

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM)

Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) adalah sistem yang terintegrasi untuk memenuhi kebutuhan air minum, mulai dari pengambilan air baku, pengolahan, penyimpanan, distribusi hingga konsumen. SPAM terdiri dari berbagai komponen seperti *intake*, instalasi pengolahan air (IPA), *reservoir*, jaringan pipa transmisi, dan distribusi. Berdasarkan sumber air bakunya, SPAM dapat dibedakan menjadi SPAM berbasis air permukaan, air tanah, atau air hujan.

SPAM Regional Jatiluhur 1 merupakan salah satu contoh implementasi konsep SPAM Regional. Hal ini bertujuan untuk melayani kebutuhan air minum di beberapa wilayah secara terintegrasi. Konsep ini diatur dalam Peraturan Pemerintah No. 122 Tahun 2015 tentang Sistem Penyediaan Air Minum yang menekankan pentingnya pengembangan SPAM secara regional untuk meningkatkan efisiensi dan efektivitas pelayanan. Hal ini sejalan dengan UU No. 17 Tahun 2019 tentang Sumber Daya Air yang menekankan pentingnya pengelolaan sumber daya air yang berkelanjutan dan terpadu.

Peraturan-peraturan ini memberikan kerangka hukum yang jelas untuk pengembangan dan pengelolaan SPAM, memastikan bahwa semua kegiatan terkait air minum dilaksanakan dengan memperhatikan aspek keberlanjutan dan kualitas layanan yang optimal. Peraturan Permen PUPR No.27/PRT/M/2016 tentang Penyelenggaraan Sistem Penyediaan Air Minum juga memberikan pedoman teknis yang diperlukan untuk implementasi SPAM agar berjalan efektif.

2.2 Transmisi Air Minum

Sistem transmisi air minum berfungsi untuk mengalirkan air dari instalasi pengolahan air (IPA) ke *reservoir* atau jaringan distribusi. Pada SPAM Regional Jatiluhur 1, sistem transmisi yang digunakan adalah untuk mengalirkan air dari

reservoir ke *offtaker* pada masing-masing trase. Komponen utama sistem transmisi meliputi pipa transmisi, pompa, dan bangunan pelengkap seperti *valve* dan *hydrant*. Kinerja sistem transmisi dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti kondisi fisik pipa, topografi, dan manajemen operasional.

Perencanaan sistem transmisi harus memperhatikan standar dan peraturan yang berlaku, seperti SNI 7509:2011 tentang tata cara perencanaan teknik jaringan distribusi dan pipa utama air minum. Standar ini memberikan panduan dalam menghitung kapasitas dan dimensi pipa transmisi yang dibutuhkan. Dengan mengikuti pedoman ini, diharapkan sistem transmisi yang berjalan dapat berfungsi secara optimal dan memenuhi kebutuhan masyarakat.

Selain itu, Permen PUPR No.4 Tahun 2017 tentang Penyelenggaraan Sistem Penyediaan Air Minum juga mengatur tentang aspek teknis dan operasional dari sistem transmisi, memastikan bahwa semua komponen sistem dirancang dan dikelola sesuai dengan standar yang ditetapkan. Hal ini penting untuk menjaga kualitas air yang didistribusikan dan meminimalkan kehilangan air selama proses transmisi.

2.3 Analisis Hidrolik Sistem Transmisi

Analisis hidrolik diperlukan untuk memahami karakteristik aliran dalam sistem transmisi air minum. Prinsip-prinsip dalam pipa mengikuti hukum hidrodinamika. Prinsip ini dapat dihitung menggunakan persamaan Bernoulli dan persamaan kontinuitas. Kehilangan tekanan (*head loss*) dalam pipa dapat dihitung menggunakan rumus Darcy-Weisbach atau Hazen-Williams. Rumus-rumus berikut memberikan gambaran tentang efisiensi sistem transmisi.

Analisis jaringan pipa transmisi dapat dilakukan dengan metode Hardy-Cross atau metode nodal. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui distribusi aliran dan tekanan dalam jaringan pipa, sehingga kinerja sistem transmisi dapat dioptimalkan. Pentingnya analisis ini juga diatur oleh SNI 7509:2011. Peraturan ini mencakup tata cara perencanaan teknik jaringan distribusi dan pipa utama air minum.

Lebih lanjut, Permen PUPR No. 26/PRT/M/2014 tentang Prosedur Operasional Standar Pengelolaan Sistem Penyediaan Air Minum juga menekankan pentingnya analisis hidrolis dalam pengelolaan sistem transmisi. Peraturan ini membantu agar pengelola dapat mengambil langkah-langkah yang tepat untuk meningkatkan kinerja dan efisiensi sistem. Dengan demikian, analisis hidrolis yang baik akan mendukung pengelolaan air minum yang lebih efektif dan berkelanjutan.

2.3.1 Stabilitas Tekanan dalam Sistem Transmisi

Stabilitas tekanan dalam pipa transmisi air adalah faktor kritis yang mempengaruhi efisiensi dan keandalan sistem distribusi air. Tekanan dalam pipa dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk panjang pipa, diameter, jenis material, viskositas fluida, dan kecepatan aliran. Penurunan tekanan sering kali terjadi akibat gesekan antara fluida dan dinding pipa yang dikenal sebagai *major losses*. Selain itu, perubahan arah aliran atau adanya *fitting* dalam sistem juga dapat menyebabkan *minor losses*.

Dalam konteks penurunan tekanan dapat digunakan Rumus 2.1 :

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{\rho v^2}{2} \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana :

ΔP = Penurunan tekanan

f = Faktor gesekan Darcy

L = Panjang pipa

D = Diameter pipa

ρ = Densitas fluida

v = Kecepatan aliran

Penelitian dan rumus menunjukkan bahwa peningkatan panjang pipa akan berbanding lurus dengan penurunan tekanan. Hal ini disebabkan oleh interaksi fluida yang lebih lama dengan dinding pipa. Air mengalami peningkatan gesekan

dan menyebabkan lebih banyak kehilangan tekanan. Selain itu, material pipa juga berpengaruh, pipa yang lebih halus seperti *High Density Polyethylene* (HDPE) memiliki kehilangan tekanan yang lebih rendah dibandingkan dengan pipa yang lebih kasar seperti pipa beton.

2.3.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Penurunan Tekanan

Faktor yang mempengaruhi penurunan tekanan dalam pipa meliputi panjang pipa, semakin panjang pipa maka kemungkinan penurunan tekanan akan lebih signifikan karena air terkena gesekan yang lebih lama dengan dinding pipa. Lalu kondisi *fitting* dan *valve* juga berpengaruh terhadap penurunan tekanan. Setiap perubahan arah dalam sistem transmisi juga dapat menyebabkan penurunan tekanan. *Fitting* dan *valve* harus dirancang dengan baik untuk menghilangkan kehilangan tekanan. Menurut Chadwick et al. (2004) dalam *Water Supply Engineering* menunjukkan bahwa desain *fitting* dan *valve* yang buruk dapat meningkatkan kehilangan energi dalam sistem. Oleh karena itu, penting untuk merancang sistem transmisi dengan mempertimbangkan penggunaan katup pengatur dan pemilihan jenis pompa yang tepat agar dapat menjaga kestabilan tekanan dengan lebih baik.

Kondisi fisik sambungan juga dapat menyebabkan kehilangan tekanan dalam pipa transmisi, sekecil apapun kebocoran pada sambungan antara pipa dapat berpengaruh terhadap penurunan tekanan dalam pipa. Kondisi sambungan antara pipa perlu di cek secara berkala untuk mengurangi resiko terjadinya penurunan tekanan air. Apabila udara masuk ke dalam pipa akibat sambungan yang tidak rapat, maka akan sangat berpengaruh terhadap kestabilan tekanan dalam pipa transmisi.

2.3.3 Sistem Pompa untuk Menjaga Kestabilan Tekanan

Dalam kestabilan tekanan, pompa berperan penting dalam sistem transmisi air. Pompa bertugas untuk mengatasi kehilangan tekanan akibat gesekan dan memastikan bahwa air dapat didistribusikan dengan efisien ke seluruh jaringan. Dalam konteks SPAM Regional Jatiluhur 1, penggunaan pompa yang tepat sangat penting untuk menjaga kestabilan tekanan sepanjang trase Teluk Buyung.

Menurut Mays (2000) dalam bukunya *Water Distribution System Handbook*, pompa harus dirancang untuk memenuhi kebutuhan aliran maksimum pada jam puncak, serta harus dilengkapi dengan pompa cadangan untuk memastikan kontinuitas pasokan air. Dalam sistem pompa yang tidak dilengkapi *Variable Speed Drive* (VSD), umumnya digunakan pompa yang beroperasi dalam model *on-off*. Pompa ini mengandalkan saklar tekanan untuk menghidupkan dan mematikan pompa berdasarkan kebutuhan aliran. Meskipun pompa ini lebih ekonomis, mereka memiliki kelemahan dalam hal fluktuasi tekanan yang menyebabkan lonjakan dan penurunan tekanan yang berbahaya bagi infrastruktur pipa.

2.4 Skema Pemasangan Pompa pada Pipa Transmisi

Pemasangan pompa dalam sistem pipa transmisi air merupakan aspek penting yang mempengaruhi efisiensi dan kestabilan tekanan dalam jaringan distribusi air. Berikut adalah beberapa skema pemasangan pompa serta kondisi yang memerlukan pemasangan pompa pada pipa transmisi:

1. Kondisi Pemasangan Pompa
 - Ketinggian Elevasi: Pompa diperlukan ketika terdapat perbedaan elevasi yang signifikan antara sumber air dan titik distribusi. Jika elevasi wilayah lebih tinggi dari sumber air, pompa penguat (*booster pump*) harus dipasang untuk mengatasi kehilangan tekanan akibat gravitasi.
 - Jarak Jauh dari Sumber Air: Jika jarak antara sumber air dan titik distribusi terlalu jauh, pompa diperlukan untuk memastikan bahwa air dapat mencapai tujuan dengan tekanan yang cukup. Hal ini penting untuk menjaga kontinuitas pasokan air kepada konsumen.
2. Skema Pemasangan Pompa
 - Pompa Ditempatkan di Sumber Air: Dalam skema ini, pompa dipasang dekat dengan sumber air, seperti sumur atau *reservoir*. Pompa ini bertugas untuk mengangkat air ke dalam sistem pipa

transmisi. Hal ini sering dilakukan pada sistem yang menggunakan pompa *submersible* atau pompa permukaan.

- Pompa Penguat di Tengah Jaringan: Pada jaringan pipa transmisi yang panjang, pompa penguat dapat dipasang di tengah jalur untuk meningkatkan tekanan dan memastikan aliran yang konsisten. Ini berguna untuk mengatasi kehilangan tekanan akibat gesekan dalam pipa.
 - Pompa di Titik Distribusi: Dalam beberapa kasus, pompa juga dapat dipasang di titik distribusi akhir sebelum air disalurkan ke konsumen. Pompa ini berfungsi untuk meningkatkan tekanan agar air dapat mencapai ketinggian bangunan atau area yang lebih tinggi.
3. Pemasangan dan Perawatan Pompa
- Persiapan Lokasi: Pemilihan lokasi pemasangan pompa harus mempertimbangkan aksesibilitas untuk perawatan dan perbaikan. Lokasi harus terlindungi dari paparan langsung sinar matahari dan hujan, serta memiliki permukaan yang stabil.
 - Pemasangan Pipa *Inlet* dan *Outlet*: Pipa *inlet* harus terhubung dari sumber air dari pompa ke jaringan distribusi. Pastikan semua sambungan rapat untuk mencegah kebocoran.
 - Perawatan Rutin: Melakukan pemeriksaan dan pemeliharaan rutin pada pompa sangat penting untuk memastikan kinerja optimal. Ini termasuk pemeriksaan komponen seperti *impeller*, *seal*, dan motor secara berkala.

2.5 Menjaga Kestabilan Tekanan

Tekanan air merupakan salah satu parameter kunci yang mempengaruhi kinerja sistem transmisi. Parameter ini langsung berhubungan dengan kemampuan sistem untuk mendistribusikan air secara efisien ke *oftaker*. Pengukuran tekanan air akan dilakukan pada beberapa titik dalam sistem transmisi untuk mendapatkan gambaran

yang komprehensif tentang fluktuasi ataupun penurunan tekanan sepanjang trase.

Data tekanan air ini akan digunakan untuk menganalisis apakah sistem transmisi mampu mempertahankan tekanan yang sesuai dengan standar yang ditetapkan oleh peraturan dan SNI. Tekanan yang terlalu rendah dapat mengindikasikan adanya masalah dalam sistem, seperti kebocoran, penyumbatan, adanya masalah sambungan antara pipa, ataupun udara yang masuk ke dalam pipa. Sedangkan tekanan yang terlalu tinggi dapat berpotensi untuk merusak kondisi fisik pipa.

Analisis terhadap tekanan air juga akan membantu dalam mengidentifikasi potensi peningkatan efisiensi operasional sistem transmisi. Dengan memahami pola tekanan dalam sistem, maka langkah perbaikan yang diperlukan untuk memastikan bahwa distribusi transmisi air dapat berjalan dengan lancar.

Menjaga kestabilan tekanan dalam sistem pipa transmisi air adalah aspek yang penting untuk memastikan distribusi air yang efisien dan mencegah kerusakan pada infrastruktur. Kestabilan tekanan yang baik tidak hanya berkontribusi pada kualitas layanan, tetapi juga mengurangi risiko kebocoran dan kerusakan pipa. Berikut adalah kegiatan rutin yang dapat dilakukan untuk menjaga kestabilan tekanan dalam pipa transmisi:

1. Pemeriksaan Rutin Tekanan Air: melakukan pengukuran tekanan secara berkala di berbagai titik dalam sistem transmisi penting untuk memastikan bahwa tekanan tetap berada pada batas yang diinginkan. Pengukuran ini dapat dilakukan menggunakan *pressure gauge* yang dipasang pada titik-titik strategis dalam jaringan pipa. Pada penelitian ini titik-titik strategis akan ditentukan melalui simulasi yang akan dilaksanakan. Pemantauan tekanan secara rutin dapat membantu mengidentifikasi penurunan tekanan yang tidak normal. Penurunan tekanan ini dapat disebabkan oleh kebocoran, penyumbatan, atau masalah lain dalam sistem. Apabila ditemukan penurunan tekanan yang signifikan, maka langkah perbaikan harus segera dilaksanakan untuk mencegah kerugian lebih lanjut.

2. Perawatan Pompa: pompa adalah komponen utama dalam menjaga aliran dan tekanan dalam sistem pipa transmisi. Melakukan pemeriksaan dan perawatan pada pompa secara berkala sangat penting, termasuk pemeliharaan komponen seperti *impeller*, *casing*, *seal*, dan motor pompa. Pompa dirancang untuk memenuhi kebutuhan aliran maksimum pada jam puncak, serta harus dilengkapi dengan pompa cadangan untuk kontinuitas pasokan air. Pemeliharaan yang baik pada pompa dapat mencegah fluktuasi tekanan dan meningkatkan efisiensi operasional.
3. Pengujian Sistem Secara Berkala: melakukan pengujian sistem transmisi secara berkala dapat membantu mengidentifikasi masalah yang terjadi, pengujian ini juga dapat memastikan bahwa semua komponen berfungsi dengan baik. Pengujian ini mencakup pemeriksaan terhadap semua *fitting*, *valve*, sambungan antar pipa, serta pipanya itu sendiri untuk memastikan tidak ada kebocoran atau penyumbatan yang terjadi. Pengujian ini dapat dilakukan dengan *performance test* atau *year operation*, dengan pengujian ini yang dilakukan secara berkala dapat diharapkan untuk menjaga status kondisi pipa trase pada kondisi optimal.

2.6 Standar dan Peraturan terkait Sistem Transmisi Air Minum

Dalam pengelolaan sistem transmisi air minum, terdapat berbagai standar dan peraturan yang harus diikuti untuk memastikan sistem berfungsi dengan baik dan memenuhi kebutuhan masyarakat. Berikut adalah standar teknis, peraturan pemerintah, serta rumus-rumus relevan yang digunakan dalam analisis hidrolis.

Standar Nasional Indonesia (SNI) memberikan pedoman teknis yang penting dalam merancang dan mengelola sistem transmisi air minum. Salah satu rumus yang digunakan dalam analisis hidrolis adalah rumus Hazen-Williams. Rumus ini digunakan untuk menghitung kehilangan tekanan (*head loss*) dalam pipa. Berikut merupakan Rumus 2.2:

$$hf = \frac{10,675 \times L \times Q^{1,85}}{C^{1,85} \times D^{4,87}} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana

hf = Kehilangan kepala akibat gesekan (m)

L = panjang pipa (m)

Q = Laju aliran (m³/s)

C = koefisien Hazen-Williams (dimensionless)

D = diameter dalam pipa (m)

Rumus untuk menghitung laju aliran dapat dihitung menggunakan Rumus 2.3 Berikut:

$$v = \frac{Q}{A} \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana :

Q = laju aliran (m³/s)

A = luas penampang pipa (m²)

V = kecepatan aliran (m/s)

Peraturan pemerintah yang mengatur sistem penyediaan air minum di Indonesia antara lain: PP No. 12 Tahun 2015 yang mengatur Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM), penyelenggaraan, pencegahan pencemaran, serta wewenang dan tanggung jawab dalam pelaksanaan SPAM. Permen PUPR No.27/PRT/M/2016 yang menyediakan pedoman tentang penyelenggaraan SPAM. Serta Permen PUPR No.4 Tahun 2017 yang mengatur lebih lanjut tentang penyelenggaraan SPAM dengan fokus pada aspek teknis, operasional, dan manajerial. Peraturan-peraturan ini bertujuan memberikan kerangka hukum yang jelas bagi pengelolaan dan penyelenggaraan sistem penyediaan air minum.

Peraturan lainnya yang relevan untuk pengelolaan sistem penyediaan air minum antara lain: Peraturan Dirjen Cipta Karya No.61/KPTS/CK/1998 yang mengatur persyaratan teknis jalan masuk ke sistem penyediaan air minum, Perda Provinsi Jawa Barat No. 5 Tahun 2021 yang mengatur penyelenggaraan sistem penyediaan air minum di provinsi, serta Perda Kabupaten Bekasi No. 6 Tahun 2013

yang mengatur pelayanan air minum di Kabupaten Bekasi. Dengan memenuhi semua standar dan peraturan ini, serta menggunakan rumus-rumus yang relevan, diharapkan pengelolaan sistem transmisi air minum dapat dilakukan secara efektif dan responsif terhadap kebutuhan masyarakat setempat.

2.7 Metode Evaluasi Kinerja Transmisi

Evaluasi kinerja sistem transmisi air minum dapat dilakukan dengan menggunakan indikator-indikator kinerja, seperti efisiensi transmisi, kehilangan air, dan keandalan sistem. Pengukuran indikator kinerja dilakukan melalui pemantauan dan pengumpulan data secara berkala. Hal ini penting untuk memastikan bahwa sistem beroperasi sesuai dengan standar yang ditetapkan.

Hasil evaluasi kinerja dapat digunakan sebagai dasar untuk melakukan perbaikan dan peningkatan sistem transmisi, sehingga dapat memenuhi target pelayanan yang ditetapkan. Evaluasi kinerja juga merupakan bagian dari pengelolaan aset infrastruktur air minum. Evaluasi ini juga harus dilakukan secara berkelanjutan untuk menjaga kualitas layanan.

Evaluasi kinerja ini dapat dilihat dalam Permen PUPR No. 27/PRT/M/2016 tentang Penyelenggaraan Sistem Penyediaan Air Minum, peraturan ini mencakup Lampiran III tentang Indikator Kinerja SPAM. Selain itu, Peraturan BPPSPAM No. 002/KPTS/K-6/IV/2010 tentang Penilaian Kinerja Pelayanan Penyelenggaraan Pengembangan SPAM juga menekankan pentingnya evaluasi kinerja dalam memastikan bahwa sistem penyediaan air minum berfungsi dengan baik dan memenuhi harapan masyarakat.

2.8 Aspek Lingkungan dan Sosial dalam Pengembangan SPAM

Pengembangan SPAM harus memperhatikan aspek lingkungan dan sosial untuk menjamin keberlanjutan sistem. Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL) perlu dilakukan untuk mengidentifikasi dan mengelola dampak yang mungkin timbul akibat pembangunan infrastruktur air minum. Proses AMDAL ini harus melibatkan masyarakat dan pemangku kepentingan untuk memastikan bahwa

semua perspektif dipertimbangkan.

Partisipasi masyarakat juga penting dalam pengembangan SPAM, mulai dari perencanaan, pembangunan, hingga operasi dan pemeliharaan. Pelibatan masyarakat dapat meningkatkan penerimaan dan rasa memiliki terhadap proyek, serta menjamin keberlanjutan sistem. Dengan melibatkan masyarakat, dapat diharapkan terciptanya kesadaran akan pentingnya menjaga kualitas dan kuantitas air.

Peraturan tentang hal ini dapat dilihat dalam UU No. 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, yang mengatur tentang pentingnya AMDAL dalam setiap proyek yang berpotensi menimbulkan dampak lingkungan. Selain itu, Permen LHK No. 38 Tahun 2019 tentang Jenis Rencana Usaha dan/atau Kegiatan yang Wajib Memiliki AMDAL juga memberikan panduan mengenai proyek-proyek yang memerlukan analisis dampak lingkungan.

2.9 *WaterCAD*

Aplikasi *WaterCAD* adalah perangkat lunak atau software yang dirancang untuk analisis dan perencanaan sistem distribusi air. *WaterCAD* dapat digunakan untuk perencanaan, analisis, serta mengelola jaringan pipa distribusi air dengan lebih efisien. Aplikasi ini digunakan untuk membantu menganalisis hidrolis, simulasi skenario, visualisasi data, serta pemodelan jaringan. *WaterCAD* membuat simulasi tekanan *WaterCAD* membuat simulasi tekanan pada pemodelan yang telah dibuat, analisis tekanan akan dapat terlihat pada aplikasi *WaterCAD*. Setelah dilakukan simulasi, evaluasi kondisi aliran dapat terlihat agar dapat membuat rekomendasi yang sesuai dengan kondisi lapangan. Hasil simulasi dari *WaterCAD* akan tervisualisasi dengan grafik pada jaringan pipa secara langsung. Fitur ini sangat berguna untuk identifikasi area dengan tekanan yang tidak stabil atau lebih rendah dari yang direncanakan.

2.10 Penelitian Terdahulu

A. Analisis Sistem Transmisi dan Distribusi Air Bersih Perumda Air Minum Tirta Jungporo Wilayah IKK Bateatlit

Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi sistem transmisi dan distribusi air bersih yang dikelola oleh Perumda Air Minum Tirta Jungporo di wilayah pelayanan IKK Bateatlit, Kabupaten Jepara. Fokus utama dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi masalah yang dihadapi dalam sistem penyediaan air, seperti tingkat kebocoran yang tinggi dan rendahnya angka pelayanan yang hanya mencapai 33,9%. Penelitian ini juga mencatat bahwa kebocoran dalam sistem transmisi mencapai angka 31,97% yang menunjukkan adanya inefisiensi dalam pengelolaan jaringan distribusi. Dalam analisis hidrolika pada sistem transmisi, hasilnya menunjukkan bahwa tekanan air dan kecepatan aliran pada beberapa area dalam jaringan distribusi masih belum memenuhi standar yang ditetapkan.

B. *Appraising the Impact of Pressure Control on Leakage Flow in Water Distribution Networks*

Penelitian ini membahas bagaimana pengendalian tekanan dalam sistem distribusi air dapat mempengaruhi aliran kebocoran. Penelitian ini menunjukkan bahwa pengurangan tekanan di dalam jaringan distribusi dapat secara signifikan mengurangi tingkat kebocoran yang terjadi. Dengan menggunakan model simulasi, peneliti menganalisis berbagai skenario pengaturan tekanan dan dampaknya terhadap aliran air dan kebocoran di jaringan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan kontrol tekanan yang efektif tidak hanya mengurangi kebocoran tetapi juga meningkatkan efisiensi operasional sistem distribusi air. Penelitian ini menggarisbawahi pentingnya pengelolaan tekanan yang tepat untuk menjaga stabilitas dan keandalan sistem distribusi air, serta untuk memenuhi kebutuhan masyarakat akan air bersih.

C. *Dynamical Stability of Water Distribution Networks*

Penelitian ini membahas jaringan distribusi air adalah sistem yang

dirancang untuk menyediakan air minum dan mendukung upaya pemadaman kebakaran. Sistem ini harus mampu menangani variasi permintaan air sepanjang hari dan tahun, serta menghadapi ancaman seperti kontaminasi dan pemadaman listrik. Desain dan pengoperasian sistem ini harus memprioritaskan upaya untuk meminimalkan potensi kegagalan. Manajemen risiko dalam teknik penyediaan air melibatkan penilaian kemungkinan dan konsekuensi dari kegagalan, sedangkan manajemen ketahanan bertujuan untuk mempersiapkan diri menghadapi masalah yang tidak terduga. Ketahanan dipandang sebagai kemampuan sistem untuk menahan, bertahan, dan pulih dari tekanan. Jaringan ini terdiri dari pipa, *reservoir*, pompa, dan *valve*. Kegagalan dalam jaringan dapat secara signifikan mengganggu layanan. Minat terhadap ilmu jaringan baru-baru ini mendorong upaya untuk menerapkan analisis jaringan dalam mengevaluasi ketahanan sistem distribusi air.

Langkah-langkah ketahanan yang ada sering kali berfokus pada struktur jaringan atau tingkat aliran dalam keadaan stabil, tetapi mengabaikan sifat dinamis dan transien dari aliran air, yang penting untuk memahami ketahanan. Untuk menilai ketahanan secara tepat, perlu dieksplorasi dinamika transien, terutama karena sistem distribusi air nyata mengalami perubahan akibat operasi dan potensi kegagalan.

D. *Pressure as a Predictor of Occurrence of Pipe Breaks in Water Distribution Networks*

Pada penelitian ini membahas tentang bagaimana kebocoran atau ledakan dalam jaringan distribusi air dapat menyebabkan masalah dalam biaya dan waktu. Dalam penelitian ini, mengelola tekanan dapat membantu mengurangi peluang kerusakan tersebut. Studi ini memperkenalkan metode untuk menganalisis hubungan antara kerusakan pipa dan tekanan air menggunakan indikator tekanan tertentu. Tujuannya adalah menemukan indikator mana yang paling memengaruhi kemungkinan kerusakan pipa. Metode ini membandingkan *cumulative distribution functions* (CDF) yang terkait dengan kerusakan dan sampel acak dari CDF indikator tekanan. Indikator yang paling berpengaruh menunjukkan jumlah kasus yang

ditolak tinggi berdasarkan uji statistik. Analisis sensitivitas menyoroti indikator momen dan periode perhitungannya. Metode ini diuji pada enam area di Madrid, dengan dua area tambahan digunakan untuk validasi. Hasilnya menunjukkan bahwa rentang tekanan adalah indikator terbaik untuk memprediksi kerusakan.

Utilitas air bertujuan memenuhi kebutuhan pengguna dengan menyediakan aliran dan tekanan air yang konsisten. Namun, mereka menghadapi tantangan seperti ledakan pipa, yang dapat mengganggu layanan dan merusak kualitas air. Ledakan pipa dapat menyebabkan biaya tinggi dan dampak lingkungan yang signifikan. Biaya penggantian pipa bervariasi tergantung pada sifatnya seperti material dan panjang pipa. Perbaikan juga membawa biaya terkait gangguan layanan. Oleh karena itu, penting untuk mengurangi kerusakan pipa. Beberapa penyebab potensial ledakan, termasuk usia pipa, diameter, panjang, material, dan tekanan air, dapat dianalisis, meskipun pengumpulan data sering kali kompleks. Pendekatan yang disederhanakan dengan fokus pada tekanan direkomendasikan. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa mengelola tekanan dapat secara signifikan mengurangi frekuensi ledakan, menekankan pentingnya pemeliharaan preventif.

Studi ini menyimpulkan bahwa rentang tekanan adalah indikator paling signifikan yang memengaruhi kerusakan pipa. Hasilnya menunjukkan bahwa mengelola variabilitas tekanan sangat penting. Metodologi ini menawarkan cara baru bagi perusahaan utilitas air untuk mengidentifikasi indikator yang dapat secara efektif mengurangi kerusakan pipa.

E. *Global Resilience Analysis of Water Distribution Networks*

Penelitian ini membahas tentang bagaimana ketahanan sangat penting untuk menjadikan sistem lebih berkelanjutan. Ketahanan ini dapat dipahami dengan dua cara, yaitu sebagai seperangkat prinsip desain atau sebagai kinerja sistem dalam menghadapi ancaman kerusakan. Penelitian ini berfokus pada bagaimana sistem distribusi air berfungsi di bawah kondisi yang tidak terduga dan mendefinisikan ketahanan sebagai kemampuan sistem untuk mengurangi kegagalan layanan selama situasi luar biasa. Memahami ketahanan bawaan dari suatu sistem sangat penting

untuk meningkatkan kinerjanya.

Analisis risiko adalah metode umum untuk mempelajari potensi ancaman, tetapi sulit menangani ancaman yang tidak diketahui. Sebagai gantinya, disarankan untuk fokus pada bagaimana sistem menangani berbagai jenis kegagalan, seperti kegagalan pipa yang disebabkan oleh berbagai faktor internal atau eksternal. Kinerja sistem di bawah tekanan ini menjadi kunci untuk memahami ketahanannya. Penelitian ini mengusulkan metode baru bernama *global resilience analysis* (GRA), yang mengevaluasi ketahanan sistem distribusi air secara keseluruhan untuk berbagai skenario kegagalan. Analisis ini mengungkap tingkat ketahanan yang berbeda di antara sistem dan menyoroti skenario kritis yang dapat ditangani untuk meningkatkan ketahanan secara efektif. Secara keseluruhan, GRA dapat mengidentifikasi ketahanan sistem terhadap berbagai jenis kegagalan, potensi dampak ekstrem, dan komponen kritis yang perlu difokuskan untuk strategi operasional dan pemeliharaan. Penelitian ini juga menekankan bahwa meningkatkan kapasitas tidak selalu meningkatkan ketahanan.