inlet; minimum night flow	Lokasi zona kehilangan teridentifikasi
3	Kebocoran aktif	Step test, sounding/korelator, inspeksi sambungan, perbaikan cepat	Penurunan volume kehilangan per zona
4	Manajemen aset	Pemetaan kebocoran berulang dan penggantian pipa berbasis risiko	Frekuensi kebocoran dan gangguan menurun
5	Manajemen tekanan	Logger tekanan, kalibrasi model, PRV/set-point jika diperlukan	Tekanan layanan stabil dan kebocoran menurun
6	Kehilangan nonfisik	Uji akurasi meter, audit sambungan, konsistensi database pelanggan	Apparent loss terukur dan terkendali

Sumber: sintesis hasil penelitian dan literatur terkait pengelolaan kehilangan air.

Keberhasilan program perlu dinilai dengan indikator yang konsisten dari waktu ke waktu. Selain persentase kehilangan, utilitas perlu memantau volume kehilangan absolut, kehilangan per sambungan, jumlah kejadian kebocoran, waktu respons perbaikan, tekanan minimum dan maksimum pada node kritis, serta tren konsumsi bermeter. Penggunaan indikator gabungan penting karena penurunan persentase kehilangan dapat terjadi akibat peningkatan konsumsi tanpa penurunan kebocoran. Pendekatan multi-indikator seperti yang dibahas Obunga et al. (2025) dan dinamika NRW yang ditunjukkan Pathirane et al. (2024) memberikan dasar untuk membangun sistem monitoring yang lebih tahan terhadap perubahan pola konsumsi.

Dalam perspektif implementasi, target jangka pendek yang realistis adalah menghasilkan baseline data yang dapat diaudit selama sekurang-kurangnya beberapa siklus pembacaan meter, bukan langsung menetapkan target kehilangan yang sangat rendah. Setelah sistem data stabil, target penurunan dapat ditetapkan per zona dan dievaluasi berdasarkan biaya intervensi serta volume air yang berhasil diselamatkan. Pendekatan bertahap ini memungkinkan Perumda membedakan tindakan berbiaya rendah dengan manfaat cepat, seperti perbaikan kebocoran terlihat dan kalibrasi meter, dari investasi yang membutuhkan studi hidraulik dan pembiayaan lebih besar, seperti penggantian jaringan atau instalasi PRV permanen.

Keterbatasan dan Arah Penelitian Lanjutan

Penggunaan istilah potensi kehilangan air merupakan konsekuensi metodologis dari kelengkapan data yang tersedia. Neraca air pada artikel ini mampu menunjukkan besarnya selisih volume yang tidak menjadi konsumsi bermeter berekening dan memisahkan komponen nonfisik yang telah teridentifikasi, tetapi belum memenuhi seluruh prasyarat audit NRW terstandar. Konsumsi resmi tak berekening, variasi akurasi meter berdasarkan umur dan kelas meter, serta kemungkinan ketidaksamaian periode baca meter belum dapat dihitung secara terpisah. Oleh karena itu, angka 51,28% sebaiknya digunakan sebagai baseline investigasi, bukan sebagai nilai final yang langsung digunakan untuk menilai kinerja finansial perusahaan.

Penelitian lanjutan perlu memulai dari perbaikan desain pengukuran. Meter induk pada inlet zona harus memiliki kelas akurasi yang diketahui dan diverifikasi, sedangkan sampel meter pelanggan perlu dipilih berdasarkan umur, diameter, volume kumulatif, dan lokasi hidraulik. Pengukuran tekanan sebaiknya dilakukan menggunakan data logger minimal pada titik hulu, tengah, hilir, dan elevasi kritis selama beberapa hari yang mewakili hari kerja dan akhir pekan. Kombinasi data aliran dan tekanan tersebut memungkinkan analisis minimum night flow, evaluasi pressure-leakage relationship, dan kalibrasi model hidraulik.

Selain itu, pembentukan DMA harus diikuti dengan prosedur validasi batas zona. Valve yang menjadi batas DMA perlu diuji untuk memastikan tidak terjadi aliran lintas batas yang tidak tercatat. Setelah DMA stabil, step test dapat dilaksanakan pada periode aliran malam minimum untuk mempersempit segmen dengan indikasi kebocoran terbesar. Hasil step test kemudian diverifikasi melalui survei akustik atau inspeksi lapangan. Dengan desain tersebut, kehilangan fisik tidak lagi dihitung hanya sebagai residual, tetapi dapat dikaitkan dengan lokasi dan karakter kerusakan jaringan.

Aspek ekonomi juga perlu ditambahkan pada penelitian berikutnya. Volume air yang hilang perlu dikonversi menjadi biaya berdasarkan biaya produksi marginal, biaya energi, tarif rata-rata tertimbang, dan biaya penanganan kebocoran. Analisis ekonomi dapat membedakan antara apparent loss yang langsung berkaitan dengan pendapatan yang tidak tertagih dan real loss yang terutama merepresentasikan pemborosan sumber daya serta biaya produksi. Dengan memasukkan biaya investasi dan umur layanan aset, Perumda dapat menyusun urutan proyek berdasarkan payback period atau biaya per meter kubik air yang berhasil diselamatkan.

Terakhir, evaluasi perlu dilakukan secara longitudinal. Satu neraca air hanya menggambarkan satu kondisi waktu, sedangkan jaringan distribusi bersifat dinamis. Monitoring bulanan selama satu tahun akan memperlihatkan pengaruh musim, perubahan konsumsi, gangguan sumber, perbaikan kebocoran, dan perubahan tekanan terhadap kehilangan air. Dataset longitudinal juga memungkinkan penggunaan indikator yang lebih kuat, termasuk kehilangan per sambungan per hari, minimum night flow, dan ILI setelah seluruh input dapat diverifikasi. Dengan demikian, penelitian lanjutan dapat bergerak dari tahap identifikasi potensi menuju diagnosis penyebab dan evaluasi efektivitas intervensi.

KESIMPULAN

Analisis neraca air menunjukkan bahwa jaringan distribusi Perumahan RSS Baumata memiliki potensi kehilangan air sebesar 7.747,58 m³ per tahun atau 51,28% dari volume input sistem 15.108,58 m³ per tahun. Konsumsi bermeter berekening hanya mencapai 7.361,00 m³ per tahun atau 48,72%. Kehilangan nonfisik yang telah teridentifikasi sebesar 143,52 m³ per tahun atau 0,95%, sedangkan kehilangan fisik residual mencapai 7.604,06 m³ per tahun atau 50,33%, sehingga indikasi utama masalah berada pada komponen fisik jaringan. Hasil ini menempatkan RSS Baumata pada tingkat kehilangan yang tinggi dibandingkan sejumlah studi kasus jaringan distribusi di Indonesia. Prioritas tindakan yang disarankan adalah audit data dan meter, pembentukan zona pengukuran, pencatatan minimum night flow, deteksi kebocoran aktif, perbaikan dan penggantian pipa prioritas, serta manajemen tekanan berbasis profil tekanan yang terukur. Karena dataset belum menyediakan seluruh komponen audit NRW dan input ILI secara konsisten, hasil penelitian diposisikan sebagai baseline potensi kehilangan air, bukan audit NRW final. Penelitian lanjutan perlu mengintegrasikan water balance yang lengkap, DMA, minimum night flow, step test, pemodelan hidraulik terkalibrasi, dan evaluasi biaya untuk menghasilkan program penurunan kehilangan air yang terukur dan dapat diprioritaskan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Perusahaan Umum Daerah Air Minum Tirta Lontar Kabupaten Kupang atas ketersediaan data teknis dan operasional yang digunakan dalam penelitian ini, serta kepada Program Studi Teknik Perancangan Irigasi dan Penanganan Pantai, Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Kupang, atas dukungan akademik selama pelaksanaan penelitian.

REFERENSI

- Boik, R. A., Lasmana, I., & Tallo, A. J. (2026). Evaluasi terintegrasi rembesan dan stabilitas Bendungan Raknamo: Pembandingan SEEP/W–V-Notch dan respons terhadap skenario pembebanan. *JiTEKH*, 14(2), 181–192. <https://doi.org/10.35447/jitekh.v14i2.1570>
- Buko, B. T., Sarminingsih, A., & Samadikun, B. P. (2022). Penerapan jaringan distribusi sistem District Meter Area (DMA) SPAM Semarang Barat dalam optimalisasi penurunan kehilangan air ditinjau dari aspek teknis dan finansial (Studi kasus: Area pelayanan Reservoir Manyaran 1). *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 20(4), 872–879. <https://doi.org/10.14710/jil.20.4.872-879>

- Fathani, A., Masduqi, A., & Hastuti, D. S. (2025). Penurunan Non Revenue Water (NRW) melalui analisis neraca air dan indikator kinerja pada wilayah pelayanan Pilang Raya Perumda Air Minum Tirta Giri Nata Kota Cirebon. *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, 13(1), 61–70. <https://doi.org/10.26418/jtllb.v13i1.86141>
- Ghobadian, R., & Mohammadi, K. (2023). Optimal design and cost analysis of water distribution networks based on pressure-dependent leakage using NSGA-II. *Applied Water Science*, 13, 92. <https://doi.org/10.1007/s13201-023-01888-4>
- Jurmawanti, J., Soedjono, E. S., & Hastuti, D. S. (2025). Strategi penurunan Non Revenue Water (NRW) di DMA Graha Permata Kota (GPK) PT Air Minum Giri Menang (Perseroda). *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, 13(2), 154–163. <https://doi.org/10.26418/jtllb.v13i2.95513>
- Kızıllöz, B., Şişman, E., & Oruç, H. N. (2022). Predicting a water infrastructure leakage index via machine learning. *Utilities Policy*, 75, 101357. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2022.101357>
- Mahardini, I. R., & Tangahu, B. V. (2023). Water distribution system management in District Metered Area (DMA) Kalipuro 5. *Asian Journal of Engineering, Social and Health*, 2(10). <https://doi.org/10.46799/ajesh.v2i10.154>
- Mathye, R. P., Scholz, M., & Nyende-Byakika, S. (2022). Optimal pressure management in water distribution systems: Efficiency indexes for volumetric cost performance, consumption and linear leakage measurements. *Water*, 14(5), 805. <https://doi.org/10.3390/w14050805>
- Obunga, P., Rwanga, S. S., & Dinka, M. O. (2025). Quantification of water loss indices in a water distribution network: A case of Water and Sewerage Company of Nairobi City, Kenya. *Water Practice & Technology*, 20(3), 732–745. <https://doi.org/10.2166/wpt.2025.041>
- Pathirane, A., Kazama, S., & Takizawa, S. (2024). Dynamic analysis of non-revenue water in district metered areas under varying water consumption conditions owing to COVID-19. *Heliyon*, 10(1), e23516. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23516>
- Patria, A. E., Masduqi, A., & Prinandes, D. (2026). Studi kehilangan air pada District Metered Area Plamongan Indah di wilayah pelayanan Semarang Timur Perumda Air Minum Tirta Moedal Kota Semarang. *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, 14(1), 351–371. <https://doi.org/10.26418/jtllb.v14i1.99002>
- Price, E., Abhijith, G. R., & Ostfeld, A. (2022). Pressure management in water distribution systems through PRVs optimal placement and settings. *Water Research*, 226, 119236. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119236>
- Rakhmad, G. I., & Yuniarto, A. (2024). Analisis kehilangan air dengan metode neraca air dan Infrastructure Leakage Index (ILI) pada Perumda Air Minum Kota Surakarta. *Journal Serambi Engineering*, 9(4), 11142–11151.
- Spedaletti, S., Rossi, M., Comodi, G., Cioccolanti, L., Salvi, D., & Lorenzetti, M. (2022). Improvement of the energy efficiency in water systems through water losses reduction using the district metered area approach. *Sustainable Cities and Society*, 77, 103525. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103525>
- Tallo, A. J., Amnifu, L. S., & Tallo, M. G. Y. (2023). Analisis penentuan daerah rawan banjir di Kota Kupang terhadap kerentanan fisik dan ekonomi menggunakan Geographic Information System. *Angkasa: Jurnal Ilmiah Bidang Teknologi*, 15(1), 123–132. <https://doi.org/10.28989/angkasa.v15i1.1657>
- Tian, Y., Gao, J., Chen, J., Xie, J., Que, Q., Munthali, R. M., & Zhang, T. (2023). Optimization of pressure management in water distribution systems based on pressure-reducing valve control: Evaluation and case study. *Sustainability*, 15(14), 11086. <https://doi.org/10.3390/su151411086>
- Totu, C. R., Tallo, A. J., & Fallo, Y. (2026). Penilaian kinerja jaringan irigasi air tanah Sumur PNK-219 berdasarkan indeks penilaian operasi dan pemeliharaan pada Daerah Irigasi Desa Nunkurus. *JiTEKH*, 14(1), 1–14. <https://doi.org/10.35447/jitekh.v14i1.1309>
- 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), 182–190. <https://doi.org/10.26418/jtllb.v12i1.74304>
- Widianto, D. R., & Hadi, W. (2023). Analisis penurunan angka Air Tidak Berekening (Non Revenue Water) Unit Kecamatan Kalianget Kabupaten Sumenep. *Envirotek: Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan*, 15(1), 1–5. <https://doi.org/10.33005/envirotek.v15i1.213>
- Zafira, A. D., Nurhayati, E., & R. P., G. N. (2023). Strategi penurunan Non Revenue Water (NRW) melalui analisis neraca air dan indikator kinerja NRW pada jaringan distribusi SPAM Cabang Karawang. *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, 11(3), 721–730. <https://doi.org/10.26418/jtllb.v11i3.69033>