

JURNAL KONSTRUKSI DAN INFRASTRUKTUR

Teknik Sipil dan Perencanaan

STRATEGI TEKNIS UNTUK MENGATASI TEKANAN BERLEBIH DALAM SISTEM DISTRIBUSI AIR BERSIH DI DAERAH PEGUNUNGAN

Pureza Marenshaputri^{1*}, Rizka Indri Meutia¹, Mohamad Yudi Purnawan²

^{1*)} Program Studi Teknik Sipil, Politeknik Negeri Bandung, Kabupaten Bandung Barat

Email: 1pureza.marenshaputri@polban.ac.id, 2rizka.indri@polban.ac.id

HP: 08122037724

²⁾Kementerian Pekerjaan Umum, Jakarta Selatan

Email: 3mohamad.purnawan@pu.go.id

ABSTRACT

In gravity-based water distribution systems in mountainous regions, excessive hydrostatic pressure—caused by significant elevation differences can lead to pipeline stress, leakage, or even bursts. To control this, pressure-reducing valves (PRVs), break-pressure tanks, or energy recovery systems like micro-hydropower turbines are strategically installed at key elevation drops. These methods ensure pressure stability, protect infrastructure, and can also enhance system efficiency and sustainability when excess pressure is harnessed for energy generation. This study examines technical strategies for controlling excessive hydrostatic pressure in gravity-based water distribution systems in mountainous regions, with a focus on the Cilongkrang system in Majalengka, Indonesia. With an elevation difference of over 950 meters between the spring and service zone, the system faces potential hydrostatic pressure exceeding 90 bar, far beyond the design limits of standard pipelines. The research compares two pressure control technologies Pressure Reducing Valves (PRV), and Break Pressure Tanks (BPT). By evaluating their hydraulic performance, operational practicality, lifecycle costs, and field applicability. The analysis utilizes topographic data, pressure modelling, and actual project cost estimates to quantify the effectiveness of each option. Results show that BPTs are more cost-effective and reliable for large elevation drops in rural areas with sufficient land, while PRVs are suitable for confined, urban installations requiring precision. This study contributes a practical framework for designing sustainable gravity-fed water supply systems in extreme topographic conditions.

Keywords: BPT, Gravity System, Hydrostatic Pressure, PRV.

1. PENDAHULUAN

Penyediaan air bersih di wilayah pegunungan menghadirkan tantangan sekaligus peluang dari sisi teknis distribusi. Sistem berbasis gravitasi kerap menjadi pilihan utama karena dapat memanfaatkan perbedaan elevasi alami tanpa membutuhkan energi eksternal seperti pompa. Pendekatan ini terbukti efisien dalam hal operasional dan ramah lingkungan. Namun, di balik efisiensi tersebut, perbedaan elevasi yang ekstrem dapat menyebabkan tekanan hidrostatik berlebih pada jaringan perpipaan, yang berpotensi menimbulkan kebocoran, kerusakan sambungan, dan bahkan keruntuhan sistem distribusi [1].

Tekanan berlebih dalam jaringan distribusi air terjadi ketika air mengalir dari ketinggian yang sangat tinggi ke titik distribusi yang jauh lebih rendah. Dalam sistem distribusi berbasis gravitasi, kondisi ini umum ditemukan di wilayah pegunungan yang memiliki perbedaan elevasi ekstrem. Tekanan hidrostatik yang timbul dapat mencapai puluhan bar, jauh melampaui batas tekanan desain standar pipa distribusi, yang umumnya dirancang untuk menahan tekanan hingga 10–16 bar. Jika tidak dikendalikan, tekanan tinggi ini dapat menyebabkan percepatan degradasi material pipa, peningkatan kebocoran,

kerusakan sambungan, serta peningkatan kehilangan air atau *non-revenue water (NRW)*. Studi di Lombok menunjukkan bahwa tekanan akibat elevasi pegunungan dapat mencapai lebih dari 70 bar jika tidak dibagi dalam zona tekanan [2]. Selain itu, analisis hidraulik di sistem perbukitan menunjukkan bahwa tekanan tinggi tanpa kontrol dapat memicu gangguan dinamis seperti *water hammer* dan menyebabkan keruntuhan sistem [2], [3]. Oleh karena itu, pengendalian tekanan menjadi aspek teknis yang sangat krusial dalam desain dan pengoperasian sistem penyediaan air bersih di daerah bertopografi curam.

Berbagai strategi teknis telah dikembangkan untuk mengatasi tekanan berlebih dalam sistem distribusi air berbasis gravitasi, terutama di wilayah dengan perbedaan elevasi yang ekstrem. Dua pendekatan utama yang umum digunakan adalah penerapan Pressure Reducing Valve (PRV) dan pembangunan Bak Pelepas Tekan (BPT). PRV merupakan perangkat mekanis yang dirancang untuk mengurangi tekanan air secara presisi dan otomatis, memungkinkan pengaturan tekanan sesuai kebutuhan sistem distribusi pada zona hilir. Sementara itu, BPT merupakan struktur pasif berupa kolam atau bak penampung yang memecah tekanan secara alami melalui aliran terbuka dan perubahan elevasi. Meskipun tidak sepresisi PRV dalam pengaturan tekanan, BPT menawarkan keunggulan dalam hal kesederhanaan operasi, kebutuhan pemeliharaan yang rendah, serta umur teknis yang panjang [4]. Namun, masing-masing metode memiliki keterbatasan: PRV cenderung mahal dan memerlukan perawatan rutin serta pasokan suku cadang, sedangkan BPT membutuhkan lahan yang relatif luas dan konstruksi fisik yang lebih besar[5]. Oleh karena itu, pemilihan teknologi harus mempertimbangkan kondisi topografi, ketersediaan sumber daya lokal, dan karakteristik jaringan.

Dalam konteks pengembangan sistem air bersih di wilayah pegunungan seperti Cilongkrang, Kabupaten Majalengka, tantangan tekanan hidrostatik sangat nyata. Sumber mata air yang berada pada ketinggian ± 1.016 meter di atas permukaan laut (mdpl) harus disalurkan ke titik distribusi yang berada pada elevasi ± 62 mdpl [6]. Selisih ketinggian lebih dari 950 meter ini dapat menimbulkan tekanan hingga 90 bar jika tidak dikendalikan secara bertahap. Oleh karena itu, pemilihan strategi teknis yang tepat untuk pengendalian tekanan menjadi faktor penentu keberhasilan sistem penyediaan air tersebut.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan efektivitas PRV dan BPT sebagai solusi pengendali tekanan pada sistem distribusi air bersih di daerah pegunungan. Analisis dilakukan melalui pendekatan teknis dan ekonomis berbasis dokumen perencanaan, literatur, dan data lapangan. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi yang aplikatif bagi perencana dan pelaksana pembangunan SPAM (Sistem Penyediaan Air Minum), terutama dalam menghadapi tantangan tekanan berlebih di wilayah dengan topografi ekstrem.

Ketika air didistribusikan dari sumber di ketinggian lebih tinggi ke area rendah tanpa pengaturan tekanan yang memadai, tekanan di bagian bawah jaringan akan meningkat secara signifikan. Tekanan berlebih ini dapat menyebabkan kebocoran, karena material pipa dan sambungan lebih rentan mengalami kerusakan di bawah kondisi seperti itu. Menurut penelitian, tekanan yang terlalu tinggi dapat meningkatkan risiko non-revenue water (NRW), atau air hilang, hingga 30-40% dari total distribusi air [7].

Dalam jaringan pipa yang beroperasi di berbagai ketinggian, fluktuasi tekanan bisa menyebabkan kelelahan material. Hal ini terutama terjadi jika sistem tidak dilengkapi dengan teknologi seperti Pressure Reducing Valve (PRV) atau kontrol tekanan otomatis [8]. Pipa dan sambungan yang terpapar tekanan tinggi terus-menerus lebih mudah mengalami kebocoran kecil, yang sulit dideteksi tetapi berkontribusi pada kehilangan air yang signifikan seiring waktu.

Ketika air bergerak dari ketinggian tinggi ke rendah melalui reservoir (seperti di Cilongkrang, dengan kapasitas 900 m^3), ada kemungkinan terjadinya evaporasi atau overflows (air meluap) akibat tekanan dan volume berlebih. Selain itu, perubahan tekanan mendadak di jalur distribusi dapat menyebabkan sambungan valve atau pipa tidak tertutup sempurna, yang berpotensi menyebabkan kebocoran.

Sistem distribusi air yang tidak diatur dengan baik berpotensi mengalami water hammer [9], yaitu peningkatan tekanan mendadak saat aliran air terhenti secara tiba-tiba. Water hammer tidak hanya merusak komponen jaringan, tetapi juga dapat menimbulkan kebocoran internal di titik-titik rawan seperti sambungan pipa atau PRV, mengakibatkan air hilang tanpa disadari.

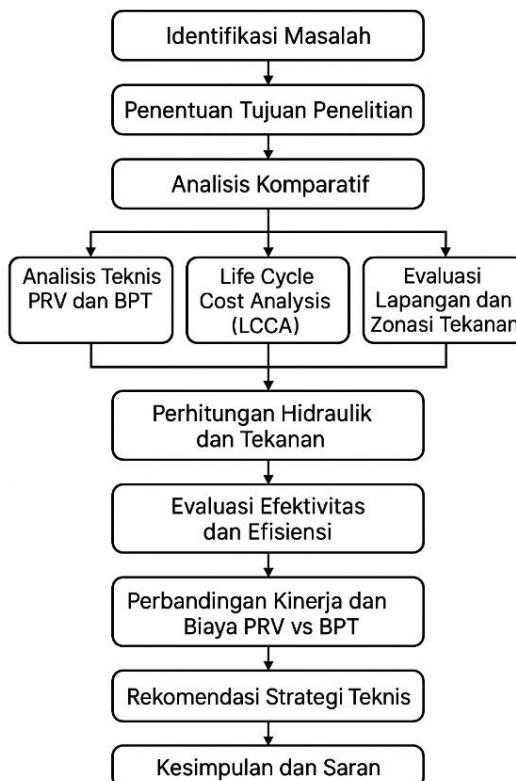
Ketika distribusi tidak seimbang, misalnya, tekanan rendah di area tinggi dan tekanan tinggi di area rendah, air tidak dapat mengalir dengan efisien. Kondisi ini seringkali memerlukan penggunaan pompa tambahan, yang justru dapat memperburuk kebocoran di jaringan pipa [5]. Tanpa manajemen tekanan yang efektif, distribusi air tidak hanya tidak merata, tetapi juga boros energi dan berpotensi

menyebabkan air hilang dalam volume besar [7]. Penerapan manajemen tekanan terbukti efektif mengurangi non-revenue water dengan menstabilkan tekanan dan menekan kebocoran pada jaringan distribusi air [10].

Penelitian ini menghadirkan kebaruan dalam konteks sistem distribusi air bersih berbasis gravitasi di wilayah pegunungan yang memiliki perbedaan elevasi ekstrem, seperti di Cilongkrang, Majalengka, dengan selisih ketinggian mencapai lebih dari 900 meter antara sumber mata air dan titik distribusi. Situasi ini menimbulkan tekanan hidrostatik yang sangat tinggi, jauh melampaui batas kekuatan material pipa dan sambungannya, sehingga berisiko menyebabkan kebocoran, kerusakan struktural, dan gangguan fungsi sistem secara menyeluruh. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang hanya membahas aspek teknis PRV atau BPT secara terpisah, studi ini menawarkan pendekatan komprehensif dengan mengevaluasi tekanan aktual berbasis elevasi lapangan dan merumuskan strategi teknis pengendalian tekanan secara zonasi. Pendekatan tersebut mengombinasikan kajian teknis, efisiensi biaya, dan umur layanan infrastruktur sebagai dasar pemilihan PRV atau BPT, sehingga mampu menjawab kebutuhan desain sistem air minum yang andal, efisien, dan adaptif terhadap kondisi topografi ekstrem.

2. METODE PENELITIAN

Pendekatan analisis komparatif digunakan untuk mengevaluasi pilihan infrastruktur PRV dan BPT dalam sistem distribusi air minum berbasis gravitasi, dengan memadukan tiga metode utama, yaitu analisis komparatif berbasis literatur dan studi teknis untuk menilai aspek kinerja, teknis, dan operasional, Life Cycle Cost Analysis (LCCA) secara dokumentatif, dengan menggunakan data RAB aktual sebagai dasar estimasi biaya investasi dan operasional jangka panjang; serta checklist evaluatif berbasis studi lapangan, yang mengidentifikasi kesesuaian sistem dengan kondisi topografi, kemudahan pemeliharaan, dan dukungan teknis local. Alur tahapan penelitian dapat dilihat pada **Gambar 1** berikut.



Gambar 1. Diagram Alur Tahapan Penelitian

Sistem distribusi air bersih berbasis gravitasi di daerah pegunungan memanfaatkan perbedaan elevasi antara sumber air dan titik layanan untuk mengalirkan air tanpa pompa. Namun, semakin besar selisih ketinggian antara titik awal dan akhir, semakin besar pula tekanan hidrostatik yang dihasilkan. Tekanan ini dapat dihitung dengan rumus:

$$P = \rho \cdot g \cdot h \quad (1)$$

Dimana:

P = tekanan (Pa atau N/m²)

ρ = massa jenis air (1000 kg/m³)

g = percepatan gravitasi (9,81 m/s²)

h = selisih ketinggian (m)

Dalam kasus Cilongkrang, dengan elevasi sumber ±1016 mdpl dan elevasi titik terendah ±62 mdpl, tekanan hidrostatik dapat mencapai lebih dari 90 bar. Tekanan sebesar ini melebihi kapasitas teknis pipa standar, yang biasanya hanya dirancang untuk tekanan ≤10 bar. Oleh karena itu, karakteristik tekanan yang ekstrem ini menimbulkan risiko kebocoran, kerusakan jaringan, hingga potensi keruntuhan sistem, jika tidak dikendalikan secara bertahap.

2.1 Pressure Reduce Valve (PRV)

Pada dasarnya, PRV dirancang untuk menjaga tekanan konstan pada sisi hilir (downstream) sesuai nilai yang telah ditentukan, terlepas dari fluktuasi tekanan pada sisi hulu.

$$P_{out} = P_{set} \quad (2)$$

dengan:

P_{out} = tekanan di sisi hilir PRV

P_{set} = tekanan target yang diatur pada PRV (misal: 2–4 bar)

Penentuan PRV agar tekanan tetap dalam batas aman (misalnya ≤10 bar), dilakukan pembagian zona distribusi dengan PRV diantaranya. Sehingga diketahui dengan delta ketiggian sesuai studi kasus, bisa memaksimalkan jumlah PRV yang didapatkan dengan perhitungan sebagai berikut:

$$n = \frac{h_{total}}{h_{maksimal}} \quad (3)$$

dimana

n = jumlah minimum PRV

h_{total} = total penurunan elevasi

$h_{maksimal}$ = selisih elevasi maksimum yang diizinkan per zona (misal: 80–100 m)

2.2 Bak Pelepas Tekan (BPT)

Volume BPT dapat dihitung dengan mempertimbangkan debit dan waktu detensi yang merupakan parameter penting dalam sistem pengolahan maupun distribusi air, yang menunjukkan lamanya air berada dalam suatu unit atau media sebelum dialirkan ke tahap berikutnya. Berikut cara perhitungan volume BPT.

$$V = Q \times T_{det} \quad (4)$$

Dimana

V = Volume BPT (m³)

Q = debit (liter/detik)

T_{det} = Waktu detensi (detik)

Sejalan dengan perhitungan jumlah PRV diatas, untuk menjaga agar tekanan dalam jaringan tidak melebihi batas desain pipa (misalnya 10 bar), maka dapat dihitung pula jumlah BPT yang diperlukan sesuai dengan rumus berikut;

$$Jumlah BPT = \frac{\Delta H_{total}}{\Delta H_{maks}} \quad (5)$$

dimana

ΔH_{total} = total perbedaan elevasi (m)

H_{maks} = batas elevasi maksimum antar segmen agar tekanan < batas desain (misal 100 m untuk 10 bar)

Jika ingin mengukur **efisiensi pemanfaatan BPT** dari sisi hidraulik dan biaya, bisa digunakan rumus rasio efisiensi berikut:

$$Efisiensi BPT = \frac{\text{Reduksi Tekanan Total}}{\text{Biaya Konstruksi BPT}} \times \text{Faktor Umur Teknis} \quad (6)$$

Keterangan:

Reduksi tekanan total = jumlah tekanan yang berhasil "dilepas" oleh sistem BPT

Biaya konstruksi BPT = total biaya pembuatan seluruh BPT

Faktor umur teknis = nilai bobot usia infrastruktur (misalnya 1.5 untuk usia >20 tahun)

2.3 Strategi Pengendalian Tekanan

Pengaturan tekanan dalam sistem distribusi air berbasis gravitasi sangat penting, terutama pada wilayah dengan perbedaan elevasi ekstrem seperti Cilongkrang. Tekanan yang tidak terkendali tidak hanya berpotensi merusak jaringan pipa, tetapi juga dapat menurunkan efisiensi distribusi dan menimbulkan kehilangan air yang signifikan.

Sistem distribusi air berbasis gravitasi di daerah pegunungan memiliki keuntungan dari sisi efisiensi energi, tetapi juga menghadapi tantangan besar berupa tekanan hidrostatik yang sangat tinggi akibat perbedaan elevasi ekstrem. Oleh karena itu, diperlukan strategi teknis yang terintegrasi untuk mengendalikan tekanan agar sistem tetap aman, berfungsi optimal, dan berkelanjutan. Strategi pengendalian tekanan dapat dilakukan melalui pendekatan berikut:

1. Zonasi Tekanan (Pressure Zoning)

Distribusi air dibagi menjadi beberapa zona tekanan berdasarkan profil elevasi. Setiap zona dirancang agar selisih ketinggiannya tidak melebihi batas tekanan maksimum pipa yang digunakan (biasanya setara dengan 8–10 bar atau 80–100 meter head). Zonasi ini penting untuk menentukan titik-titik intervensi teknis seperti pemasangan PRV atau pembangunan BPT.

2. Pemasangan Pressure Reducing Valve (PRV)

PRV digunakan di lokasi strategis dengan ruang terbatas atau pada jalur distribusi yang membutuhkan kontrol tekanan presisi. PRV dipasang di titik-titik transisi antar zona atau pada percabangan utama untuk memastikan tekanan hilir sesuai kebutuhan desain. Setiap PRV disesuaikan dengan spesifikasi tekanan masuk dan keluar, dan harus mudah diakses untuk keperluan pemeliharaan berkala.

3. Pembangunan Bak Pelepas Tekan (BPT)

BPT merupakan solusi pasif yang digunakan untuk membuang kelebihan tekanan secara gravitasi. BPT ideal diterapkan pada daerah yang memiliki lahan memadai dan tekanan tinggi yang bersifat konstan. Selain berfungsi sebagai pelepas tekanan, BPT juga dapat digunakan sebagai titik kontrol aliran, tempat pencucian pipa (scouring), atau titik transisi ke pipa distribusi ke bawah.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Lokasi dan Objek Penelitian

Lokasi penelitian adalah sistem penyediaan air minum di Desa Cilongkrang, Kecamatan Banjarsari, Kabupaten Majalengka, Jawa Barat. Perumdam Tirta Bhakti Raharja selaku pengelola sistem air minum di Kabupaten Majalengka saat ini telah melayani 14 Ibu Kota Kecamatan (IKK) melalui lima cabang dan lima unit pelayanan. Meski begitu, cakupan layanan masih terbatas. Pada tahun 2021, hanya 30.298 sambungan langsung (SL) yang tercatat melayani sekitar 151.490 jiwa, atau sekitar 11,48% dari total penduduk administratif kabupaten.

Mata Air Cilongkrang pada tahun 2024 baru termanfaatkan sebesar 72 lpd yang disadap oleh pipa diameter 200 mm untuk melayani 9.229 Sambungan Rumah (Data Perumdam Tirta Bhakti Raharja Kabupaten Majalengka per 31 Desember 2023), sementara masih bisa dimanfaatkan sebesar 143 lpd yang masih bisa memfasilitasi penambahan Sambungan Rumah sebanyak 9.226 dalam proyeksi tiga tahun mendatang. Informasi terkait elevasi dari masing-masing lokasi yang berpengaruh pada penelitian ini sesuai dengan **Tabel 1** berikut.

Tabel 1 Informasi Dasar Cilongkrang

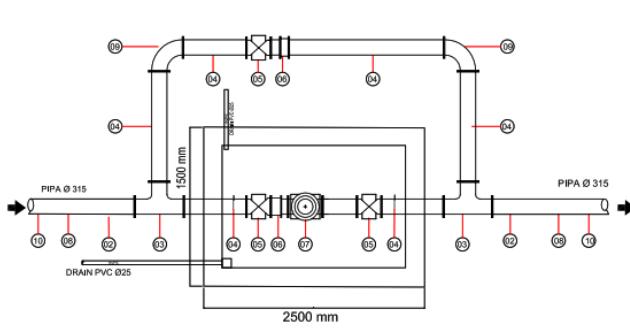
Lokasi	Elevasi
Mata Air Cilongkrang	1016 mdpl
Reservoir 900 m ³	236 mdpl
Wilayah Pelayanan	120 mdpl (IKK Majalengka) 83 mdpl (IKK Panyingkiran) 64 mdpl (IKK Cigasong) 62 mdpl (Kawasan Polman)
Kecepatan Aliran (m3/det)	143

Sumber: Perumdam Tirta Bhakti Raharja Kabupaten Majalengka, 2023

3.2 Hasil dan Pembahasan

Kondisi topografi di wilayah Cilongkrang, dengan perbedaan elevasi yang mencapai lebih dari 950 meter antara sumber mata air dan zona pelayanan, menghasilkan tekanan hidrostatik yang sangat tinggi dan berpotensi melampaui batas desain sistem perpipaan. Dalam merespons tantangan tersebut, pemilihan infrastruktur pengendali tekanan menjadi komponen strategis dalam perencanaan sistem distribusi air bersih berbasis gravitasi. Pressure Reducing Valve (PRV) dan Bak Pelepas Tekan (BPT) merupakan dua alternatif yang lazim digunakan, masing-masing menawarkan pendekatan berbeda dalam pengaturan tekanan, baik dari segi teknis, operasional, maupun ekonomis. Kajian berikut menguraikan karakteristik desain dan implikasi penerapan kedua opsi tersebut dalam konteks rencana pembangunan SPAM di Cilongkrang.

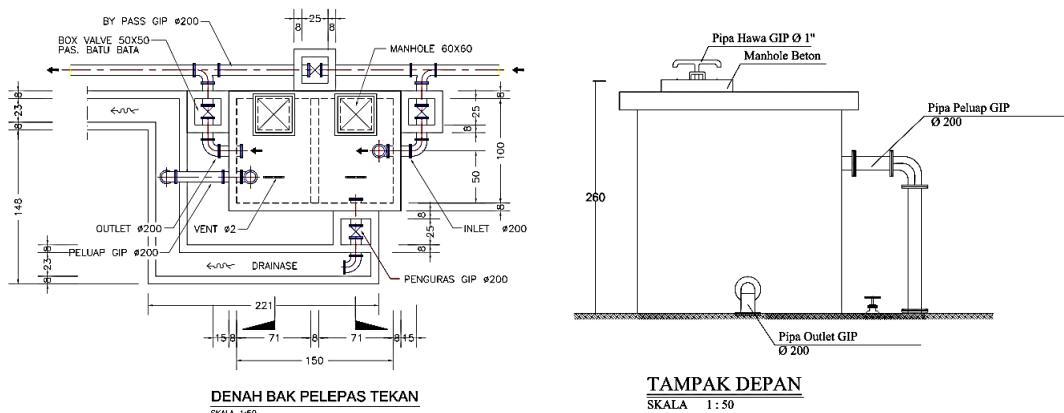
Gambar 2 berikut memperlihatkan desain bangunan untuk satu unit PRV (Pressure Reducing Valve) yang digunakan dalam sistem distribusi air berbasis gravitasi di wilayah perencanaan SPAM Cilongkrang. Dalam perencanaan ini, dipilih PRV berdiameter 250 mm, dengan dimensi box bangunan sebesar 2 x 1,5 x 2 meter. Meskipun volume pekerjaan sipilnya relatif kecil, pengadaan komponen utama PRV dengan harga sekitar Rp120.000.000,00 menjadi elemen biaya yang paling signifikan dalam unit ini.



NO	URAIAN	DIMENSI UNTUK PIPA (mm)	BAHAN	JUMLAH
01	PIPA INLET	Ø 300	PE	—
02	REDUCER	Ø 300x250	PE	1
03	TEE FLANGE	Ø 300	PE	2
04	PRESSURE GAUGE	Ø 300	CI	2
05	GATE VALVE	Ø 300	CI	3
06	DISMANTLING JOINT	Ø 300	CI	1
07	PRV	Ø 300	CI	1
08	FLANGE SOCKET	Ø 300	PE	2
09	BEND 90° FLANGE	Ø 300	CI	2
10	PIPA OUTLET	Ø 300	PE	—

Gambar 2 Desain Bangunan PRV

Sebagai alternatif dari penggunaan PRV, sistem distribusi juga dapat dilengkapi dengan Bak Pelepas Tekan (BPT) untuk mengatur tekanan air secara gravitasi. Gambar 3 menampilkan desain bangunan BPT yang dirancang sesuai kondisi hidraulik dan topografi wilayah layanan. BPT memiliki karakteristik bangunan yang lebih masif dibanding PRV, namun dengan komponen mekanikal yang lebih sederhana, sehingga perbandingan antara keduanya perlu dianalisis lebih lanjut dari segi teknis maupun ekonomis.



Gambar 3 Desain Bangunan Bak Pelepas Tekan

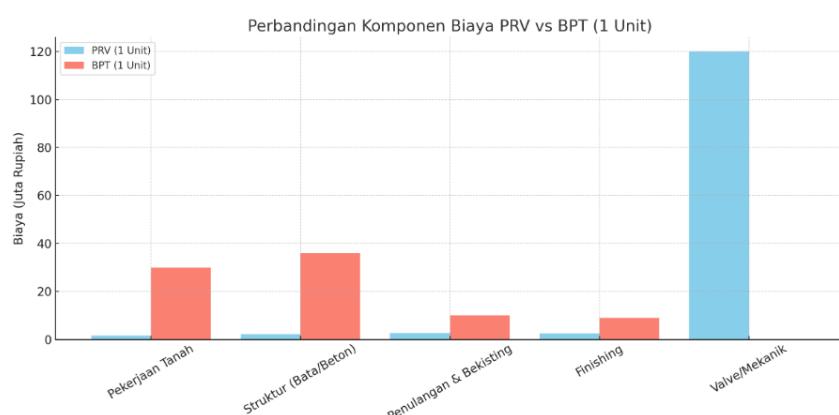
Untuk menjelaskan lebih lanjut kriteria teknis dan spesifikasi desain yang digunakan dalam pemilihan PRV dan BPT, tabel berikut merangkum parameter hasil perhitungan serta nilai standar yang digunakan dalam analisis.

Tabel 2 Kriteria Spesifikasi untuk Desain PRV dan BPT

Parameter	Perhitungan Teknis	Desain Optimal	Standar
a. Kecepatan Aliran (lpd)	140	143	150
b. Elevasi Optimal (m)	675,5	675	-
c. Tekanan Inlet (bar)	9,7	9	16
d. Tegangan Tekanan Pipa (bar)	9	9	10

Sumber: Hasil Perhitungan, 2025

Perbandingan visual terhadap biaya investasi awal antara infrastruktur PRV dan BPT ditampilkan pada Gambar 1, yang memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai implikasi anggaran dari masing-masing pilihan. Meskipun **Tabel 2** menampilkan perbedaan teknis, operasional, dan umur layan antara kedua sistem, penting juga untuk memahami bagaimana perbedaan tersebut tercermin dalam aspek biaya. Rincian biaya pada gambar menunjukkan tidak hanya komponen pekerjaan konstruksi dan peralatan, tetapi juga menekankan bahwa pengadaan mekanis (dalam hal ini PRV) secara signifikan mempengaruhi total pengeluaran. Representasi grafis ini membantu pengambil keputusan dalam memvisualisasikan bobot finansial dari masing-masing alternatif, sehingga lebih mudah menyelaraskan pilihan teknis dengan anggaran yang tersedia dan kapasitas pemeliharaan jangka panjang.



Sumber: Hasil Analisis, 2025

Gambar 4 Perbandingan Biaya Awal PRV dan BPT

Perbandingan biaya awal antara PRV dan BPT yang ditampilkan pada **Gambar 4** menggambarkan bahwa meskipun konstruksi bangunan PRV lebih sederhana dan berukuran kecil, komponen mekanis PRV memiliki kontribusi biaya yang sangat besar terhadap total anggaran. Di sisi lain, BPT memerlukan konstruksi fisik yang lebih besar namun biaya materialnya lebih rendah dan bersifat pasif. Untuk memberikan pemahaman yang lebih komprehensif terhadap aspek teknis, operasional, dan ekonomis dari kedua jenis infrastruktur tersebut, **Tabel 3** berikut merangkum perbandingan antara PRV dan BPT berdasarkan berbagai parameter utama.

Berdasarkan hasil perbandingan teknis, PRV menawarkan presisi tinggi dalam pengaturan tekanan serta fleksibilitas dalam pemasangan, khususnya pada jaringan eksisting atau lokasi dengan keterbatasan ruang. Meskipun demikian, ketergantungan pada komponen mekanis menjadikan PRV rentan terhadap gangguan jika tidak dirawat secara berkala. Interval servis rutin dan kebutuhan inspeksi teknis menjadikan biaya operasional PRV relatif menengah hingga tinggi. Dalam sistem seperti Cilongkrang, dengan tekanan hingga 90 bar yang perlu dikendalikan bertahap, keberadaan PRV di titik strategis seperti percabangan utama dapat menjadi solusi efisien selama tersedia sumber daya teknis dan anggaran pemeliharaan yang memadai.

Tabel 3 Perbandingan PRV dan BPT

Aspek	Pressure Reducing Valve (PRV)	Bak Pelepas Tekan (BPT)
Volume Bangunan	2m x 1,5m x 2m	3,9m x 2,9m x 2,6m
Jumlah (Sumber Air hingga Reservoir)	8 unit	11 unit
Total Biaya	Rp 128.776.269,00	Rp 85.000.000,00
Biaya Operasional	Menengah, memerlukan perawatan berkala	Rendah, sistem pasif
Pemasangan pada Perbedaan Ketinggian	100 meter – 150 meter	60 meter - 100 meter
Umur Pakai / Waktu Layan	Bervariasi dari 3–20 tahun, tergantung pada kualitas katup, perawatan, dan layanannya	>20 tahun (beton bertulang)
Perawatan	<ul style="list-style-type: none"> - Untuk perawatan pencegahan, perlu melakukan servis dasar komponen utama setiap 6–12 bulan. - Setiap 6–10 tahun, bisa dilakukan servis utama katup, termasuk pemeriksaan internal dan eksternal. 	Minim perawatan
Keandalan Jangka Panjang	Rentan jika tidak dirawat, komponen rusak	Sangat andal, minim perawatan
Presisi Pengaturan Tekanan	Sangat presisi dan fleksibel, dapat disesuaikan sesuai kebutuhan	Tidak presisi, tekanan disesuaikan elevasi, hanya menurunkan tekanan alami
Kompatibilitas Sistem	Dapat dipasang di jaringan eksisting	Perlu integrasi sistem yang dirancang ulang
Risiko Kegagalan Sistem	Tinggi jika PRV macet atau tersumbat	Rendah, asalkan konstruksi benar
Sistem Operasi	Mekanis (memerlukan teknisi)	Pasif (gravitasi alami)

Sumber: Hasil Analisis, 2025

Sebaliknya, BPT beroperasi secara pasif dengan memanfaatkan energi gravitasi untuk membuang kelebihan tekanan. Ini menjadikan BPT sangat cocok diterapkan di wilayah rural atau dengan ketersediaan lahan yang cukup. Keunggulan utama BPT terletak pada minimnya kebutuhan pemeliharaan, daya tahan struktur beton bertulang, serta multifungsi sebagai titik scouring atau pencuci pipa. Namun, BPT memiliki keterbatasan dari sisi fleksibilitas, karena tekanan yang dikendalikan bersifat tidak presisi dan sepenuhnya bergantung pada elevasi. Oleh karena itu, peran BPT lebih tepat digunakan sebagai pemecah tekanan alami antar segmen jaringan, bukan sebagai kontrol tekanan presisi.

Dari aspek biaya, hasil menunjukkan bahwa total pengadaan dan konstruksi satu unit PRV diestimasi mencapai Rp 128.776.269,00, sedangkan BPT hanya sekitar Rp 85.000.000,00. Selisih ini sebagian besar berasal dari biaya pengadaan PRV sebagai alat mekanis. Dengan mempertimbangkan umur layanan, PRV memiliki masa pakai 3–20 tahun tergantung pemeliharaan, sedangkan BPT dapat bertahan lebih dari 20 tahun dengan struktur yang baik. Oleh karena itu, strategi teknis yang direkomendasikan untuk Cilongkrang adalah penggunaan kombinasi PRV dan BPT yang disesuaikan dengan zonasi elevasi dan kondisi tapak, guna mengoptimalkan efisiensi teknis, keandalan jangka panjang, dan biaya siklus hidup sistem distribusi.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis teknis dan ekonomis, sistem penyediaan air bersih di wilayah Cilongkrang yang menggunakan pendekatan distribusi berbasis gravitasi menunjukkan potensi efisiensi operasional yang tinggi. Namun demikian, sistem ini juga menghadapi tantangan serius akibat tekanan hidrostatik ekstrem yang dapat mencapai lebih dari 90 bar, yang berisiko merusak struktur jaringan perpipaan apabila tidak dikendalikan dengan baik. Penelitian ini menunjukkan bahwa Bak Pelepas Tekan (BPT) lebih tepat diterapkan pada wilayah dengan perbedaan elevasi yang besar dan ketersediaan lahan yang memadai. Sistem pasif ini membutuhkan perawatan minimal dan memiliki umur teknis yang panjang, lebih dari 20 tahun, sehingga andal untuk digunakan dalam jangka panjang. Sementara itu, Pressure Reducing Valve (PRV) lebih sesuai diterapkan di wilayah padat penduduk atau area dengan keterbatasan ruang. Meskipun membutuhkan biaya investasi dan perawatan yang lebih tinggi, PRV mampu memberikan pengaturan tekanan yang presisi dan fleksibel. Oleh karena itu, strategi teknis yang paling efektif dan efisien adalah dengan mengombinasikan penggunaan PRV dan BPT berdasarkan pembagian zona elevasi. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan keandalan sistem dan efisiensi biaya, tetapi juga berkontribusi terhadap penurunan kehilangan air (non-revenue water) akibat tekanan berlebih dan kebocoran dalam jaringan distribusi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Moslehi and M. Jalili-Ghazizadeh, “Pressure-Pipe Breaks Relationship in Water Distribution Networks: A Statistical Analysis,” *Water Resources Management*, vol. 34, no. 9, pp. 2851–2868, Jul. 2020.
- [2] R. P. W. Siswantoro, D. A. Susanti, and I. G. N. Prasetya, “Gravity Fed Rural Water Supply Design at Mount Rinjani Lombok for Sustainable Tourism,” in *ICE Virtual Library*, ICE Publishing, 2023.
- [3] R. Li, H. Li, M. Lv, C. Wang, and Y. Cheng, “Transient hydraulic analysis of the water delivery pipeline in mountainous areas for cascade pressurized pump stations,” *Water Pract Technol*, vol. 19, no. 8, pp. 3389–3404, Aug. 2024.
- [4] A. M. Baghapour, M. M. Mahvi, and N. Sadeghi, “Design and operational considerations for break pressure tanks in rural gravity-fed water systems,” *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, vol. 69, no. 6, pp. 524–533, 2020.
- [5] D. F. Njiraini, J. M. Ndambuki, and A. M. Abdel-Shafy, “A comparative evaluation of pressure control technologies in high-gradient water supply systems,” *Water Pract Technol*, vol. 16, no. 4, pp. 1231–1242, 2021.
- [6] P. T. B. Raharja, “Justifikasi Teknis: Peningkatan Kapasitas Air Minum SPAM Perkotaan Majalengka bagi Penyiapan Infrastruktur Kawasan Pendidikan Lingkar Utara dari Mata Air Cilongkrang,” Kabupaten Majalengka, 2023.

- [7] S. Kowalski and M. Suchorab, "Flow control using a pressure-reducing valve and active pressure control can reduce leakage in water distribution systems," *AQUA – Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, vol. 73, no. 3, pp. 453–463, 2024.
- [8] G. A. Rokstad, "Optimisation of Fixed-Outlet and Flow-Modulated Pressure Reduction Measures in Looped Water Distribution Networks Constrained by Fire Fighting Capacity Requirements," *Int J Environ Res Public Health*, vol. 18, no. 13, p. 7088, Jul. 2021.
- [9] M. Wang, Y. Tan, L. Li, and Q. Zhang, "Optimized regulation scheme of valves in self-pressurized water pipeline network and water hammer protection research," *Water (Basel)*, vol. 17, no. 10, p. 1534, May 2025.
- [10] A. K. Wibowo and A. Slamet, "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*, vol. 12, no. 1, 2024, doi: 10.26418/jtllb.v12i1.74304.