

## Perumusan Strategi Pengendalian Kehilangan Air Berbasis Pola Spasial Pada Jaringan Distribusi Air Bersih Kawasan Industri PIER

### *Formulation of Water Loss Control Strategies Based on Spatial Patterns in the Water Distribution Network of the PIER Industrial Estate*

Anggy Yoga Hanggara<sup>1</sup>, Widyo Nugroho\*<sup>2</sup>, Sulhan<sup>3</sup>

<sup>1</sup>PT. Air Bersih Jawa Timur (Perseroda), Surabaya 60292, Indonesia

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Sipil, Universitas Bojonegoro, Bojonegoro 62119, Indonesia.

<sup>3</sup>Program Studi Ekonomi Syariah, STAI Az-Zain, Sampang 69254, Indonesia.

\*Corresponding Author: [widyo.nugroho@gmail.com](mailto:widyo.nugroho@gmail.com)

#### ABSTRAK

Pengendalian kehilangan air membutuhkan pemahaman yang mendalam tentang faktor-faktor yang mempengaruhi. Strategi pengendalian kehilangan air harus dilakukan dengan cermat dan terarah untuk menjaga keandalan serta efisiensi sistem distribusi air bersih. Dengan memanfaatkan data dan analisis spasial, strategi ini dapat mengidentifikasi pola kebocoran pipa yang terjadi di titik-titik tertentu pada sebuah kawasan industri. Penerapan strategi ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi operasional jaringan distribusi air bersih, mengurangi kerugian akibat kehilangan air, dan meningkatkan kualitas layanan bagi pelanggan di kawasan industri PIER. Penelitian ini bertujuan untuk melengkapi pemahaman tentang pola kebocoran pipa distribusi air bersih dan menetapkan strategi dalam pengendalian kehilangan air pada jaringan distribusi air bersih di kawasan industri PIER. Analisis pola titik spasial mendapati bahwa terdapat dua kluster intensitas dari persebaran lokasi kebocoran pipa. Hal ini mempengaruhi perumusan strategi dengan mengintegrasikan beberapa aspek, antara lain aspek pemantauan, inovasi, dan identifikasi risiko.

Kata kunci: kehilangan air, pola titik spasial, jaringan distribusi air bersih, kawasan industri PIER.

#### ABSTRACT

*Water loss control requires a deep understanding of the influencing factors. The strategy for controlling water loss must be carefully and systematically implemented to maintain the reliability and efficiency of the clean water distribution system. By utilizing spatial data and analysis, this strategy can identify leakage patterns that occur at specific points within an industrial area. The implementation of this strategy is expected to improve the operational efficiency of the clean water distribution network, reduce financial losses caused by water loss, and enhance service quality for customers in the PIER industrial estate. This study aims to enrich the understanding of leakage patterns in the clean water distribution network and to establish effective strategies for water loss control in the distribution system of the PIER industrial estate. Spatial point pattern analysis reveals that there are two distinct clusters of pipe leakage locations. This finding influences the formulation of strategies by integrating several key aspects, including monitoring, innovation, and risk identification.*

*Keywords: water loss, spatial point pattern, clean water distribution network, PIER industrial estate*

#### PENDAHULUAN

Dalam era pertumbuhan industri yang pesat, keberadaan kawasan industri menjadi suatu kebutuhan yang tidak bisa diabaikan, terutama di provinsi yang memiliki pertumbuhan ekonomi tinggi sebagaimana Jawa Timur. *Pasuruan Industrial Estate Rembang (PIER)*, merupakan salah satu kawasan industri terkemuka di Jawa Timur, yang memberikan gambaran tentang pentingnya pengembangan kawasan industri dalam mendukung pertumbuhan ekonomi dan lapangan kerja pada tingkat regional. Namun, untuk mendukung aktivitas industri yang semakin berkembang, keberadaan infrastruktur yang handal, yang di antaranya adalah sistem

penyediaan air bersih, menjadi esensial (Nainggolan dkk., 2020). Pada kawasan industri PIER, sistem penyediaan air bersih telah menjadi tulang punggung dalam menopang kegiatan produksi dan sanitasi sejak tahun 1996. PT. Air Bersih Jawa Timur (Perseroda) merupakan korporasi milik pemerintah provinsi yang bertanggung jawab atas pengelolaan sistem ini, yang melibatkan berbagai aspek mulai dari proses pengolahan air hingga kegiatan distribusi ke area pelayanan konsumen. Sistem distribusi air bersih bukan hanya tentang mengalirkan air yang telah diolah, tetapi juga melibatkan sistem infrastruktur yang kompleks, seperti perangkat, bangunan, peralatan, dan jaringan infrastruktur yang terintegrasi dengan baik (Nainggolan dkk., 2021).

Dalam konteks kehilangan air pada sistem penyediaan air, pengendalian kehilangan air secara fisik, seperti kebocoran pipa, membutuhkan perhatian khusus. Upaya untuk mengatasi kehilangan air tidak hanya melibatkan penanganan fisik, tetapi juga memerlukan pemahaman mendalam tentang faktor-faktor yang mempengaruhi kehilangan air, baik dari segi fisik, operasional maupun lingkungan (Nugroho dkk., 2021). Beberapa penelitian sebelumnya pada obyek jaringan distribusi air bersih di kawasan industri telah mengidentifikasi faktor-faktor yang berkontribusi terhadap kebocoran pipa (Hanggara dkk., 2024). Faktor-faktor seperti diameter pipa, panjang pipa, debit aliran, tekanan hidraulik dan jumlah titik distribusi telah diidentifikasi berpengaruh secara dalam menentukan tingkat kehilangan air (Jang, 2018). Selain itu, aspek operasional seperti kecepatan perbaikan dan jumlah kejadian kebocoran juga memiliki peran penting (Nugroho dan Iriawan, 2019). Strategi pengendalian kehilangan air merupakan pendekatan yang harus dilakukan secara cermat dan terarah dalam menjaga keandalan serta efisiensi sistem distribusi air bersih (Jang dan Choi, 2017). Dengan memanfaatkan data dan analisis spasial, strategi ini dapat mengidentifikasi pola kerusakan pipa yang terjadi di titik-titik tertentu dalam area layanan, dalam hal ini adalah kawasan industri PIER. Melalui pemahaman mendalam tentang pola kebocoran ini, pengelola aset jaringan distribusi dapat merencanakan strategi perbaikan, pemantauan dan pemeliharaan yang lebih proaktif dan efisien (Nugroho dkk., 2022).

Dengan demikian, pendekatan ini tidak hanya menekankan deteksi dini terhadap potensi kebocoran pipa, tetapi juga memungkinkan untuk pengelolaan aset yang lebih efektif dengan mengalokasikan sumber daya secara tepat pada area-area yang memiliki risiko kebocoran yang lebih tinggi (Jang dkk., 2018). Selain itu, dengan memperhitungkan karakteristik kawasan industri PIER, seperti intensitas aktivitas industri dan jenis material pipa yang digunakan, strategi ini dapat disesuaikan untuk mengatasi tantangan khusus yang timbul dalam lingkungan industri tersebut (Nainggolan dkk., 2020). Penerapan strategi yang tepat diharapkan berujung pada peningkatan efisiensi operasional jaringan distribusi air bersih, mengurangi kerugian akibat kehilangan air, dan pada akhirnya, meningkatkan kualitas layanan dan keberlanjutan sistem penyediaan air (Nugroho dkk., 2025), khususnya kepada *tenant* yang memiliki fasilitas di kawasan industri PIER.

Penelitian ini bertujuan untuk melengkapi pemahaman tentang pola kebocoran pada jaringan pipa dan menetapkan strategi yang efektif dalam pengendalian kehilangan air pada sistem distribusi air bersih di kawasan industri PIER. Dengan demikian, upaya untuk meningkatkan efisiensi pengelolaan jaringan distribusi air bersih dapat terus dilakukan secara berkelanjutan demi mendukung pertumbuhan industri yang berkelanjutan dan berdaya saing. Hasil yang diharapkan dari penelitian ini mencakup identifikasi zona risiko kebocoran yang tinggi melalui analisis pola spasial, pengembangan strategi mitigasi risiko berbasis spasial, serta rekomendasi perbaikan operasional seperti manajemen tekanan, prioritas penggantian pipa, dan peningkatan sistem pemantauan. Pada akhirnya, penerapan strategi ini diharapkan dapat menurunkan

tingkat *Non-Revenue Water* (NRW), mengoptimalkan biaya operasional, serta meningkatkan keandalan dan kualitas layanan air bersih di kawasan industri PIER.

## METODE PENELITIAN

### TOPOLOGI SPASIAL

Basis data spasial menggambarkan sekumpulan entitas dengan lokasi atau posisi yang tetap atau berubah-ubah. Entitas spasial ini memiliki sifat topografi dasar yang memiliki lokasi, dimensi, dan bentuk. Basis data spasial memiliki integrasi tipe entitas spasial dan non-spasial. Dalam basis data spasial, terdapat dua jenis informasi, yakni spasial dan atribut. Informasi ini disimpan sebagai serangkaian data dan berisi informasi spasial atau informasi deskriptif tentang fitur spasial. Kekuatan basis data spasial adalah pada keterkaitan kedua jenis data tersebut dan hubungan spasial di antara fitur-fitur spasial. Mengakses informasi dalam basis data atribut dapat melalui fitur spasial, atau sebaliknya dapat membuat fitur spasial berdasarkan informasi dari data atribut (Roux dkk., 2020).

Fitur spasial terdiri dari (Roux dkk., 2020) :

1. Fitur titik, diwakili oleh lokasi diskrit yang mendefinisikan obyek yang batas atau bentuknya terlalu kecil untuk direpresentasikan sebagai fitur garis atau area, seperti titik kebocoran pipa.
2. Fitur garis, sekumpulan koordinat berurutan yang jika dihubungkan akan menampilkan bentuk linear dari sebuah obyek yang terlalu sempit untuk ditampilkan sebagai sebuah area, seperti trase jalur pipa.
3. Fitur area, gambar tertutup yang batasnya mencakup area homogen, seperti batas wilayah.

Berdasarkan data yang terkumpul sejak tahun 2012 sampai tahun 2021 titik lokasi kebocoran berjumlah 633 yang tersebar di lima zona layanan. Analisis spasial dimulai dengan mentransformasikan data kebocoran pipa ke dalam bentuk *point pattern* di mana wilayah studi dibagi menjadi beberapa *object tessellation* sebagaimana ditampilkan pada gambar 1 sesuai dengan jumlah zona layanan jaringan. Untuk memetakan titik lokasi kebocoran pipa di perangkat lunak R-Studio diperlukan peta zona layanan jaringan dalam bentuk data *shapefile* dengan paket *maptools*.



**Gambar 1.** *Object tessellation* wilayah studi yang terbagi 5 zona layanan

Data dalam bentuk *shapefile* mewakili obyek spasial dalam bentuk garis, titik, atau area, dan setiap obyek dapat memiliki variabel atribut yang melekat. Analisis spasial dilaksanakan dengan menggunakan R-studio dengan paket *spatstat*. Perangkat lunak ini dilengkapi dengan berbagai teknik untuk eksplorasi data dan analisis pola titik spasial. Teknik tersebut di

antaranya adalah metode *quadrat counting* (Baddeley dkk., 2015) yang digunakan untuk mengidentifikasi pola titik kebocoran pipa dengan membagi pengamatan menjadi *subregion* yang disebut sebagai *quadrat*, dan kemudian menghitung jumlah titik kejadian pada setiap *subregion* (Roux dkk., 2020).

### **POLA TITIK SPASIAL**

Pola titik spasial adalah sebuah konsep penting dalam analisis spasial yang mengacu pada distribusi titik-titik yang tersebar di ruang berdimensi tertentu secara acak, di mana dimensi ruang tersebut dapat berjumlah dua atau lebih. Konsep ini menjadi landasan bagi model statistik yang digunakan dalam menganalisis pola persebaran titik yang merepresentasikan lokasi dari sebuah obyek yang diteliti. Salah satu tujuan utama dari pendekatan ini adalah untuk mengidentifikasi pola spasial yang mungkin terjadi dalam intensitas titik-titik tersebut. Melalui analisis statistika terhadap pola titik spasial, berbagai fitur penting dalam persebaran titik dapat terungkap (Iriawan dan Yasmirullah, 2019). Dalam konteks infrastruktur, pola titik spasial telah menjadi fokus penelitian bagi sejumlah peneliti untuk mengeksplorasi faktor-faktor yang mempengaruhi berbagai hal, seperti pola kerusakan jalan raya (Sulhan dkk., 2020), persebaran kebocoran pipa pada jaringan distribusi air bersih (Nugroho, 2019) dan identifikasi faktor kebocoran pipa pada kawasan industri (Hanggara dkk., 2024). Pada penelitian tersebut, pola titik spasial menjadi tahap paling penting, yang memungkinkan diperolehnya pemahaman yang lebih mendalam tentang distribusi spasial dari fenomena yang diamati (Baddeley dkk., 2015).

### **PROSES TITIK POISSON**

Dalam pola titik spasial, proses titik Poisson diadopsi sebagai pendekatan dasar. Proses stokastik ini mengasumsikan tidak adanya interaksi antara satu titik lokasi dengan yang lainnya, sehingga titik-titik tersebut diasumsikan tersebar secara acak dan independen. Proses titik Poisson dapat didefinisikan menjadi dua jenis, yakni homogen dan inhomogen. Proses titik Poisson didefinisikan memiliki jenis homogen ketika intensitasnya bersifat tetap atau konstan di seluruh wilayah yang ditinjau. Namun, dalam situasi di mana intensitas berubah-ubah, kita akan menjumpai proses titik Poisson yang berjenis inhomogen di mana nilai parameter  $\lambda$  bervariasi, terutama dalam jumlah kejadian dalam interval waktu atau spasial tertentu. Analisis pola titik spasial dan penggunaan proses titik Poisson ini memberikan pemahaman yang lebih baik dalam memodelkan dan menganalisis fenomena spasial yang kompleks (Baddeley dkk., 2015). Model *mixture Poisson* merupakan model yang berisi gabungan dari beberapa sub populasi yang dapat menggambarkan proses titik Poisson yang inhomogen. Fungsi distribusi probabilitas dengan asumsi dua komponen *mixture Poisson* dijelaskan dengan persamaan berikut (Baddeley dkk., 2015) :

$$Pr(X = x) = p \frac{e^{-\lambda_1} \lambda_1^x}{x!} + (1 - p) \frac{e^{-\lambda_2} \lambda_2^x}{x!} \dots\dots\dots (1)$$

Adapun model *mixture poisson regression* adalah (Wang dkk., 2002) :

$$\log \lambda = p(\lambda_1(x)) + (1 - p)(\lambda_2(x)) \dots\dots\dots (2)$$

Sehingga fungsi intensitas *mixture poisson regression* adalah (Wang dkk., 2002) :

$$\lambda_i(x) = \exp(\beta_0 + \beta_1 Z(x)) \dots\dots\dots (3)$$

Di mana :

- Pr = Fungsi distribusi probabilitas  
 $\lambda$  = Intensitas persebaran  
 $\beta$  = Parameter persebaran  
x = Variabel persebaran

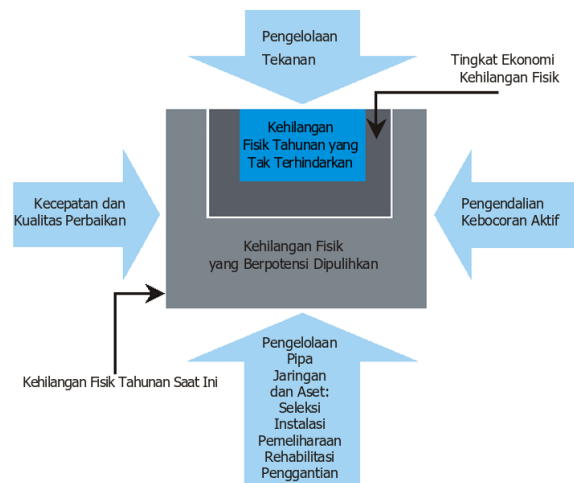
Variabel data ditampilkan dalam bentuk gambar piksel. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah *smoothed kernel*. Metode ini digunakan untuk fungsi densitas, yang menghitung konvolusi kernel gaussian isotropik dari standar deviasi sigma dengan massa titik pada setiap titik data di lokasi x. Konvolusi dilakukan dengan mengalikan gambar piksel ke piksel berikutnya dengan matriks, di mana smoothed kernel merupakan nilai matriks yang kecil yang digunakan dalam konvolusi citra (Xia dan Ludwig, 2016). Dari intensitas citra piksel tersebut dilakukan uji homogenitas pada proses Poisson untuk mengetahui homogenitas persebaran titik (Baddeley dkk., 2015).

### ESTIMASI PARAMETER

*Markov Chain - Monte Carlo* (MCMC) adalah teknik penghitungan numerik yang digunakan untuk menghasilkan sampel dari distribusi probabilitas yang kompleks, terutama ketika distribusi tersebut tidak memungkinkan untuk dihitung secara analitis. Ide dasar pada MCMC adalah menggunakan rantai Markov untuk menghasilkan sampel yang memperkirakan distribusi target yang diinginkan. Rantai Markov adalah urutan dari variabel acak yang bergantung pada nilai variabel sebelumnya, dan kondisi saat ini (*prior*) adalah satu-satunya informasi yang diperlukan untuk memprediksi kondisi berikutnya (*posterior*). Dalam kasus ini, MCMC digunakan untuk estimasi parameter yang mempengaruhi kebocoran pipa. Tahap pertama dalam proses MCMC adalah inisialisasi, di mana dilakukan pemilihan titik awal dalam ruang parameter. Titik ini bisa dipilih secara acak atau berdasarkan pengetahuan awal tentang distribusi target yang diinginkan. Selanjutnya, proses iterasi dimulai, di mana langkah-langkah utama meliputi proposisi, evaluasi, pemilihan, dan akuisisi. Dalam langkah proposisi, dihasilkan *posterior* baru untuk sampel berikutnya dengan menggunakan sebuah metode *Gibbs sampling*. Setelah itu, dilakukan evaluasi probabilitas dari *posterior* berdasarkan distribusi target. Keputusan untuk menerima atau menolak *posterior* biasanya didasarkan pada perbandingan antara nilai probabilitas *posterior* dengan nilai probabilitas sampel sebelumnya. Setelah iterasi sejumlah yang diinginkan telah dilakukan, langkah konvergensi dilakukan untuk mengevaluasi apakah algoritma telah konvergen. Setelah proses konvergensi, sampel yang dihasilkan dapat dianalisis untuk mendapatkan perkiraan parameter yang diinginkan atau melakukan inferensi lainnya terhadap distribusi target.

### KOMPONEN STRATEGI PENGENDALIAN KEHILANGAN AIR

Dalam pengendalian kehilangan air, terdapat dua jenis kehilangan air, yakni kehilangan karena faktor kausa non fisik (*apparent losses*) serta kehilangan karena kausa fisik (*real losses*) (Farley dan Trow, 2015). Farley dkk (2008) menyatakan bahwa terdapat empat faktor yang dapat diterapkan secara terpadu di dalam satu strategi pengendalian kehilangan air fisik (*real losses*). Faktor tersebut mencakup pengelolaan tekanan pada jaringan (*pressure management*), peningkatan kualitas dan kecepatan perbaikan (*recovery improvement*), pengendalian kebocoran secara aktif (*active leakage control*) dan pengelolaan aset pada jaringan (*asset management*) (Farley dkk., 2008) sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2. Faktor-faktor tersebut mempengaruhi bagaimana kehilangan air fisik kemudian dikelola dan dengan demikian volume dan nilai ekonomi kebocoran dapat dianalisis dalam sebuah jaringan distribusi air bersih.



**Gambar 2.** Komponen Strategi Pengendalian Kehilangan Air Fisik (Farley dkk., 2008)

Dalam konteks kebocoran pada sistem pipa, terdapat beberapa faktor penentu yang meliputi (Jang, 2018):

1. Usia Pipa, yang menentukan tingkat kebocoran karena semakin tua sebuah pipa, semakin besar kemungkinan pipa tersebut mengalami kerusakan, korosi, atau keausan yang dapat menyebabkan kebocoran.
2. Diameter Pipa, yang mempengaruhi jumlah air yang mengalir melalui sistem pipa. Pipa dengan diameter yang lebih besar cenderung memiliki kapasitas yang lebih besar dan memiliki kemungkinan kebocoran yang lebih rendah dibandingkan dengan pipa berdiameter kecil.
3. Rasio Panjang Pipa per *demand junction*, yang menggambarkan hubungan antara panjang total pipa dalam sistem dengan jumlah titik distribusi. Semakin tinggi rasio ini, semakin panjang pipa yang harus diawasi, dan ini dapat meningkatkan risiko kebocoran.
4. Rasio debit per *demand junction*, yang menggambarkan hubungan antara total debit air yang dialirkan dalam sistem dengan jumlah titik distribusi. Jika rasio debit per *demand junction* tinggi, kemungkinan tekanan dalam pipa meningkat, yang dapat meningkatkan risiko kebocoran.
5. Tekanan hidraulik, di mana tekanan yang tinggi dapat menyebabkan tegangan berlebih pada pipa, yang pada gilirannya dapat meningkatkan risiko kebocoran, terutama pada pipa yang sudah tua atau sering mengalami kerusakan.

Memahami faktor-faktor tersebut dan bagaimana interaksi antar faktor dapat membantu dalam mengelola dan meminimalkan risiko kebocoran dalam sistem pipa. Upaya pencegahan dan pemeliharaan yang tepat dapat diarahkan untuk mengatasi setiap faktor yang berkontribusi pada kebocoran. Faktor penentu kebocoran pada penelitian ini digunakan sebagai variabel kovariat yang tertera pada tabel 1.

**Tabel 1.** Variabel dan definisi operasional

Parameter	Variabel	Definisi	Satuan
$\beta_1$	Usia pipa	Rentang waktu mulai saat pipa tersebut diinstalasi hingga saat penelitian ini dimulai	Tahun
$\beta_2$	Diameter pipa	Diameter bagian dalam pipa	mm

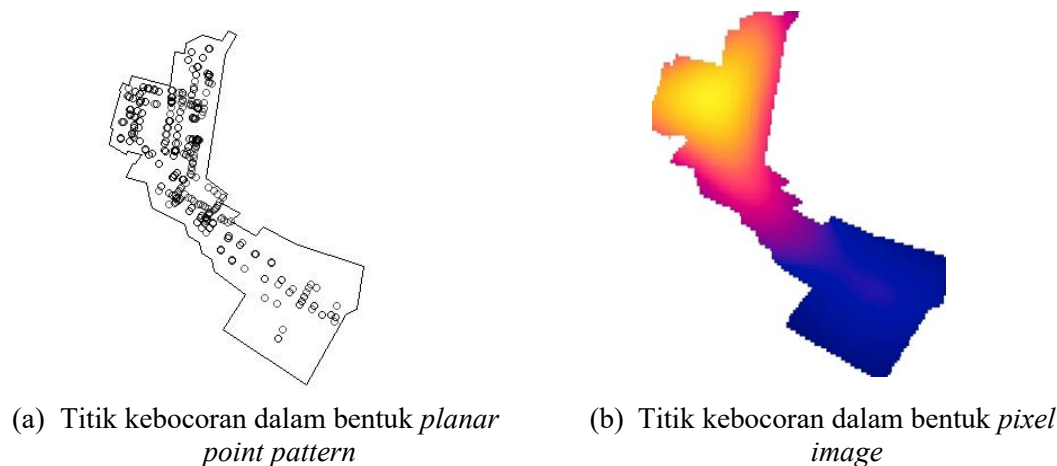
Parameter	Variabel	Definisi	Satuan
$\beta_3$	Rasio panjang pipa per <i>demand junction</i>	Perbandingan panjang pipa dengan jumlah titik distribusi pada zona layanan pipa tersebut	m/ jumlah titik distribusi
$\beta_4$	Rasio debit per <i>demand junction</i>	Perbandingan debit pipa dengan jumlah titik distribusi pada zona layanan pipa tersebut	m <sup>3</sup> / jumlah titik distribusi
$\beta_5$	Tekanan Hidraulik	Tekanan kerja hidraulik rerata sepanjang jalur pipa yang ditinjau	m

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### INTENSITAS SPASIAL TITIK KEBOCORAN PIPA

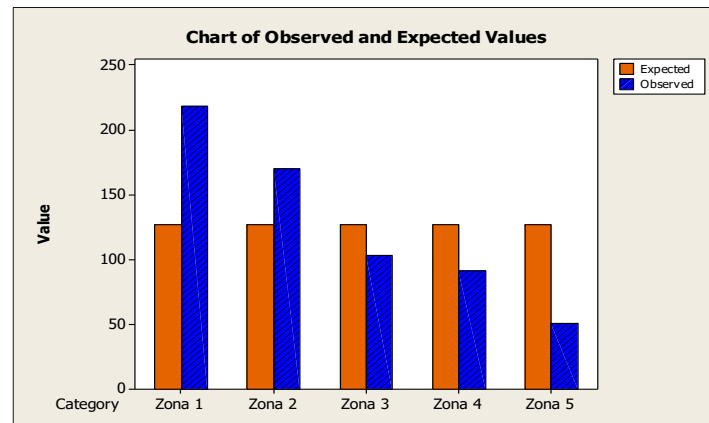
Analisis intensitas bertujuan menunjukkan jumlah titik kebocoran di suatu zona dengan ukuran luas wilayah tertentu. Dalam analisis yang melibatkan wilayah administratif dengan batas regional tertentu, object tessellation sering digunakan karena kepraktisan mekanisme tampilan komputasi yang dapat mengubah area menjadi grid yang memiliki ukuran yang sama dengan wilayah, sehingga variabel yang diamati dapat menggambarkan kondisi masing-masing zona layanan.

Gambar 3(a) merupakan visualisasi yang menggambarkan data lokasi kebocoran pipa. Representasi visual ini membantu dalam memahami distribusi spasial dari kebocoran pipa di area tersebut. Sementara gambar 3(b) memberikan informasi lebih lanjut mengenai intensitas kebocoran pipa, dan dapat dilihat bahwa jumlah terbesar kebocoran pipa cenderung berada di daerah utara dan secara spasial didapati adanya dua kluster intensitas dari persebaran lokasi kebocoran pipa, yakni kluster utara dan tengah (ditunjukkan dengan warna terang) dan kluster selatan (ditunjukkan dengan warna gelap). Pada analisis selanjutnya, kluster utara disebut sebagai kluster 1 sedangkan kluster selatan disebut sebagai kluster 2.



**Gambar 3.** Intensitas spasial titik kebocoran pipa

Selain pengamatan secara visual, secara kuantitatif, intensitas spasial harus dianalisis dengan uji homogenitas intensitas. Uji ini memiliki asumsi (*expected value*) bahwa intensitas kebocoran pada setiap zona merata atau homogen, sebagaimana terlihat pada gambar 4. Hal ini berarti bahwa jika ada variasi dalam intensitas kebocoran di antara zona-zona tersebut, maka asumsi homogenitas tidak akan terpenuhi.



**Gambar 4.** Nilai Pengamatan Kebocoran pada tiap Zona Layanan

Dari hasil uji homogenitas intensitas dengan metode chi-square yang tertera pada tabel 2, di mana nilai  $\chi^2$  lebih besar dari nilai kritis maka disimpulkan bahwa persebaran titik kebocoran pipa bersifat inhomogen sehingga perlu dilakukan analisis *mixture Poisson*.

**Tabel 2.** Hasil Uji Homogenitas Intensitas dengan metode *Chi-Square*

$\chi^2$	Nilai kritis	<i>p-value</i>	$\alpha$
140,42	9,448	$1,2 \times 10^{-4}$	0,05

Dalam konteks ini, hasil uji homogenitas menunjukkan bahwa persebaran titik kebocoran pipa bersifat inhomogen, menunjukkan bahwa asumsi homogenitas tidak terpenuhi, di mana terdapat variasi dalam intensitas kebocoran di antara zona-zona tersebut. Dalam kasus ini, analisis *mixture Poisson* adalah pendekatan yang tepat untuk mengakomodasi variasi dalam intensitas kebocoran di antara zona-zona melalui model *mixture*. Dalam analisis *mixture Poisson*, data diasumsikan terdiri dari beberapa komponen atau kelompok yang masing-masing mengikuti distribusi Poisson dengan parameter yang berbeda. Pendekatan ini memungkinkan untuk memodelkan variasi dalam data yang mungkin disebabkan oleh faktor-faktor tertentu yang tidak diketahui atau tidak diamati.

Estimasi parameter dilakukan dengan metode *Markov Chain – Monte Carlo (MCMC)*. Dari hasil estimasi parameter pada tabel 3, terlihat bahwa parameter  $\beta_1$  (usia pipa),  $\beta_2$  (diameter pipa) dan  $\beta_3$  (rasio panjang pipa) adalah parameter yang berpengaruh signifikan terhadap intensitas kejadian kebocoran pipa. Hal ini disimpulkan dari nilai *Credible Interval (CI)* yang tidak meliputi nilai nol. *Credible Interval* adalah rentang nilai di mana kita memiliki keyakinan tertentu bahwa nilai parameter sebenarnya berada di dalamnya. Jika CI tidak meliputi nilai nol, itu menunjukkan bahwa nilai parameter yang sesungguhnya kemungkinan besar tidak nol. Dalam konteks ini, jika CI untuk parameter-parameter tersebut tidak meliputi nol, maka itu menunjukkan bahwa pengaruhnya terhadap intensitas kejadian kebocoran pipa cukup signifikan. Dengan CI yang tidak meliputi nol, kita dapat menyimpulkan bahwa perubahan dalam variabel-variabel ini (usia pipa, diameter pipa, dan rasio panjang pipa) memiliki dampak yang signifikan pada intensitas kejadian kebocoran pipa.

**Tabel 3.** Pendugaan Parameter dengan *Markov Chain – Monte Carlo (MCMC)*

Parameter [klaster]	Faktor penentu kebocoran	<i>Credible Interval (CI)</i>	Pengaruh terhadap kebocoran
		2,5% median	97,5%

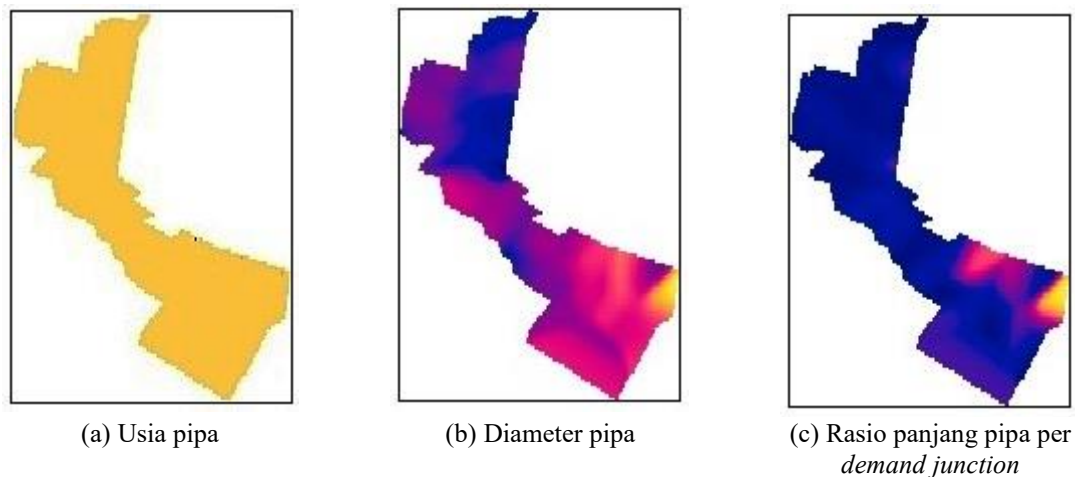
$\beta_1$ [1]	Usia pipa	3,470	4,188	4,941	Signifikan (+)
$\beta_1$ [2]	Usia pipa	-9,316	-5,056	-0,528	Signifikan (-)
$\beta_2$ [1]	Diameter pipa	-10,330	-7,778	-5,812	Signifikan (-)
$\beta_2$ [2]	Diameter pipa	0,095	1,481	2,874	Signifikan (+)
$\beta_3$ [1]	Rasio panjang pipa per <i>demand junction</i>	3,608	4,858	6,112	Signifikan (+)
$\beta_3$ [2]	Rasio panjang pipa per <i>demand junction</i>	3,475	5,072	6,663	Signifikan (+)
$\beta_4$ [1]	Rasio debit per <i>demand junction</i>	-0,266	-0,076	0,449	Tidak signifikan
$\beta_4$ [2]	Rasio debit per <i>demand junction</i>	-11,250	-3,226	4,165	Tidak signifikan
$\beta_5$ [1]	Tekanan hidraulik	-1,618	1,129	4,737	Tidak signifikan
$\beta_5$ [2]	Tekanan hidraulik	-0,396	1,851	4,177	Tidak signifikan

Oleh karena itu, perhatian khusus perlu diberikan pada faktor-faktor ini dalam upaya mencegah atau mengurangi kebocoran pipa. Parameter yang memiliki signifikansi terbesar adalah  $\beta_2$ [1] (diameter pipa pada klaster 1) dan  $\beta_3$ [2] (rasio panjang pipa pada klaster 2), dengan penulisan ditandai dengan lambang asterisk (\*) sebagaimana ditampilkan pada tabel 4.

**Tabel 4.** Faktor yang berpengaruh signifikan terhadap kebocoran pipa

Parameter [klaster]	Faktor penentu kebocoran	Nilai parameter rerata	Simpangan Baku
$\beta_1$ [1]	Usia Pipa	4,192	0,379
$\beta_1$ [2]	Usia Pipa	-5,004	2,239
$\beta_2$ [1]	Diameter Pipa	-7,842*	1,128
$\beta_2$ [2]	Diameter Pipa	1,477	0,708
$\beta_3$ [1]	Rasio panjang pipa per <i>demand junction</i>	4,864	0,640
$\beta_3$ [2]	Rasio panjang pipa per <i>demand junction</i>	5,070*	0,812

Pola spasial faktor signifikan penentu kebocoran didapatkan dengan plot titik-titik kebocoran dengan koordinat tertentu yang memuat data atribut mengenai nilai kovariat, kemudian dilakukan transformasi dalam bentuk *pixel image*. Tujuan diakukannya tranformasi ini adalah untuk mendapatkan interpolasi hasil pengamatan variabel kovariat pada titik-titik yang tidak dapat diperoleh hasil pengamatannya. Dengan dilakukan transformasi ini ditujukan agar setiap titik pada lingkup zona dapat terwakili. Faktor usia pipa merupakan rentang waktu mulai saat pipa tersebut diinstalasi hingga saat penelitian ini dimulai. Gambar 5(a) menunjukkan nilai yang merata semua zona layanan, yang menandakan bahwa pipa diinstalasi pada tahun yang sama. Penelitian ini mendapati temuan bahwa usia pipa berpengaruh signifikan terhadap intensitas kebocoran, terutama pada klaster 2. Hasil ini yang membedakan temuan penelitian ini dengan penelitian terdahulu. Di mana pada penelitian terdahulu terdapat variasi nilai usia pipa antara satu klaster dengan klaster lainnya (Nugroho dkk., 2023), sementara pada penelitian ini tidak ada variasi nilai usia antara klaster 1 dan klaster 2.



**Gambar 5.** Pola spasial faktor signifikan penentu kebocoran

Diameter pipa merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi tingkat kebocoran pipa. Penelitian terdahulu menekankan pentingnya dimensi pipa terutama dalam kaitannya dengan diameter. Hal ini disebabkan oleh pengaruh diameter pipa dalam jaringan distribusi, yang mempengaruhi parameter hidraulik aliran seperti kecepatan aliran, debit, dan tekanan hidraulik (Phan dkk., 2019). Gambar 5(b) menampilkan distribusi diameter pipa di berbagai zona, yang terlihat dari variasi warna piksel. Terlihat bahwa pada kluster 1 diameter rerata pipa lebih kecil apabila dibandingkan dengan kluster 2 yang ditandai dengan warna *pixel image* yang lebih gelap pada kluster 1. Dengan demikian, hasil ini selaras dengan penelitian sebelumnya, dan menandai konsekuensi bahwa dengan diameter rerata yang lebih kecil resiko kebocoran pada kluster 1 lebih besar dibandingkan dengan kluster 2.

Pola spasial pada gambar 5(c) menggambarkan rasio panjang pipa per sambungan pelanggan di berbagai zona layanan. Pipa-pipa yang terletak di zona satu hingga empat memiliki panjang sekitar 100 meter, sedangkan di zona lima, sebagian memiliki panjang antara 300 meter dan sebagian besar sekitar 100 meter. Dalam evaluasi kinerja sistem distribusi air bersih, sangat penting untuk mempertimbangkan rasio panjang pipa dalam merencanakan pengembangan layanan air di masa depan (Haider dkk., 2022). Terlihat bahwa pada kluster 1 rasio panjang pipa per *demand junction* lebih kecil apabila dibandingkan dengan kluster 2 yang ditandai dengan warna *pixel image* yang lebih gelap pada kluster 1. Dengan demikian, hasil ini selaras dengan penelitian sebelumnya, dan menandai konsekuensi bahwa dengan rasio panjang pipa per *demand junction* yang lebih kecil maka resiko kebocoran pada kluster 1 lebih kecil dibandingkan dengan kluster 2.

## PERUMUSAN STRATEGI KEHILANGAN AIR FISIK

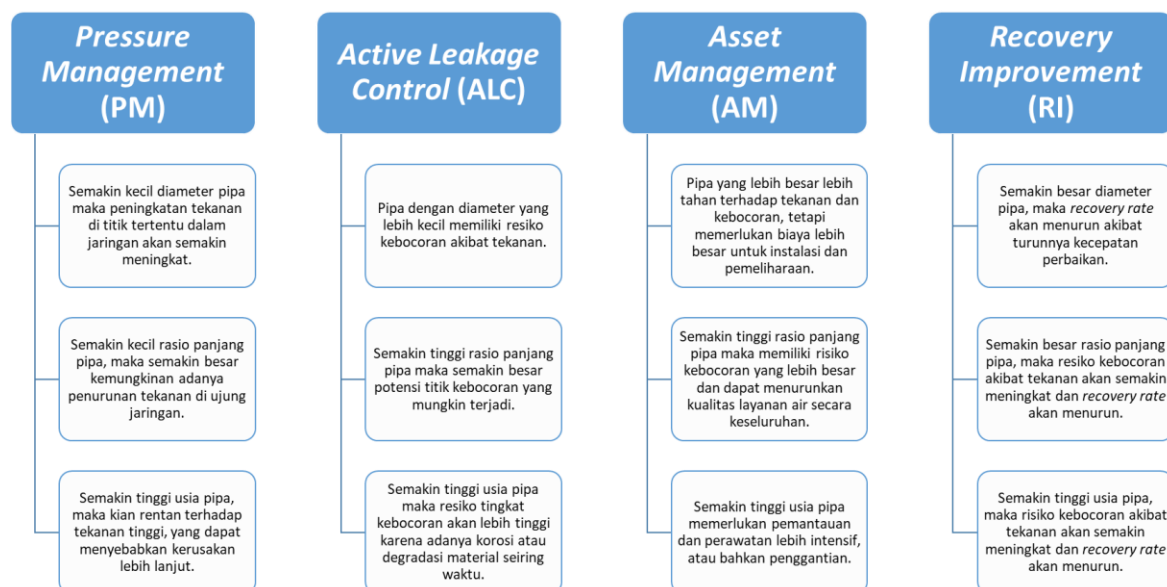
Strategi pengendalian kehilangan air dalam jaringan distribusi air bersih menjadi krusial mengingat pentingnya menjaga infrastruktur yang berperan dalam menyediakan pasokan air yang aman dan handal bagi masyarakat. Salah satu pendekatan yang efektif adalah dengan memperhatikan pola titik spasial kerusakan pipa. Langkah pertama dalam strategi ini adalah melakukan identifikasi yang komprehensif terhadap pola kebocoran pipa, yang melibatkan pemetaan dan analisis mendalam terhadap lokasi kerusakan secara spasial. Dari sini, kita dapat memahami secara lebih baik di mana titik-titik kerentanan terletak dalam jaringan distribusi, sebagaimana yang telah dilakukan pada proses analisis intensitas spasial, di mana terdapat dua kelompok intensitas kebocoran, yakni kluster dengan intensitas kebocoran yang tinggi serta kluster dengan intensitas kebocoran yang rendah dengan identifikasi tertera pada tabel 5.

Setelah pola kebocoran teridentifikasi, langkah selanjutnya adalah melakukan analisis mendalam terhadap faktor-faktor penentu kebocoran pipa. Pada tahap ini, kita dapat mengidentifikasi pola-pola umum yang mempengaruhi kerusakan pipa, sehingga dapat dirumuskan strategi pencegahan yang lebih tepat dan terarah. Prediksi menjadi kunci dalam strategi ini. Dengan memahami pola kerusakan dan faktor-faktor yang memengaruhinya, kita dapat mengembangkan model prediksi yang dapat memperkirakan dengan lebih akurat kemungkinan terjadinya kerusakan pipa di masa depan.

**Tabel 5.** Identifikasi pola kebocoran pipa

Kelompok Intensitas Kebocoran	Karakter intensitas	Zona Layanan	Faktor Penentu Terbesar
Klaster 1 (bagian utara dan tengah)	Intensitas tinggi	Keseluruhan Zona 1 Keseluruhan Zona 2 Keseluruhan Zona 3 Sebagian Zona 4	Diameter pipa
Klaster 2 (bagian selatan)	Intensitas rendah	Keseluruhan Zona 5 Sebagian Zona 4	Rasio panjang pipa per <i>demand junction</i>

Dengan demikian, tindakan pencegahan dapat dilakukan lebih dini, sebelum kerusakan menjadi lebih parah atau menimbulkan dampak yang lebih besar. Dalam pengelolaan kehilangan air, terdapat keterkaitan yang erat antara beberapa komponen, meliputi *Pressure Management*, *Active Leakage Control*, *Network Asset Management*, dan *Recovery Improvement*, dengan faktor penentu kebocoran dalam jaringan distribusi air. Gambar 6 berikut memuat penjelasan singkat tentang keterkaitan antara konsep-konsep tersebut dengan faktor penentu kebocoran.



**Gambar 6.** Skema Keterkaitan antara Komponen Strategi dan Faktor Penentu Kebocoran

Selanjutnya dilakukan perumusan strategi yang mengintegrasikan beberapa aspek, di antaranya adalah aspek implementasi sistem pemantauan dan sensor jaringan dapat digunakan untuk

memantau kondisi pipa secara real time. Data yang diperoleh dari sistem pemantauan ini akan menjadi landasan untuk pengambilan keputusan dalam strategi pemeliharaan preventif dan perbaikan yang tepat waktu. Aspek inovasi teknologi juga dapat menjadi bagian dari strategi ini, di mana pengembangan teknologi perbaikan pipa atau penggunaan material pipa yang lebih tahan terhadap penyebab kerusakan pipa dapat membantu mengurangi risiko kerusakan pipa secara signifikan. Aspek pengelolaan resiko juga perlu diterapkan secara menyeluruh, yang mencakup penilaian dampak potensial dari kerusakan pipa terhadap pasokan air secara keseluruhan dan dampaknya terhadap pengguna. Dengan mengintegrasikan semua langkah-langkah ini, strategi pengendalian kehilangan air dalam jaringan distribusi air bersih dapat dijalankan dengan lebih efektif dan efisien, sehingga dapat meningkatkan keandalan dan keberlanjutan jaringan distribusi air bersih secara keseluruhan. Matriks selengkapnya ditampilkan pada tabel 6.

**Tabel 6.** Matriks Strategi Pengendalian Kehilangan Air Fisik (*Real Losses*)

Faktor Penentu	Strategi Pengendalian Kehilangan Air Fisik			
	<i>Pressure Management (PM)</i>	<i>Active Leakage Control (ALC)</i>	<i>Asset Management (AM)</i>	<i>Recovery Improvement (RI)</i>
Diameter Pipa	Penerapan sistem pemantauan tekanan pipa dan peningkatan instrumentasi pemantau dan instrumen pengatur tekanan teknologi terbaru	Fokus pemantauan operasional pipa berdiameter rerata kecil dengan sistem pemantauan <i>real time</i> untuk mengurangi resiko kebocoran	Prioritas penggantian pipa yang rusak berdiameter rerata lebih kecil untuk mengurangi resiko kebocoran	Identifikasi titik-titik kritis pada jaringan berdiameter rerata kecil dengan mempertimbangkan peralatan dan teknologi penggantian terbaru
Rasio Panjang Pipa per <i>demand junction</i>	Pengaturan tekanan dengan instrumen yang sesuai untuk mengimbangi efek rasio panjang pipa yang lebih besar untuk menurunkan resiko kebocoran	Memprioritaskan deteksi kebocoran di area-area dengan rasio panjang pipa yang lebih besar dengan adopsi teknologi deteksi terbaru	Optimasi <i>layout</i> jaringan dan menyesuaikan perencanaan pengembangan jaringan dengan mempertimbangkan faktor penentu kebocoran pipa	Penambahan titik sambungan baru, relokasi pipa, atau pengurangan panjang pipa dalam pengembangan jaringan baru untuk mengurangi rasio panjang pipa per <i>demand junction</i>
Usia Pipa	Melakukan evaluasi tekanan di seluruh jaringan distribusi dengan mempertimbangkan usia pipa. Mengatur tekanan untuk pipa-pipa yang lebih tua agar tetap dalam batas yang aman untuk menurunkan resiko kebocoran	Melakukan survei rutin pada wilayah dengan pipa yang lebih tua untuk mendeteksi potensi kebocoran dan kerusakan. Memprioritaskan pemantauan dan perbaikan pada pipa yang lebih tua dengan sistem pemantauan <i>real time</i>	Menetapkan prioritas penggantian pipa pada pipa yang lebih tua untuk meningkatkan keandalan jaringan dan mengurangi resiko kebocoran	Menyusun rencana jangka panjang untuk mengganti pipa-pipa dengan memilih material yang memiliki umur pakai yang lebih panjang dan resistensi terhadap penyebab kerusakan pipa

## IMPLIKASI MANAJERIAL

Keterkaitan yang erat antara pengendalian kehilangan air dan manajemen strategi menjadi esensi dalam memastikan keberlangsungan operasional yang efisien dan efektif dari sistem penyediaan air bersih. Jaringan distribusi air bersih adalah tulang punggung dari sistem penyediaan air, yang memainkan peran penting dalam memastikan ketersediaan air bersih yang aman dan berkualitas. Dalam konteks ini, penerapan prinsip-prinsip manajemen strategi menjadi kunci untuk mengoptimalkan pengendalian kehilangan air.

Perencanaan strategis adalah langkah awal yang sangat penting dalam pencapaian kedua domain tersebut. Dalam pengendalian kehilangan air, perencanaan strategis mempertimbangkan faktor-faktor seperti penetapan tujuan jangka panjang, identifikasi risiko, dan alokasi sumber daya yang efektif. Hal ini mencakup pemetaan lokasi layanan, evaluasi kondisi fisik aset dan pola kerusakan serta pengembangan rencana pengelolaan yang sesuai dengan kebutuhan. Perencanaan strategi ini memungkinkan penyedia layanan air untuk menghadapi tantangan seperti kebocoran, kerusakan infrastruktur, atau perubahan kebutuhan pelanggan dengan rencana yang terstruktur dan adaptif. Di sisi lain, di dalam manajemen strategi, sebuah perencanaan strategis harus melibatkan penetapan visi, misi, dan tujuan organisasi yang berkaitan dengan infrastruktur air bersih, serta pengembangan rencana tindakan yang mencakup penggunaan sumber daya secara efisien untuk mencapainya.

Pemilihan strategi menjadi titik fokus berikutnya dalam keterkaitan antara kedua domain tersebut. Dalam pengendalian kehilangan air, pemilihan strategi melibatkan keputusan tentang teknologi yang akan digunakan, investasi dalam pemeliharaan dan pengembangan infrastruktur, serta pengelolaan risiko terkait dengan kebocoran. Hal ini mencakup keputusan tentang penggunaan teknologi deteksi kebocoran, perencanaan penggantian pipa yang sudah tua, dan investasi dalam teknologi yang dapat meningkatkan efisiensi distribusi air.

Selanjutnya, setelah pemilihan strategi, tahap implementasi dan evaluasi kinerja menjadi sangat penting. Dalam hal ini, implementasi strategi melibatkan perbaikan, pemeliharaan, dan penggantian infrastruktur sesuai rencana yang telah ditetapkan, termasuk pelaksanaan program pemeliharaan rutin, perbaikan kebocoran, dan investasi dalam adopsi teknologi yang dapat meningkatkan efisiensi operasional. Evaluasi kinerja dilakukan untuk memastikan bahwa strategi yang diadopsi efektif dalam mencapai tujuan yang ditetapkan, dengan mengukur indikator seperti tingkat kebocoran, efisiensi distribusi, atau kepuasan pelanggan. Sama halnya, dalam manajemen strategi, implementasi strategi melibatkan pengorganisasian sumber daya dan pengambilan keputusan operasional untuk mencapai tujuan yang ditetapkan. Evaluasi kinerja digunakan untuk mengukur kesuksesan implementasi strategi dan menyesuaikan rencana jika diperlukan, dengan memonitor kinerja operasional.

## KESIMPULAN

Dari serangkaian analisis di atas, penelitian ini mencapai beberapa kesimpulan. Analisis intensitas bertujuan menunjukkan jumlah titik kebocoran di suatu zona dengan ukuran luas wilayah tertentu. Analisis tersebut memberikan informasi lebih lanjut mengenai intensitas kebocoran pipa, dan dapat dilihat bahwa jumlah terbesar kebocoran pipa cenderung berada di daerah utara dan secara spasial didapati adanya dua kluster intensitas dari persebaran lokasi kebocoran pipa, yakni kluster utara dan tengah dan kluster selatan.

Estimasi parameter yang dilakukan dengan metode *Markov Chain – Monte Carlo* (MCMC) menunjukkan bahwa parameter usia, diameter dan rasio panjang pipa per *demand junction* adalah parameter yang berpengaruh signifikan terhadap intensitas kejadian kebocoran pipa. Sedangkan parameter yang memiliki signifikansi terbesar adalah diameter pipa pada kluster utara dan tengah serta rasio panjang pipa pada kluster selatan.

Selanjutnya dilakukan perumusan strategi yang mengintegrasikan beberapa aspek, di antaranya adalah aspek sistem pemantauan yang menjadi landasan untuk pengambilan keputusan dalam strategi pemeliharaan preventif dan perbaikan yang tepat waktu. Aspek inovasi teknologi juga menjadi bagian dari strategi ini, di mana pengembangan teknologi perbaikan pipa atau penggunaan material pipa yang lebih tahan terhadap penyebab kerusakan pipa dapat membantu mengurangi risiko kerusakan pipa secara signifikan. Aspek identifikasi resiko juga perlu

diterapkan secara menyeluruh, yang mencakup penilaian dampak potensial dari kerusakan pipa terhadap pasokan air secara keseluruhan dan dampaknya terhadap pelanggan.

Keterkaitan yang erat antara pengendalian kehilangan air dan manajemen strategi mencerminkan pentingnya penerapan prinsip-prinsip manajemen strategis dalam menjalankan sistem penyediaan air yang kompleks. Dengan memanfaatkan prinsip-prinsip ini, penyedia layanan air dapat mencapai efisiensi, keberlanjutan, dan peningkatan tingkat pelayanan kepada pelanggan.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Para penulis menyampaikan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada segenap pimpinan PT. Air Bersih Jawa Timur (Perseroda) khususnya Unit SPAM Kawasan Industri PIER, Kabupaten Pasuruan, atas dukungan yang diberikan dalam proses penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- Baddeley, A., Rubak, E., & Turner, R. (2015). Spatial Point Patterns. In *Spatial Point Patterns*. <https://doi.org/10.1201/b19708>
- Farley, M., & Trow, S. (2015). Losses in Water Distribution Networks: A Practitioners' Guide to Assessment, Monitoring and Control. *Water Intelligence Online*, 4(0), 9781780402642–9781780402642. <https://doi.org/10.2166/9781780402642>
- Farley, M., Wyeth, G., Ghazali, Z. B. M., Istandar, A., & Sigh, S. (2008). *The Manager's Non-Revenue Water Handbook. A Guide to Understanding Water Losses*, Ranhill Utilities Bernhad and USAID, Malaysia.
- Haider, H., Almutlaq, M. A., Alodah, A., Ghumman, A. R., AlSalamah, I. S., Ghazaw, Y. M., & Shafiquzzaman, M. (2022). Risk-Based Inspection and Rehabilitation Planning of Service Connections in Intermittent Water Supply Systems for Leakage Management in Arid Regions. In *Water* (Vol. 14, Issue 24). <https://doi.org/10.3390/w14243994>
- Hanggara, A., Kurniawan, F., & Prawito, D. (2024). Analisis faktor fisik dan operasional jaringan distribusi air bersih yang mempengaruhi pola spasial titik kebocoran pipa pada kawasan industri PIER. *Narotama Jurnal Teknik Sipil* Volume 6, 114. <https://doi.org/10.31090/njts.v6i2.1956>
- Iriawan, N., & Yasmirullah, S. D. P. (2019). An Economic Growth Model Using Hierarchical Bayesian Method. In *Bayesian Networks-Advances and Novel Applications*. IntechOpen.
- Jang, D. (2018). A Parameter Classification System for Nonrevenue Water Management in Water Distribution Networks. *Advances in Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2018/3841979>
- Jang, D., & Choi, G. (2017). Estimation of non-revenue water ratio for sustainable management using artificial neural network and Z-score in Incheon, Republic of Korea. *Sustainability* (Switzerland). <https://doi.org/10.3390/su9111933>
- Jang, D., Park, H., & Choi, G. (2018). Estimation of leakage ratio using principal component analysis and artificial neural network in water distribution systems. *Sustainability* (Switzerland). <https://doi.org/10.3390/su10030750>
- Nainggolan, H, Wardhani, N. W. S., Leksono, A. S., & Santoso, I. (2020). Driving factors for the success of the green industrial estate: a case study of Pasuruan Industrial Estate

- Rembang. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 475(1), 12071. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/475/1/012071>
- Nainggolan, Hotnida, Wardhani, N. W. S., Leksono, A. S., & Santoso, I. (2021). Readiness Assessment of Pasuruan Industrial Estate Rembang (PIER) Towards Sustainable Industrial Estate. *Jurnal Sumberdaya Alam dan Lingkungan*; Vol 8, No 3 (2021)DO - 10.21776/Ub.Jsal.2021.008.03.1 . <https://jsal.ub.ac.id/index.php/jsal/article/view/370>
- Nugroho, W., & Iriawan, N. (2019). Effect of the leakage location pattern on the speed of recovery in water supply networks. *Journal of Physics: Conference Series*, 1402, 022023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1402/2/022023>
- Nugroho, W, Iriawan, N., & Utomo, C. (2021). Determining physical and operational factors influencing pipeline leakage location pattern in water distribution networks using spatial poisson point process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1098(2), 022051. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1098/2/022051>
- Nugroho, W, Utomo, C., & Iriawan, N. (2023). A spatial data-driven decision analysis of pipe failure management in water supply system. *AIP Conference Proceedings*, 2646(1), 50029. <https://doi.org/10.1063/5.0139420>
- Nugroho, Widyo, Utomo, C., & Iriawan, N. (2022). A Bayesian Pipe Failure Prediction for Optimizing Pipe Renewal Time in Water Distribution Networks. *Infrastructures*, 7(10). <https://doi.org/10.3390/infrastructures7100136>
- Nugroho, W., Ambarwati, R., Prapanca, D., Wahyuni, A. (2025). Developing cost frameworks for sustainable water supply utility: A bibliometric analysis and systematic literature review. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, Vol. 20, No. 1, pp. 227-244. <https://doi.org/10.18280/ijstdp.200122>
- Phan, H. C., Dhar, A. S., Hu, G., & Sadiq, R. (2019). Managing water main breaks in distribution networks—A risk-based decision making. *Reliability Engineering & System Safety*, 191, 106581. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.res.2019.106581>
- Roux, W., Yi, G., & Gandikota, I. (2020). A spatial kernel approach for topology optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 361, 112794. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cma.2019.112794>
- Sulhan, Iriawan, N., & Ahyudanari, E. (2020). The Distribution of Damage to District Roads in Karang Penang Sub-District in Sampang District Uses Pavement Condition Index (PCI) and Spatial Poisson Point Process (SPPP). In *Institut Teknologi Sepuluh November (Ed.), IPTEK Journal of Proceedings Series* (p. 140). International Conference on Management of Technology, Innovation, and Project (MOTIP) 2020. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.12962/j23546026.y2020i3.11193>
- Wang, K., Yau, K. K. W., & Lee, A. H. (2002). A hierarchical Poisson mixture regression model to analyse maternity length of hospital stay. *Statistics in Medicine*, 21(23), 3639–3654. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/sim.1307>
- Xia, G., & Ludwig, S. A. (2016). Object-tracking based on particle filter using particle swarm optimization with density estimation. 2016 *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, CEC 2016. <https://doi.org/10.1109/CEC.2016.7744317>