

LAPORAN AKHIR

PENELITIAN INTERNAL BAGI DOSEN



**PENGEMBANGAN MODEL PREDIKSI KEGAGALAN PIPA BERBASIS
NON-HOMOGENEOUS POISSON PROCESS DENGAN PENDEKATAN
BAYESIAN DAN *FREQUENTIST* UNTUK OPTIMASI USIA ASET
INFRASTRUKTUR PENYEDIAAN AIR**

Tim Peneliti:

Dr. Widyo Nugroho, ST., M.MT
Ayu Kurnia Ratna Sari, ST., MM.
Putri Sekar Arumdalu

**Penelitian Didanai oleh:
Universitas Bojonegoro
Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat
(LPPM)
Tahun Anggaran 2025/2026**

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI.....	2
KATA PENGANTAR.....	5
BAB I PENDAHULUAN	6
1.1 Latar Belakang.....	6
1.2 Obyek Penelitian	9
1.3 Tujuan Pengembangan Model	11
1.4 Manfaat Pengembangan Model	11
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	13
2.1 Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM).....	13
2.1.1. Unit Transmisi (Air Baku)	13
2.1.2. Unit Produksi (Pengolahan)	14
2.1.3. Unit Distribusi	16
2.2 Prinsip <i>Full Cost Recovery</i> pada Pengelolaan Sumberdaya Air.....	16
2.3 Manajemen Aset Infrastruktur.....	19
2.3.1. Pengertian Aset.....	19
2.3.2. Pengertian Manajemen Aset	20
2.3.3. Life Cycle Asset Management	21
2.4 Life Cycle Cost Analysis (LCCA).....	24
2.5 Analisis Keandalan Aset.....	27
2.5.1 Prediksi Kegagalan.....	27
2.5.2. Regresi Eksponensial	29
2.5.3. Regresi Eksponensial	30
2.6 <i>State-of-the-Art</i> Topik Penelitian	31
2.6.1. Analisis Bibliometrik Topik Penelitian.....	31
2.6.2. Pembahasan Penelitian Terdahulu	33
2.6.3. Posisi Penelitian	39
BAB III METODE PELAKSANAAN	46
3.1 Pendekatan Perancangan	46
3.2 Obyek Perancangan.....	48
3.3 Konfigurasi Sistem pada Perancangan.....	48
3.3.1. Jenis dan Sumber Data Perancangan.....	48

3.3.2. Metode Pengumpulan Data.....	48
3.3.3. Variabel dan Instrumen Perancangan	49
3.3.4. Definisi Operasional Variabel Perancangan	52
BAB IV PERANCANGAN MODEL DAN UJI KELAYAKAN	55
4.1 Analisis Reliabilitas	55
4.1.1. Jumlah Kerusakan Pipa pada Jaringan Distribusi	55
4.1.2. Intensitas Kejadian Kerusakan Pipa.....	57
4.1.3. Uji Homogenitas Intensitas.....	59
4.1.3. Uji Kesesuaian Distribusi.....	60
4.2 Pemodelan Deteriorasi Jaringan Pipa.....	61
4.2.1. Pemodelan Deteriorasi Jaringan Pipa dengan Inferensia Bayesian.....	62
4.2.2. Pemodelan Deteriorasi Jaringan Pipa dengan Inferensia <i>Frequentist</i>	72
4.2.3. Analisis Laju Deteriorasi dan Indeks Reliabilitas Jaringan Pipa.....	77
4.3 Pemodelan Life Cycle Cost (LCC).	83
4.3.1. Model LCC dengan pendekatan <i>Markov Chain-Monte Carlo</i> (MCMC)	84
4.3.2. Model LCC dengan pendekatan <i>Maximum Likelihood</i> (ML)	88
BAB V PERANCANGAN SISTEM INFORMASI MANAJEMEN ASET SPAM	96
5.1 Perancangan Sistem Informasi.....	96
5.2 Analisis Perancangan Sistem.....	97
5.3 Perancangan Sistem Informasi.....	98
5.4 Pengembangan Aplikasi.....	99
5.5 Uji Coba Sistem Informasi.....	100
5.6 Penerapan (Deployment) Sistem Informasi	100
5.7 Pemeliharaan Sistem Informasi	102
5.8 Ruang Lingkup Sistem.....	104
5.9 Pemangku Kepentingan.....	107
REFERENSI.....	109

LEMBAR PENGESAHAN LAPORAN AKHIR PENELITIAN

1. Judul Penelitian : PENGEMBANGAN MODEL PREDIKSI KEGAGALAN PIPA BERBASIS NON-HOMOGENEOUS POISSON PROCESS DENGAN PENDEKATAN BAYESIAN DAN FREQUENTIST UNTUK OPTIMASI USIA ASET INFRASTRUKTUR PENYEDIAAN AIR
2. Ketua Periset :
- a. Nama Lengkap : Dr. Widyo Nugroho, ST., M.MT.
 - b. Jenis Kelamin : Laki-Laki
 - c. NIP/NIK/KTP/NIDN : 8454754655130103
 - d. Jabatan Struktural : -
 - e. Jabatan Fungsional : Tenaga Pengajar
 - f. Institusi Periset : Universitas Bojonegoro
 - g. Alamat : Jl. Lettu Suyitno No.2, Kalirejo, Bojonegoro 62119.
 - h. HP/Telepon/Faks : 08113777585
 - i. Alamat Rumah : Jl. Durian No.5 Kota Malang
 - j. Telpon/Faks/Email : widyo.nugroho@gmail.com

3. Anggota Riset

No	Nama	NIDN/NIM	Asal Institusi
1	Ayu Kurnia Ratna Sari, ST., MM	0724098001	Universitas Bojonegoro
2	Putri Sekar Arumdalu	24222011174	Universitas Bojonegoro

4. Pendanaan :

No	Uraian	LPPM UNIGORO	Sharing	Total
1	Tahun 1	Rp 3.500.000,-	-	Rp 3.500.000,-

Bojonegoro, 23 Pebruari 2026
Ketua Tim Periset,

Menyetujui,
Kepala LPPM
Universitas Bojonegoro

Dr. Laily Agustina Rahmawati, S.Si., M.Sc.
NIDN 07 2108 8601

Dr. Widyo Nugroho, ST., M.MT.
NUPTK. 8454754655130103

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena atas rahmat dan karunia-Nya, laporan akhir penelitian yang berjudul **“Pengembangan Model Prediksi Kegagalan Pipa Berbasis Non-Homogeneous Poisson Process dengan Pendekatan Bayesian dan Frequentist untuk Optimasi Usia Aset Infrastruktur Penyediaan Air”** dapat disusun dan diselesaikan dengan baik.

Laporan ini disusun sebagai bagian dari upaya pengembangan kajian ilmiah dalam bidang manajemen aset infrastruktur air minum, khususnya dalam meningkatkan efektivitas pengelolaan jaringan perpipaan melalui pendekatan pemodelan statistik yang andal dan berbasis data. Penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi nyata dalam mendukung pengambilan keputusan terkait perencanaan pemeliharaan, rehabilitasi, serta penggantian aset secara lebih optimal dan berkelanjutan.

Penyusunan laporan ini tidak terlepas dari dukungan, bimbingan, dan bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penyusun menyampaikan apresiasi dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada LPPM Universitas Bojonegoro dan seluruh pihak yang telah memberikan kontribusi, baik secara langsung maupun tidak langsung, dalam proses perencanaan dan penyusunan penelitian ini.

Penyusun menyadari bahwa laporan ini masih memiliki keterbatasan dan memerlukan penyempurnaan lebih lanjut. Oleh sebab itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan demi peningkatan kualitas penelitian di masa mendatang. Semoga penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan, praktisi di bidang pengelolaan infrastruktur air minum, serta pihak-pihak terkait lainnya.

Akhir kata, penyusun berharap semoga penelitian ini dapat berjalan dengan baik dan memberikan hasil yang bermanfaat bagi peningkatan kinerja pengelolaan aset infrastruktur penyediaan air di Indonesia.

Bojonegoro, 23 Pebruari 2026

Ketua Tim Periset

Dr. Widyo Nugroho, ST., M.MT

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pencapaian biaya dan tingkat layanan yang optimal kepada pelanggan adalah tujuan utama dari penerapan pengelolaan aset bagi keberlangsungan sebuah sistem distribusi air minum. Sistem ini merupakan sistem yang menitikberatkan pada pengelolaan padat aset, di mana membutuhkan pengelolaan aset yang efektif untuk memastikan dan mempertahankan penyampaian layanan yang diperlukan. Dalam pengertian USEPA (*United States Environmental Protection Agency*), manajemen aset adalah proses berkelanjutan yang memandu akuisisi aset, penggunaan aset, dan pembuangan aset infrastruktur untuk mengoptimalkan pemberian layanan publik dan meminimalkan biaya selama usia aset (USEPA, 2015). Hal ini membutuhkan metode untuk mengumpulkan informasi terkait keseluruhan aset yang dimiliki dan nilai aset, kondisi aset dan sisa usia layanan aset, dan prioritas perbaikan atau penggantian komponen. *American Society of Civil Engineer (ASCE)* menyatakan bahwa pada era masyarakat perkotaan yang modern terdapat tuntutan masyarakat akan perbaikan tingkat layanan, manajemen risiko yang tepat, dan operasional yang berkelanjutan. Karena itu diperlukan pencapaian sistem pemeliharaan dan rehabilitasi pada level yang tinggi, ketepatan penggantian infrastruktur yang akurat, tuntutan pengeluaran biaya yang efisien, dan perencanaan yang efektif (ASCE, 2009).

Dengan demikian praktek manajemen aset infrastruktur pada sistem distribusi air minum adalah serangkaian proses yang harus dilakukan oleh pengelola untuk memastikan bahwa kinerja infrastruktur sesuai dengan target layanan dari waktu ke waktu, bahwa risiko akan dikelola secara memadai, dan bahwa pengelolaan biaya yang sesuai dalam perspektif daur hidup aset, dan dalam tingkat paling efisien (Mazumder dkk., 2018).

Kegiatan bisnis bertujuan pada perolehan profit agar untuk menjaga kelangsungan hidup serta perkembangan perusahaan. Pencapaian profit dapat terealisasi apabila perusahaan melakukan perencanaan yang akurat terhadap target volume penjualan. Proses untuk mencapai target profit yang ditargetkan akan berkaitan dengan perencanaan yang ditetapkan guna memenuhi kebutuhan kegiatan operasionalnya di masa yang akan

datang. Pencapaian target profit perusahaan berkaitan dengan volume produk yang dijual serta besaran harga yang ditetapkan (Thomas dkk., 2022).

Badan Peningkatan Penyelenggaraan Sistem Penyediaan Air Minum (BPPSPAM) menyatakan bahwa dalam meningkatkan akses masyarakat terhadap air minum, maka diperlukan pengembangan infrastruktur khususnya dalam hal produksi dan distribusi air minum. Dalam pemenuhan hal tersebut dibutuhkan biaya yang besar baik dari dalam perusahaan itu sendiri maupun dari pihak luar untuk kebutuhan investasi, operasional, *maintenance*, serta kebutuhan lainnya yang berkaitan dengan pengembangan infrastruktur penyediaan air minum. Berkaitan dengan investasi yang telah dikeluarkan, tentunya harapan utamanya adalah mendapatkan hasil berupa profit. Jadi, untuk setiap biaya yang telah dikeluarkan, harus mencapai kondisi pemulihan biaya penuh (*Full Cost Recovery*). Pencapaian *Full Cost Recovery* (FCR) merupakan target dari *owner* atau investor atas terjaminnya pengembalian biaya yang telah dikeluarkan (investasi, operasional, *maintenance*). Dalam hal pengembangan infrastruktur air minum, pencapaian target profit dapat dicapai dengan jumlah air yang dijual kepada pelanggan serta tarif (harga) penggunaan air. Hal terpenting dalam pencapaian kondisi *Full Cost Recovery* (FCR) adalah penetapan tarif air oleh perusahaan penyediaan air minum untuk mendukung biaya operasional. Regulasi pencapaian kondisi *Full Cost Recovery* (FCR) diatur pada Permendagri (Peraturan Kementerian Dalam Negeri) No. 21 Tahun 2020 mengenai Perhitungan dan Penetapan Tarif Air Minum, yang menyatakan bahwa pencapaian kondisi *Full Cost Recovery* (FCR) memiliki tujuan untuk menutup kebutuhan operasional dan ditetapkan berdasarkan perhitungan tarif rata-rata yang sama dengan biaya dasar. Tarif rata-rata yang dimaksud ialah total pendapatan penjualan air minum berdasarkan total volume air terjual, sementara biaya dasar adalah biaya yang dikeluarkan dalam memproduksi tiap meter kubik air minum (BPPSPAM, 2020).

Dalam pengembangan infrastruktur air minum, FCR berperan penting karena beberapa alasan. Pertama, FCR merupakan tarif pemulihan atas biaya operasional dalam Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM), di mana dengan mencapai FCR, perusahaan penyedia air minum dapat meningkatkan pelayanan dalam berbagai aspek, seperti aksesibilitas, keadilan, kualitas pelayanan, efisiensi penggunaan air, perencanaan rehabilitasi aset infrastruktur. Selain itu, penetapan tarif yang memenuhi kriteria

pencapaian FCR akan membantu dalam pengelolaan keuangan perusahaan penyedia air minum. Dalam hal ini, BPPSPAM menyatakan bahwa perusahaan penyedia air minum yang tarifnya memenuhi kriteria FCR serta memiliki lebih dari 10.000 pelanggan memiliki kriteria sebagai perusahaan penyedia air minum yang sehat. Penyesuaian tarif air merupakan hal yang menentukan pencapaian FCR setiap tahunnya. Perusahaan penyedia air minum perlu menyesuaikan tarif dengan biaya operasional serta kehilangan air faktual dalam penentuan FCR. Di Indonesia masih terdapat sekitar 63% perusahaan air minum yang belum memenuhi kriteria FCR dalam penetapan tarif air minum. Di sisi lain, batas minimal dan maksimal tarif air minum ditentukan berdasarkan peraturan kepala daerah dengan berdasarkan tingkat pendapatan masyarakat yang bervariasi pada tiap daerah, sehingga membatasi setiap perusahaan penyedia air minum untuk menyesuaikan tarif yang memenuhi kriteria FCR. Berkaitan dengan hal tersebut, BPPSPAM menyatakan bahwa permasalahan pencapaian kondisi FCR bagi perusahaan penyedia air minum di Indonesia bersifat kompleks, dengan bertumpu pada aspek teknis, keuangan, dan juga pemenuhan target tingkat pelayanan kepada masyarakat. Tidak mengherankan apabila sebagian besar perusahaan penyedia air minum di Indonesia belum menerapkan tarif yang memenuhi kriteria FCR sehingga biaya produksi lebih tinggi daripada pendapatan penjualan air. Hal ini menyebabkan pengelolaan perusahaan penyedia air minum tidak efisien dan selalu mengalami kerugian (Wardiha dkk, 2020). Berdasarkan latar belakang tersebut maka perlu dilakukan suatu kajian mengenai kelayakan tarif air minum berdasarkan pencapaian kondisi FCR dengan memperhitungkan keseluruhan biaya selama siklus hidup aset infrastruktur penyediaan air minum.

Para praktisi dan peneliti pada bidang penyediaan air minum saat ini dihadapkan pada tantangan yang semakin kompleks untuk secara efektif dan efisien melakukan penilaian aset dan mengelola aset dengan cara yang dapat memaksimalkan reliabilitas dan minimalisasi biaya dan kerugian (Nafi dan Brans, 2019). Analisis *Life-Cycle Cost (LCC)* dapat mendukung perusahaan penyedia air minum untuk menetapkan strategi pengelolaan aset infrastruktur penyediaan air minum. Analisis ini memperhitungkan seluruh biaya selama siklus hidup aset yang ditinjau. Dengan mengetahui besar biaya selama siklus hidup, maka perusahaan penyediaan air minum dapat merumuskan

kebijakan dalam operasional dan pemeliharaan aset infrastruktur untuk mencapai usia guna aset yang optimum.

Analisis LCC yang menghasilkan biaya total selama siklus hidup aset pada sistem penyediaan air minum, dapat menjadi acuan dalam pencapaian kondisi FCR. Di mana apabila biaya total selama siklus hidup sama dengan pendapatan penjualan air maka pada titik tersebut kondisi FCR dapat tercapai. Analisis LCC pada aset pada sistem penyediaan air minum melibatkan komponen biaya yang terdiri atas biaya awal, biaya operasional, biaya perbaikan, biaya pemeliharaan, dan biaya penggantian (Nugroho, Utomo dan Iriawan, 2022). Dengan mengetahui nilai dari komponen tersebut, perusahaan pengelola sistem penyediaan air minum dapat menerapkan program dan tindakan untuk pencapaian kondisi optimal dalam operasional dan pemeliharaan sistem penyediaan air minum.

Dalam kondisi di mana terdapat komponen yang berbeda-beda pada unit SPAM, maka terdapat karakter keandalan yang bervariasi apabila ditinjau dari sisi jenis komponen unit SPAM. Dengan variasi tingkat keandalan tersebut maka akan berpengaruh terhadap fase siklus hidup SPAM dalam hal yang berkaitan dengan proses operasional dan pemeliharaan selama usia guna yang direncanakan yakni 50 tahun, karena tidak semua komponen memiliki usia guna yang sama. Pada akhirnya, hal tersebut akan berpengaruh terhadap biaya siklus hidup aset pada seluruh unit Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM).

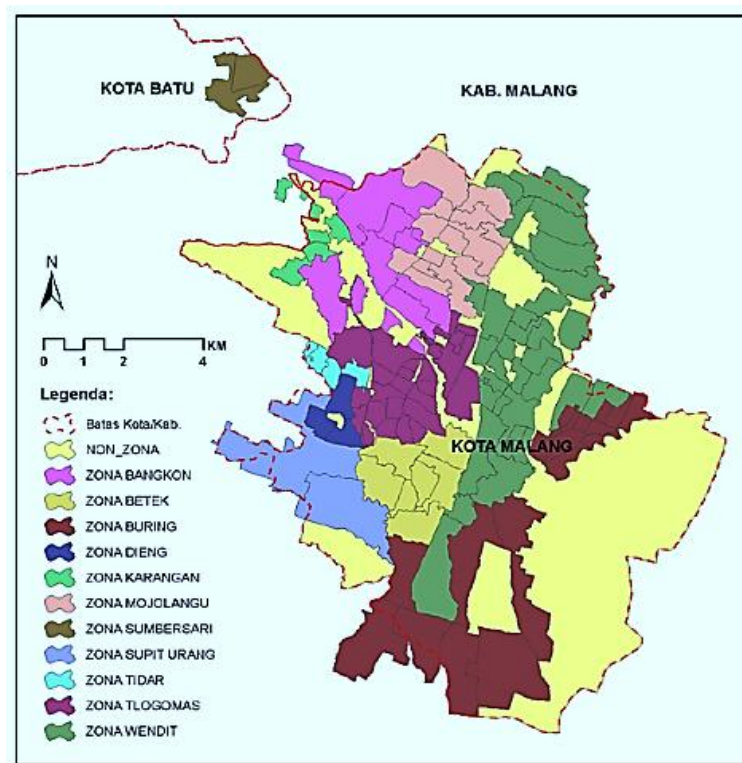
1.2 Obyek Penelitian

Obyek Penelitian ini adalah Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) di Kota Malang, Jawa Timur. Jaringan pelayanan air minum Kota Malang telah menjangkau 80% dari luas wilayah Kota Malang yakni seluas 110 km². Sedangkan cakupan jumlah pelanggan saat ini mencapai 98% dari jumlah rumah tangga di Kota Malang, yakni mencapai 171.000 sambungan rumah. Jumlah produksi air minum adalah sebesar 1525 liter per detik (Saparina, 2018).

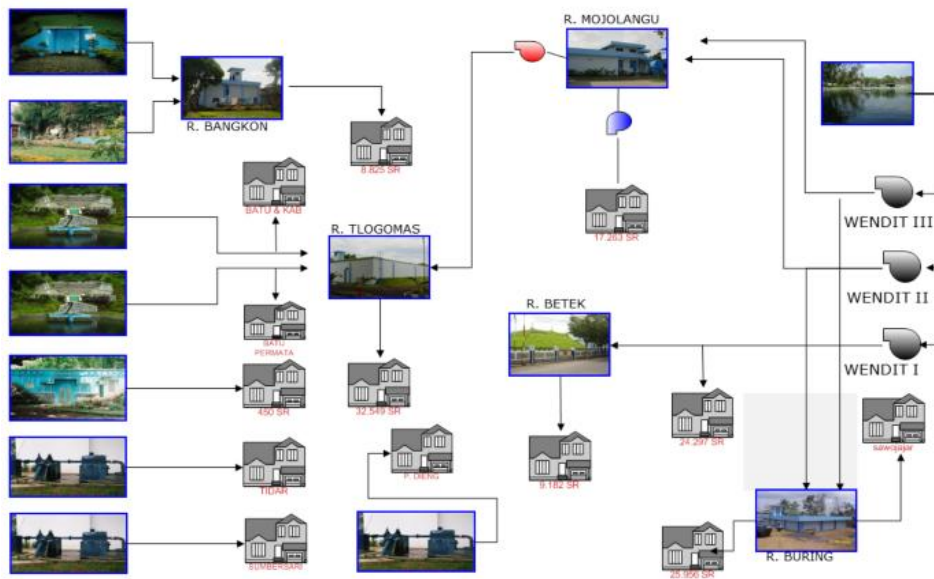
Jaringan distribusi air minum Kota Malang memiliki daerah layanan yang terbagi atas 13 zona layanan dan 205 *District Metered Area (DMA)*. Sistem yang diterapkan pada jaringan air minum Kota Malang menggunakan dua sistem distribusi air, yaitu sistem gravitasi dan sistem pompa untuk mengalirkan air dari sumber air baku (lokasi produksi)

ke *reservoir* pelayanan (jaringan transmisi) dan distribusi air minum ke pelanggan (jaringan distribusi).

Sistem ini dikelola oleh Perusahaan Umum Daerah Tugu Tirta yang bertindak sebagai operator dan korporasi penyedia air minum di Kota Malang. Perumda Tugu Tirta, yang sebelumnya bernama PDAM Kota Malang merupakan Badan Usaha Milik Daerah (BUMD) Kota Malang yang mengelola sistem penyediaan air minum sejak tahun 1915 sebagai hasil nasionalisasi perusahaan utilitas air minum milik Pemerintah Kolonial Belanda.



Gambar 1.1. Zona layanan distribusi air minum Kota Malang (Saparina, 2018)



Gambar 1.2. Sistem Penyediaan Air Minum Kota Malang (PDAM Tugu Tirta, 2020)

1.3 Tujuan Pengembangan Model

Tujuan pengembangan model ini adalah :

1. Mengetahui kondisi keandalan pada aset penyediaan air minum berdasarkan pola kerusakan komponen unit Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM).
2. Mengetahui pencapaian usia guna aset pada sistem penyediaan air minum berdasarkan analisis LCC yang dilakukan.
3. Mengetahui pencapaian kondisi *Full Cost Recovery (FCR)* selama usia guna aset pada sistem penyediaan air minum yang direncanakan.

1.4 Manfaat Pengembangan Model

Manfaat empirik yang ingin dicapai dari pengembangan model ini adalah :

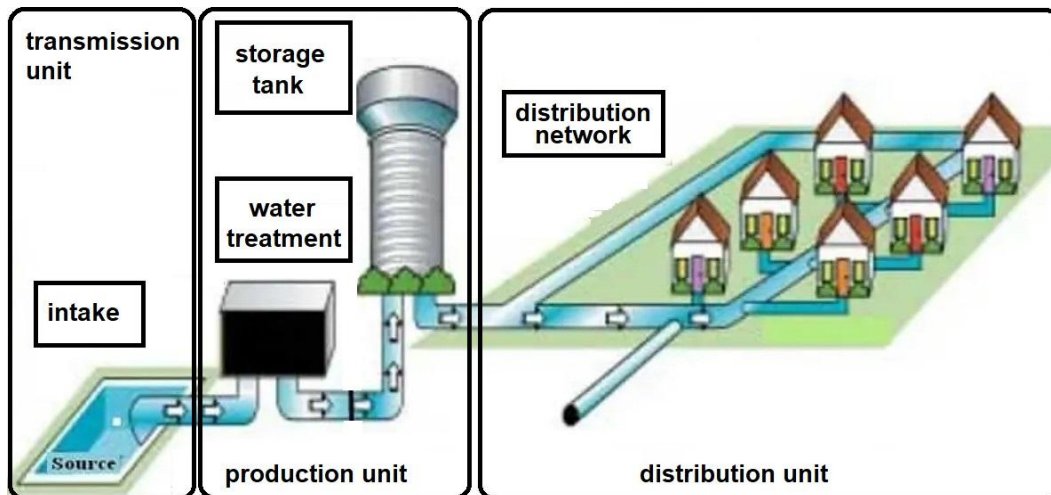
1. Memberikan informasi mengenai tahap siklus hidup aset pada sistem penyediaan air minum untuk penyusunan rencana operasional dan pemeliharaan.

2. Memberikan informasi mengenai pencapaian usia guna aset pada sistem penyediaan air minum sebagai dasar bagi evaluasi penyusunan rencana teknis dan anggaran pada program jangka panjang proyek penyediaan air minum.
3. Mengetahui pencapaian kondisi *Full Cost Recovery (FCR)* selama usia guna aset sebagai dasar bagi evaluasi rencana bisnis perusahaan penyedia air minum.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM)

Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) adalah satu kesatuan aset yang terintegrasi baik berupa perangkat, bangunan, peralatan dan saluran yang membawa air yang telah diolah dari unit pengambilan air menuju daerah pelayanan tempat konsumen berada. Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) terdiri atas unit transmisi (unit air baku), unit produksi (unit pengolahan), unit distribusi dan unit pelayanan kepada pelanggan, yang masing-masing memiliki komponen tersendiri (Saparina, 2018).



Gambar 2.1. Gambaran Sistem Penyediaan Air Minum

2.1.1. Unit Transmisi (Air Baku)

Unit transmisi adalah satu kesatuan bangunan atau instrumen pengambilan air dari sumber air permukaan atau air bawah permukaan ke instalasi pengolahan. Pada umumnya unit transmisi dilengkapi dengan instrumen pompa pengambilan apabila membutuhkan *head* (tinggi energi gravitasi) tertentu untuk mencapai permukaan. Selanjutnya, air akan dipompa ke unit selanjutnya, yaitu unit pengolahan. Pipa transmisi adalah pipa pembawa air baku dari titik awal transmisi ke titik akhir transmisi air baku atau awal unit pengolahan.

2.1.2. Unit Produksi (Pengolahan)

Dari unit transmisi, air akan masuk ke Instalasi Pengolahan Air atau *Water Treatment Plant*. Instalasi ini merupakan sarana yang berfungsi untuk mengolah air dari kualitas air baku atau air terkontaminasi yang kemudian mendapatkan perawatan kualitas air yang diinginkan sehingga memenuhi baku mutu air minum. Pada umumnya instalasi ini terdiri dari beberapa komponen unit, meliputi koagulasi, flokulasi, sedimentasi, filtrasi, dan desinfeksi, dengan tahap pengolahan sebagai berikut :

1. Pada proses koagulasi dilakukan proses destabilisasi partikel koloid, karena pada dasarnya sumber air (air baku) biasanya berbentuk koloid dengan berbagai koloid yang terkandung didalamnya. Tujuan proses ini adalah untuk memisahkan air dengan pengotor yang terlarut didalamnya. Proses destabilisasi ini dapat dilakukan dengan penambahan bahan kimia maupun dilakukan secara fisik dengan rapid mixing (pengadukan cepat), hidrolis (terjunan atau hydrolic jump), maupun secara mekanis (menggunakan batang pengaduk).
2. Proses flokulasi pada *Water Treatment Plant* (WTP) atau Instalasi Pengolahan Air (IPA) bertujuan untuk membentuk dan memperbesar flokulan (pengotor yang terendapkan). Disini dilakukan pengadukan lambat (slow mixing), di mana aliran air disini harus tenang. Untuk meningkatkan efisiensi biasanya ditambah dengan senyawa kimia yang mampu mengikat flokulan.
3. Proses sedimentasi menggunakan prinsip berat jenis, dan proses sedimentasi dalam *Water Treatment Plant* (WTP) atau Instalasi Pengolahan Air (IPA) berfungsi untuk mengendapkan partikel-partikel koloid yang sudah didestabilisasi oleh proses sebelumnya (partikel koloid lebih besar berat jenisnya daripada air).
4. Proses filtrasi bertujuan untuk penyaringan. Teknologi membran bisa dilakukan pada proses ini, selain bisa juga menggunakan media lainnya seperti pasir dan lainnya. Dalam teknologi membran proses filtrasi

membran ada beberapa jenis, yaitu: *Multi Media Filter*, *UF (Ultrafiltration) System*, *NF (Nanofiltration) System*, *MF (Microfiltration) System*, *RO (Reverse Osmosis) System*.

5. Setelah melewati proses filtrasi terdapat kemungkinan masih terdapat *micro organisme* yang berada di dalam air, sehingga diperlukan penambahan senyawa kimia yang dapat mematikan kuman, biasanya berupa penambahan chlor, ozonosasi, UV, pemabasan sebelum masuk ke konstruksi terakhir yaitu reservoir.

Selanjutnya, sebelum didistribusikan, air masuk ke dalam *reservoir*. *Reservoir* merupakan suatu bangunan konstruksi yang berfungsi untuk menampung air yang telah diolah untuk didistribusikan kepada konsumen melalui jaringan distribusi. *Reservoir* dipergunakan untuk menyediakan tampungan air guna memenuhi fluktuasi jumlah pemakaian air. Pada saat pemakaian air di bawah konsumsi air rata-rata maka suplai air yang lebih akan ditampung didalam *reservoir* untuk mengimbangi pemakaian air dalam jumlah yang besar pada jam-jam puncak. *Reservoir* juga diperlukan untuk menyediakan tampungan air bagi penanggulangan kebakaran, serta untuk menstabilkan tekanan di dalam sistem distribusi dan juga sebagai pemeratan aliran dan tekanan akibat fluktuasi pemakaian air di daerah distribusi. *Reservoir* harus terletak sedekat mungkin dengan pusat pemakaian. Pemakaian air didalam *reservoir* harus cukup tinggi untuk memungkinkan aliran gravitasi dengan tekanan yang cukup ke sistim distribusi yang akan dilayani. Pada kota-kota besar beberapa *reservoir* dapat diletakkan pada titik-titik strategis didalam kota. Air biasanya dipompakan ke dalam suatu *reservoir* dan kemudian dilepaskan ke jaringan sistim distribusi dengan aliran gravitasi. Kapasitas yang dibutuhkan dari suatu *reservoir* ditetapkan berdasarkan topografi dan ciri-ciri lain dari daerah yang dilayani. *Reservoir* ini biasanya diletakkan di tempat dengan elevasi lebih tinggi daripada tempat-tempat yang menjadi sasaran distribusi. Biasanya terletak di atas bukit atau gunung. Setelah dari *reservoir*, air bersih siap untuk didistribusikan melalui pipa-pipa dengan berbagai ukuran ke tiap daerah distribusi. Jenis *reservoir* meliputi (Anonim, 2009) :

- a. *Ground reservoir* yaitu bangunan penampung air bersih di bawah permukaan tanah. Karena letaknya tersebut maka *reservoir* ini sangat dipengaruhi oleh fluktuasi permukaan air, oleh sebab itu konstruksi *reservoir* jenis ini dilengkapi dengan sekat-sekat pembatas. Hal tersebut dikarenakan prinsip utama dalam penyimpanan air adalah tidak boleh terdapat sedimentasi. Volume yang dapat harus ditampung minimal $\frac{2}{3}$ dari volume total kebutuhan harian maksimum daerah pelayanan.
- b. *Elevated reservoir* adalah bangunan penampung air yang terletak di atas permukaan tanah dengan ketinggian tertentu sehingga tekanan air pada titik terjauh masih tercapai. Volume yang dapat ditampung minimal $\frac{1}{3}$ dari volume total kebutuhan harian maksimum daerah pelayanan.

2.1.3. Unit Distribusi

Unit distribusi memiliki fungsi untuk mengalirkan air dari unit produksi kepada pelanggan. Perancangan unit ini didasarkan atas dua faktor utama yaitu kebutuhan air (*water demand*) dan tekanan hidraulik (*hydraulic pressure*), serta ditunjang oleh faktor kontinuitas (*continuity*) dan keamanan (*safety*). Dengan demikian, fungsi pokok unit ini adalah menghantarkan air minum ke seluruh pelanggan di daerah pelayanan dengan tetap memperhatikan faktor kualitas, kuantitas, kontinuitas dengan tekanan hidraulik dan kebutuhan air yang memenuhi standar (Krocova, 2015). Dengan demikian, kondisi yang diinginkan oleh pelanggan adalah bahwa kapan saja pelanggan membutuhkan, maka air harus selalu tersedia dalam kualitas, kuantitas dan kontinuitas yang memadai (Jang dan Choi, 2017).

2.2 Prinsip *Full Cost Recovery* pada Pengelolaan Sumberdaya Air

Prinsip pemulihan biaya secara penuh atau *Full Cost Recovery* (FCR) pertama kali ditetapkan oleh Uni Eropa (UE) pada tahun 2002 sebagai persyaratan substansial untuk efisiensi ekonomi, transparansi, keadilan, dan keberlanjutan dalam pengelolaan sumber daya air. Meskipun demikian, pelaksanaan FCR menghadapi tantangan yang

signifikan, baik secara teoretis maupun praktis, khususnya mengenai perhitungan biaya dengan kompleksitas komponen dan sumber daya yang terkait penggunaan air. Pencapaian kondisi FCR dengan penggunaan sumberdaya yang efisien adalah strategi penting untuk pengelolaan air bagi perkotaan. Studi terdahulu menunjukkan bahwa penetapan harga dengan tidak mempertimbangkan pencapaian FCR menghasilkan pengelolaan air yang tidak efektif. Di sisi lain kota-kota yang menggunakan strategi penetapan harga tersegmentasi telah mendorong pelanggan untuk menggunakan air secara efisien. Struktur penetapan harga untuk setiap sumber daya yang tersedia secara alami harus didasarkan pada parameter sosial, kondisi lingkungan, dan mekanisme pemulihan biaya secara penuh. Penetapan harga air seharusnya dilakukan dengan tiga prinsip yaitu keadilan, efisiensi, dan lingkungan. Pemanfaatan air yang berkelanjutan adalah pemanfaatan sumber daya terbarukan, yang dapat habis dalam batas pemulihannya, dengan sebuah penilaian rasional untuk menggunakan sebagaimana layaknya sumber daya yang tidak terbarukan (Exposito, 2018). Secara umum FCR dinyatakan dalam *Cost Recovery Rate (CRR)* dengan persamaan sebagai berikut (Exposito, 2018) :

$$CRR = R_t/C_t \quad (2.1)$$

Di mana :

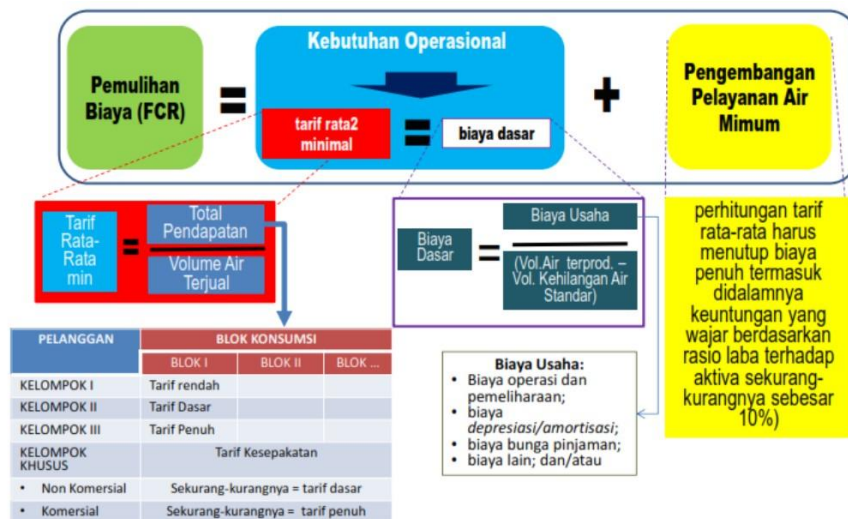
CRR = *Cost Recovery Rate*

R_t = Keseluruhan pendapatan (*revenue*)

C_t = Keseluruhan biaya (*cost*)

Penetapan pemulihan biaya secara penuh dan penggunaan air yang efisien tidak dapat mengendalikan penggunaan air melainkan diperlukan perubahan kebijakan dan instrumental untuk mempertimbangkan air sebagai sumber daya alam yang terbatas. Studi terdahulu menyimpulkan bahwa upaya untuk penetapan tarif dengan pemulihan biaya penuh belum memperhitungkan biaya secara terperinci ke dalam sistem penetapan harga air agar skema pengelolaan air menjadi lebih mandiri. Berbagai upaya seharusnya dilakukan untuk membuat model penetapan harga air yang berkelanjutan, pada tingkat kualitas air yang berbeda untuk berbagai kebutuhan air. Mengingat tingginya biaya modal proyek infrastruktur air, maka biaya yang lebih terperinci hendaknya disertakan dalam model penetapan harga air, untuk mencapai titik impas biaya yang lebih baik (Thomas dkk., 2022).

Dalam pengelolaan aset penyediaan air minum di Indonesia, prinsip FCR diadopsi pada tahun 2020 dengan pemberlakuan Permendagri No 21 Tahun 2020. Pada pasal 5 Permendagri No 21 Tahun 2020 disebutkan bahwa pemulihan biaya penuh ditujukan untuk menutup kebutuhan operasional berdasarkan penetapan tarif yang memenuhi biaya dasar air minum. Berdasarkan hal tersebut, didapati bahwa komponen yang sangat penting terhadap keberlangsungan pengelolaan SPAM adalah tarif air minum. Salah satu dasar kebijakan penetapan tarif pada pencapaian pemulihan biaya penuh adalah tarif yang ditetapkan dapat menghasilkan pendapatan yang dapat menutup seluruh biaya dasar yang dikeluarkan. Biaya dasar adalah biaya yang diperoleh dari biaya operasional dan biaya pemeliharaan terhadap infrastruktur yang terbangun dengan memperhitungkan nilai investasi.



Gambar 2.2. Skema FCR berdasarkan Permendagri No 21 Tahun 2020 (Kemendagri, 2020)

Dalam rangka pemulihan biaya secara penuh, pengelola SPAM perlu mengambil langkah yang tepat dalam menentukan besaran tarif air minum. FCR merupakan cerminan dari keinginan investor bahwa biaya yang telah diinvestasikan akan kembali. Rasio pengembalian biaya (*CRR*) menjadi pertimbangan untuk penetapan tarif air bersih oleh pihak penyedia air agar diperoleh nilai alternatif tarif air bersih yang paling optimal untuk pengelolaan (Wardiha dkk., 2021). Selain memperhitungkan biaya yang timbul akibat operasional, pencapaian FCR juga memperhitungkan kebutuhan bagi pengembangan pelayanan air minum.

2.3 Manajemen Aset Infrastruktur

2.3.1. Pengertian Aset

Aset adalah barang dan segala sesuatu baik yang berwujud (*tangible*) maupun tidak berwujud (*intangible*) yang tercakup dalam kekayaan suatu pihak yang memiliki nilai finansial. Suatu aset dapat memberikan manfaat bagi organisasi apabila dikelola dengan baik. Aset infrastruktur seperti prasarana air minum, jalan raya, jembatan, pelabuhan dan irigasi merupakan aset berwujud yang dimanfaatkan untuk pelayanan publik. Aset berwujud milik perusahaan dapat berupa tanah perusahaan, bangunan pabrik/kantor, peralatan/mesin dan properti lain (Hastings, 2015).

Pengertian lain dari aset dinyatakan oleh Standar Pengelolaan Aset ISO 55000 yang mendefinisikan aset sebagai barang, benda atau entitas yang memiliki nilai potensial atau aktual untuk suatu organisasi. Jenis aset yang umum diidentifikasi dalam suatu organisasi meliputi (ISO, 2014) :

1. *Physical assets* seperti pabrik, mesin, bangunan/gedung, jalan, kendaraan, kereta api, pesawat, pipa-pipa, kabel, alat komunikasi, dan infrastruktur lainnya.
2. *Financial assets* seperti sumber keuangan untuk investasi, operasi, perawatan dan material.
3. *Human assets* adalah perilaku, pengetahuan dan kompetensi dasar pekerja yang mempengaruhi performa aset fisik.
4. *Information assets* merupakan data dan informasi yang esensial untuk pengembangan, optimasi dan implementasi rencana manajemen aset.
5. *Intangible assets* adalah sesuatu non-fisik seperti *goodwill* dan kekayaan intelektual.

Menurut sifatnya, terdapat tiga jenis aset. Pertama yaitu aset yang umur manfaatnya terbatas dan tidak terbatas, kedua adalah aset yang dapat dan tidak dapat didepresiasi, serta ketiga adalah aset yang tidak dapat diganti dan dapat diganti. Tanah merupakan aset yang tidak dapat didepresiasi karena umur manfaatnya tidak terbatas. Aset seperti bangunan, kendaraan, mesin, peralatan, dan aset lainnya merupakan aset yang dapat didepresiasi atau umur

manfaatnya terbatas. Umumnya, aset yang dikelola dalam akuntansi perusahaan adalah aset yang mempunyai manfaat ekonomi lebih dari satu tahun dan bertujuan tidak untuk dijual dalam kegiatan normal perusahaan. Aset-aset yang dimiliki seharusnya dimanfaatkan seoptimal mungkin untuk meningkatkan performa suatu organisasi. Dengan kata lain, suatu organisasi harus menghindari adanya waktu menganggur pada aset yang dimiliki. Berdasarkan pernyataan tersebut maka dapat diketahui bahwa manajemen aset menjadi unsur penting perusahaan. Aset yang tidak dimanfaatkan menjadikan kondisi aset menurun dan mempercepat proses penuaan. Aset yang saat ini masih dapat berfungsi sebisa mungkin dipertahankan dan dirawat dengan melakukan tindakan *maintenance*. Di samping itu, aset yang sudah tidak dimanfaatkan tidak boleh dibiarkan begitu saja, harus ada pertimbangan dan keputusan terkait dengan tindakan yang akan dilakukan terhadap aset tersebut (Hastings, 2015).

2.3.2. Pengertian Manajemen Aset

Kaganova dan McKellar (2015) mendefinisikan manajemen aset sebagai suatu proses dalam pengambilan keputusan dan implementasi, berkaitan dengan perolehan, penggunaan dan pemusnahan harta aset. Manajemen aset menjadi komponen yang kritis bagi kesuksesan suatu bisnis. Dalam iklim bisnis yang kompetitif seperti saat ini, sangat penting memiliki tools untuk meningkatkan produktivitas. ISO 55000 merupakan standar yang bisa digunakan berbagai ukuran dan sektor organisasi atau perusahaan. ISO 55000 merupakan standar baru yang menggantikan PAS 55. Pada tahun 2002-2004, *Institute of Asset Management (IAM)* bekerjasama dengan BSI dalam mengembangkan PAS 55 yang merupakan spesifikasi publik pertama yang tersedia untuk manajemen optimal aset fisik. Spesifikasi ini terbukti berhasil dengan utilitas yang luas di perusahaan transport, pertambangan, dan industri proses manufaktur di dunia. Pengembangan PAS 55 hingga tahun 2008 dilakukan oleh 50 organisasi dari 15 sektor industri di 10 negara. ISO kemudian menerima PAS 55 sebagai dasar pengembangan rangkaian standar internasional ISO 55000 yang baru. Pada Februari 2014, standard baru ISO 55000 resmi dipublikasikan (Hastings, 2015).

Manajemen aset merupakan serangkaian kegiatan yang terkait dengan (Hastings, 2015) :

1. Mengidentifikasi aset yang dibutuhkan
2. Mengidentifikasi kelayakan atau kebutuhan dana
3. Mengakuisisi atau memperoleh aset
4. Menyediakan sistem dukungan logistik dan pemeliharaan untuk aset
5. Menghapus dan memperbaharui aset sehingga secara efektif dan efisien dapat memenuhi tujuan perusahaan

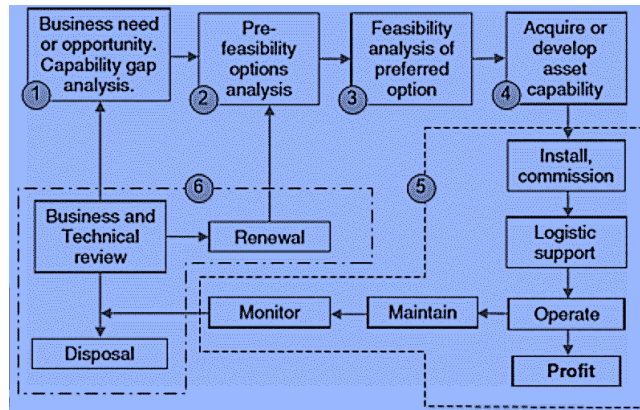
Tujuan manajemen aset adalah agar organisasi dapat memiliki aset sesuai dengan kebutuhan bisnisnya, menyediakan layanan pendukung sehingga dapat beroperasi secara efektif dan efisien untuk mewujudkan nilai dari asetnya seiring dengan menyeimbangkan biaya finansial, lingkungan dan sosial, risiko, tingkat dan kualitas layanan kinerja aset (Kaganova dan McKellar, 2015).

Standar ISO 55000 memberikan manfaat penyusunan kerangka umum pengelolaan aset fisik, antara lain (Hastings, 2015) :

1. Pandangan dan pemahaman terstruktur mengenai manajemen aset.
2. Hubungan yang efektif antara bagian *top management*, bagian *asset management*, serta operasi dan pemeliharaan.
3. Perbaikan dalam pengembalian aset.
4. Keputusan pengelolaan aset yang terinformasi dengan baik.
5. Perbaikan dalam pelatihan dan pengembangan.

2.3.3. Life Cycle Asset Management

Secara umum, siklus hidup aset yang dikenal mencakup empat fase yaitu fase perencanaan (*planning*), fase pengadaan (*acquisition*), fase operasi (*operation*) dan fase penghapusan (*disposal*). Hastings (2015) memberikan skema yang berbeda dari siklus hidup aset pada umumnya. Standar seri ISO 55000 dirancang sebagai panduan bagi organisasi dalam membangun, menerapkan dan memelihara sistem manajemen aset dan untuk perencanaan, perancangan dan pelaksanaan kegiatan manajemen aset tersebut. `



Gambar 2.2. Siklus Hidup Manajemen Aset menurut ISO 55001 (Hastings, 2015)

Siklus hidup manajemen aset dimulai dari tahap pertama yaitu menganalisis kebutuhan. Pada tahap ini dilakukan identifikasi aset dan total kemampuan aset yang dibutuhkan organisasi untuk mendukung rencana bisnis ke depan. Identifikasi kebutuhan aset ini berdasar pada hasil analisis permintaan produk atau jasa yang berasal dari *customer*, *users*, atau *stakeholders*. Seiring dengan proses analisis kebutuhan, juga dilakukan tahap analisis kesenjangan. Pada analisis kesenjangan, kemampuan aset yang ada saat ini diproyeksikan dan dibandingkan dengan kemampuan/kebutuhan aset yang direncanakan. Hasilnya berupa penilaian atau pernyataan target organisasi yang perlu dicapai untuk mengisi *gap* yang terjadi.

Tahap kedua yaitu *prefeasibility analysis* yang merupakan analisis mempertimbangkan kemungkinan kemampuan aset dan memberikan alternatif pilihan-pilihan lain. Proses ini dapat menunjukkan bahwa beberapa aspek mungkin saja perlu ditinjau, sehingga dapat mengacu kembali ke tahap sebelumnya.

Tahap ketiga adalah menganalisis kebutuhan pendanaan. Pilihan-pilihan aset di tahap kedua dianalisis secara detail dengan menentukan pembiayaan, seperti biaya akuisisi, biaya operasi, biaya perawatan, kapasitas produksi, umur ekonomis aset dan depresiasi aset. Tahap ini disebut dengan tahap *feasibility analysis*.

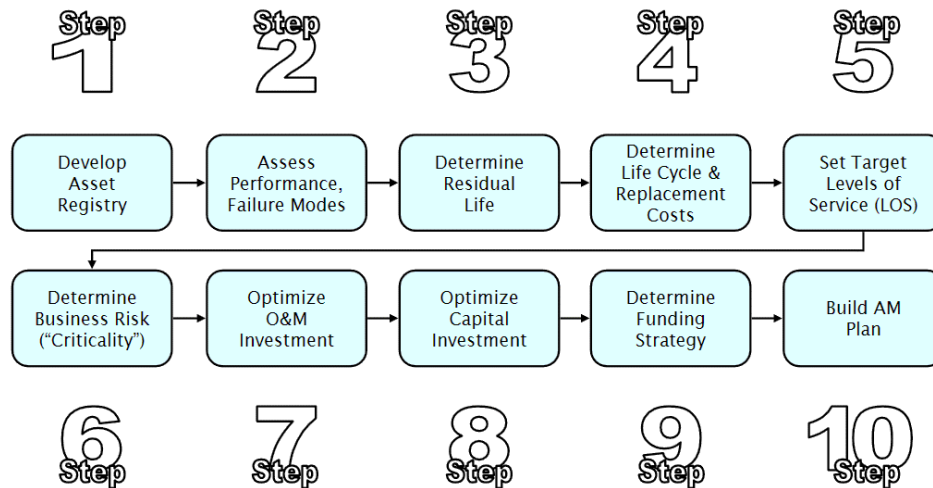
Tahap keempat adalah *acquisition* yang merupakan tahap memperoleh atau mengadakan aset yang direncanakan. Proses pengadaan aset ini merupakan proses dimana aset yang diperoleh harus sejalan dengan sasaran dan tujuan yang

telah ditetapkan. Dalam pertimbangan akuisisi, penting untuk memastikan bahwa aset tersebut layak diperoleh dari sudut pandang pengiriman, sehingga penting adanya untuk menentukan *supplier*. Faktor lain adalah ketersediaan sumber daya untuk melaksanakan akuisisi apapun. Sumber daya personil dibutuhkan untuk melaksanakan fungsi desain dan pengembangan, spesifikasi dan evaluasi peralatan serta analisis biaya. Dukungan hukum, keuangan dan teknik juga penting dalam akuisisi untuk selanjutnya bergerak ke tahap implementasi, operasi, pemeliharaan dan monitor sistem.

Tahap pengoperasian aset, pemeliharaan aset dan monitor dilakukan secara berkelanjutan. Tahap di mana kegiatan menggunakan aset, mengawasi keadaan aset saat dimanfaatkan dan memperbaiki seluruh aset agar dapat dioperasikan. Tahap terakhir siklus hidup aset adalah fase disposal yang dapat ditentukan prioritas aset sesuai dengan keadaan aset-aset yang dimiliki organisasi. Keadaan aset yang dalam kondisi kritis, umur ekonomis aset yang sudah habis, mengalami penurunan kemampuan atau kehilangan fungsi dapat kemudian diperbaiki, dialihkan/dihibahkan atau bahkan dihapuskan/pemusnahan.

USEPA (*United States Environmental Protection Agency*) memberikan 10 langkah dalam penyusunan rencana manajemen aset meliputi (USEPA, 2013):

1. Identifikasi dan pencatatan aset
2. Penilaian aset dan moda kegagalan
3. Penentuan sisa usia aset
4. Penentuan biaya siklus hidup dan penggantian aset
5. Penentuan tingkat pelayanan
6. Analisis risiko bisnis
7. Optimasi investasi operasional dan pemeliharaan
8. Optimasi investasi modal
9. Analisis biaya pendanaan
10. Penyusunan rencana manajemen aset



Gambar 2.3. Langkah Penyusunan Rencana Manajemen Aset Fisik (USEPA, 2013)

2.4 Life Cycle Cost Analysis (LCCA)

Menurut Ghobadi dkk (2021), *Life Cycle Cost Analysis (LCCA)* adalah teknik evaluasi ekonomi yang memperhitungkan semua biaya yang berkaitan selama jangka waktu investasi dengan penyesuaian yang berdasarkan konsep nilai waktu terhadap uang (*time value of money*). Biaya yang terdapat dalam perhitungan *Life Cycle Cost Analysis* adalah sebagai berikut (Ghobadi dkk, 2021) :

- a. Biaya awal (*initial cost*), yang meliputi biaya konstruksi, biaya desain, biaya perijinan, dan biaya pengembangan. Biaya awal merupakan penggabungan dari pengembangan awal fasilitas, pendukung proyek dan biaya konstruksi. Biaya item-item penggabungan ketiganya terdiri dari biaya desain, konsultan, perijinan, upah tenaga ahli, biaya konstruksi, semua perlengkapan dan peralatan. Metode yang digunakan untuk mengestimasi biaya awal adalah dengan mengestimasi dari parameter biaya yang sudah ada sebelumnya. Data dapat diperoleh dari biaya aktual arsip kontraktor, konsultan, pemrakarsa proyek atau bisa juga dari biaya standar yang ditetapkan oleh pemerintah melalui keluaran standar SNI.
- b. Biaya operasional (*operational cost*), merupakan biaya yang timbul dari kegiatan operasional setiap periode tahun ataupun dalam periode waktu tertentu.

- c. Biaya pemeliharaan (*maintenance cost*), merupakan biaya yang timbul dari kegiatan pemeliharaan berkala yang timbul setiap periode tahun ataupun dalam periode waktu tertentu.
- d. Biaya perbaikan (*repair cost*), merupakan biaya yang timbul dari kegiatan perbaikan akibat kerusakan yang mungkin terjadi setiap periode tahun ataupun dalam periode waktu tertentu.
- e. Biaya penggantian (*replacement cost*), merupakan biaya yang timbul karena usaha untuk mempertahankan fungsi asli dari suatu aset, di mana terdapat beberapa penyebab adanya penggantian, yang meliputi kerusakan fisik atau perubahan yang terjadi pada kondisi fisik aset akibat penuaan (*aging*) akan menyebabkan pengoperasian sebuah aset menjadi kurang efisien. Selain itu, dampak perubahan teknologi sehingga memerlukan penggantian dan faktor keuangan melibatkan perubahan peluang ekonomi terhadap operasi fisik atau penggunaan aset dapat menjadi penyebab tindakan penggantian.

Dengan demikian, *Life Cycle Cost* (LCC) dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut (Ghobadi dkk, 2021) :

$$LCC = C_i + C_o + C_m + C_r + C_R \quad (2.2)$$

Di mana :

LCC = *Life Cycle Cost* (LCC)

C_i = Biaya awal (*initial cost*)

C_o = Biaya operasional (*operational cost*)

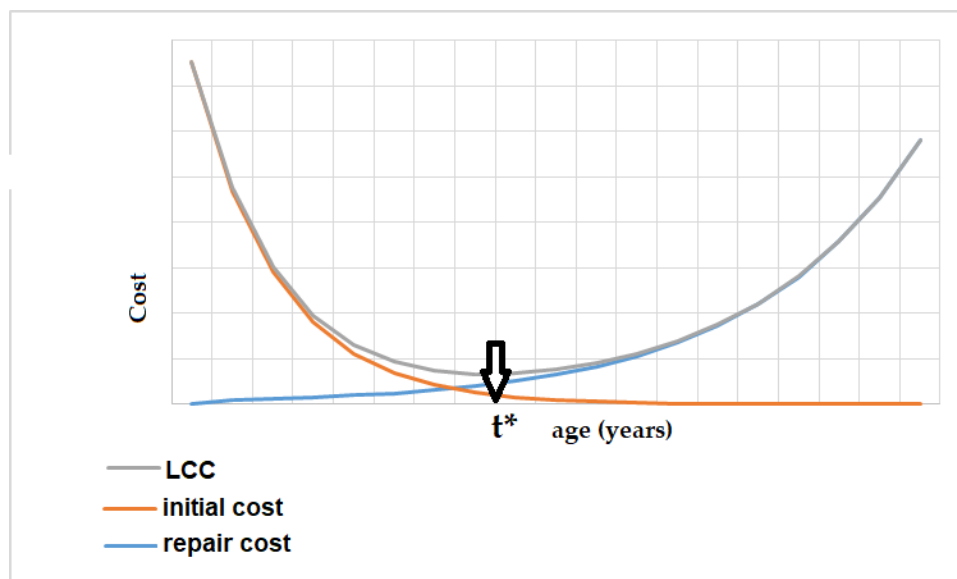
C_m = Biaya pemeliharaan (*maintenance cost*)

C_r = Biaya perbaikan (*repair cost*)

C_R = Biaya penggantian (*replacement cost*)

Para praktisi dan peneliti pada bidang penyediaan air minum saat ini dihadapkan pada tantangan yang semakin kompleks untuk secara efektif dan efisien melakukan penilaian aset dan mengelola aset dengan cara yang dapat memaksimalkan reliabilitas dan minimalisasi biaya dan kerugian (Nafi dan Brans, 2019). Analisis *Life-Cycle Cost* (LCC) dapat mendukung perusahaan penyedia air minum untuk menetapkan strategi pengelolaan aset infrastruktur penyediaan air minum. Analisis ini memperhitungkan seluruh biaya selama siklus hidup aset yang ditinjau. Dengan mengetahui besar biaya selama siklus hidup, maka perusahaan penyediaan air minum dapat merumuskan

kebijakan dalam operasional dan pemeliharaan aset infrastruktur untuk mencapai usia guna aset yang optimum. Gambar 2.4 menunjukkan ilustrasi kurva LCC pada jaringan distribusi air minum, yang disajikan dengan mengkaji usia aset infrastruktur penyediaan air minum, di mana terdapat kondisi biaya perbaikan meningkat seiring dengan bertambahnya usia aset. Siklus hidup dengan total biaya terendah adalah waktu yang paling efisien dalam melakukan penggantian aset infrastruktur. Nilai LCC terendah dalam suatu siklus hidup aset disebut sebagai LCC optimal.



Gambar 2.4. Hubungan antara *Life-Cycle Cost* dengan Biaya Awal dan Biaya Perbaikan (Nugroho, Utomo, Iriawan, 2022)

Kurva LCC memberikan keuntungan dalam mengantisipasi waktu pembaruan (*renewable period*) aset yang optimal dan menampilkan variasi total biaya di sekitar titik terendah, yakni titik t^* (Nugroho, Utomo, Iriawan, 2022).

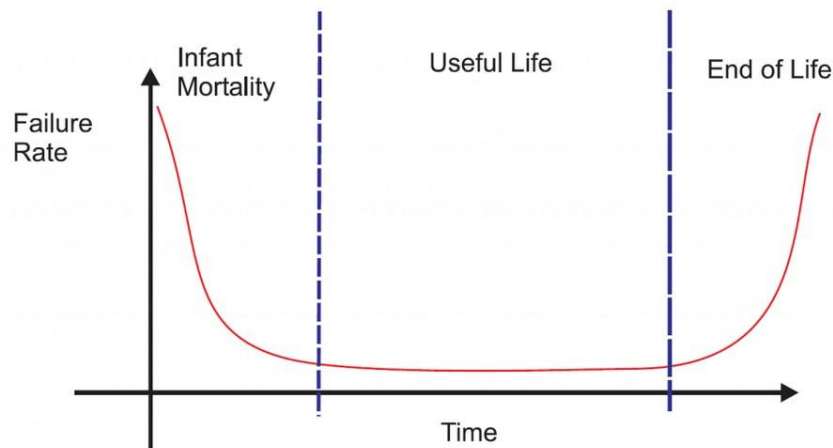
Analisis LCC yang menghasilkan biaya total selama siklus hidup aset pada sistem penyediaan air minum, dapat menjadi acuan dalam pencapaian kondisi FCR. Di mana apabila biaya total selama siklus hidup sama dengan pendapatan penjualan air maka pada titik tersebut kondisi FCR dapat tercapai. Analisis LCC pada aset pada sistem penyediaan air minum melibatkan komponen biaya yang terdiri atas biaya awal, biaya operasional, biaya perbaikan, biaya pemeliharaan, dan biaya penggantian. Dengan mengetahui nilai dari komponen tersebut, perusahaan pengelola sistem penyediaan air minum dapat menerapkan program dan tindakan untuk pencapaian kondisi optimal dalam operasional dan pemeliharaan sistem penyediaan air minum (Nugroho, Utomo dan Iriawan, 2022).

2.5 Analisis Keandalan Aset

2.5.1 Prediksi Kegagalan

Dalam kondisi di mana terdapat komponen yang berbeda-beda pada unit SPAM, maka terdapat karakter keandalan yang bervariasi apabila ditinjau dari sisi jenis komponen unit SPAM. Dengan variasi tingkat keandalan tersebut maka akan berpengaruh terhadap fase siklus hidup SPAM dalam hal yang berkaitan dengan proses operasional dan pemeliharaan selama usia guna yang direncanakan yakni 50 tahun, karena tidak semua komponen memiliki usia guna teknis yang sama. Pada akhirnya, hal tersebut akan berpengaruh terhadap biaya siklus hidup aset pada seluruh unit Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM). Untuk mengetahui keandalan aset, para peneliti telah mengembangkan beberapa model yang berbasis prediksi kegagalan di masa yang akan datang.

Model prediksi kegagalan dapat secara luas dibagi menjadi model fisik dan statistik (Nishiyama dan Fillion, 2013). Perbedaan utama antara model statistik dan fisik yang utama terletak pada kebutuhan data. Model statistik memerlukan pengumpulan data historis, sedangkan model fisik memerlukan data yang berasal dari uji laboratorium atau lapangan (Mazumder dkk., 2018).

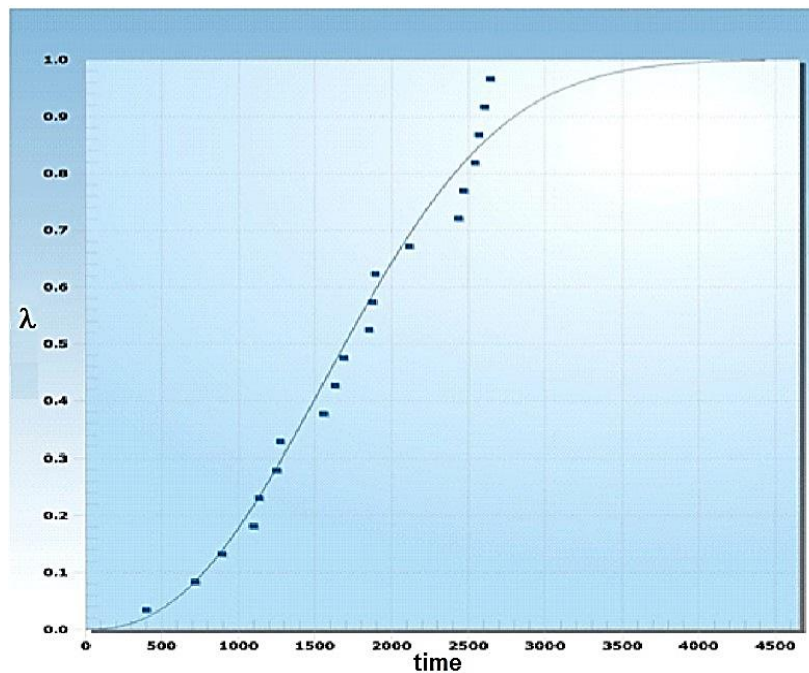


Gambar 2.4. Kurva teoritik hubungan antara laju kegagalan dengan waktu pada sebuah siklus hidup aset infrastruktur (Lin dan Yuan, 2019)

Model statistik probabilistik dikembangkan dengan menggunakan data historis kegagalan sebagai pendekatan untuk memprediksi kegagalan di masa depan. Akurasi

dan keserbagunaan model tersebut tergantung kelengkapan data historis kegagalan aset. Model statistik probabilistik memerlukan pengembangan fungsi laju kegagalan yang tergantung waktu di mana waktu untuk kegagalan berikutnya dapat berubah berdasarkan data historis. Berdasarkan penelitian terdahulu, hal ini dapat dicapai dengan menggunakan *time-dependent model*, *hazard functions model*, *accelerated lifetime model*, *cohort survival mode* atau proses Markov (Wilson dkk., 2017).

Para peneliti terdahulu melakukan analisis keandalan aset dengan kesimpulan bahwa jumlah kegagalan dalam periode waktu tertentu mengikuti persebaran distribusi dalam lingkup keluarga eksponensial (Lin dan Yuan, 2019). Distribusi yang termasuk ke dalam keluarga eksponensial dan pengembangannya adalah distribusi eksponensial, distribusi *Poisson*, distribusi binomial, distribusi gamma, distribusi binomial negatif, distribusi *inverse gaussian* distribusi Weibull, dan distribusi Cox (Mazumder, 2018). Dengan asumsi tersebut, maka pendekatan hubungan antara jumlah kegagalan dengan usia aset pada penelitian ini menggunakan *time-dependent model* yang dikembangkan berdasarkan regresi eksponensial.



Gambar 2.5. Ilustrasi *time-dependent* model pada laju kegagalan (λ) yang dikembangkan berdasarkan regresi eksponensial

2.5.2. Regresi Eksponensial

Regresi eksponensial merupakan suatu teknik statistika untuk menjelaskan hubungan antara variabel bebas dan variabel tak bebas, di mana persamaan yang dihasilkan berupa persamaan eksponensial. Regresi eksponensial memiliki bentuk umum dengan persamaan (Gomez dkk, 2020) :

$$f(x) = \alpha \exp(\beta x) \quad (2.3)$$

Di mana α dan β adalah parameter regresi eksponensial. Penetapan parameter nilai α dan β dapat dilakukan mentransformasi bentuk eksponensial ke bentuk linear dengan persamaan sebagai berikut :

$$\ln f(x) = \ln (\alpha \exp(\beta x)) \quad (2.4)$$

$$\ln f(x) = \ln \alpha + \ln (\exp(\beta x)) \quad (2.5)$$

$$\ln f(x) = \ln \alpha + \beta x \ln e \quad (2.6)$$

Di mana $\ln e = 1$, maka persamaan 2.4 menjadi :

$$\ln f(x) = \ln \alpha + \beta x \quad (2.7)$$

Dalam kondisi di mana $\ln f(x) = y$, maka :

$$y = \ln \alpha + \beta x \quad (2.8)$$

Dalam sebuah seri data, parameter α dan β diperoleh dengan persamaan :

$$\beta = \frac{n(\sum xy) - \sum x \sum y}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \quad (2.9)$$

$$\ln \alpha = \frac{n(\sum y) - \beta \sum x}{n} \quad (2.10)$$

$$\alpha = \exp\left(\frac{n(\sum y) - \beta \sum x}{n}\right) \quad (2.11)$$

Dalam menentukan signifikansi hubungan antara variabel, penelitian ini menggunakan uji statistik sebagai berikut (Iriawan, 2021) :

1. Uji koefisien determinasi (R^2)

Uji koefisien determinasi bertujuan untuk mengukur seberapa jauh kemampuan model dalam menerangkan variasi variabel terikat. Nilai koefisien determinasi adalah antara nol dan satu. Semakin kecil nilai koefisien determinasi (R^2) maka menunjukkan bahwa kemampuan variabel-variabel bebas dalam menjelaskan variabel terikat sangat terbatas. Kelemahan dari koefisien determinasi adalah bias terhadap jumlah variabel bebas yang dimasukkan ke dalam model. Setiap ada penambahan variabel bebas maka koefisien determinasi akan meningkat tanpa mempedulikan apakah variabel

tersebut berpengaruh secara signifikan terhadap variabel terikat. Oleh karena itu, digunakanlah model *adjusted R²*. Model *adjusted R²* dapat naik atau turun apabila ada suatu variabel bebas yang ditambahkan kedalam model.

2. Uji Signifikansi Simultan (Uji Statistik F)

Uji statistik F mengukur *goodness of fit*, yaitu ketepatan fungsi regresi sampel dalam menaksir nilai aktual. Jika nilai signifikansi $F < 0,05$, maka model regresi dapat digunakan untuk memprediksi variabel bebas. Uji statistik F juga menunjukkan apakah semua variabel bebas yang dipertimbangkan dalam model mempunyai pengaruh secara bersama-sama terhadap variabel terikat. Uji statistik F mempunyai signifikansi 0,05. Kriteria pengujian model dengan menggunakan statistik F adalah jika nilai signifikansi $F < 0,05$, maka model dapat diterima, yang menyatakan bahwa semua variabel bebas secara simultan dan signifikan mempengaruhi variabel terikat.

3. Uji Signifikansi Parameter Individual (Uji Statistik t)

Uji statistik t pada dasarnya menunjukkan seberapa jauh pengaruh satu variabel bebas secara individual mempengaruhi variasi variabel terikat. Uji t mempunyai nilai signifikansi $\alpha = 5\%$. Kriteria pengujian hipotesis dengan menggunakan uji statistik t adalah jika nilai signifikansi t (*p-value*) $< 0,05$, maka model regresi dapat diterima, yang menyatakan bahwa suatu variabel bebas secara individual dan signifikan mempengaruhi variabel terikat.

2.5.3. Regresi Eksponensial

Konsep nilai waktu uang merupakan suatu konsep yang didasarkan atas perhitungan bahwa nilai uang pada saat ini lebih berharga dibandingkan dengan nilai uang pada masa mendatang. Pada prinsipnya konsep nilai mata uang menyatakan bahwa uang mempunyai suatu nilai tertentu yang dipengaruhi oleh waktu dan tingkat suku bunga. Di dalam konsep ini dikenal beberapa istilah sebagai berikut (Slobodnyak dan Sidorov, 2022) :

1. *Future value* (nilai mendatang), yakni nilai yang akan diterima pada masa yang akan datang berdasarkan asumsi tingkat suku bunga atas nilai uang pada saat ini.

2. *Present value* (nilai sekarang), yakni nilai sekarang dari suatu jumlah uang yang akan diterima pada masa mendatang.

Kedua nilai tersebut dinyatakan dalam persamaan berikut (Slobodnyak dan Sidorov, 2022) :

$$PV = FV/(1+i)^n \quad (2.12)$$

atau

$$FV = PV(1+i)^n \quad (2.13)$$

Di mana :

FV = *Future Value*

PV = *Present Value*

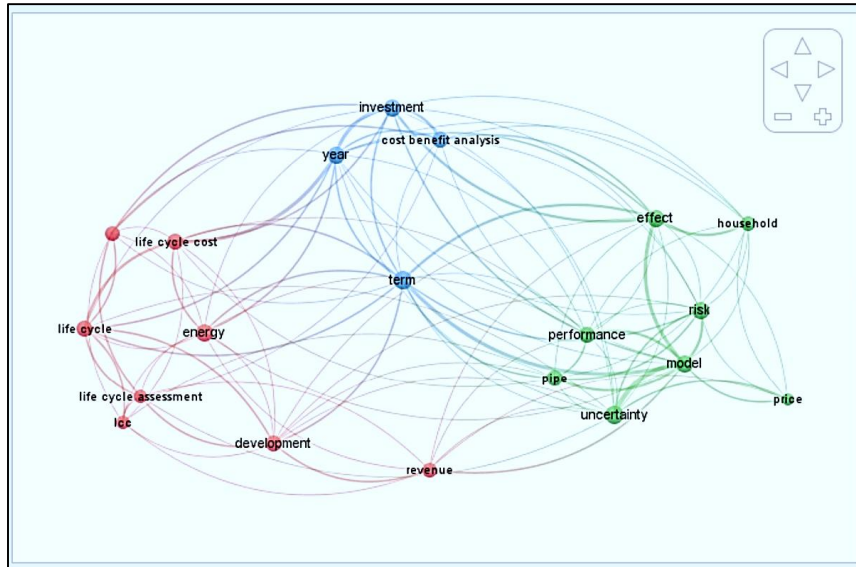
i = asumsi tingkat suku bunga

n = periode waktu

2.6 *State-of-the-Art* Topik Penelitian

2.6.1. Analisis Bibliometrik Topik Penelitian

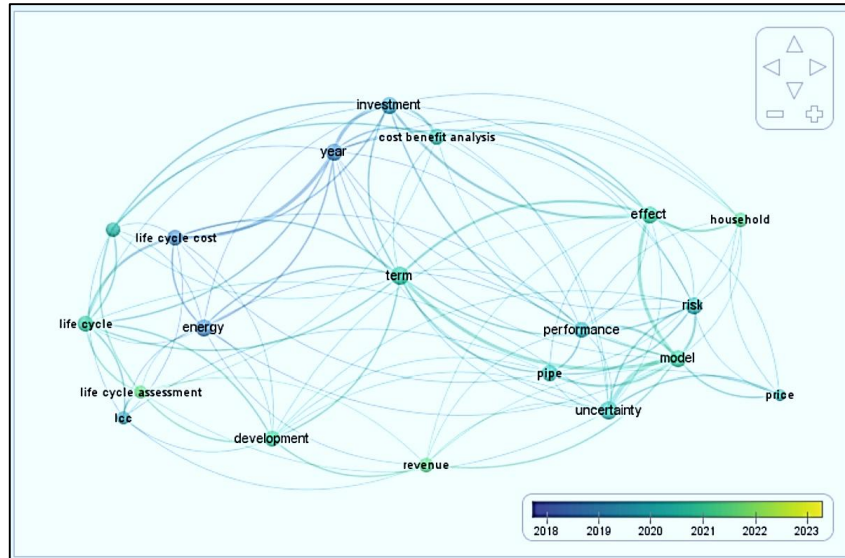
Penelitian ini berfokus pada topik analisis biaya pada pengelolaan aset infrastruktur sumberdaya air. Dalam memperkuat basis literatur, dilakukan *review* terhadap penelitian terdahulu dengan topik yang sejenis. Dari jumlah awal 62 artikel, setelah dilakukan seleksi, akhirnya terpilih sebanyak 54 artikel publikasi penelitian dari basis data Scopus dengan kualifikasi *Quartile 1* (Q1) dan *Quartile 2* (Q2) untuk menjadi referensi yang menunjang analisis pada penelitian ini. Dari analisis bibliometrik berdasarkan topik, abstrak dan kata kunci, diketahui bahwa pada terdapat tiga *cluster* utama pada topik ini, meliputi *cluster* berbasis analisis investasi dan biaya, *cluster* berbasis siklus hidup aset (*life-cycle*) dan *cluster* berbasis analisis risiko dan ketidakpastian (*uncertainty*). Gambar 2.6 menggambarkan peta visualisasi jaringan topik, abstrak dan kata kunci yang menunjukkan keterkaitan antara satu fokus bahasan dengan fokus bahasan lainnya. Warna biru, merah dan hijau menunjukkan *cluster* pada topik penelitian.



Gambar 2.6. Cluster pembahasan di dalam topik penelitian

Pada gambar 2.6 ukuran *node* menunjukkan kuantitas publikasi yang membahas bahasan tersebut, sehingga semakin besar *node* menunjukkan semakin banyak publikasi yang membahas fokus bahasan tersebut. *Node* berukuran kecil merupakan fokus bahasan baru yang merupakan pengembangan dari fokus bahasan lama yang ditandai dengan jejaring. Dari gambar 2.6 terlihat bahwa pada *cluster* berbasis analisis siklus hidup (*life-cycle*) aset, titik bahasan terkini adalah mengenai pendapatan (*revenue*), sedangkan pada *cluster* berbasis analisis risiko, titik bahasan terkini adalah mengenai harga (*price*). Sementara pada *cluster* berbasis analisis investasi dan biaya, titik bahasan terkini adalah mengenai analisis biaya-manfaat (*cost-benefit analysis*).

Gambar 2.7 menggambarkan *overlay visualization* dengan tema peta periode publikasi. Berdasarkan periode publikasi, sebagian besar artikel diterbitkan pada sekitar tahun 2020 hingga tahun 2022. Hal ini ditandai dengan warna dominan hijau pada gambar. Dengan demikian, topik penelitian ini masih menjadi pusat perhatian para peneliti di seluruh dunia.



Gambar 2.7. Tahun publikasi artikel di dalam topik penelitian

2.6.2. Pembahasan Penelitian Terdahulu

Para peneliti telah melakukan penelitian yang berbasis siklus hidup aset untuk beberapa tujuan, di antaranya adalah untuk perumusan jadwal pemeliharaan, penggantian atau rehabilitasi aset infrastruktur bidang sumberdaya air. Xu dkk (2013) menyajikan perumusan strategi penggantian pipa dengan *Genetic programming* berbasis *life-cycle cost*. Penelitian tersebut mengusulkan variabel berupa data fisik pipa, laju kegagalan pipa, biaya perbaikan dan biaya penggantian pipa untuk mencapai strategi penggantian pipa yang optimal. Schoelten dkk (2014) menyajikan perumusan rencana rehabilitasi jaringan pipa air dengan *multi-criteria decision analysis* (MCDA) *multi-criteria decision analysis* (MCDA) dan *life-cycle costing* yang berbasis keandalan Data fisik pipa, biaya penggantian, biaya perbaikan, biaya pemeliharaan, biaya siklus hidup untuk memperoleh strategi rehabilitasi jangka panjang dengan metode kombinasi manajemen aset, model kegagalan analisis keputusan. Ghobadi, dkk (2021) menyusun penjadualan penggantian pipa berdasarkan biaya siklus hidup dengan metode *life-cycle cost analysis* (LCCA) dan *optimization algorithm*. Dengan merekomendasikan data penelitian yang terdiri atas laju kegagalan pipa, usia pipa, diameter pipa, *life-cycle cost*, *running cost*, *initial cost*, *replacement cost*, *repair cost*, Ghobadi dkk (2021) memperoleh hasil berupa jadwal penggantian pipa serta rencana investasi tahunan yang optimal. Peneliti yang lain, Elsebaie dan AlKhomairi (2021) merekomendasikan analisis *life-cycle cost*

berdasarkan variasi usia guna aset *life-cycle cost analysis* (LCCA) dengan variabel diameter pipa, jenis material pipa, *initial cost*, *operational cost*, *maintenance cost*, *interest rate*, *inflation rate*, *service life* pipa dan pompa. Penelitian ini memperoleh hasil penekanan pada biaya tahunan ekuivalen merupakan faktor terbesar dalam pencapaian efisiensi. Nugroho, Utomo dan Iriawan (2022) menganalisis pengambilan keputusan pembaharuan jaringan distribusi air bersih berdasarkan analisis kegagalan pipa dengan pendekatan statistika bayesian dan *life cycle cost analysis* (LCCA). Data yang digunakan meliputi historis kegagalan pipa, usia pipa, diameter pipa, biaya awal, biaya operasional, biaya perbaikan untuk mendapatkan periode penggantian pipa yang optimal pada diameter tertentu.

Peneliti yang lain menggunakan metode *life-cycle costing* untuk penilaian alternatif pengembangan aset atau teknologi. Godfrey dan Hailemichael (2017) melakukan analisis *life-cycle cost* pada infrastruktur penyediaan air yang terdampak curah hujan rendah dengan menggunakan *Life-cycle cost analysis* (LCCA). Variabel dalam penelitian ini adalah *capital expenditure costs for fixed assets (CAPEX)*, *emergency expenditure costs (EMMEX)*, dan *operation cost*, yang mendapatkan hasil bahwa penggabungan antara *water harvesting system* dan air kondensat dapat mengurangi kebutuhan air utama hingga 75%. Sarkar (2023) melakukan analisis biaya untuk pemilihan alternatif instalasi pengolahan daur ulang air limbah rumah tangga *Life-cycle cost analysis* (LCCA) dan *cost-benefit analysis* (CBA) dengan menggunakan variabel biaya awal, biaya konstruksi, biaya pemeliharaan, biaya operasional, biaya penggantian Alternatif terbaik didapatkan dengan pertimbangan LCCA terendah dan manfaat terbesar. Koseoglu, Ellis dan Biswas (2021) menggunakan *life-cycle cost assessment* untuk mendukung investasi berkelanjutan pada fasilitas sanitasi pedesaan berbasis masyarakat dengan menggunakan variabel *life-cycle cost assessment*, *analysis of determinants* *Repairs' material cost*, *operational material cost*, *skilled staff*, *unskilled staff*, *total cost of use and repairs* untuk mendapatkan hasil bahwa investasi dan intervensi yang mendorong permintaan dan meningkatkan kapasitas masyarakat adalah pilihan terbaik.

Peneliti yang lain menggunakan pendekatan *trade-off* antara faktor biaya berbasis siklus hidup aset dengan faktor lingkungan. Mo dkk (2018) melakukan Analisis biaya dan dampak lingkungan dari sistem penyediaan air minum dalam

peningkatan reduksi desinfektan *Life-cycle cost analysis* (LCCA) dan *life-cycle assesment* (LCA) Biaya konstruksi, biaya operasional, biaya pemeliharaan, biaya energi, biaya penggunaan material, data dampak lingkungan Biaya energi dan penggunaan material berdampak terbesar terhadap biaya dan lingkungan. Harris *et al.*, (2021) Penerapan LCA dan LCC pada tahap awal perencanaan fasilitas pengolahan air limbah *Life-cycle assesment* (LCA) dan *life-cycle costing* (LCC) Data dampak lingkungan, biaya pemeliharaan, biaya personil, biaya operasional, biaya modal, *revenue Preliminary evaluation* dari perencanaan fasilitas dapat mereduksi penggunaan energi dan mencapai biaya yang lebih rendah. Fathollahi dan Coupe (2021) melakukan analisis biaya dan dampak lingkungan dari desain sistem drainase jalan dengan proses kuantifikasi pada fase yang berbeda *Life-cycle cost analysis* (LCCA) dan *life-cycle assesment* (LCA) menggunakan variabel usia teknis prasarana, biaya konstruksi, biaya pemeliharaan tahunan, biaya operasional, tahunan ekuivalen, data dampak lingkungan. Dalam penelitian tersebut, didapatkan kesimpulan bahwa prasarana yang memiliki nilai biaya tertinggi, memiliki penilaian lingkungan yang paling tinggi pula. Pryce dkk (2022) melakukan analisis pemilihan alternatif pengembangan teknologi pada fasilitas pengolahan air menggunakan *life-cycle cost analysis* (LCCA) dan *life-cycle assesment* (LCA). Variabel yang disarankan adalah biaya konstruksi, biaya operasional, biaya pemeliharaan, *disposal cost*, dan data dampak lingkungan untuk memperoleh pencapaian persentase *eco-efficiency* terbesar menjadi dasar pemilihan pengembangan teknologi. López-Serrano dkk. (2023) melakukan analisis dampak ekonomi dan lingkungan instalasi pengolahan air jenis VFCW (*Vertical Flow Constructed Wetlands*) dengan metode *Life-cycle assesment* (LCA), *life-cycle cost assesment* (LCCA) dan *cost-benefit analysis* (CBA), biaya investasi awal, biaya operasional tetap, *cleaning cost*, *removal cost*. Penelitian ini menghasilkan temuan penting bahwa instalasi pengolahan air jenis VFCW memiliki *cleaning cost* dan *removal cost* lebih rendah dibanding jenis konvensional.

Dalam penelitian dengan tema biaya berbasis risiko, beberapa peneliti melakukan penelitian dengan pendekatan *trade-off* antara biaya dengan risiko. Shin, Jo dan Koo (2016) melakukan penyusunan model rehabilitasi optimal pada sistem jaringan pipa air menggunakan analisis biaya dan algoritma genetika. Variabel yang direkomendasikan adalah *vulnerability index*, data historis kegagalan dan data biaya

perbaikan yang menghasilkan rencana pembaharuan utilitas air berdasarkan *vulnerability index*. Raspati dkk. (2022) melakukan penyusunan rencana prioritas rehabilitasi berbasis risiko pada utilitas air dengan menggunakan metode statistika probabilistik untuk analisis tingkat risiko sebagai dasar dalam pengambilan keputusan. Variabel yang digunakan adalah data fisik, operasional, lingkungan serta riwayat kegagalan pada utilitas air yang menghasilkan rekomendasi zonasi prioritas rehabilitasi pada sistem penyediaan air. Haider dkk.(2022) melakukan perumusan rencana rehabilitasi dan inspeksi berbasis risiko pada sistem penyediaan air menggunakan *multi criteria decision analysis* (MCDA) dengan pendekatan *fuzzy-AHP* untuk analisis kegagalan berdasarkan tingkat risiko dengan menggunakan data fisik dan operasional serta riwayat kegagalan pada sistem penyediaan air untuk menghasilkan rekomendasi tindakan penggantian material dengan jenis non metal berpengaruh menurunkan kerugian dan biaya kegagalan.

Beberapa peneliti lain menyusun penilaian rancangan biaya berbasis analisis risiko. Francisque dkk (2016) melakukan analisis efektivitas biaya dalam kondisi ketidakpastian pasokan air, pada fasilitas *solar water heating system* (SWHS) dengan merekomendasikan variabel produksi energi tahunan, *levelized cost of energy (LCOE)*, *capital cost*, *operation cost*, *maintenance cost*, usia guna fasilitas. Didapati temuan bahwa opsi yang menarik secara finansial adalah SWHS dengan LPG sebagai cadangan musim dingin. Opsi ini dapat mencapai dampak lingkungan yang terendah. Sementara itu, Yao, 2022 melakukan analisis ketahanan utilitas air dan tenaga listrik terhadap fluktuasi pendapatan akibat ketidakpastian ketersediaan air dngan melakukan *Revenue analysis* dengan simulasi ketidakpastian dengan beberapa skenario. Data yang digunakan adalah data ketersediaan air pada waduk, kapasitas pompa, kapasitas PLTA, data neraca air, data tarif air dan tarif listrik, dengan mendapati temuan bahwa utilitas memiliki ketahanan maksimum kerugian dengan pemenuhan 2/3 pelayanan air. Zechman dkk., 2022 melakukan kajian risiko COVID-19 terhadap operasional dan kerentanan utilitas air berdasarkan studi literatur dan observasi pada kondisi keuangan utilitas air di Amerika Utara menggunakan data pendapatan utilitas air di Amerika Utara. Didapatkan temuan bahwa sebagian besar utilitas air (51,8%) mengalami kerugian akibat COVID-19.

Pendekatan konsep *trade-off* antara faktor biaya dan keandalan aset juga didapati pada penelitian dengan tema kajian biaya dan investasi. Mazumder dkk. (2018) melakukan kajian mengenai evaluasi performa dan manajemen aset pada sistem distribusi air berdasarkan studi literatur dan observasi pada utilitas air di Amerika Serikat berdasarkan penelitian terdahulu, data jenis kegagalan aset pada utilitas air di Amerika Serikat serta estimasi biaya perbaikan yang menghasilkan skema biaya perbaikan dengan berbagai teknik evaluasi performa. Kim dkk., 2019 melakukan perumusan periode pembaharuan pipa air dengan pendekatan ekonomi berbasis risiko dan laju kegagalan pipa. Metode yang digunakan adalah *cost – benefit analysis* (CBA), *Net present value* (NPV), analisis statistika probabilitik menggunakan data yang terdiri atas data fisik pipa, laju kegagalan pipa, biaya perbaikan, biaya penggantian, biaya kerusakan di mana menghasilkan rencana periode pembaharuan pipa yang optimal dicapai dengan rasio manfaat terhadap biaya. Zangenehmadar, Moselhi dan Golnaraghi (2020) melakukan perumusan rencana perbaikan pipa pada jaringan distribusi air dengan metode analisis biaya dan algoritma genetika menggunakan data fisik pipa, tipe kerusakan, jumlah kerusakan historis, biaya mobilisasi, biaya perbaikan, biaya penggantian, asumsi *growth rate* untuk memperoleh jadwal perbaikan pipa yang optimal dengan penggunaan sumberdaya yang efisien.

Beberapa peneliti lain mengemukakan konsep penetapan harga komoditas air sebagai tema penelitian mereka. Gutiérrez-Martín, Borrego-Marín dan Berbel (2017) melakukan analisis ekonomi penggunaan air berbasis sistem akuntansi ekonomi – lingkungan dengan metode analisis biaya produksi air, analisis harga air (*water pricing*) dan *gross value added* menggunakan data penggunaan air pada seluruh sektor, data konsumsi air, biaya produksi air untuk mendapatkan skema *apparent water productivity*. Expósito (2018) melakukan analisis penerapan prinsip *cost recovery* pada unit layanan air irigasi dengan metode analisis harga air (*water pricing*) dan *cost recovery rate* menggunakan variabel *financial cost*, *environmental cost*, *revenue*, tarif air irigasi, harga air irigasi dan mendapati bahwa *cost recovery rate* untuk layanan air irigasi pada obyek studi berkisar antara 0,48 hingga 0,60. García-López and Montano (2020) Kajian peran tarif air dalam ketidakseimbangan konsumsi air dan wilayah Studi literatur Penelitian terdahulu, data pelanggan, data konsumsi air

dan data utilitas air di Spanyol dengan temuan penting bahwa penetapan tarif air dengan mengabaikan karakteristik wilayah tidak mampu mendorong efisiensi konsumsi dan pembiayaan layanan air secara memadai. Sanabria and Torres (2020) melakukan perumusan harga air dengan berbasis biaya konservasi lingkungan dan sumberdaya dengan metode *water pricing* dan statistika probabilitas. Variabel yang digunakan adalah jumlah permintaan air, biaya produksi air, biaya konservasi. Kesimpulan yang dicapai adalah bahwa *water pricing* yang optimal dengan *constraint* keseimbangan antara produksi dan konservasi. Zetland (2021) memaparkan peran harga air dalam pengelolaan kelangkaan air berdasarkan studi literatur pada penelitian terdahulu, dengan berbasis pada data mengenai biaya dan pendapatan, hubungan antara permintaan dan pasokan air, data mengenai konsumen air di Belanda. Artikel ini merumuskan rekomendasi bahwa pengelolaan kelangkaan air yang sukses berbasis kepada harga yang memperhitungkan permintaan air dan pendapatan penjualan air yang dapat menutupi biaya pasokan yang andal. Thomas dkk. (2022) melakukan analisis penerapan kebijakan *Full Cost Recovery* (FCR) pada pengelolaan air bagi perkotaan menggunakan metode penetapan harga air (*water pricing*) dengan perbandingan strategi penetapan harga menggunakan variabel populasi pelanggan, *capital expenses*, *operational expenses*, biaya operasional, biaya energi, dan *opportunity cost*. Penelitian ini mencapai kesimpulan bahwa strategi penetapan air multi blok dapat mencapai harga air terendah dan pengembalian modal tertinggi. Martínez-Dalmau dkk.(2023) melakukan kajian dampak penetapan harga air irigasi pada sebuah wilayah berdasarkan model *hydro-economic*. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah analisis biaya dasar dan penetapan harga air berdasarkan komponen sosial ekonomi dan hidrologi. Variabel yang digunakan adalah data ketersediaan air, angka kebutuhan air, komponen sosial ekonomi, komponen hidrologi. Penelitian ini mencapai kesimpulan bahwa penetapan harga air irigasi berpengaruh pola tata tanam yang kemudian mempengaruhi laba pertanian.

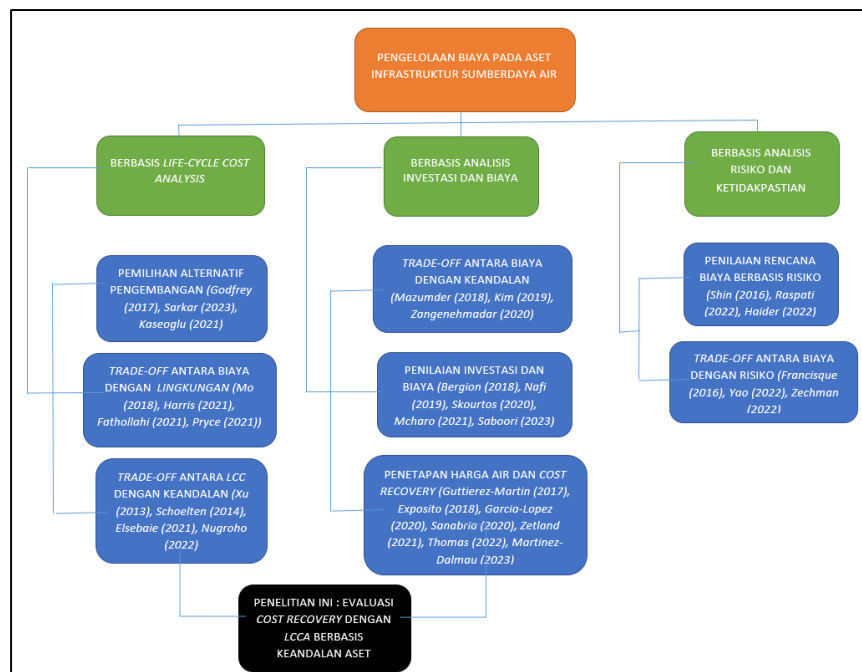
Peneliti lain mengemukakan konsep penilaian investasi dan biaya di antaranya adalah Bergion dkk.(2018) yang menggunakan metode analisis biaya-manfaat berbasis risiko pada sistem pengolahan air minum untuk evaluasi mitigasi risiko mikroba. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah *cost – benefit analysis* (CBA), *water quality modelling* dengan mempertimbangkan data kualitas air baku,

biaya investasi, biaya operasional tahunan, manfaat, data teknis sistem pengolahan air. Penelitian ini mencapai temuan bahwa kombinasi penilaian risiko mikroba kuantitatif dan analisis biaya-manfaat memberikan model keputusan baru untuk mitigasi risiko mikroba. Nafi and Brans (2019) melakukan analisis prediksi biaya dan manfaat dari tindakan manajemen aset pada jaringan distribusi air dengan metode *cost – benefit analysis* (CBA), *artificial neural network* (ANN). Variabel yang direkomendasikan adalah data utilitas air, *capital expenditure* dan *operational expenditure* untuk memperoleh rencana optimalisasi berdasarkan anggaran dan target rasio efisiensi air. Skourtos dkk.(2020) merekomendasikan *probabilistic framework* untuk mendukung penilaian investasi pada proyek pengolahan air dengan sistem desalinasi. Metode yang digunakan adalah analisis probabilitas, *levelised cost of energy* (LCOE) dan *levelised cost of water* (LCOW) dengan variabel biaya investasi, biaya operasional, biaya awal, *heat rate*, kapasitas unit pengolahan, usia guna fasilitas untuk memperoleh kerangka kerja yang diusulkan. Mcharo dan Maghenda (2021) melakukan analisis biaya dan manfaat untuk program konservasi lahan dan pengelolaan air pada daerah aliran sungai bagian hulu dengan metode *Cost – Benefit Analysis* (CBA), dan *Net Present Value* (NPV). Variabel yang digunakan adalah biaya awal, biaya pemeliharaan tahunan, biaya teknologi konservasi dengan mencapai kesimpulan bahwa NPV masih dapat mencapai angka positif meskipun pemasukan berkurang hingga 80%. Saboori (2023) melakukan perencanaan instalasi pengolahan air dengan energi terbarukan dengan meminimalisasi *levelised cost of water* (LCOW). Pada penelitian ini, dilakukan simulasi dengan *goal* pencapaian biaya LCOW minimal dengan menggunakan model matematika. Variabel yang diusulkan adalah biaya investasi, biaya operasional, biaya energi, biaya pemeliharaan dari unit pengolahan air untuk mencapai kondisi minimal LCOW tercapai dengan optimasi penggunaan tenaga listrik dan tampungan air.

2.6.3. Posisi Penelitian

Berdasarkan pembahasan terhadap penelitian terdahulu, diketahui bahwa topik pengelolaan biaya pada aset infrastruktur sumberdaya air memiliki tiga dasar utama pengembangan topik yang meliputi *life-cycle cost analysis*, analisis investasi dan biaya, dan analisis risiko dan ketidakpastian. Masing-masing konsep kemudian

dikembangkan berdasarkan permasalahan empirik, teoritik dan kombinasi metode untuk mencapai tujuan penelitian. Peluang penelitian di masa mendatang masih memungkinkan untuk dieksplorasi dengan pengembangan atau kombinasi konsep, dengan menitikberatkan pada titik bahasan terkini. Penelitian terdahulu lebih banyak melakukan penetapan harga air dan penentuan *cost recovery* berdasarkan analisis investasi. Sedangkan penggunaan analisis biaya berbasis siklus hidup aset lebih banyak digunakan oleh peneliti terdahulu untuk pemilihan alternatif desain, pengembangan teknologi, perumusan rencana operasional dan pemeliharaan. Penelitian ini mengambil posisi dengan memadukan pengembangan konsep *trade-off* antara *life-cycle cost* dengan keandalan aset dan konsep penetapan harga air dan *cost recovery*. Permasalahan empirik juga menjadi pendukung posisi penelitian ini. Di mana keandalan aset dapat menjadi kendala dalam pencapaian kondisi *full cost recovery* dengan munculnya biaya-biaya yang tidak diperhitungkan pada siklus hidup aset, terutama biaya perbaikan (*repair cost*).



Gambar 2.8. Penelitian Terdahulu dan Posisi Penelitian ini

Tabel 2.1. Posisi Penelitian di antara Penelitian Terdahulu

Peneliti dan Tahun	Lingkup	Metode	Data/Variabel	Hasil
Penelitian ini, 2023	Evaluasi <i>cost recovery rate</i> dengan metode LCC berbasis keandalan aset pada sistem penyediaan air minum	<i>Life-cycle cost analysis</i> (LCCA) dan statistika probabilistik	Biaya awal, biaya pemeliharaan, biaya operasional, biaya penggantian, biaya perbaikan, data historis kegagalan, usia aset, jumlah pelanggan, tarif air, data produksi air	-
Saboori, 2023	Perencanaan instalasi pengolahan air dengan energi terbarukan dengan meminimalisasi <i>levelized cost of water</i> (LCOW)	Simulasi dengan <i>goal</i> pencapaian biaya LCOW minimal dengan menggunakan model matematika	Biaya investasi, biaya operasional, biaya energi, biaya pemeliharaan dari unit pengolahan air	Kondisi minimal LCOW tercapai dengan optimasi penggunaan tenaga listrik dan tampungan air
Sarkar, 2023	Analisis biaya untuk pemilihan alternatif instalasi pengolahan daur ulang air limbah rumah tangga	<i>Life-cycle cost analysis</i> (LCCA) dan <i>cost-benefit analysis</i> (CBA)	Biaya awal, biaya konstruksi, biaya pemeliharaan, biaya operasional, biaya penggantian	Alternatif terbaik tercapai dengan pertimbangan LCCA terendah dan manfaat terbesar
López-Serrano dkk., 2023	Analisis dampak ekonomi dan lingkungan instalasi pengolahan air jenis VFCW (<i>Vertical Flow Constructed Wetlands</i>)	<i>Life-cycle assesment</i> (LCA), <i>life-cycle cost assesment</i> (LCCA) dan <i>cost-benefit analysis</i> (CBA)	Biaya investasi awal, biaya operasional tetap, <i>cleaning cost</i> , <i>removal cost</i>	Instalasi pengolahan air jenis VFCW memiliki <i>cleaning cost</i> dan <i>removal cost</i> lebih rendah dibanding jenis konvensional
Martinez-Dalmau dkk., 2023	Kajian dampak penetapan harga air irigasi pada sebuah wilayah berdasarkan model <i>hydro-economic</i>	Analisis biaya dasar dan harga air berdasarkan komponen sosial ekonomi dan hidrologi	Data ketersediaan air, angka kebutuhan air, komponen sosial ekonomi, komponen hidrologi	Penetapan harga air irigasi berpengaruh pada laba pertanian
Tran dkk., 2023	Perencanaan ketersediaan air untuk permintaan di masa mendatang dengan pengenalan pendekatan berbasis probabilistik	Analisis probabilistic	Data wilayah perencanaan penyediaan air	Total biaya dari hasil ukur ketidakpastian biaya investasi untuk permintaan air
Haider dkk., 2022	Perumusan rencana rehabilitasi dan inspeksi berbasis risiko pada sistem penyediaan air	<i>Multi criteria decision analysis</i> (MCDA) dengan pendekatan <i>fuzzy-AHP</i> untuk analisis kegagalan berdasarkan tingkat risiko	Data fisik dan operasional serta riwayat kegagalan pada sistem penyediaan air	Penggantian material dengan jenis non metal berpengaruh menurunkan kerugian dan biaya kegagalan
Raspati dkk., 2022	Penyusunan rencana prioritas rehabilitasi berbasis risiko pada utilitas air	Metode statistika probabilistik untuk analisis tingkat risiko sebagai dasar dalam pengambilan keputusan	Data fisik, operasional, lingkungan serta riwayat kegagalan pada utilitas air	Zonasi prioritas rehabilitasi pada sistem penyediaan air
Zechman dkk., 2022	Kajian risiko COVID-19 terhadap operasional dan kerentanan utilitas air	Studi literatur dan observasi pada kondisi keuangan utilitas air di Amerika Utara	Data pendapatan utilitas air di Amerika Utara	Sebagian besar utilitas air (51,8%) mengalami kerugian akibat COVID-19
Yao, 2022	Analisis ketahanan utilitas air dan tenaga listrik terhadap fluktuasi pendapatan akibat ketidakpastian ketersediaan air	<i>Revenue analysis</i> dengan simulasi ketidakpastian dengan beberapa skenario.	Data ketersediaan air pada waduk, kapasitas pompa, kapasitas PLTA, data neraca air, data tarif air dan tarif listrik	Utilitas memiliki ketahanan maksimum kerugian dengan pemenuhan 2/3 pelayanan air
Pryce dkk., 2022	Pemilihan alternatif pengembangan	<i>Life-cycle cost analysis</i> (LCCA) dan	Biaya konstruksi, biaya operasional, biaya pemeliharaan,	Pencapaian persentase <i>eco-efficiency</i> terbesar menjadi dasar

	teknologi pada fasilitas pengolahan air	<i>life-cycle assesment (LCA)</i>	<i>disposal cost</i> , data dampak lingkungan	pemilihan pengembangan teknologi
Thomas dkk., 2022	Analisis penerapan kebijakan <i>Full Cost Recovery (FCR)</i> pada pengelolaan air bagi perkotaan	Analisis harga air (<i>water pricing</i>) dengan perbandingan strategi penetapan harga	Populasi pelanggan, <i>capital expenses</i> , <i>operational expenses</i> , biaya operasional, biaya energi, <i>opportunity cost</i>	Strategi multi blok dapat mencapai harga air terendah dan pengembalian modal tertinggi
Nugroho, Utomo dan Iriawan, 2022	Pengambilan keputusan pembaharuan jaringan distribusi air bersih berdasarkan analisis kegagalan pipa	Statistika bayesian dan <i>life cycle cost analysis (LCCA)</i>	Data historis kegagalan pipa, usia pipa, diameter pipa, biaya awal, biaya operasional, biaya perbaikan	Periode penggantian pipa yang optimal pada diameter tertentu
Lin dkk., 2022	Kajian mengenai skenario optimal untuk dua strategi	Simulasi <i>Monte Carlo</i> dan <i>life-cycle cost (LCC)</i>	Data kegagalan saluran air	Strategi pemeliharaan dan penggantian saluran air yang optimal
Lopez dkk., 2022	Pengaruh struktur tarif alternatif	Persamaan estimasi ekonometrik	Data konsumsi air dan pengeluaran air rumah tangga	Pengambilan keputusan permasalahan harga tarif air
Mcharo dan Maghenda, 2021	Analisis biaya dan manfaat untuk program konservasi lahan dan pengelolaan air pada daerah aliran sungai bagian hulu	<i>Cost – Benefit Analysis, Net Present Value</i>	Biaya awal, biaya pemeliharaan tahunan, biaya teknologi konservasi	NPV masih dapat mencapai angka positif meskipun pemasukan berkurang hingga 80%
Fathollahi dan Coupe, 2021	Analisis biaya dan dampak lingkungan dari desain sistem drainase jalan dengan proses kuantifikasi pada fase yang berbeda	<i>Life-cycle cost analysis (LCCA)</i> dan <i>life-cycle assesment (LCA)</i>	Usia teknis prasarana, biaya konstruksi, biaya pemeliharaan tahunan, biaya operasional, tahunan ekuivalen, data dampak lingkungan	Prasarana yang memiliki nilai biaya tertinggi, berdampak paling tinggi pula terhadap lingkungan
Koseoglu, Ellis dan Biswas, 2021	<i>Life-cycle cost assessment</i> untuk mendukung investasi berkelanjutan pada fasilitas sanitasi pedesaan berbasis masyarakat	<i>Life-cycle cost assessment, analysis of determinants</i>	<i>Repairs' material cost, operational material cost, skilled staff, unskilled staff, total cost of use</i> dan <i>repairs</i>	Investasi dan intervensi yang mendorong permintaan dan meningkatkan kapasitas masyarakat adalah pilihan terbaik
Ilyas, Kassa dan Darun, 2021	<i>Review</i> sistematis untuk analisis <i>life-cycle cost</i> pada instalasi pengolahan air dan air limbah	Studi literatur	Penelitian terdahulu	Skema penelitian terdahulu berdasarkan kategori biaya dan skema metode analisis ketidakpastian
Elsebaie dan Al-Khomairi, 2021	Optimasi <i>life-cycle cost</i> berdasarkan variasi usia guna aset	<i>Life-cycle cost analysis (LCCA)</i>	Diameter pipa, jenis material pipa, <i>initial cost, operational cost, maintenance cost, interest rate, inflation rate, service life</i> pipa dan pompa	Penekanan pada biaya tahunan ekuivalen merupakan faktor terbesar dalam pencapaian efisiensi
Harris dkk., 2021	Penerapan LCA dan LCC pada tahap awal perencanaan fasilitas pengolahan air limbah	<i>Life-cycle assesment (LCA)</i> dan <i>life-cycle costing (LCC)</i>	Data dampak lingkungan, biaya pemeliharaan, biaya personil, biaya operasional, biaya modal, <i>revenue</i>	<i>Preliminary evaluation</i> dari perencanaan fasilitas dapat mereduksi penggunaan energi dan mencapai biaya yang lebih rendah
Zetland, 2021	Pemaparan peran harga air dalam pengelolaan kelangkaan air	Studi literatur	Penelitian terdahulu, data mengenai biaya dan pendapatan, hubungan antara permintaan dan pasokan air, data mengenai konsumen air di Belanda	Pengelolaan kelangkaan air yang sukses berbasis kepada harga yang memperhitungkan permintaan air dan pendapatan penjualan air yang dapat menutupi biaya pasokan yang andal

Ghobadi, Jeong dan Kang, 2021	Penjadualan penggantian pipa berdasarkan biaya siklus hidup	<i>Life-cycle cost analysis (LCCA)</i> dan <i>optimization algorithm</i>	Laju kegagalan pipa, usia pipa, diameter pipa, <i>life-cycle cost</i> , <i>running cost</i> , <i>initial cost</i> , <i>replacement cost</i> , <i>repair cost</i>	Jadual penggantian pipa serta rencana investasi tahunan yang optimal
Haller, 2020	Kajian biaya-manfaat global dari intervensi pasokan air dan sanitasi dengan menggunakan <i>cost-benefit analysis</i>	<i>Cost-benefit analysis</i> , studi literatur	Penelitian terdahulu	Manfaat berinvestasi dalam penyediaan air bersih dan layanan sanitasi
Ahopelto dan Vahala, 2020	Efektivitas biaya investasi pada jaringan pasokan air dalam pengurangan kebocoran dengan metode <i>cost-benefit analysis</i>	<i>Cost-benefit analysis</i>	Data utilitas air	Biaya investasi dan efek lingkungan pada jaringan pasokan air
Lee dan Burian, 2020	Perencanaan tarif air masa depan dalam mencapai target system distribusi air dengan model <i>triple top-line</i>	EPANET <i>hydraulic analysis</i>	Penelitian terdahulu	Optimalisasi tarif air
Skourtos dkk., 2020	Rekomendasi <i>probabilistic framework</i> untuk mendukung penilaian investasi pada proyek pengolahan air dengan sistem desalinasi	Analisis probabilitas, <i>levelised cost of energy (LCOE)</i> dan <i>levelised cost of water (LCOW)</i>	Biaya investasi, biaya operasional, biaya awal, <i>heat rate</i> , kapasitas unit pengolahan, usia guna fasilitas	Kerangka kerja yang diusulkan, meskipun tidak dapat menghilangkan ketidakpastian, dapat membantu pembuat keputusan dalam mengelolanya dengan membingkai berbagai kemungkinan hasil dari LCOW.
Sanabria dan Torres, 2020	Perumusan harga air dengan berbasis biaya konservasi lingkungan dan sumberdaya	<i>Water pricing</i> dan statistika probabilistik	Jumlah permintaan air, biaya produksi air, biaya konservasi	<i>Water pricing</i> yang optimal dengan <i>constraint</i> keseimbangan antara produksi dan konservasi
Ratnaweera, Heistad dan Navrud, 2020	<i>Review</i> sistematis untuk analisis biaya-manfaat pada sektor proyek sumberdaya air	Studi literatur	Penelitian terdahulu	Pengembangan kerangka analisis biaya-manfaat yang lebih mudah diakses untuk manajer proyek infrastruktur air dengan penggunaan metode valuasi moneter dan data sumber sekunder.
Peña dan Rovira-Val, 2020	<i>Review</i> sistematis untuk analisis <i>life-cycle cost</i> pada bidang irigasi	Studi literatur	Penelitian terdahulu	Hanya 40% paper menggunakan alat keuangan tambahan dan biaya penting seperti infrastruktur, tenaga kerja, pemeliharaan, dan akhir usia guna sering tidak disertakan.
García-López dan Montano, 2020	Kajian peran tarif air dalam ketidakseimbangan konsumsi air dan wilayah	Studi literatur	Penelitian terdahulu, data pelanggan, data konsumsi air dan data utilitas air di Spanyol	Penetapan tarif air dengan mengabaikan karakteristik wilayah tidak mampu mendorong efisiensi konsumsi dan pembiayaan layanan air secara memadai
Zangenehmadar, Moselhi dan Golnaraghi, 2020	Perumusan rencana perbaikan pipa pada jaringan distribusi air	Analisis biaya dan algoritma genetika	Data fisik pipa, tipe kerusakan, jumlah kerusakan historis, biaya mobilisasi, biaya perbaikan, biaya	Jadual perbaikan pipa yang optimal dengan penggunaan sumberdaya yang efisien

			penggantian, asumsi <i>growth rate</i>	
Kim dkk., 2019	Perumusan periode pembaharuan pipa air dengan pendekatan ekonomi berbasis risiko dan laju kegagalan pipa	<i>Cost – benefit analysis (CBA), Net present value (NPV), analisis statistika probabilitas</i>	Data fisik pipa, laju kegagalan pipa, biaya perbaikan, biaya penggantian, biaya kerusakan	Rencana periode pembaharuan pipa yang optimal dicapai dengan rasio manfaat terhadap biaya
Nafi dan Brans, 2019	Prediksi biaya dan manfaat dari tindakan manajemen aset pada jaringan distribusi air	<i>Cost – benefit analysis (CBA), artificial neural network</i>	Data utilitas air, <i>capital expenditure</i> dan <i>operational expenditure</i>	Rencana optimalisasi berdasarkan anggaran dan target rasio efisiensi air
Jocanovic dkk., 2019	Evaluasi unit pompa pada sistem distribusi air	<i>Life-cycle cost (LCC) dan Life-cycle Assessment (LCA)</i>	Data komponen unit pompa, parameter operasi pompa meter	Penilaian biaya menggunakan model LCA dan LCC
Bergion dkk., 2018	Penggunaan metode analisis biaya-manfaat berbasis risiko pada sistem pengolahan air minum untuk evaluasi mitigasi risiko mikroba	<i>Cost – benefit analysis (CBA), water quality modelling</i>	Data kualitas air baku, biaya investasi, biaya operasional tahunan, manfaat, data teknis sistem pengolahan	Kombinasi penilaian risiko mikroba kuantitatif dan analisis biaya-manfaat memberikan model keputusan baru untuk mitigasi risiko mikroba.
D’Ercole dkk., 2018	Perencanaan rehabilitasi pipa pada sistem penyediaan air minum berbasis keandalan	Analisis keandalan	Data kerusakan pipa	Strategi rehabilitasi pipa pada sistem penyediaan air minum
Frangopol dkk., 2018	Kajian manajemen siklus hidup dengan pertimbangan kerusakan	Studi literatur	Penelitian terdahulu	Pendekatan manajemen siklus hidup pada infrastruktur
Mo dkk., 2018	Analisis biaya dan dampak lingkungan dari sistem penyediaan air minum dalam peningkatan reduksi desinfektan	<i>Life-cycle cost analysis (LCCA) dan life-cycle assesment (LCA)</i>	Biaya konstruksi, biaya operasional, biaya pemeliharaan, biaya energi, biaya penggunaan material, data dampak lingkungan	Biaya energi dan penggunaan material berdampak terbesar terhadap biaya dan lingkungan
Expósito, 2018	Analisis penerapan prinsip <i>cost recovery</i> pada unit layanan air irigasi	Analisis harga air (<i>water pricing</i>) dan <i>cost recovery rate</i>	<i>Financial cost, environmental cost, revenue</i> , tarif air irigasi, harga air irigasi,	<i>Cost recovery rate</i> untuk layanan air irigasi pada obyek studi berkisar antara 0,48 hingga 0,60
Mazumder dkk., 2018	Kajian mengenai evaluasi performa dan manajemen aset pada sistem distribusi air	Studi literatur dan observasi pada utilitas air di Amerika Serikat	Penelitian terdahulu, data jenis kegagalan aset pada utilitas air di Amerika Serikat, estimasi biaya perbaikan	Skema biaya perbaikan dengan berbagai teknik evaluasi performa
Gutiérrez-Martín, Borrego-Marín dan Berbel, 2017	Analisis ekonomi penggunaan air berbasis sistem akuntansi ekonomi – lingkungan	Analisis biaya produksi air, analisis harga air (<i>water pricing</i>) dan <i>gross value added</i>	Data penggunaan air pada seluruh sektor, data konsumsi air, biaya produksi air	Skema <i>apparent water productivity</i>
Stephan dan Stephan, 2017	Analisis <i>life cycle</i> air, energi, dan kebutuhan biaya untuk <i>water harvesting system</i> pada gedung apartemen pada wilayah iklim mediterania selama 50 tahun	<i>Life-cycle cost analysis (LCCA) dan life-cycle assesment (LCA)</i>	Kuantitas kebutuhan air, area layanan, kuantitas energi, data iklim, data keuangan, <i>inflation rate, discount rate, capital cost</i> , biaya energi, biaya air induk, biaya air yang diangkut, biaya penggantian material, biaya penggantian komponen	Menggabungkan <i>water harvesting system</i> dan air kondensat dapat mengurangi kebutuhan air utama hingga 75%
Godfrey dan Hailemichael, 2017	Analisis <i>life-cycle cost</i> pada infrastruktur penyediaan air yang terdampak curah hujan rendah	<i>Life-cycle cost analysis (LCCA)</i>	<i>Capital expenditure costs for fixed assets (CAPEX), Emergency expenditure costs (EMMEX), Operation expenditure costs (OPEX)</i>	Sistem penyediaan air dengan biaya investasi awal yang lebih tinggi justru menghasilkan LCC terendah

Lee dkk., 2017	Review sistematis terhadap inventarisasi data pada analisis <i>life-cycle cost</i> (LCC) untuk sistem penyediaan air	Studi literatur	Penelitian terdahulu	Skema inventarisasi data pada sistem penyediaan air
Yurtsev dan Jenkins, 2016	Analisis efektivitas biaya dalam kondisi ketidakpastian pasokan air, pada fasilitas <i>solar water heating system</i> (SWHS)	Analisis efektivitas biaya, <i>levelized cost of energy (LCOE)</i> , <i>levelized cost of water (LCOW)</i> ,	Produksi energi tahunan, <i>levelized cost of energy (LCOE)</i> , <i>capital cost</i> , <i>operation cost</i> , <i>maintenance cost</i> , usia guna fasilitas	Opsi yang menarik secara finansial adalah SWHS dengan LPG sebagai cadangan musim dingin. Opsi ini dapat mencapai dampak lingkungan yang terendah.
Francisque dkk., 2016	Penyusunan <i>framework</i> untuk rencana pembaharuan utilitas air	<i>Life-cycle cost analysis (LCCA)</i> dan <i>vulnerability analysis (VA)</i>	<i>Vulnerability index</i> , data historis kegagalan dan data biaya perbaikan	Rencana pembaharuan utilitas air berdasarkan <i>vulnerability index</i>
Shin, Joo dan Koo, 2016	Penyusunan model rehabilitasi optimal pada sistem jaringan pipa air	Analisis biaya dan algoritma genetika	Data fisik pipa, biaya kegagalan, biaya perbaikan, biaya penggantian, biaya pemeliharaan tahunan	<i>Budget Constraint Scheduling</i>
Biondini dan Frangopol, 2016	Kajian <i>life-cycle performance</i> pada utilitas air yang memburuk dalam kondisi ketidakpastian	Studi literatur	Penelitian terdahulu	<i>life-cycle performance framework</i>
Ambre dkk., 2016	Pemilihan model estimasi berbasis <i>life-cycle cost</i>	NPV dan EAC	Data dari biaya siklus hidup selama 30 tahun	Perbedaan metode EAC dan NPV
Mamo, 2014	Manajemen aset berbasis risiko pada fasilitas air perkotaan	Studi literatur	Penelitian terdahulu	<i>Risk based asset management framework</i>
Scholten dkk., 2014	Perumusan rencana rehabilitasi jaringan pipa air dengan <i>multi-criteria decision analysis (MCDA)</i>	<i>multi-criteria decision analysis (MCDA)</i> dan <i>life-cycle costing</i> yang berbasis keandalan	Data fisik pipa, biaya penggantian, biaya perbaikan, biaya pemeliharaan, biaya siklus hidup	Strategi rehabilitasi jangka panjang dengan metode kombinasi manajemen aset, model kegagalan analisis keputusan.
Xu dkk., 2013	Perumusan strategi penggantian pipa	<i>Genetic programming</i> berbasis <i>life-cycle cost</i>	Data fisik pipa, laju kegagalan pipa, biaya perbaikan dan biaya penggantian pipa	Strategi penggantian pipa yang optimal

BAB III

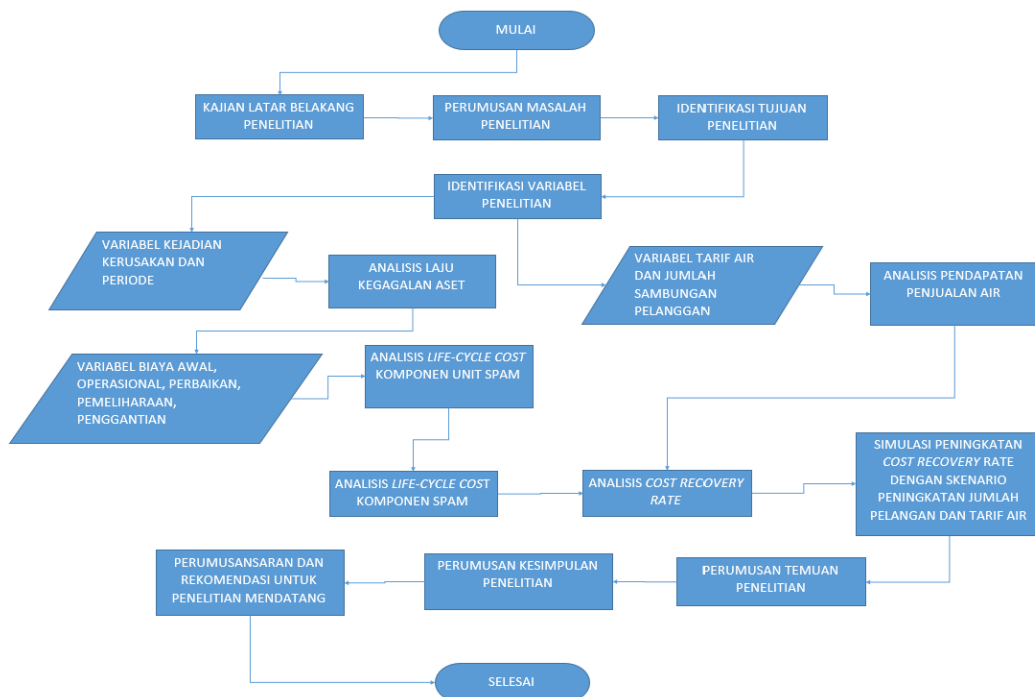
METODE PELAKSANAAN

3.1 Pendekatan Perancangan

Perancangan ini dirancang untuk menjawab permasalahan yang telah dirumuskan dengan pendekatan sebagai berikut:

1. Secara garis besar proses perancangan yang akan dilaksanakan adalah sebagai berikut:
 - a. Melakukan perumusan latar belakang perancangan
 - b. Merumuskan masalah perancangan
 - c. Mengidentifikasi tujuan perancangan
 - d. Melakukan pengumpulan data melalui pengumpulan data yang meliputi:
 1. Data susunan komponen unit SPAM pada obyek studi
 2. Data kapasitas rencana komponen unit SPAM pada obyek studi
 3. Data kapasitas praktis komponen unit SPAM pada obyek studi
 4. Data historis kerusakan pada komponen unit SPAM selama 10 tahun
 5. Data organisasi pelaksana pemeliharaan dan pola pemeliharaan terencana (*planned maintenance*) pada komponen unit SPAM
 6. Data organisasi pelaksana operasional dan unsur biaya operasional pada komponen unit SPAM
 7. Data biaya awal aset, yang meliputi biaya pembelian, instalasi atau konstruksi pada komponen unit SPAM
 8. Data tarif air minum pada obyek studi
 9. Data jumlah sambungan pelanggan pada obyek studi
2. Proses analisis adalah sebagai berikut:
 - a. Analisis keandalan dengan mengidentifikasi pola kerusakan komponen unit SPAM dengan metode generalisasi statistik inferensial, yakni regresi eksponensial.
 - b. Analisis biaya perbaikan komponen unit SPAM berdasarkan pola kerusakan komponen unit SPAM

- c. Analisis biaya pemeliharaan komponen unit Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) sehubungan dengan pemeliharaan yang terjadwal (*planned maintenance*)
 - d. Analisis biaya penggantian komponen unit SPAM yakni pada instrumen atau alat yang telah mengalami kerusakan yang bersifat *non-repairable*
 - e. Analisis biaya operasional komponen unit SPAM
 - f. Analisis *life cycle cost* (LCC) komponen unit SPAM
 - g. Analisis *life cycle cost* (LCC) keseluruhan unit SPAM
 - h. Analisis pendapatan penjualan air minum berdasarkan kapasitas praktis produksi dan tarif air minum eksisting
 - i. Evaluasi kondisi *full cost recovery* (FCR) pada SPAM berdasarkan pendapatan penjualan air minum dan *life cycle cost* (LCC)
 - j. Simulasi peningkatan koefisien *full cost recovery* (FCR) berdasarkan peningkatan jumlah pelanggan selama usia guna aset unit SPAM
3. Merumuskan kesimpulan perancangan sehubungan dengan permasalahan perancangan
 4. Merumuskan saran untuk perancangan di masa mendatang



Gambar 3.1 Tahap Pelaksanaan Perancangan

3.2 Obyek Perancangan

Obyek perancangan ini adalah Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) Kota Malang, Jawa Timur. Secara khusus perancangan ini akan difokuskan pada obyek unit SPAM Wilayah II dengan zona layanan meliputi Kota Malang bagian timur. Adapun alasan pemilihan obyek perancangan adalah sebagai berikut :

- a. Kota Malang memiliki Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) yang telah tertata dan terbagi menjadi beberapa zona layanan dan *DMA (District Metered Area)*
- b. Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) Kota Malang telah dikelola dengan menerapkan strategi pengelolaan aset yang berpedoman kepada Rencana Pengamanan Air Minum (RPAM)
- c. Kegiatan operasional dan pemeliharaan pada Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) belum didasarkan pada pendekatan analisis keandalan sehingga diperlukan kajian biaya berbasis keandalan selama siklus hidup aset SPAM
- d. Secara khusus, SPAM Wilayah II memiliki ketersediaan data biaya awal (*initial cost*) yang lengkap, sehingga dapat membantu pencapaian target waktu pelaksanaan perancangan

3.3 Konfigurasi Sistem pada Perancangan

3.3.1. Jenis dan Sumber Data Perancangan

Jenis data yang dipergunakan adalah data primer dan data sekunder. Sumber data primer didapatkan dari survei dan wawancara terstruktur pada daerah studi. Sedangkan sumber data sekunder berasal dari studi literatur dokumen pengelolaan SPAM yang berupa laporan tahunan perusahaan, laporan pelaksanaan program, laporan pemeliharaan berkala maupun data lain yang diperlukan bagi perancangan ini.

3.3.2. Metode Pengumpulan Data

Metode pengumpulan data perancangan ini adalah:

1. Survei dan wawancara terstruktur untuk memperoleh data primer, yang meliputi:
 - a. Data susunan komponen unit SPAM pada obyek studi

- b. Data kapasitas praktis komponen unit SPAM pada obyek studi
 - c. Data organisasi dan pola pemeliharaan terencana (*planned maintenance*) pada komponen unit SPAM
 - d. Data organisasi dan unsur biaya operasional pada komponen unit SPAM
2. Studi literatur untuk memperoleh data sekunder, yang meliputi :
- a. Data kapasitas rencana komponen unit SPAM pada obyek studi
 - b. Data historis kerusakan pada komponen unit SPAM selama 10 tahun
 - c. Data biaya pengadaan, yang meliputi biaya pembelian, instalasi atau konstruksi pada komponen unit SPAM
 - d. Data tarif air minum pada obyek studi
 - e. Data jumlah sambungan pelanggan pada obyek studi

3.3.3. Variabel dan Instrumen Perancangan

Terdapat beberapa variabel perancangan yang digunakan sebagai perangkat perancangan untuk menunjang pencapaian tujuan perancangan. Variabel perancangan ini menjadi pertimbangan dalam analisis yang terbagi menjadi *life-cycle cost analysis*, analisis keandalan, analisis pendapatan penjualan air, dan analisis *cost recovery*. Variabel perancangan diperoleh dengan berbagai instrumen. Instrumen perancangan merupakan alat ukur yang digunakan untuk mendapatkan dan mengumpulkan data perancangan, sebagai salah satu langkah untuk mencapai tujuan perancangan.

Pada analisis keandalan terdapat variabel yang meliputi jumlah kejadian kerusakan, periode operasional dan laju kerusakan. Variabel laju kerusakan merupakan variabel terikat yang diperoleh dari analisis hubungan antara variabel jumlah kejadian kerusakan dengan variabel periode operasional dengan pendekatan statistika probabilitas dengan metode regresi eksponensial. Laju kerusakan merupakan variabel yang mempengaruhi variabel biaya kerusakan yang menjadi pertimbangan pada analisis *life-cycle cost*.

Tabel 3.1. Variabel pada Analisis Keandalan

Variabel Perancangan	Peneliti (Tahun Perancangan)	Satuan	Skala	Instrumen
Jumlah kejadian kerusakan komponen unit SPAM	Zangenhmadar dkk (2020), Francisque dkk, (2016), Shin dkk (2016)	Kejadian kerusakan	Rasio	Kajian data pemeliharaan
Periode operasional	Zangenhmadar dkk (2020), Francisque dkk (2016), Shin dkk (2016)	Tahun	Rasio	Kajian data pemeliharaan
Laju Kegagalan komponen unit SPAM	Zangenhmadar dkk (2020), Francisque dkk, (2016), Shin dkk (2016), Nugroho, Utomo, Iriawan (2022), Qiang Xu dkk (2013)	Jumlah kerusakan per tahun	Rasio	Analisis regresi eksponensial

Analisis *life-cycle cost* mempertimbangkan beberapa variabel yang meliputi biaya perbaikan, biaya operasional, biaya pemeliharaan dan biaya penggantian. Analisis ini menghasilkan variabel LCC pada tingkat komponen dan LCC pada tingkat unit yang merupakan kumulasi dari LCC pada tingkat komponen. LCC pada tingkat komponen bervariasi bergantung kepada jenis komponen.

Tabel 3.2. Variabel pada *Life-Cycle Cost Analysis*

Variabel Perancangan	Peneliti (Tahun Perancangan)	Satuan	Skala	Instrumen
Biaya perbaikan komponen unit SPAM	Zangenhmadar dkk (2020), Francisque dkk (2016), Shin dkk (2016), Mamo (2014), Scheidegger dkk (2014), Qiang Xu dkk (2013),	Rupiah	Rasio	Kajian data pemeliharaan
Biaya awal komponen unit SPAM	Zangenhmadar dkk (2020), Francisque dkk, (2016), Shin dkk (2016)	Rupiah	Rasio	Kajian data operasional
Biaya operasional komponen unit SPAM	Zangenhmadar dkk (2020), Francisque dkk, (2016), Shin dkk (2016)	Rupiah	Rasio	Kajian data operasional

Variabel Perancangan	Peneliti (Tahun Perancangan)	Satuan	Skala	Instrumen
Biaya pemeliharaan komponen unit SPAM	Zangenhmadar dkk (2020), Francisque dkk, (2016), Shin dkk (2016)	Rupiah	Rasio	Kajian laporan pemeliharaan
Biaya penggantian komponen unit SPAM	Zangenhmadar dkk (2020), Francisque dkk, (2016), Shin dkk (2016)	Rupiah	Rasio	Kajian laporan pemeliharaan
<i>Life Cycle Cost (LCC)</i> komponen unit SPAM	Nugroho, Utomo, Iriawan (2022), Qiang Xu dkk (2013), Ghobadi dkk (2021)	Rupiah	Rasio	Analisis dengan metode LCCA
<i>Life Cycle Cost (LCC)</i> keseluruhan unit SPAM	Nugroho, Utomo, Iriawan (2022), Qiang Xu dkk (2013), Ghobadi dkk (2021)	Rupiah	Rasio	Analisis dengan metode LCCA

Pada perancangan ini, komponen unit SPAM terdiri atas beberapa *device* yang meliputi konstruksi sumur, pipa pengambilan, pompa pengambilan, fasilitas pengolahan air, pompa *dosing*, tangki penyimpanan (*reservoir*) dan pipa distribusi. Masing-masing komponen memiliki siklus hidup, usia teknis dan usia ekonomis tersendiri yang akan mempengaruhi nilai LCC.

Analisis penjualan air memperhitungkan beberapa variabel yang meliputi tarif air yang ditetapkan oleh otorita setempat dan jumlah sambungan pelanggan yang mempengaruhi kuantitas air yang diproduksi. Dengan mengetahui harga dan kuantitas produk, maka pendapatan (*revenue*) dari penjualan sebuah produk dapat diketahui yang dinyatakan dalam pendapatan penjualan air.

Tabel 3.3. Variabel pada Analisis Pendapatan Penjualan Air

Variabel Perancangan	Peneliti (Tahun Perancangan)	Satuan	Skala	Instrumen
Tarif air	Martinez-Dalmau dkk (2023), Garcia-Lopez (2020), Zetland (2021)	Rupiah per meter kubik	Rasio	Kajian laporan keuangan

Variabel Perancangan	Peneliti (Tahun Perancangan)	Satuan	Skala	Instrumen
Jumlah sambungan pelanggan	Martinez-Dalmau dkk (2023), Garcia-Lopez (2020), Zetland (2021)	Unit	Rasio	Kajian laporan keuangan
Pendapatan penjualan air	Martinez-Dalmau dkk (2023), Garcia-Lopez (2020), Zetland (2021)	Rupiah	Rasio	Analisis berdasarkan tarif air dan jumlah pelanggan

Analisis *cost recovery* dilakukan dengan mempertimbangkan variabel LCC pada tingkat unit dan pendapatan penjualan air. *Cost recovery* dinyatakan dengan variabel *cost recovery rate* yang merupakan perbandingan antara pendapatan penjualan air dengan biaya, dalam hal ini adalah biaya selama siklus hidup aset atau LCC. Analisis ini menjadi dasar bagi proses simulasi peningkatan *cost recovery rate* dengan skenario peningkatan jumlah sambungan pelanggan dan tarif air.

Tabel 3.4. Variabel pada Analisis *Cost Recovery*

Variabel Perancangan	Peneliti (Tahun Perancangan)	Satuan	Skala	Instrumen
<i>Life Cycle Cost (LCC)</i> keseluruhan unit SPAM	Nugroho, Utomo, Iriawan (2022), Qiang Xu dkk (2013), Ghobadi dkk (2021)	Rupiah	Rasio	Analisis dengan metode LCCA
Pendapatan penjualan air	Martinez-Dalmau dkk (2023), Garcia-Lopez (2020), Zetland (2021)	Rupiah	Rasio	Analisis berdasarkan tarif air dan jumlah pelanggan
<i>Cost Recovery Rate</i>	Exposito (2018), Thomas dkk (2022)	Tidak memiliki satuan (<i>unitless</i>)	Rasio	Analisis pebandingan tarif air dengan LCC

3.3.4. Definisi Operasional Variabel Perancangan

Kesepahaman pengertian tentang suatu variabel sangat dibutuhkan untuk menghindari perbedaan pendapat dan persepsi. Oleh karena itu perlu diberikan definisi operasional yang jelas beserta metode dan cara pengukurannya. Variabel

perancangan tersebut direkomendasikan oleh para peneliti terdahulu yang telah melakukan perancangan terpublikasi pada jurnal pada topik yang sejenis yang terlampir pada laporan ini. Definisi operasional untuk variabel perancangan ini, dijelaskan pada tabel berikut.

Tabel 3.5. Definisi Operasional Variabel Perancangan

Variabel Perancangan	Definisi Operasional	Peneliti (Tahun Perancangan)	Satuan	Skala	Instrumen
Biaya awal komponen unit SPAM	Biaya yang timbul pada awal pembuatan komponen unit SPAM	Zangenhmadar dkk (2020), Francisque dkk, (2016), Shin dkk (2016)	Rupiah	Rasio	Kajian data operasional
Biaya perbaikan komponen unit SPAM	Biaya yang timbul pada saat perbaikan komponen unit SPAM	Zangenhmadar dkk (2020), Francisque dkk (2016), Shin dkk (2016), Mamo (2014), Scheidegger dkk (2014), Qiang Xu dkk (2013),	Rupiah	Rasio	Kajian data pemeliharaan
Biaya operasional komponen unit SPAM	Biaya yang timbul pada saat operasional komponen unit SPAM	Zangenhmadar dkk (2020), Francisque dkk, (2016), Shin dkk (2016)	Rupiah	Rasio	Kajian data operasional
Biaya pemeliharaan komponen unit SPAM	Biaya yang timbul pada saat pemeliharaan komponen unit SPAM	Zangenhmadar dkk (2020), Francisque dkk, (2016), Shin dkk (2016)	Rupiah	Rasio	Kajian laporan pemeliharaan
Biaya penggantian komponen unit SPAM	Biaya yang timbul pada saat penggantian komponen unit SPAM	Zangenhmadar dkk (2020), Francisque dkk, (2016), Shin dkk (2016)	Rupiah	Rasio	Kajian laporan pemeliharaan
<i>Life Cycle Cost (LCC)</i> komponen unit SPAM	Biaya total yang diperhitungkan selama siklus hidup komponen unit SPAM	Nugroho, Utomo, Iriawan (2022), Qiang Xu dkk (2013), Ghobadi dkk (2021)	Rupiah	Rasio	Analisis dengan metode LCCA
<i>Life Cycle Cost (LCC)</i> keseluruhan unit SPAM	Biaya total yang diperhitungkan selama siklus hidup unit SPAM yang berasal dari	Nugroho, Utomo, Iriawan (2022), Qiang Xu dkk (2013), Ghobadi dkk (2021)	Rupiah	Rasio	Penjumlahan LCC seluruh komponen
Laju kerusakan	Hubungan antara jumlah kejadian	Zangenhmadar dkk (2020), Francisque dkk,	Jumlah kerusakan per tahun	Rasio	Analisis regresi polinomial

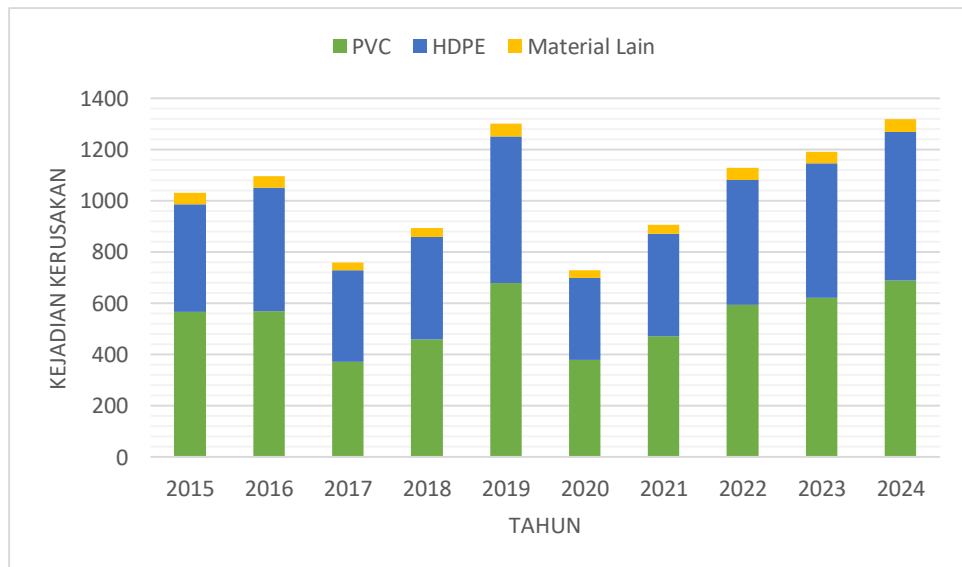
Variabel Perancangan	Definisi Operasional	Peneliti (Tahun Perancangan)	Satuan	Skala	Instrumen
komponen unit SPAM	kerusakan dengan waktu selama periode tertentu	(2016), Shin dkk (2016), Nugroho, Utomo, Iriawan (2022), Qiang Xu dkk (2013)			
Jumlah kejadian kerusakan komponen unit SPAM	Jumlah kejadian kerusakan yang menyebabkan malfungsi dari komponen unit SPAM	Zangenhmadar dkk (2020), Francisque dkk, (2016), Shin dkk (2016)	Kejadian kerusakan	Rasio	Kajian data pemeliharaan
Tahun operasional	Besaran waktu selama operasional aset SPAM yang dinyatakan dalam satuan tahun	Zangenhmadar dkk (2020), Francisque dkk (2016), Shin dkk (2016)	Tahun	Rasio	Kajian data pemeliharaan
<i>Cost Recovery Rate</i>	Rasio nilai yang merupakan perbandingan antara nilai pendapatan dengan biaya	Exposito (2018), Thomas dkk (2022)	Tidak memiliki satuan (<i>unitless</i>)	Rasio	Analisis perbandingan tarif air dengan LCC
Pendapatan penjualan air	Kas masuk yang didapatkan dari penjualan sejumlah air dalam volume tertentu	Martinez-Dalmau dkk (2023), Garcia-Lopez (2020), Zetland (2021)	Rupiah	Rasio	Analisis berdasarkan tarif air dan jumlah pelanggan
Tarif air	Biaya atas jasa layanan Air Minum untuk pemakaian setiap meter kubik atau satuan volume lainnya	Martinez-Dalmau dkk (2023), Garcia-Lopez (2020), Zetland (2021)	Rupiah per meter kubik	Rasio	Kajian laporan keuangan
Jumlah sambungan pelanggan	Jumlah sambungan yang digunakan untuk penyediaan air minum pada tiap pelanggan	Martinez-Dalmau dkk (2023), Garcia-Lopez (2020), Zetland (2021)	Unit	Rasio	Kajian laporan keuangan

BAB IV PERANCANGAN MODEL DAN UJI KELAYAKAN

4.1 Analisis Reliabilitas

4.1.1. Jumlah Kerusakan Pipa pada Jaringan Distribusi

Hal yang sangat erat berhubungan dengan pengelolaan aset pada jaringan distribusi adalah jumlah kejadian kerusakan. Gambar 4.1 menunjukkan jumlah kejadian kerusakan tahunan terbesar dialami oleh pipa dengan jenis material yang terdapat pada jaringan distribusi. Dari gambar tersebut terlihat bahwa jumlah kerusakan tahunan terbesar terjadi pada kelompok pipa dengan material PVC.



Gambar 4.1. Jumlah Kejadian Kerusakan Pipa Tahunan Berdasarkan Material Pipa pada Jaringan Distribusi (Perumda Tugu Tirta, 2022)

Tabel 4.1 menunjukkan kerusakan pipa tahunan pada pipa PVC di wilayah studi. Pada penelitian ini, periode pemantauan berlangsung selama 10 tahun, antara bulan Januari 2012 sampai bulan Desember 2021 dengan jumlah kerusakan sebesar 5402 kejadian. Sebagian besar kerusakan pipa yang diamati memiliki diameter rerata berkisar antara 82,30 mm hingga 107,70 mm. Dalam hal ini, pipa PVC pada jaringan pipa distribusi menunjukkan kecenderungan kerusakan yang semakin meningkat.

Tabel 4.1. Jumlah Kejadian Kerusakan Pipa PVC

Periode	Jumlah Kerusakan Pipa	Diameter Rerata (mm)
2015	567	82.30
2016	569	87.88
2017	372	92.96
2018	459	82.04
2019	680	93.47
2020	380	107.70
2021	471	96.77
2022	595	105.92
2023	621	102.62
2024	688	92.71

Sumber : Perumda Tugu Tirta (2025)

Dalam analisis pada *repairable system*, merupakan hal yang penting untuk berfokus pada analisis karakteristik pola kerusakan yang berurutan. Jika sistem menunjukkan kecenderungan kerusakan terjadi lebih jarang (mengalami deselarasi) atau dalam kondisi tertentu, bisa jadi lebih sering (mengalami akselerasi) sebagaimana terlihat pada gambar 4.1, maka para peneliti terdahulu (Scheidegger, 2013; Barton dkk, 2022) merekomendasikan penggunaan pendekatan non stasioner. Peneliti yang lain (Lin dan Yuan, 2018; Dawood dkk, 2019; Atique dan Attah-Okine, 2017) merekomendasikan beberapa metode, yang di antaranya adalah penerapan *Non-Homogeneous Poisson Process* (NHPP). NHPP adalah model yang relatif praktis untuk menggambarkan pola non stasioner dalam *repairable system*. Pendekatan ini merupakan *Poisson Process* dengan beberapa fungsi intensitas. Dalam jaringan distribusi air bersih, NHPP adalah model praktis yang dapat diterapkan pada sistem dengan tingkat kerusakan yang menurun atau meningkat. Kejadian kerusakan pada tabel 4.1. bergantung pada interval waktu tertentu, di mana hasil pengamatan berupa data diskrit dan antar kejadian saling bebas dengan intensitas tertentu.

Berkaitan dengan spesifikasi pipa PVC pada penelitian ini, tabel 4.2 menyatakan diameter, tipe SNI, *Pressure Number* dan ketebalan dinding pipa yang diinstalasi pada wilayah studi.

Tabel 4.2. Spesifikasi Pipa PVC

Diameter (mm)	Tipe SNI	Pressure Number	Ketebalan Dinding (mm)
63	RRJ S-10	PN 12,5	3,0
90	RRJ S-10	PN 12,5	4,3
110	RRJ S-10	PN 12,5	5,3
150	RRJ S-10	PN 12,5	7,7

Sumber : Perumda Tugu Tirta (2025)

Pada pipa PVC tipe SNI RRJ S-10, ketebalan dinding pipa berkaitan dengan diameter, di mana pada pipa dengan diameter yang sama memiliki ketebalan dinding yang sama, sehingga pada penelitian ini ketebalan dinding pipa tidak dipertimbangkan dalam penyusunan model.

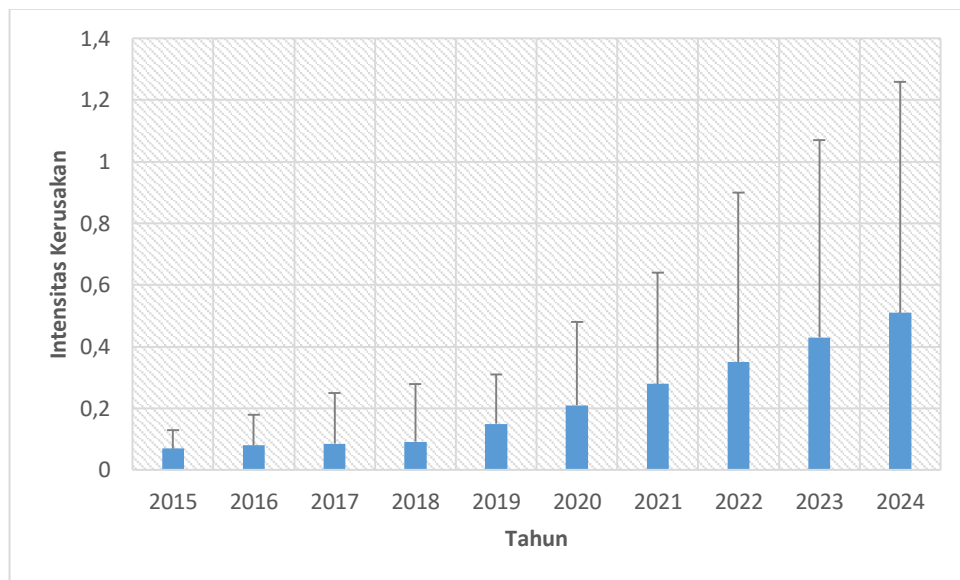
4.1.2. Intensitas Kejadian Kerusakan Pipa

Analisis kondisi dan pola deteriorasi pada jaringan distribusi air bersih Kota Malang, yang diasumsikan sebagai *repairable system*, menitikberatkan pada pengamatan karakteristik pola kerusakan yang terjadi secara berturut-turut dalam sistem tersebut. Pada penelitian ini jika pola kerusakan menunjukkan suatu *trend*, di mana kecenderungan kerusakan akan terjadi lebih dekat dalam skala waktu tertentu atau cenderung semakin sering terjadi, maka sebuah aset infrastruktur, dalam hal ini adalah pipa, dapat dikatakan mengalami deteriorasi.

Pemodelan deteriorasi pipa skala waktu dilakukan dengan menggunakan pendekatan non-stasioner. Parameter dasar dari pendekatan non-stasioner adalah adanya ROCOF (*rate of occurrence of failures*) atau laju deteriorasi. ROCOF atau laju deteriorasi merupakan derivasi dari jumlah kejadian kerusakan dalam satuan waktu tertentu. Dengan meninjau penelitian terdahulu, maka pendekatan yang disarankan untuk memperhitungkan *trend* dalam jaringan distribusi air bersih adalah NHPP. Proses tersebut merupakan proses stokastik, atau secara khusus disebut sebagai *counting process*. Pada penelitian ini, *counting process* digunakan untuk analisis kerusakan pada jaringan pipa yang diasumsikan sebagai *repairable system*. Peristiwa yang diamati adalah waktu mulai operasi, jumlah kejadian dan waktu kerusakan, untuk memodelkan jumlah kerusakan dalam interval waktu. Pada wilayah studi fungsi intensitas dapat dianggap sebagai jumlah rata-rata

kerusakan ($N(t)$) per satuan waktu. Dengan kata lain, variabel ini menggambarkan tolok ukur penilaian aset pada sebuah jaringan pipa. Dengan demikian, fungsi intensitas kerusakan adalah ukuran terpenting dari keandalan pipa. NHPP juga mengasumsikan dengan hal yang disebut sebagai perbaikan minimal. Dalam perbaikan minimal diasumsikan bahwa penanganan kerusakan tidak akan berdampak pada tingkat kerusakan pipa dan tidak akan mengembalikan pipa ke kondisi sebelum kerusakan terjadi.

Pada gambar 4.2 terlihat bahwa pada awal pengamatan hingga tahun 2018 jaringan pipa mengalami fase intensitas yang relatif konstan. Kemudian, seiring bertambahnya usia pipa, maka intensitas akan mulai meningkat.



Gambar 4.2. Intensitas kerusakan pipa (*fitted intensity*) berdasarkan hasil analisis

Hal ini selaras dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Watson (2004) dan Lin dan Yuan (2018) di mana pada akhirnya tingkat kerusakan akan melebihi tingkat tertentu dan akan menjadi lebih ekonomis untuk melakukan penggantian pipa pada jaringan dibandingkan dengan melakukan perbaikan. Scheidegger (2013) dan Lin dan Yuan (2018) menyatakan bahwa ketika pipa baru diinstalasi, dapat ditemui kondisi intensitas yang tinggi karena sering terjadi kerusakan akibat perilaku konstruksi. Ini dapat digambarkan sebagai periode awal. Setelah kerusakan awal mereda, intensitas akan menjadi lebih kecil dan relatif konstan untuk periode yang lama dari usia rencana. Hal ini berbeda dengan hasil dari analisis intensitas kerusakan pada penelitian ini, di mana awal pengamatan

dilakukan ketika usia pipa telah mencapai 10 tahun sehingga fase awal (*early stage*) dengan intensitas kerusakan yang tinggi tidak ditemui pada hasil tersebut.

Apabila hasil ini diselaraskan dengan hasil penelitian Scheidegger dkk (2013) yang menyatakan bahwa fungsi intensitas dapat digambarkan sebagai *bath tube curve*, maka fase intensitas pada gambar 4.2 berada pada fase peralihan dari fase *in-use* ke fase *wear-out*. Fase deteriorasi ini dapat dimodelkan dengan *Non-Homogeneous Poisson Process* (NHPP) yang memungkinkan intensitas kerusakan bervariasi seiring dengan waktu. Selaras dengan ini, maka hasil penelitian ini menyiratkan bahwa waktu antara kejadian kerusakan tidak independen atau terdistribusi secara identik sebagaimana penelitian yang dilakukan oleh Lin dan Yuan (2018).

4.1.3. Uji Homogenitas Intensitas

Uji homogenitas intensitas merupakan pengujian untuk mengetahui homogenitas variansi dari satu atau beberapa distribusi. Pada penelitian ini, uji homogenitas intensitas dilakukan untuk mengetahui pola persebaran data jumlah kerusakan per satuan waktu. Hasil yang akan didapatkan dari pengujian ini adalah distribusi data mengikuti karakteristik dari dua tipe *poisson process* yaitu *homogeneous* dan *non homogeneous*.

Tabel 4.3. Hasil Pengujian Homogenitas Intensitas

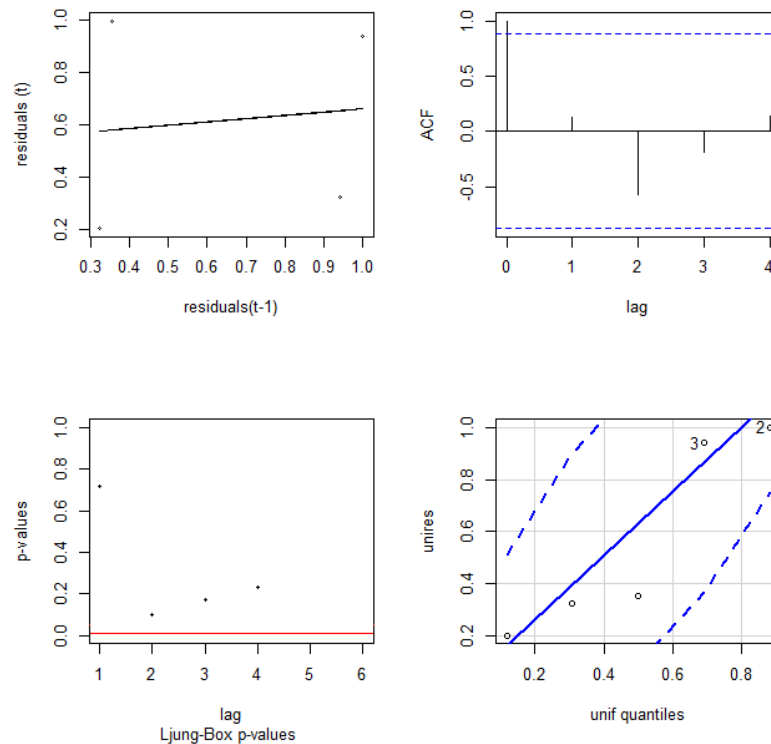
Parameter	Nilai
Derajat Kebebasan	0,05
Nilai Statistik	24939
<i>p-value</i>	0,0088

Sumber : Hasil Analisis

Hasil pengujian homogenitas intensitas pada tabel 4.3 memberikan informasi bahwa nilai statistik *chi-square* sebesar 24939 dan *p-value* sebesar 0,0088 dengan menggunakan derajat kebebasan (*alpha*) sebesar 0,05, sehingga dapat disimpulkan bahwa tingkat intensitas kerusakan pipa bersifat tidak homogen (*inhomogeneous*).

Dalam pembuatan *time-dependant model* terdapat tiga tahap yang perlu dipertimbangkan yakni diagnosa model, spesifikasi model dan pendugaan parameter. Tahap diagnosa model bertujuan untuk mengetahui apakah data yang

digunakan sudah layak digunakan pada proses peramalan. Beberapa teknik yang digunakan untuk diagnosa model adalah dengan melihat parameter autokorelasi. Autokorelasi dapat memengaruhi keandalan analisis, terutama dalam konteks analisis seri waktu. Uji Ljung-Box (Martinez-Acosta dkk, 2020) merupakan salah satu metode yang digunakan untuk menguji apakah terdapat autokorelasi yang signifikan dalam residu dari suatu model. Uji ini melibatkan *Autocorrelation Function* (ACF) pada residu dan dapat membantu menentukan apakah model yang digunakan cocok dengan data atau tidak. Jika ACF residu mendekati nol maka *error* bersifat *white noise*, sehingga data dapat digunakan peramalan, sebagaimana ditunjukkan pada gambar 4.3.



Gambar 4.3. Grafik Ljung-Box untuk Uji Homogenitas Intensitas berdasarkan hasil analisis

4.1.3. Uji Kesesuaian Distribusi

Uji kesesuaian distribusi dilakukan untuk mengetahui bahwa variabel respon atau data intensitas kerusakan mengikuti pola distribusi tertentu. Pengujian kesesuaian distribusi dilakukan dengan menggunakan Anderson-Darling dan Kolmogorov-Smirnov. Metode uji tersebut menggunakan beberapa distribusi yang meliputi Poisson, Logaritmik,

Bernoulli dan Binomial. Dari hasil uji yang tertera pada tabel 4.4. didapatkan hasil bahwa sebaran intensitas kerusakan pipa sesuai dengan pola distribusi yang digunakan pada penelitian ini. Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.4 didapatkan nilai statistik untuk jenis distribusi Poisson dan Eksponensial yang berada di atas nilai kritis (*critical value*) pada masing-masing metode uji dengan menggunakan derajat kebebasan sebesar 0,05. Dari tabel di atas, maka distribusi Poisson dapat diterima untuk proses analisis pada penelitian ini.

Tabel 4.4. Hasil Uji Kesesuaian Distribusi

Jenis Distribusi	Nilai Uji Kolmogorov-Smirnov	Nilai Uji Anderson-Darling
Poisson	0,4733	0,7448
Eksponensial	0,6291	0,3943
Bernoulli	2,9162	0,9433
Binomial	3,3362	0,8748
Nilai Kritis	2,5018	0,7472
Derajat Kebebasan	0,05	0,05

Sumber : Hasil Analisis

4.2 Pemodelan Deteriorasi Jaringan Pipa

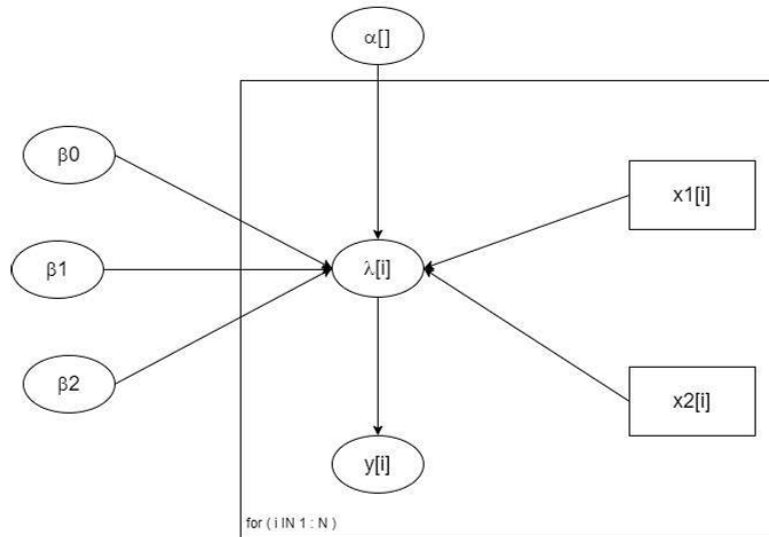
Sebagian besar model statistik dapat digunakan untuk memperkirakan jumlah kerusakan atau probabilitas kerusakan pipa. Model sering diaplikasikan menggunakan data dari kelompok pipa yang homogen (misalnya bahan dan diameter yang sama) akibat kondisi minimnya kejadian kerusakan untuk pipa individu. Dalam kebanyakan kasus, estimasi pada tingkat jaringan cukup akurat jika dibandingkan dengan data kerusakan hasil pengamatan. Namun, kejadian kerusakan pada masing-masing pipa individu sering kali terlalu diprediksi terlalu tinggi atau terlalu rendah karena model telah dikalibrasi menggunakan data pada tingkat kelompok. Cara alternatif untuk mengidentifikasi pipa dengan kemungkinan kerusakan yang tinggi adalah dengan membandingkan beberapa model yang berbeda, sebagaimana yang dilakukan oleh beberapa peneliti terdahulu (Kleiner dan Rajani, 2010; Atique dan Attouh-Okine, 2017 dan Lin dan Yuan, 2019). Dalam hal ini, NHPP adalah model yang dapat menjelaskan kerusakan pipa dan faktor-faktor yang mempengaruhinya meskipun dilakukan dengan estimasi parameter yang berbeda. Pada penelitian ini, dilakukan perbandingan model NHPP dengan estimasi parameter dengan pendekatan statistika Bayesian dan pendekatan statistika *Frequentist*.

4.2.1. Pemodelan Deteriorasi Jaringan Pipa dengan Inferensia Bayesian

Pada penelitian ini, inferensia Bayesian dilakukan dengan menggunakan metode *Markov Chain-Monte Carlo* (MCMC). Melalui metode ini, dimungkinkan untuk menghasilkan sampel dari setiap fungsi kerapatan *posterior* dan kemudian menggunakan sampel untuk menghitung nilai yang diharapkan dari *posterior*. Hal penting dalam penggunaan MCMC adalah jika algoritma simulasi diimplementasikan dengan benar, rantai Markov akan konvergen pada distribusi tertentu. Implementasi metode MCMC untuk inferensi Bayesian membutuhkan sebuah algoritma pengambilan sampel yang tepat untuk mendapatkan sampel dari suatu distribusi. Beberapa algoritma yang dikembangkan untuk pemrosesan numerik dalam metode MCMC ini di antaranya adalah algoritma *Gibbs Sampling* yang digunakan pada analisis ini.

Dalam inferensi Bayesian, *Directed Acyclic Graph* (DAG) secara grafis dapat merepresentasikan hubungan antara data dan distribusi parameter *prior*. DAG pada pemodelan deteriorasi ditampilkan pada gambar 4.4. Hasil estimasi parameter harus memenuhi sifat *irreducible*, *aperiodic*, dan *reccurent*, yang diwujudkan dengan *autocorrelation plot*, *history plot*, dan *Kernel density plot*. Struktur parameter model *poisson regression* yang dinyatakan dengan grafik DAG pada gambar 4.4 menggambarkan hubungan antara data, parameter model, dan nilai parameter. Dalam grafik, sebuah garis mewakili hubungan stokastik. Simpul berbentuk kotak mewakili parameter atau data yang konstan, sedangkan simpul berbentuk elips mewakili parameter yang berubah secara stokastik atau hubungan struktural logis. Secara konseptual, metode Bayesian didasarkan pada teorema Bayes, di mana distribusi *posterior* digunakan untuk membangun fungsi *likelihood* yang merupakan kombinasi dari distribusi *prior* dan data observasi. Fungsi *likelihood* merupakan representasi dari kondisi data, sedangkan penentuan *prior distribution* lebih kepada subyektivitas peneliti berdasarkan pertimbangan-pertimbangan tertentu. Spesifikasi distribusi *prior* dalam inferensi Bayesian merupakan hal yang penting karena distribusi *prior* akan mempengaruhi inferensi distribusi *posterior*. Penentuan distribusi *prior* adalah kunci analisis inferensi dengan Bayes dan merupakan langkah paling penting dalam menggambarkan inferensi. Penelitian ini mengusulkan *pseudo prior* dalam

menentukan parameter distribusi *prior* untuk memastikan proses estimasi parameter berulang dengan cepat (*fast mixing*) dan memenuhi kaidah rantai Markov. Distribusi *posterior* untuk menentukan parameter model dilakukan menggunakan metode MCMC dan algoritma *Gibbs Sampling*.



Gambar 4.4. Rancangan *Directed Acyclic Graph* Pemodelan Deteriorasi Pipa

Setelah *prior* ditentukan, maka proses untuk mendapatkan distribusi *posterior* berdasarkan fungsi *Likelihood* dan distribusi *prior* dapat dilakukan. Model tersebut kemudian diperiksa dengan menghitung kontribusi signifikan dari masing-masing variabel prediktor berdasarkan kriteria apakah terdapat nilai nol (*zero*) yang berada dalam interval kredibel dari distribusi *posterior*. Struktur parameter model *poisson regression* pada gambar 4.4 yang terdiri dari variabel $y[i]$ sebagai node berdistribusi *poisson* yang didapatkan dari $\ln \lambda[i]$.

Tabel 4.5. Hasil Estimasi Parameter dengan *Markov Chain-Monte Carlo*

Parameter	Rerata	Simpangan Baku	Nilai pada 2,5%	Nilai Median	Nilai pada 97,5%
β_0	6.69	0.1561	6.387	6.691	6.99
β_1	-0.001222	0.002068	-0.01617	-0.01221	-0.008135
β_2	0.04833	0.006018	0.03645	0.04839	0.05966

Sumber : Hasil Analisis

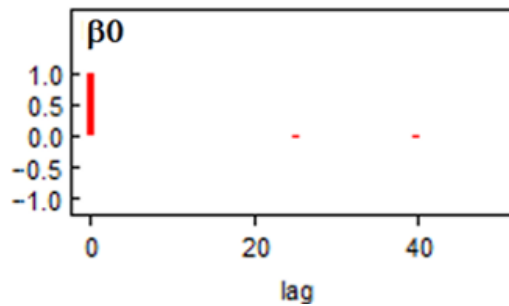
Pada tabel 4.5 terlihat bahwa ketiga parameter dapat dinyatakan valid karena nilai nol (*zero*) tidak berada dalam interval kredibel dari distribusi *posterior*. Estimasi parameter dilakukan dengan kaidah persamaan Bayesian. Seluruh variabel prediktor

digunakan secara simultan dalam pemodelan, sehingga menghasilkan persamaan model Bayesian :

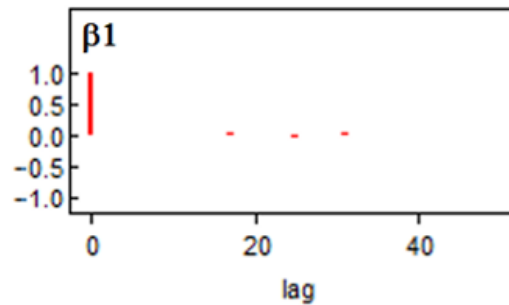
$$\lambda = \exp(6.69 - 0.01222D + 0.04833 A) \quad (4.1)$$

Dari tabel 4.5. didapati bahwa kecenderungan temuan menunjukkan adanya hubungan positif antara tingkat kerusakan pipa dengan usia pipa, serta hubungan negatif antara tingkat kerusakan pipa dengan diameter pipa.

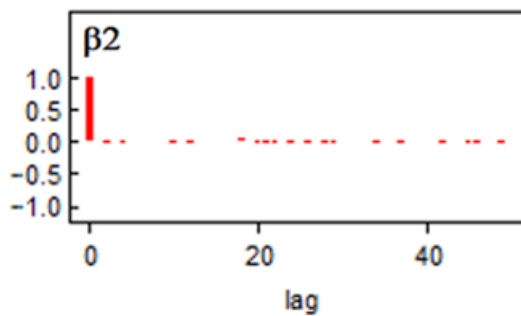
Plot autokorelasi, dengan hasil yang terlihat pada gambar 4.5 hingga gambar 4.7 menunjukkan bahwa nilai sampel yang dibangkitkan mencapai nilai maksimum pada lag yang mendekati nol, dan dinyatakan berada pada daerah distribusi *posterior*.



Gambar 4.5. Plot autokorelasi untuk parameter β_0 hasil iterasi MCMC

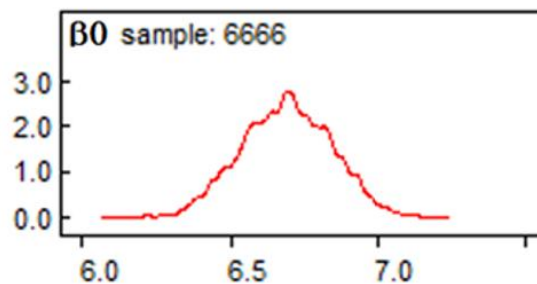


Gambar 4.6. Plot autokorelasi untuk parameter β_1 hasil iterasi MCMC

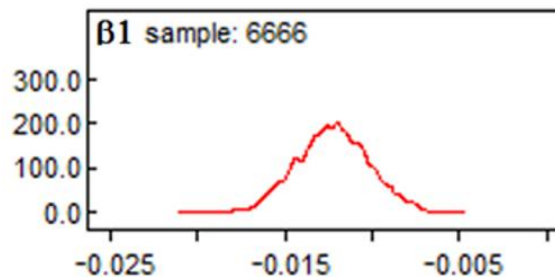


Gambar 4.7. Plot autokorelasi untuk parameter β_2 hasil iterasi MCMC

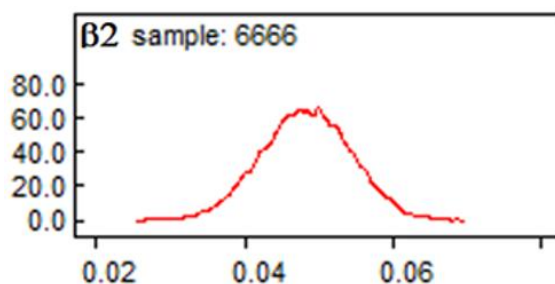
Selanjutnya estimasi parameter yang dihasilkan dari replikasi ini dihitung menggunakan *mean* aritmatika pada *density function*. Gambar 4.8 hingga 4.10 menggambarkan estimasi fungsi *Kernel density*, di mana garis solid pada DAG menggambarkan fungsi ini. *Kernel density plot* menunjukkan bahwa *density posterior* untuk parameter model memberikan bentuk *density* yang menyerupai lonceng (*bell shape*) berdasarkan pola distribusi dari parameter model. Hal ini menjadi indikasi bahwa rantai Markov telah konvergen dan memenuhi kaidah Bayesian.



Gambar 4.8. *Kernel density plot* untuk parameter β_0 hasil iterasi MCMC



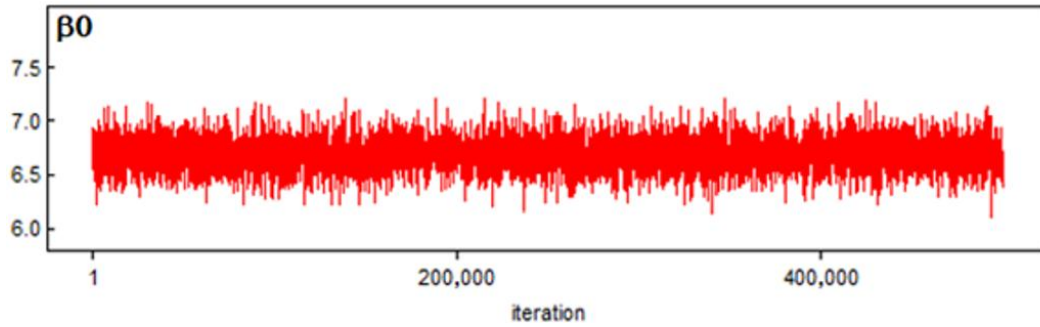
Gambar 4.9. *Kernel density plot* untuk parameter β_1 hasil iterasi MCMC



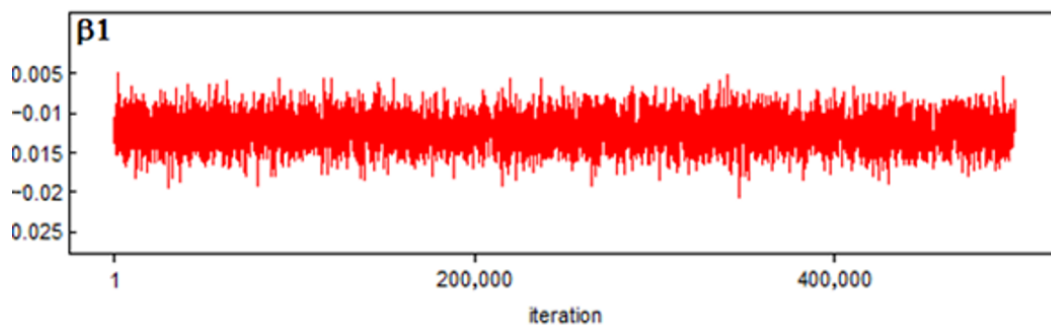
Gambar 4.10. *Kernel density plot* untuk parameter β_2 hasil iterasi MCMC

Gambar 4.11 hingga 4.13 menggambarkan hasil *history plot* pada proses iterasi MCMC. Hasil *history plot* telah menunjukkan sifat stasioner dan acak. Hal ini

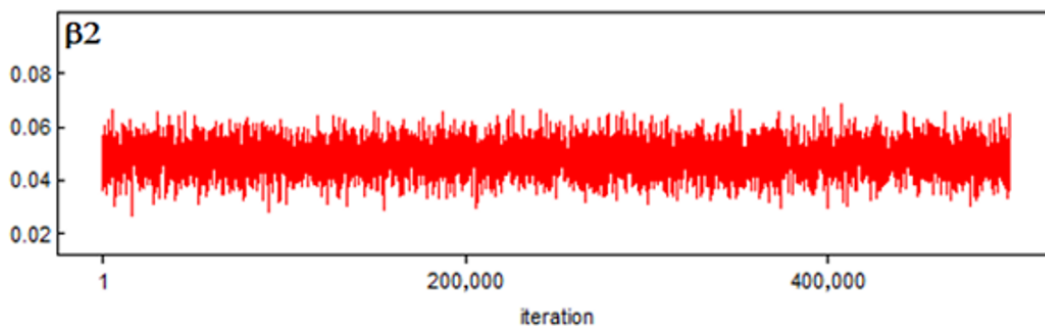
menandakan bahwa seluruh sampel yang dibangkitkan berada dalam interval domain tertentu, yang memuat semua nilai parameter yang mungkin terjadi. *History plot* dengan karakter seperti ini dapat disimpulkan telah mencapai kondisi *irreducible*, yang menggambarkan konvergensi rantai Markov telah memenuhi sifat *fast mixing*.



Gambar 4.11. *History plot* untuk parameter β_0 hasil iterasi MCMC



Gambar 4.12. *History plot* untuk parameter β_1 hasil iterasi MCMC



Gambar 4.13. *History plot* untuk parameter β_2 hasil MCMC

Berdasarkan pada gambar 4.11 hingga 4.13 tersebut dapat diketahui bahwa pada analisis ini, dilakukan proses simulasi rantai Markov hingga 500.000 iterasi, dan *history plot* telah memenuhi sifat *stationer* dan *random*. Hal ini berarti seluruh sampel yang dibangkitkan berada pada interval *domain* yang memiliki nilai tertentu. Selain itu *history plot* cenderung rapat dan *fast mixing* sehingga dapat menangkap

semua kemungkinan nilai parameter. Hal ini menunjukkan bahwa *history plot* memenuhi sifat *irreducible*. Hasil *history plot* pada gambar 4.11 hingga 4.13 menunjukkan bahwa nilai yang dibangkitkan tidak berada pada keperiodikan tertentu, dengan kata lain process MCMC yang dilakukan memenuhi sifat *aperiodic*. Gambar 4.11 hingga 4.13 juga membuktikan bahwa proses iterasi MCMC yang dilakukan memenuhi sifat *recurrent*, karena nilai parameter yang dibangkitkan dalam *state-i* dapat kembali pada *state-i*. Dengan verifikasi yang dilakukan berdasarkan plot autokorelasi, *Kernel density plot* dan *history plot* didapatkan kesimpulan bahwa tiga sifat rantai Markov telah terpenuhi sehingga dapat dinyatakan bahwa rantai Markov yang dihasilkan adalah konvergen. Dari hasil prediksi yang diperoleh, sebagaimana dinyatakan pada tabel 4.6 terdapat kecenderungan jumlah kerusakan yang diprediksi berdasarkan persamaan 4.1 konsisten dengan jumlah kerusakan hasil observasi. Meskipun demikian, tahap validasi merupakan hal yang tidak boleh untuk dilewatkan pada pengembangan sebuah model. Penelitian ini mengusulkan beberapa teknik penilaian untuk validasi model dalam menilai *error* yang dihasilkan, yang meliputi plot kerusakan tahunan, plot kerusakan kumulatif, plot kerusakan berpasangan, dan pemeriksaan *quartile* periode kerusakan pipa.

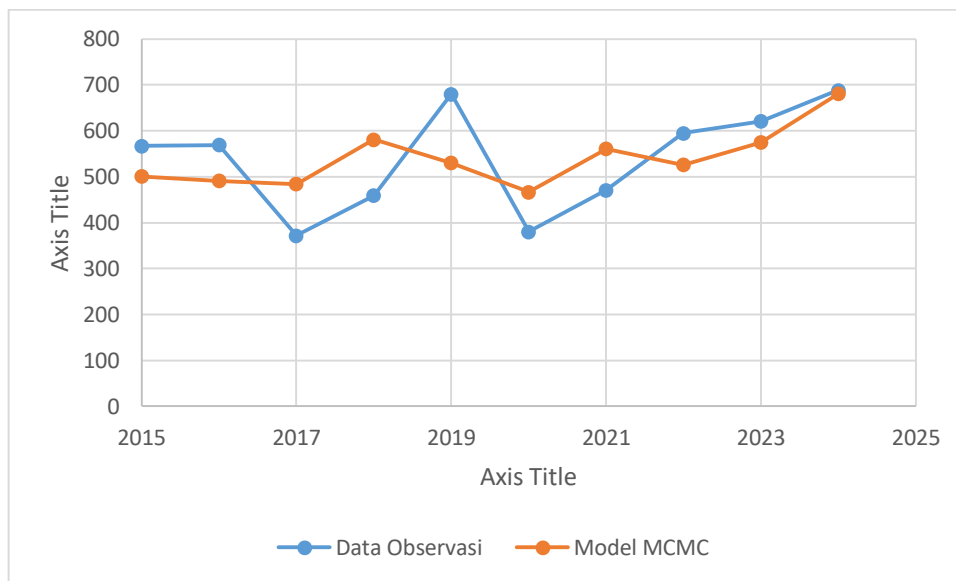
Tabel 4.6. Jumlah kerusakan pipa data observasi dan hasil estimasi parameter dengan *Markov Chain-Monte Carlo* (MCMC)

Periode	Data Observasi	Hasil Prediksi MCMC
2015	567	501
2016	569	491
2017	372	484
2018	459	581
2019	680	530
2020	380	467
2021	471	561
2022	595	526
2023	621	575
2024	688	681

Sumber : Hasil Analisis

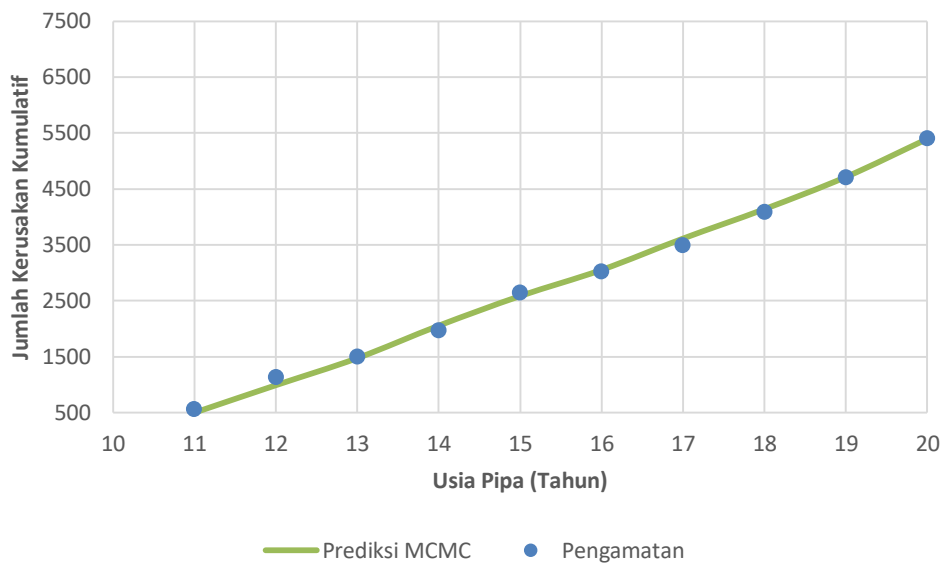
Merupakan hal yang menarik untuk diteliti apakah model tersebut juga berfungsi dengan tepat dalam menyajikan prediksi jumlah kerusakan pada setiap periode. Berkaitan dengan hal tersebut, plot kumulatif dan plot tahunan adalah alat grafis yang direkomendasikan oleh Karimian (2015) sebagai metode validasi. Sebagai validasi dari kesesuaian model, berdasarkan tabel 4.6 maka dibuatlah grafik

plot tahunan pada gambar 4.14 yang menunjukkan jumlah kerusakan yang diprediksi dan jumlah kerusakan yang diamati untuk setiap tahun. Jumlah total kerusakan yang diprediksi oleh model, dan jumlah kerusakan yang diamati relatif serupa untuk masing-masing periode tahunan. Plot tahunan dapat digunakan untuk mengevaluasi hasil prediksi dari model secara grafis dengan membandingkan dengan jumlah kerusakan yang diamati. Plot ini juga dapat menunjukkan *trend* antar periode kerusakan (*interfailure*).



Gambar 4.14. Plot kerusakan tahunan model MCMC berdasarkan hasil analisis

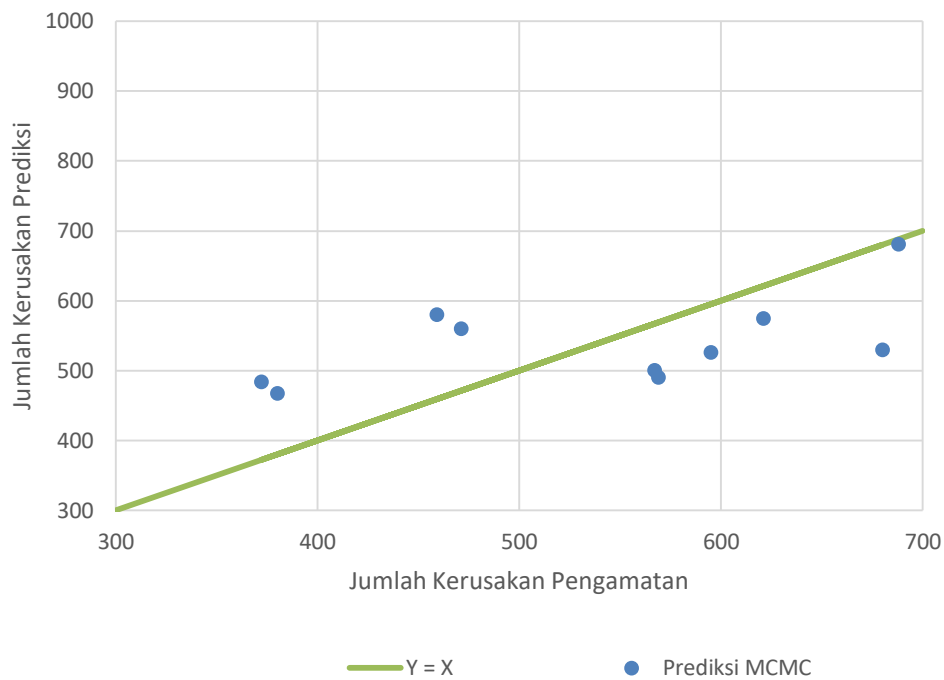
Proses validasi berikutnya pada gambar 4.15 menampilkan kerusakan kumulatif yang diamati dan kerusakan kumulatif yang diprediksi berdasarkan model MCMC pada tabel 4.6. Dalam hal ini model yang dikembangkan memiliki nilai yang relatif serupa dengan data observasi yang mengacu pada tabel 4.6. Bentuk kurva dari data observasi menunjukkan jaringan yang mengalami deteriorasi sehingga kerusakan di masa depan akan lebih sering terjadi.



Gambar 4.15. Plot kerusakan kumulatif prediksi MCMC berdasarkan hasil analisis

Perlu menjadi perhatian kita bahwa kurva prediksi pada gambar 4.15 tersebut tidak dihasilkan oleh sebuah fungsi kurva penyesuaian (*trendline*) berdasarkan jumlah kejadian kerusakan berdasarkan pengamatan per tahun tetapi didasarkan pada estimasi nilai *likelihood* jumlah kerusakan pada periode tertentu. Dalam beberapa kasus, dimungkinkan untuk menyesuaikan kurva dengan nilai pengamatan dalam meningkatkan prediksi kerusakan untuk setiap tahun. Berdasarkan plot kumulatif pada gambar 4.15 tersebut maka kita dapat menyimpulkan bahwa model MCMC memiliki kemampuan untuk mereproduksi total riwayat jumlah kerusakan dalam penelitian ini.

Pada proses selanjutnya pada gambar 4.16, jumlah kerusakan yang diamati dibandingkan dengan jumlah kerusakan yang diprediksi dengan melakukan plot data observasi sebagai absis dan data prediksi dari model sebagai ordinat. Apabila sebuah plot data prediksi model yang didistribusikan ternyata berada di sekitar garis di mana absis sama dengan ordinat, yaitu garis lurus dengan *slope* kemiringan sama dengan 1, maka hal itu menunjukkan bahwa model yang dikembangkan relatif menggambarkan kondisi sesuai pengamatan.



Gambar 4.16. Plot kerusakan berpasangan model MCMC berdasarkan hasil analisis

Untuk kondisi pipa di mana jumlah kerusakan yang diprediksi mengalami kenaikan tetapi jumlah kerusakan yang diamati lebih tinggi, maka perkiraan kenaikan jumlah kerusakan yang lebih rendah tidak berpengaruh karena pipa-pipa ini akan tetap menjadi kandidat untuk prioritas pembaruan. Apabila terdapat jumlah kerusakan yang diprediksi sama dengan nilai yang diharapkan, maka untuk setiap nilai yang diprediksi, dapat diberikan batas atas dan bawah (sebagai interval prediksi) berdasarkan data simpangan terjauh.

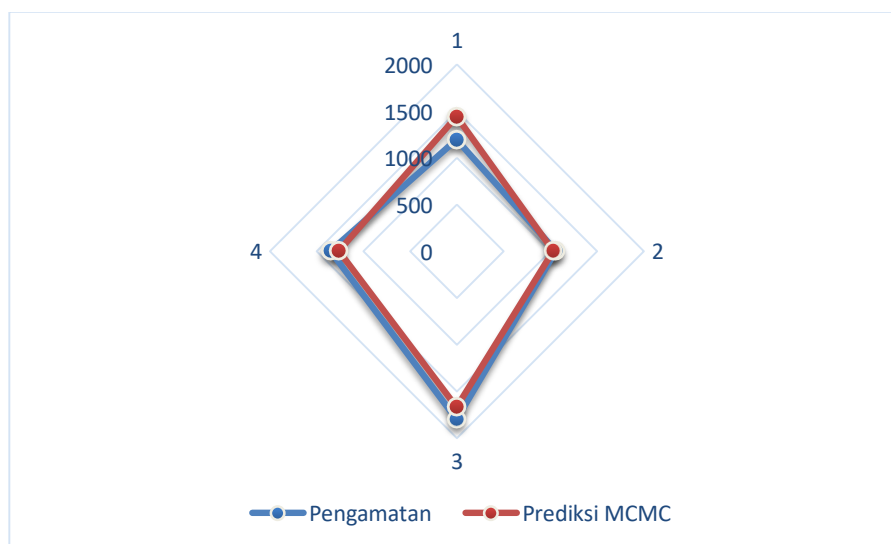
Plot berpasangan pada gambar 4.16 dapat pula menunjukkan beberapa poin di mana model tidak sesuai dengan data yang diamati dengan mengacu pada tabel 4.6, terutama pada bagian jaringan pipa yang telah mengalami perbaikan. Apabila pada bagian jaringan pipa ini tidak ditemukan adanya kerusakan setelah perbaikan, maka hal itu menjadi batasan dalam studi ini, karena tidak memungkinkan untuk mempertimbangkan pada periode yang mana terdapat bagian pipa yang telah mengalami perbaikan. Oleh karena itu dalam kasus ini, dalam pengembangan model prediksi terkadang dijumpai angka kerusakan prediksi yang lebih tinggi daripada angka kerusakan pengamatan, sebagaimana dinyatakan oleh Karimian (2015).

Pengujian lain untuk validasi adalah dengan melakukan pengamatan pada tiap *quartile* periode kerusakan pipa. Dalam pengujian ini, data prediksi untuk suatu periode divalidasi dengan data observasi untuk setiap periode yang sama. Jika sebuah model digunakan untuk prediksi pada sebuah fase usia pipa, model tersebut harus dapat mengidentifikasi pipa di mana sebagian besar kerusakan terjadi. Model tersebut dianggap valid pada usia guna pipa jika pipa yang diprediksi pada periode tertentu memiliki jumlah kerusakan terbesar, sementara data observasi juga menunjukkan hal serupa sebagaimana dinyatakan oleh Kerwin dkk (2019). Tabel 4.10 menunjukkan bahwa model relatif baik dalam estimasi prediksi kerusakan pada masing-masing periode yang ditunjukkan oleh nilai selisih total yang berada pada kisaran 0,10 %. Meskipun demikian, terdapat selisih yang lebih besar dari 20 persen pada *quartile* 1 yang perlu menjadi perhatian.

Tabel 4.7. Perbandingan kerusakan antara data observasi terhadap nilai prediksi MCMC pada tiap *quartile*

Periode	Data Observasi	Prediksi MCMC	Selisih (%)
<i>Quartile</i> 1	1191	1441	-20,93%
<i>Quartile</i> 2	1059	1030	2,68%
<i>Quartile</i> 3	1799	1665	7,43%
<i>Quartile</i> 4	1353	1260	6,87%
Total	5402	5396	0,10%

Sumber : Hasil Analisis



Gambar 4.17. Perbandingan nilai pengamatan dan prediksi MCMC pada masing-masing *quartile* dalam bentuk diagram radar berdasarkan hasil analisis

Visualisasi pada gambar 4.17 menunjukkan bahwa sebagian besar kerusakan diprediksi pada periode *quartile* 3 dan nilai terkecil berada di *quartile* 2 dan memiliki kecenderungan yang selaras dengan data observasi. Gambar 4.17 tersebut juga menunjukkan bahwa model MCMC dapat digunakan untuk penetapan prioritas perbaikan pipa. Periode kerusakan yang mengalami kerusakan pada *quartile* 3 adalah periode yang menjadi prioritas untuk perbaikan.

4.2.2. Pemodelan Deteriorasi Jaringan Pipa dengan Inferensia *Frequentist*

Pada penelitian ini inferensia *frequentist*, yang dalam hal ini adalah metode *maximum likelihood* (ML), akan digunakan sebagai pembanding model inferensia Bayesian dengan metode MCMC. Persamaan *likelihood* digunakan secara khusus pada distribusi dan estimasi tertentu sebagai pengganti penyelesaian dengan persamaan matematika atau model numerik yang rumit. Hal ini terutama jika memerlukan interval kepercayaan untuk sebuah parameter. Beberapa peneliti berpendapat bahwa lebih efektif menggunakan alat bantu statistika untuk menghasilkan estimasi *maximum likelihood*, dibandingkan dengan menggunakan metode numerik. Tentunya dengan beberapa pengecualian, pada kasus di mana terdapat persamaan *maximum likelihood* yang sederhana. Hal ini juga didukung oleh keberadaan prevalensi alat bantu *maximum likelihood* yang berkualitas tinggi yang semakin meningkat.

Untuk sampel data dalam jumlah yang kecil, *maximum likelihood* mungkin dapat bersifat bias secara signifikan, atau terdapat kemungkinan di mana nilai optimal tidak berlaku untuk pada kasus sampel yang kecil. Hal ini tidak terjadi pada penelitian ini dengan mengacu kepada hasil estimasi parameter yang ditunjukkan pada tabel 4.8.

Tabel 4.8. Hasil Estimasi Parameter dengan *Maximum Likelihood*

Parameter	Nilai	Standard Error
μ_0	6.88818	0.0155
μ_1	-0.01489	0.0021
μ_2	0.051891	0.0059

Sumber : Hasil Analisis

Seluruh variabel prediktor digunakan secara simultan untuk memodelkan, sehingga menghasilkan persamaan model *frequentist* :

$$\lambda = \exp(6.89 - 0.01489D + 0.05189 A) \quad (4.2)$$

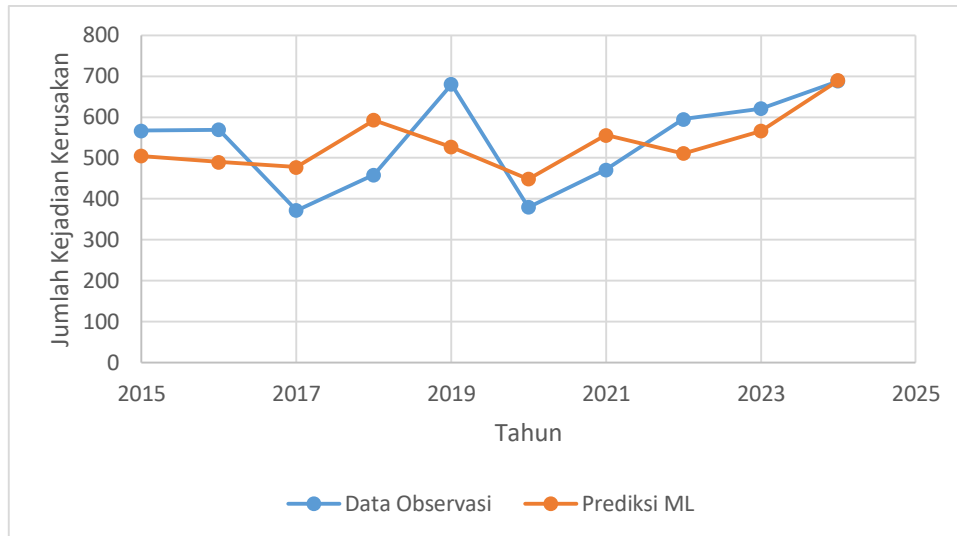
Jika kita membandingkan dua persamaan yang dihasilkan dari MCMC dan ML, terlihat bahwa meskipun parameter memiliki nilai yang berbeda, namun cenderung memiliki hubungan yang sama dengan kerusakan pipa. Berdasarkan persamaan 4.2. diketahui hubungan diameter pipa dengan kerusakan pipa adalah negatif, sedangkan hubungan antara usia pipa dengan kerusakan pipa adalah hubungan positif, dengan nilai prediksi kerusakan dinyatakan pada tabel 4.9.

Tabel 4.9. Jumlah kerusakan pipa hasil observasi dan hasil estimasi parameter dengan *Maximum Likelihood*

Periode	Data Observasi	Prediksi ML
2015	567	505
2016	569	490
2017	372	478
2018	459	593
2019	680	527
2020	380	449
2021	471	556
2022	595	511
2023	621	566
2024	688	690

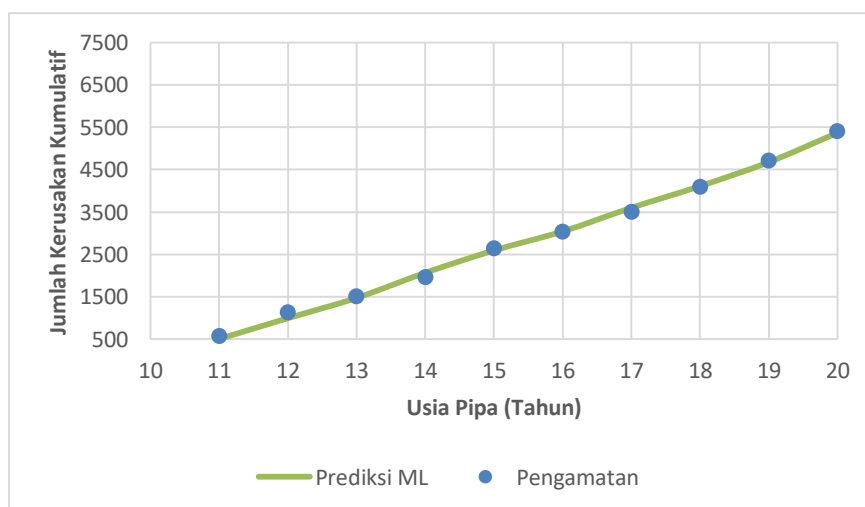
Sumber : Hasil Analisis

Selanjutnya model yang dihasilkan akan divalidasi untuk menjawab pertanyaan apakah model tersebut berfungsi dengan baik dalam menggambarkan jumlah kerusakan pipa selama periode kerusakan tersebut. Proses berikut menampilkan kerusakan kumulatif yang diamati dan kerusakan kumulatif yang diprediksi berdasarkan model ML. Gambar 4.18. menunjukkan plot tahunan kerusakan data observasi dan kurva model ML berdasarkan tabel 4.9. Dalam hal ini model yang dikembangkan menghasilkan nilai yang relatif serupa dengan data observasi.



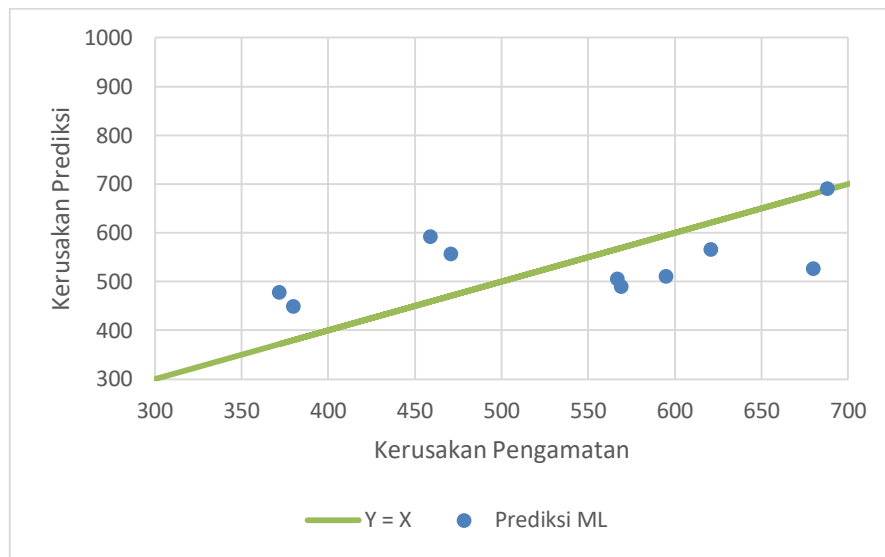
Gambar 4.18. Plot tahunan kerusakan data observasi dan kurva model NHPP dengan pendekatan *Maximum Likelihood*

Gambar 4.19. menunjukkan plot kerusakan kumulatif data observasi dan kurva model ML berdasarkan tabel 4.9. Berdasarkan plot kumulatif pada gambar tersebut maka dapat kita lihat bahwa titik-titik pengamatan berada pada sekitar garis model yang dihasilkan oleh persamaan hasil estimasi ML. Dengan demikian kita dapat menyimpulkan bahwa model ML memiliki kemampuan untuk mereproduksi total riwayat kerusakan terhadap waktu dalam penelitian ini. Pada beberapa tahun awal terlihat bahwa kurva prediksi terlihat sedikit *underestimate*, terutama pada usia ke-11 hingga usia ke-15, kemudian menginjak pada tahun ke-16 hingga ke-18, kurva relatif memiliki tingkat similaritas yang selaras dengan titik pengamatan, walaupun kembali sedikit *underestimate* pada tahun ke-19 hingga tahun ke-20.



Gambar 4.19. Plot kerusakan kumulatif model ML berdasarkan hasil analisis

Pada proses validasi selanjutnya, untuk setiap pipa, jumlah kerusakan yang diamati dibandingkan dengan jumlah kerusakan yang diprediksi dengan melakukan plot data observasi (sebagai absis) dan data prediksi dari model (sebagai ordinat). Dari plot tersebut terlihat bahwa data prediksi model yang didistribusikan berada di sekitar garis di mana absis sama dengan ordinat, yaitu garis lurus dengan *slope* kemiringan sama dengan 1, maka hal itu menunjukkan model relatif baik dalam prediksi jumlah kerusakan.



Gambar 4.20. *Plot berpasangan* untuk jumlah kerusakan prediksi dan jumlah kerusakan pengamatan

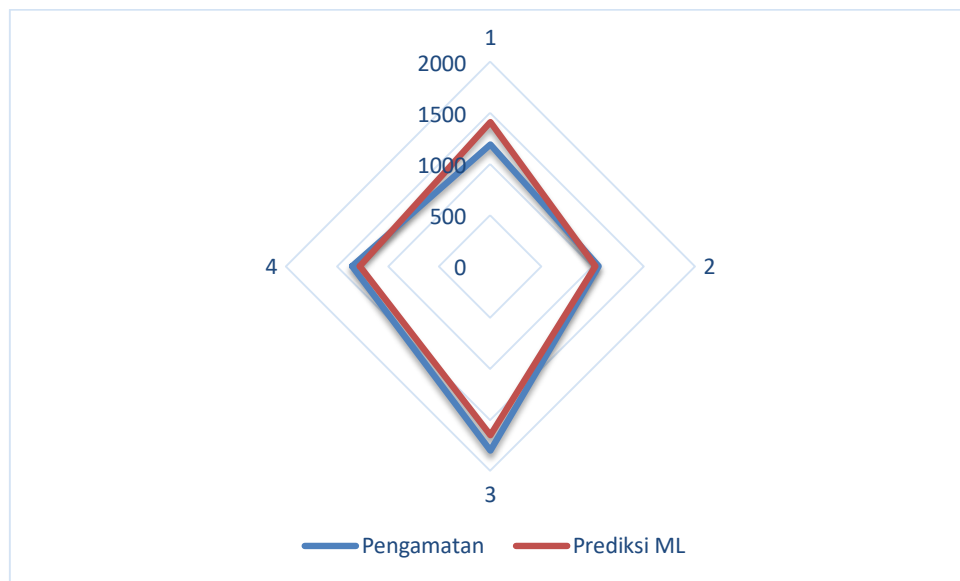
Validasi selanjutnya untuk mengevaluasi kurva prediksi kerusakan adalah dengan melakukan pengamatan pada tiap *quartile* periode kerusakan pipa. Tabel 4.10 berikut menunjukkan hasil *quartile* dari prediksi NHPP bersama dengan kerusakan yang diamati. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa model relatif baik dalam estimasi prediksi kerusakan pada masing-masing periode yang ditunjukkan oleh nilai selisih total yang berada pada nilai 0,68%.

Tabel 4.10. Perbandingan kerusakan antara nilai prediksi dan data observasi pada tiap *quartile* pada model ML

Periode	Pengamatan	Prediksi ML	Selisih (%)
<i>Quartile 1</i>	1191	1414	-18,71%
<i>Quartile 2</i>	1059	1027	2,97%
<i>Quartile 3</i>	1799	1648	8,40%
<i>Quartile 4</i>	1353	1276	5,67%
Total	5402	5365	0,68%

Sumber : Hasil Analisis

Gambar 4.21 menunjukkan bahwa sebagian besar kerusakan diprediksi di periode *quartile* 3 dan angka terkecil berada di *quartile* 2 dan memiliki kecenderungan yang sesuai dengan angka data observasi. Meskipun demikian, terdapat selisih yang lebih besar dari 10 persen pada *quartile* 1 yang perlu untuk menjadi perhatian. Tabel tersebut juga menunjukkan bahwa model NHPP dengan pendekatan frequentist menggunakan metode *Maximum Likelihood* dapat digunakan untuk penetapan prioritas perbaikan pipa.



Gambar 4.21. Perbandingan nilai pengamatan dan prediksi ML pada masing-masing *quartile* dalam bentuk diagram radar

Perbandingan model harus memperhitungkan evaluasi kinerja relatif dalam memprediksi keadaan pipa atau laju kerusakan. Untuk itu selanjutnya dikaji beberapa faktor yang diperhitungkan dalam perbandingan dapat meliputi akurasi model dalam memprediksi kerusakan pipa berdasarkan data yang ada, kemampuan model dalam situasi lapangan aktual, tingkat kompleksitas serta kebutuhan perhitungan yang diperlukan untuk menerapkan model-model ini dalam praktik, dan sejauh mana model-model ini dapat diterapkan pada berbagai kondisi pipa atau lingkungan yang berbeda. Perbandingan ini sering dilakukan dengan menganalisis set data historis yang mencakup kondisi pipa sebelumnya, membandingkan prediksi dari berbagai model, dan mengevaluasi kesesuaian model-model ini dengan pengamatan aktual tentang kondisi pipa saat ini. Tujuan utamanya adalah untuk menemukan model yang

paling akurat dan relevan dalam memprediksi kerusakan pipa dengan mempertimbangkan berbagai aspek yang terlibat. Dalam validasi prediksi, menurut Ramirez et al. (2020), harus melibatkan pemantauan dan proyeksi data sebelumnya untuk membandingkan nilai prediksi tersebut dengan data observasi. Hal ini membantu dalam evaluasi seberapa baik model dapat memprediksi hasil di masa depan berdasarkan informasi yang ada. Pada tabel 4.11 ditunjukkan hasil analisis nilai *Mean Squared Error (MSE)* yang membandingkan nilai prediksi dengan data observasi. Berkaitan dengan permasalahan *apparent error* sebagai hasil selisih antara nilai yang diamati pada nilai prediksi MCMC dan prediksi MLE, maka nilai MSE dapat dijadikan indikator model terbaik yang lebih mendekati nilai nyata. Dalam hal ini, nilai prediksi MCMC lebih baik dibandingkan prediksi ML karena mempunyai nilai *mean square error* yang lebih rendah.

Tabel 4.11. Analisis nilai *Mean Squared Error (MSE)*

Periode	Observasi	Prediksi MCMC	Error MCMC	Prediksi ML	Error ML
2015	567	501	66	505	62
2016	569	491	78	490	79
2017	372	484	-112	478	-106
2018	459	581	-122	593	-134
2019	680	530	150	527	153
2020	380	467	-87	449	-69
2021	471	561	-90	556	-85
2022	595	526	69	511	84
2023	621	575	46	566	55
2024	688	681	7	690	-2
		MSE	82963	MSE	84757

Sumber : Hasil Analisis

4.2.3. Analisis Laju Deteriorasi dan Indeks Reliabilitas Jaringan Pipa

Laju deteriorasi merupakan salah satu variabel penting pada penelitian ini dan berkontribusi signifikan pada langkah-langkah analisis selanjutnya. Bagi pengelola jaringan distribusi, laju deteriorasi mencerminkan tentang *trend* yang memburuk dalam jaringan. Perkiraan yang baik mengenai perkiraan jumlah kerusakan dalam periode waktu tertentu dapat digunakan dalam analisis ekonomi dalam mempertimbangkan rencana perbaikan versus rencana penggantian pada masing-masing pipa. Laju deteriorasi pipa juga berpengaruh dalam penganggaran untuk

kebutuhan rehabilitasi dan penggantian seluruh jaringan di masa depan. Dari sudut pandang pengelola jaringan distribusi, kerusakan yang disebabkan oleh keausan akibat usia pipa memerlukan perhatian khusus, karena kerusakan pada fase ini penting bagi perumusan strategi pemeliharaan dan pembaruan. Pemodelan prediksi kerusakan pipa dengan metode NHPP melalui pendekatan estimasi parameter MCMC dan ML menghasilkan sebuah variabel yang penting, yakni laju deteriorasi pipa yang menyatakan jumlah kerusakan per satuan panjang dalam suatu periode waktu tertentu. Laju deteriorasi pipa yang diprediksi berdasarkan estimasi MCMC dan ML dinyatakan pada tabel 4.12 dengan mengacu persamaan 4.1 dan 4.2. Dari tabel tersebut terlihat bahwa usia pipa berpengaruh terhadap laju deteriorasi. Pipa yang memiliki usia yang lebih tinggi mengalami laju deteriorasi yang lebih tinggi pula.

Tabel 4.12. Laju Deteriorasi Pipa Tiap Diameter

Usia Pipa (Tahun)	Laju Deteriorasi (kerusakan/km/tahun)							
	φ 63 mm		φ 90 mm		φ 110 mm		φ 150 mm	
	MCMC	ML	MCMC	ML	MCMC	ML	MCMC	ML
11	0,510	0,542	0,367	0,363	0,287	0,269	0,176	0,149
12	0,536	0,571	0,385	0,382	0,302	0,284	0,185	0,156
13	0,562	0,602	0,404	0,403	0,317	0,299	0,194	0,165
14	0,590	0,634	0,424	0,424	0,332	0,315	0,204	0,174
15	0,619	0,668	0,445	0,447	0,349	0,332	0,214	0,183
16	0,650	0,703	0,467	0,470	0,366	0,349	0,224	0,193
17	0,682	0,741	0,490	0,495	0,384	0,368	0,236	0,203
18	0,716	0,780	0,515	0,522	0,403	0,387	0,247	0,214
19	0,751	0,822	0,540	0,550	0,423	0,408	0,259	0,225
20	0,788	0,865	0,567	0,579	0,444	0,430	0,272	0,237

Sumber : Hasil Analisis

Fungsi reliabilitas menggambarkan probabilitas bahwa suatu sistem atau komponen akan tetap beroperasi tanpa kerusakan selama suatu periode waktu tertentu. Fungsi reliabilitas dapat diartikan sebagai kemungkinan bahwa sistem atau komponen tersebut akan berfungsi dengan baik hingga waktu tertentu. Fungsi reliabilitas dan fungsi kerusakan adalah dua konsep terkait yang digunakan dalam analisis keandalan sistem atau komponen. Hubungan antara kedua fungsi ini adalah bahwa ketika fungsi reliabilitas tinggi, maka tingkat kerusakan rendah, dan sebaliknya. Saat sistem atau

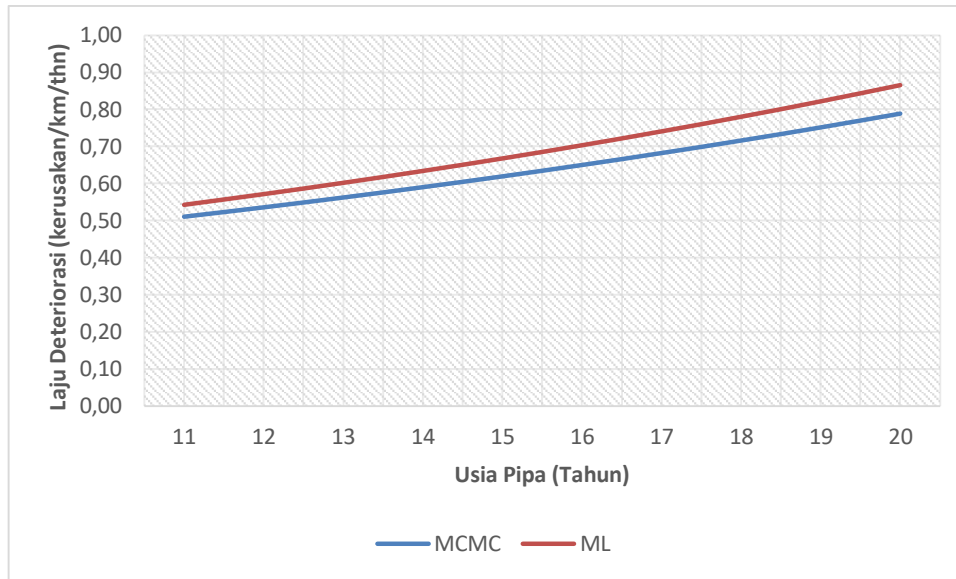
komponen baru dioperasikan, biasanya tingkat kerusakan rendah dan fungsi reliabilitas tinggi. Seiring berjalannya waktu, tingkat kerusakan bisa meningkat, menyebabkan penurunan fungsi reliabilitas. Analisis keandalan menggunakan kedua fungsi ini membantu dalam pemahaman karakteristik dan performa sistem atau komponen dari sudut pandang keandalan. Reliabilitas yang diprediksi berdasarkan model MCMC dan ML dinyatakan pada tabel 4.13 di mana terlihat bahwa usia pipa berpengaruh terhadap indeks reliabilitas, di mana semakin tinggi usia pipa, maka indeks reliabilitas akan mengalami penurunan.

Tabel 4.13. Indeks Reliabilitas Pipa Tiap Diameter

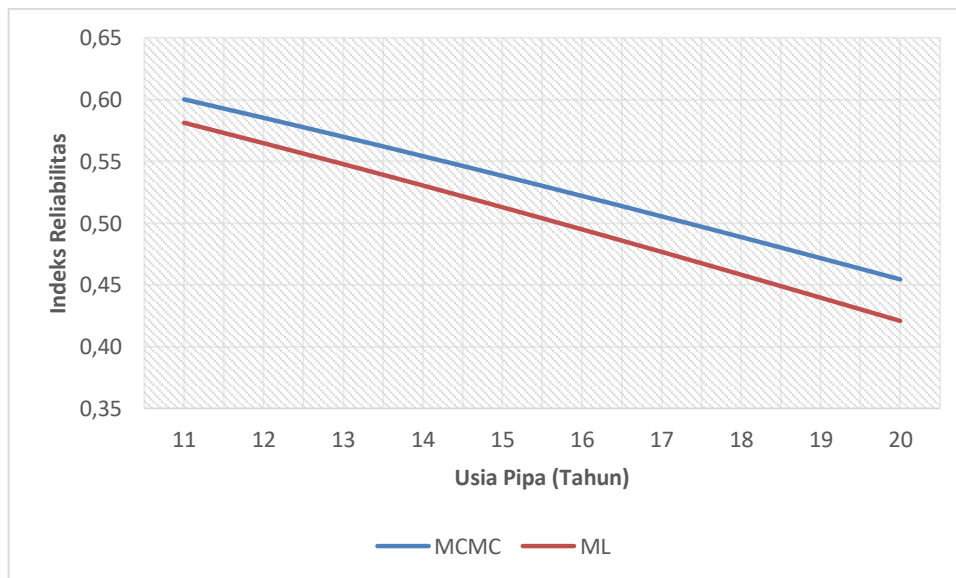
Usia Pipa (Tahun)	Indeks Reliabilitas							
	φ 63 mm		φ 90 mm		φ 110 mm		φ 150 mm	
	MCMC	ML	MCMC	ML	MCMC	ML	MCMC	ML
11	0,600	0,581	0,693	0,696	0,750	0,764	0,838	0,862
12	0,585	0,565	0,680	0,682	0,740	0,753	0,831	0,855
13	0,570	0,548	0,668	0,669	0,729	0,742	0,824	0,848
14	0,554	0,531	0,654	0,654	0,717	0,730	0,816	0,841
15	0,538	0,513	0,641	0,640	0,706	0,718	0,807	0,833
16	0,522	0,495	0,627	0,625	0,694	0,705	0,799	0,825
17	0,506	0,477	0,612	0,609	0,681	0,692	0,790	0,816
18	0,489	0,458	0,598	0,593	0,668	0,679	0,781	0,808
19	0,472	0,440	0,583	0,577	0,655	0,665	0,771	0,799
20	0,455	0,421	0,567	0,561	0,642	0,651	0,762	0,789

Sumber : Hasil Analisis

Kurva laju deteriorasi pipa dengan diameter 63 mm yang dihasilkan oleh pendekatan MCMC dan ML memiliki nilai yang relatif sama pada fase usia awal pipa, yang tergambar pada gambar 4.22. Selanjutnya pada usia pipa 13 tahun kurva deteriorasi pada pipa diameter 63 mm berakselerasi dengan tingkat yang berbeda. Terlihat bahwa kurva pendekatan MCMC berakselerasi lebih landai dibandingkan dengan kurva pendekatan ML. Seiring dengan bertambahnya usia pipa, maka perbedaan tingkat akselerasi tersebut semakin bertambah. Reliabilitas pada pipa diameter 63 mm yang diprediksi berdasarkan model MCMC dan ML digambarkan pada gambar 4.23 di mana terlihat bahwa indeks reliabilitas mengalami penurunan sebesar 0,15 dalam rentang waktu 10 tahun.



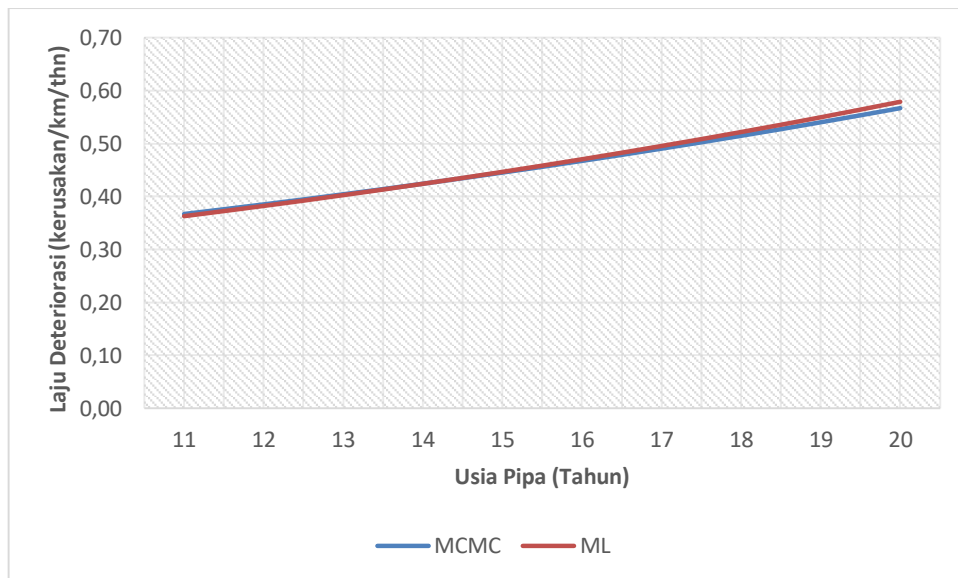
Gambar 4.22. Laju deteriorasi pada pipa diameter 63 mm berdasarkan analisis



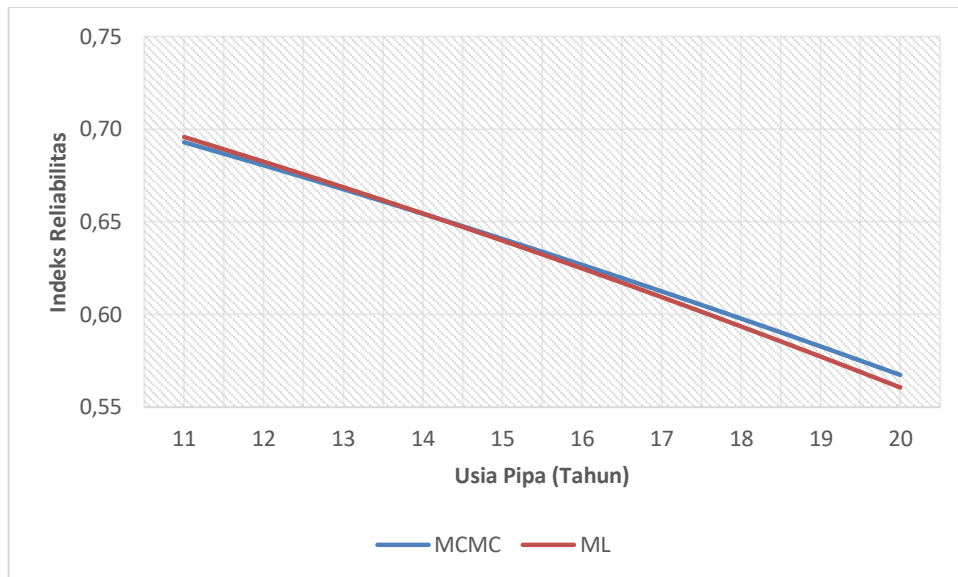
Gambar 4.23. Indeks reliabilitas pada pipa diameter 63 mm berdasarkan analisis

Pada pipa dengan diameter 90 mm perbedaan akselerasi dari kedua pendekatan didapati pada usia pipa 18 tahun, dan makin membesar sepanjang usia pipa. Pada pipa tipe ini, terdapat kondisi serupa dengan kurva pada pipa dengan diameter 63 mm, di mana terlihat bahwa kurva pendekatan MCMC berakselerasi lebih landai dibandingkan dengan kurva pendekatan ML. Seiring dengan bertambahnya usia pipa, maka perbedaan tingkat akselerasi tersebut semakin bertambah, sebagaimana terlihat pada gambar 4.24. Reliabilitas pada pipa diameter 90 mm yang diprediksi berdasarkan model MCMC dan ML digambarkan pada gambar 4.25 di mana terlihat

bahwa indeks reliabilitas mengalami penurunan sebesar 0,12 dalam rentang waktu 10 tahun.



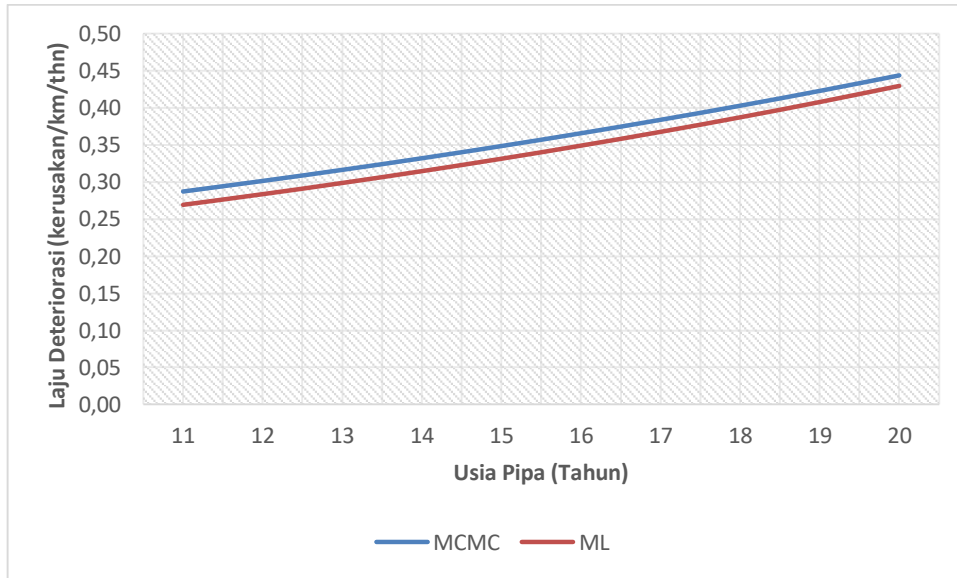
Gambar 4.24. Laju deteriorasi pada pipa diameter 90 mm berdasarkan analisis



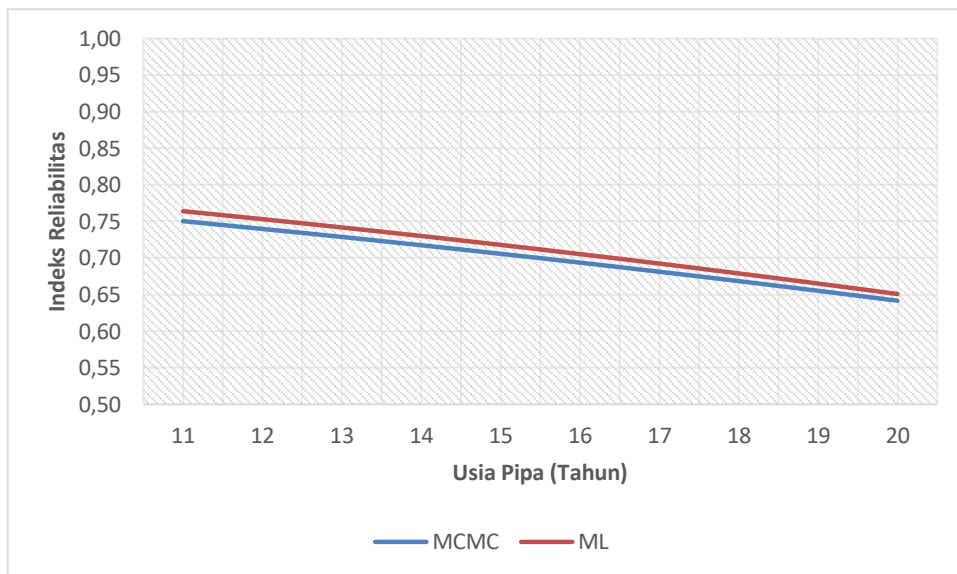
Gambar 4.25. Indeks reliabilitas pada pipa diameter 90 mm berdasarkan analisis

Pada pipa dengan diameter 110 mm perbedaan akselerasi didapati sejak fase usia awal hingga perbedaan tersebut menurun pada usia pipa 30 tahun. Perbedaan akselerasi kurva kembali terlihat pada usia pipa 35 tahun, di mana kurva pendekatan ML memiliki laju deteriorasi yang sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan kurva pendekatan MCMC yang kemudian seiring dengan bertambahnya usia pipa, maka perbedaan tingkat akselerasi tersebut semakin bertambah, sebagaimana terlihat pada

gambar 4.26. Reliabilitas pada pipa diameter 110 mm yang diprediksi berdasarkan model MCMC dan ML digambarkan pada gambar 4.27 di mana terlihat bahwa indeks reliabilitas mengalami penurunan sebesar 0,10 dalam rentang waktu 10 tahun.



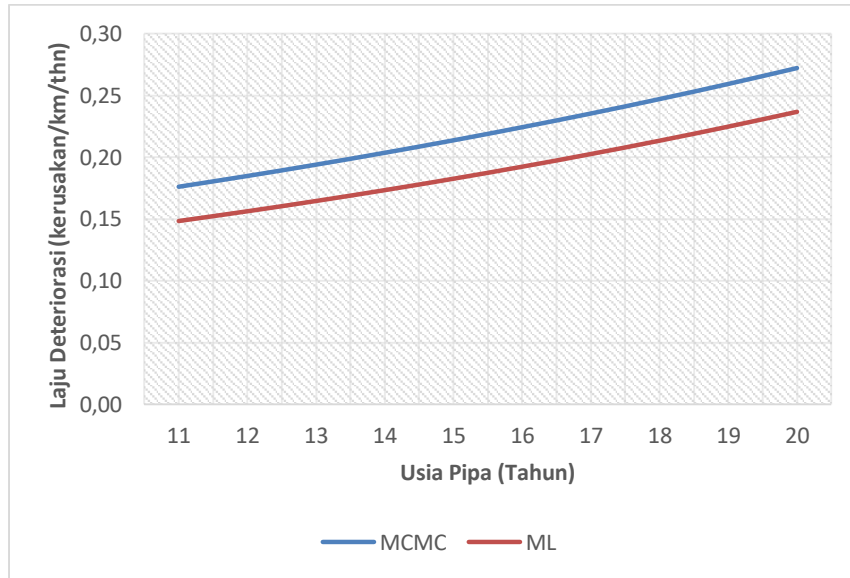
Gambar 4.26. Laju deteriorasi pada pipa diameter 110 mm berdasarkan analisis



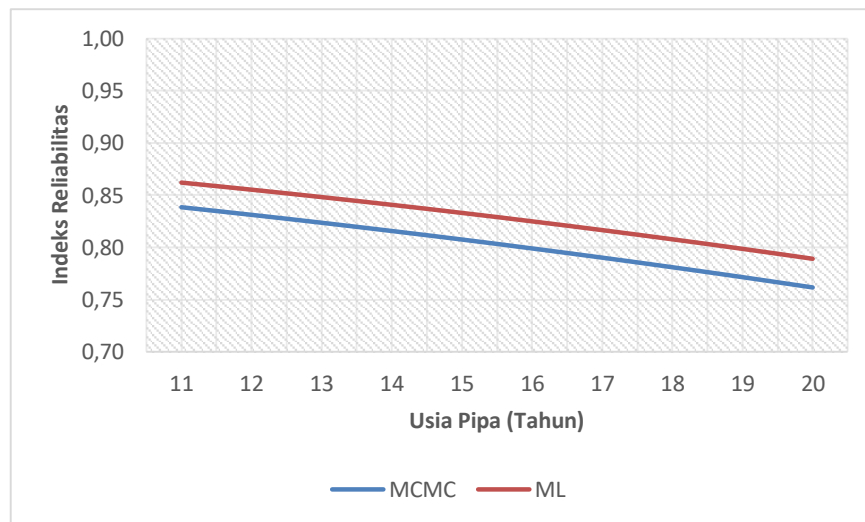
Gambar 4.27. Indeks reliabilitas pada pipa diameter 110 mm berdasarkan analisis

Pada pipa dengan diameter 150 mm perbedaan akselerasi telah didapati pada fase usia awal pipa di mana terlihat bahwa kurva pendekatan MCMC berakselerasi dengan tingkat akselerasi yang sama dengan kurva pendekatan ML seiring dengan bertambahnya usia pipa, tetapi memiliki nilai laju deteriorasi yang berbeda, sebagaimana terlihat pada gambar 4.28 berikut. Reliabilitas pada pipa diameter 150

mm yang diprediksi berdasarkan model MCMC dan ML digambarkan pada gambar 4.29 di mana terlihat bahwa indeks reliabilitas mengalami penurunan sebesar 0,06 dalam rentang waktu 10 tahun.



Gambar 4.28. Laju deteriorasi pada pipa diameter 150 mm berdasarkan analisis



Gambar 4.29. Indeks reliabilitas pada pipa diameter 150 mm berdasarkan analisis

4.3 Pemodelan Life Cycle Cost (LCC).

Penetapan periode penggantian pipa pada penelitian ini dilakukan dengan metode *Life Cycle Cost* (LCC). Analisis LCC dapat mendukung otoritas pengelola jaringan distribusi air bersih untuk memutuskan strategi relokasi yang efisien dan hemat biaya

berdasarkan biaya siklus hidup yang terendah. Analisis LCC ini mempertimbangkan laju deteriorasi pipa berdasarkan model deteriorasi skala waktu di mana untuk pipa dengan usia di atas 20 tahun diasumsikan mengalami kerusakan per tahun dengan laju deteriorasi yang sama dengan usia pipa 20 tahun. Hal ini juga mengasumsikan bahwa pengelola jaringan pipa mampu mempertahankan reliabilitas ketika usia pipa mencapai di atas 20 tahun.

4.3.1. Model LCC dengan pendekatan *Markov Chain-Monte Carlo* (MCMC)

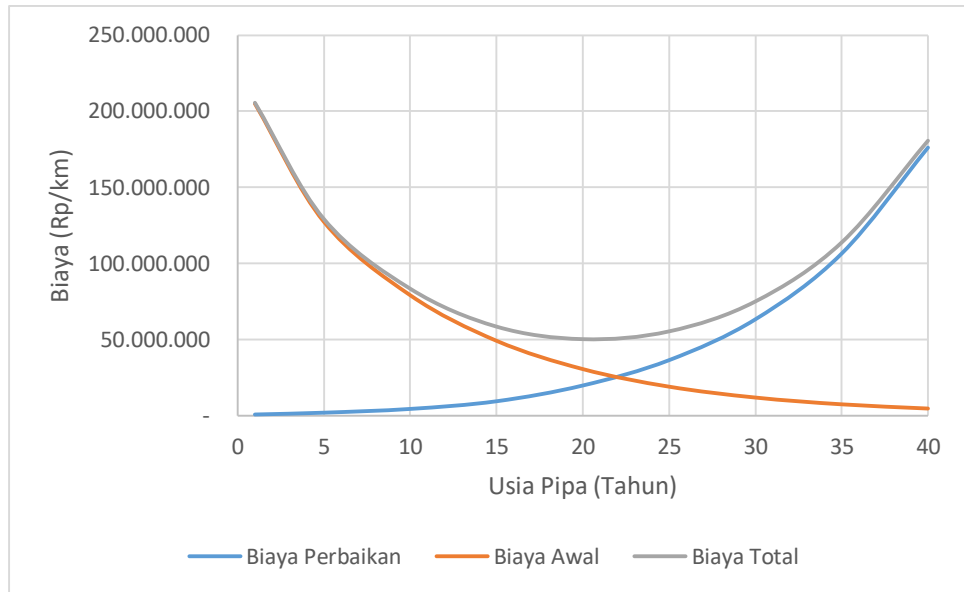
Hasil analisis LCC pada penelitian ini ditampilkan pada tabel 4.14 hingga 4.17 untuk prediksi kerusakan pipa dengan metode MCMC. Pada tabel 4.14 yang menampilkan hasil analisis LCC dari estimasi MCMC dari pipa diameter 63 mm menunjukkan bahwa nilai biaya total terendah berada pada usia pipa 20 tahun.

Tabel 4.14. Hasil analisis LCC untuk pipa 63 mm berdasarkan estimasi MCMC

Usia Pipa (tahun)	Biaya Perbaikan (Rp/km)	Biaya Awal (Rp/km)	Biaya Total (Rp/km)
1	614.327	204.980.651	205.594.977
5	1.814.712	127.276.857	129.091.569
10	4.276.390	79.028.914	83.305.305
15	9.324.654	49.070.738	58.395.392
20	19.677.331	30.469.068	50.146.399
25	36.350.422	18.918.894	55.269.315
30	63.202.601	11.747.145	74.949.745
35	106.448.304	7.294.053	113.742.356
40	176.095.941	4.529.033	180.624.973

Sumber : Hasil Analisis

Gambar 4.30 hingga 4.33 menunjukkan kurva biaya dari estimasi MCMC. Dari gambar tersebut terlihat bahwa meskipun biaya awal berbeda untuk setiap diameter, maka kecenderungannya akan menurun dan mendatar seiring dengan mendekati usia pipa 40 tahun. Pada usia pipa di atas 22 tahun maka biaya perbaikan memiliki pengaruh lebih besar terhadap total biaya. Berdasarkan gambar 4.30, terlihat bahwa waktu pembaruan pipa diameter 63 mm yang optimal didapatkan pada rentang usia pipa 18 tahun hingga 23 tahun berdasarkan kurva biaya total.



Gambar 4.30. Kurva biaya siklus hidup pipa diameter 63 mm berdasarkan estimasi MCMC

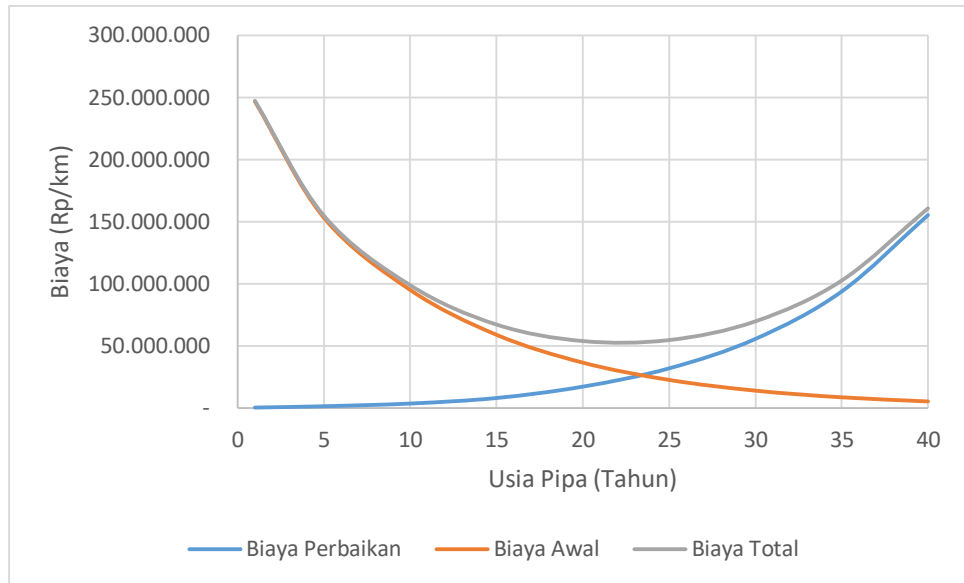
Tabel 4.15 menampilkan hasil analisis LCC dari estimasi MCMC dari pipa diameter 90 mm dan menunjukkan bahwa nilai biaya total terendah berada pada usia pipa 20 tahun.

Tabel 4.15. Hasil analisis LCC untuk pipa 90 mm berdasarkan estimasi MCMC

Usia Pipa (tahun)	Biaya Perbaikan (Rp/km)	Biaya Awal (Rp/km)	Biaya Total (Rp/km)
1	541.846	246.710.651	247.252.497
5	1.600.605	153.187.904	154.788.508
10	3.771.844	95.117.636	98.889.480
15	8.224.493	59.060.568	67.285.061
20	17.355.720	36.671.966	54.027.686
25	32.061.652	22.770.406	54.832.057
30	55.745.702	14.138.630	69.884.332
35	93.889.102	8.778.977	102.668.079
40	155.319.428	5.451.054	160.770.482

Sumber : Hasil Analisis

Berdasarkan gambar 4.31, terlihat bahwa waktu pembaruan pipa diameter 90 mm yang optimal didapatkan pada kisaran usia 20 hingga 25 tahun berdasarkan kurva biaya total.



Gambar 4.31. Kurva biaya siklus hidup pipa diameter 90 mm berdasarkan estimasi MCMC

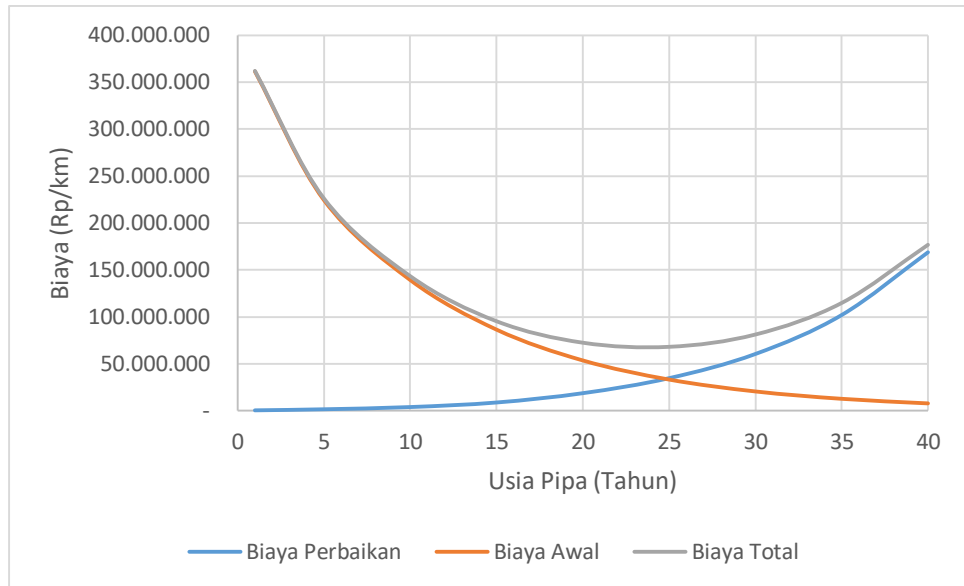
Tabel 4.16 menampilkan hasil analisis LCC dari estimasi MCMC dari pipa diameter 110 mm dan menunjukkan bahwa nilai biaya total terendah berada pada usia pipa 25 tahun.

Tabel 4.16. Hasil analisis LCC untuk pipa 110 mm berdasarkan estimasi MCMC

Usia Pipa (tahun)	Biaya Perbaikan (Rp/km)	Biaya Awal (Rp/km)	Biaya Total (Rp/km)
1	589.121	361.455.801	362.044.922
5	1.740.256	224.435.614	226.175.870
10	4.100.934	139.356.858	143.457.793
15	8.942.072	86.529.645	95.471.717
20	18.869.990	53.728.102	72.598.092
25	34.859.001	33.360.924	68.219.925
30	60.609.462	20.714.509	81.323.971
35	102.080.838	12.862.080	114.942.918
40	168.870.903	7.986.340	176.857.243

Sumber : Hasil Analisis

Berdasarkan gambar 4.32, terlihat bahwa waktu pembaruan pipa diameter 110 mm yang optimal didapatkan pada kisaran usia pipa 22 hingga 25 tahun berdasarkan kurva biaya total.



Gambar 4.32. Kurva biaya siklus hidup pipa diameter 110 mm berdasarkan estimasi MCMC

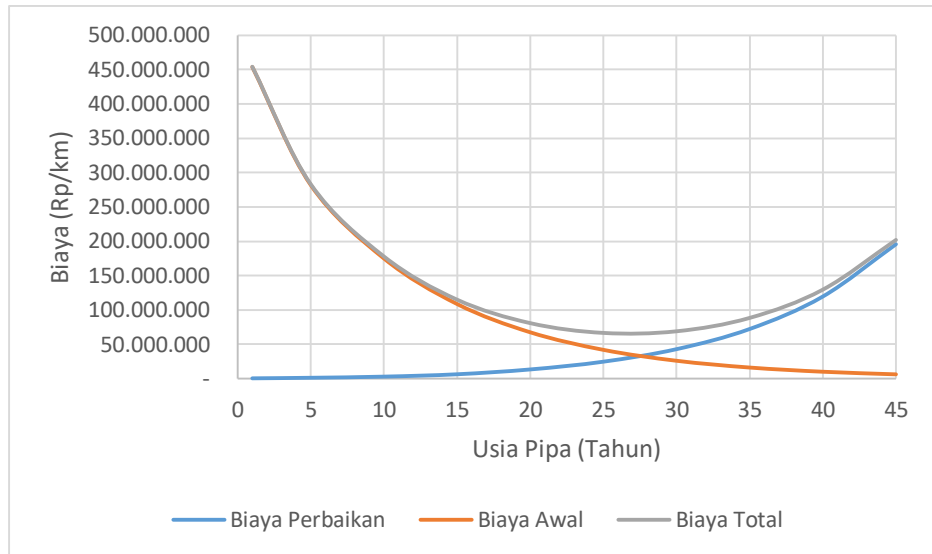
Tabel 4.17 menampilkan hasil analisis LCC dari estimasi MCMC dari pipa diameter 150 mm dan menunjukkan bahwa nilai biaya total terendah berada pada usia 25 tahun.

Tabel 4.17. Hasil analisis LCC untuk pipa 150 mm berdasarkan estimasi MCMC

Usia Pipa (tahun)	Biaya Perbaikan (Rp/km)	Biaya Awal (Rp/km)	Biaya Total (Rp/km)
1	417.007	453.736.538	454.153.545
5	1.231.831	281.734.692	282.966.523
10	2.902.826	174.935.077	177.837.903
15	6.329.601	108.620.920	114.950.521
20	13.357.027	67.445.045	80.802.072
25	24.674.768	41.878.067	66.552.834
30	42.902.102	26.002.985	68.905.086
35	72.257.405	16.145.808	88.403.213
40	119.534.416	10.025.276	129.559.692
45	195.674.513	6.224.908	201.899.421

Sumber : Hasil Analisis

Berdasarkan gambar 4.33, terlihat bahwa waktu pembaruan pipa diameter 150 mm yang optimal didapatkan pada usia 25 hingga 30 tahun berdasarkan kurva biaya total.



Gambar 4.33. Kurva biaya siklus hidup pipa diameter 150 mm berdasarkan estimasi MCMC

4.3.2. Model LCC dengan pendekatan *Maximum Likelihood* (ML)

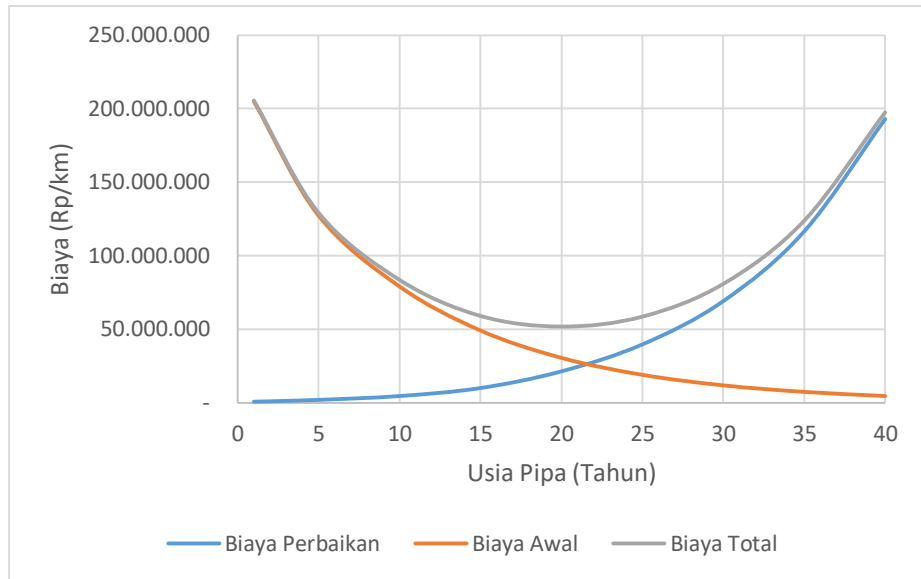
Tabel 4.18 menampilkan hasil analisis LCC dari pendekatan ML dari pipa diameter 63 mm dan menunjukkan bahwa nilai biaya total terendah berada pada usia 20 tahun

Tabel 4.18. Hasil analisis LCC untuk pipa 63 mm berdasarkan estimasi ML

Usia Pipa (tahun)	Biaya Perbaikan (Rp/km)	Biaya Awal (Rp/km)	Biaya Total (Rp/km)
1	630.099	204.980.651	205.610.750
5	1.878.961	127.276.857	129.155.817
10	4.486.047	79.028.914	83.514.962
15	9.928.524	49.070.738	58.999.262
20	21.290.078	30.469.068	51.759.146
25	39.587.974	18.918.894	58.506.868
30	69.056.918	11.747.145	80.804.063
35	116.516.948	7.294.053	123.811.000
40	192.951.800	4.529.033	197.480.833

Sumber : Hasil Analisis

Berdasarkan gambar 4.34, terlihat bahwa waktu pembaruan pipa diameter 63 mm yang optimal didapatkan pada usia 18 hingga 22 tahun berdasarkan kurva biaya total.



Gambar 4.34. Kurva biaya siklus hidup pipa diameter 63 mm berdasarkan estimasi ML

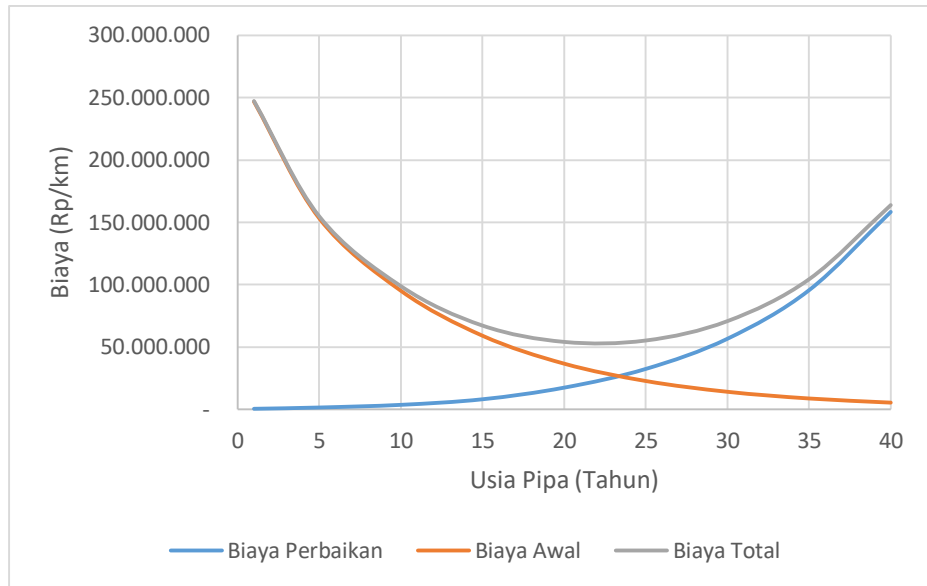
Tabel 4.19 menampilkan analisis LCC dari estimasi ML dari pipa diameter 90 mm dan menunjukkan bahwa nilai biaya total terendah berada pada usia pipa 20 tahun

Tabel 4.19. Hasil analisis LCC untuk pipa 90 mm berdasarkan estimasi ML

Usia Pipa (tahun)	Biaya Perbaikan (Rp/km)	Biaya Awal (Rp/km)	Biaya Total (Rp/km)
1	517.103	246.710.651	247.227.754
5	1.542.005	153.187.904	154.729.909
10	3.681.561	95.117.636	98.799.197
15	8.148.034	59.060.568	67.208.603
20	17.472.112	36.671.966	54.144.078
25	32.488.632	22.770.406	55.259.038
30	56.672.888	14.138.630	70.811.518
35	95.621.874	8.778.977	104.400.851
40	158.349.605	5.451.054	163.800.659

Sumber : Hasil Analisis

Berdasarkan gambar 4.35, terlihat bahwa waktu pembaruan pipa diameter 90 mm yang optimal didapatkan pada usia pipa 20 hingga 25 tahun berdasarkan kurva biaya total.



Gambar 4.35. Kurva biaya siklus hidup pipa diameter 90 mm berdasarkan estimasi ML

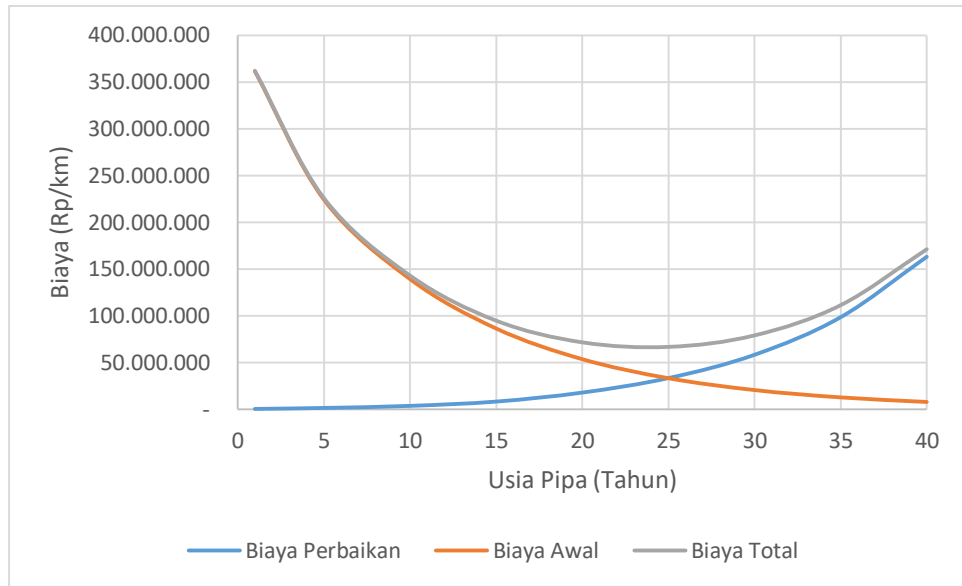
Tabel 4.20 menampilkan analisis LCC dari estimasi ML dari pipa diameter 110 mm dan menunjukkan bahwa nilai biaya total terendah berada pada usia pipa 25 tahun.

Tabel 4.20. Hasil analisis LCC untuk pipa 110 mm berdasarkan estimasi ML

Usia Pipa (tahun)	Biaya Perbaikan (Rp/km)	Biaya Awal (Rp/km)	Biaya Total (Rp/km)
1	532.985	361.455.801	361.988.785
5	1.589.365	224.435.614	226.024.979
10	3.794.632	139.356.858	143.151.491
15	8.398.284	86.529.645	94.927.929
20	18.008.731	53.728.102	71.736.833
25	33.486.453	33.360.924	66.847.376
30	58.413.477	20.714.509	79.127.986
35	98.558.700	12.862.080	111.420.780
40	163.212.983	7.986.340	171.199.323

Sumber : Hasil Analisis

Berdasarkan gambar 4.36, terlihat bahwa waktu pembaruan pipa diameter 110 mm yang optimal didapatkan pada usia 23 hingga 27 tahun berdasarkan kurva biaya total.



Gambar 4.36. Kurva biaya siklus hidup pipa diameter 110 mm berdasarkan estimasi ML

Tabel 4.21 menampilkan analisis LCC dari estimasi ML dari pipa diameter 150 mm dan menunjukkan bahwa nilai biaya total terendah berada pada usia pipa 30 tahun.

Tabel 4.21. Hasil analisis LCC untuk pipa 150 mm berdasarkan estimasi ML

Usia Pipa (tahun)	Biaya Perbaikan (Rp/km)	Biaya Awal (Rp/km)	Biaya Total (Rp/km)
1	339.055	453.736.538	454.075.593
5	1.011.065	281.734.692	282.745.757
10	2.413.933	174.935.077	177.349.010
15	5.342.519	108.620.920	113.963.438
20	11.456.148	67.445.045	78.901.193
25	21.302.208	41.878.067	63.180.275
30	37.159.387	26.002.985	63.162.372
35	62.697.533	16.145.808	78.843.341
40	103.826.972	10.025.276	113.852.248

Sumber : Hasil Analisis

Berdasarkan gambar 4.37, terlihat bahwa waktu pembaruan pipa diameter 150 mm yang optimal didapat pada usia 28 hingga 32 tahun berdasarkan kurva biaya total.



Gambar 4.37. Kurva biaya siklus hidup pipa diameter 150 mm berdasarkan estimasi ML

Kurva biaya total dengan berbagai diameter pipa di atas selaras dengan peneliti terdahulu, yakni Qiang Xu dkk (2013), Francisque dkk (2016) dan Ghobadi dkk (2021) yang merekomendasikan kurva biaya total dalam menjadwalkan pembaruan yang optimal. Gambar 4.38 dan 4.39 menggambarkan kurva biaya total, yang masing-masing mewakili diameter pipa yang berbeda, dengan dua model estimasi. Dengan estimasi MCMC, semakin kecil diameter pipa maka kurva biaya total akan cenderung semakin datar. Keputusan pembaruan pipa yang optimal mengenai pipa dengan diameter 63 mm, 90 mm memiliki pilihan waktu yang lebih leluasa dibandingkan dengan pipa dengan diameter 110 mm dan 150 mm. Pada pipa diameter 63 mm dan 90 mm, kurva biaya total estimasi MCMC relatif lebih datar dibandingkan estimasi ML. Pada kedua diameter ini, estimasi ML tidak memberikan banyak pilihan kepada pengambil keputusan dalam memodifikasi interval pembaruan. Gambar 4.38 dan 4.39 menunjukkan bahwa kurva biaya total pada diameter 63 mm dan 90 mm dengan estimasi ML lebih memandang secara pesimistis dibandingkan estimasi MCMC. Hal ini tercermin dari nilai biaya yang sedikit tidak merata di sekitar titik terendah pada kurva biaya total, sehingga pengambil keputusan mengganti pipa dalam waktu yang lebih singkat untuk mencegah kemungkinan kerugian yang lebih besar. Sebaliknya, pada pipa diameter 110 mm dan 150 mm, kurva biaya total

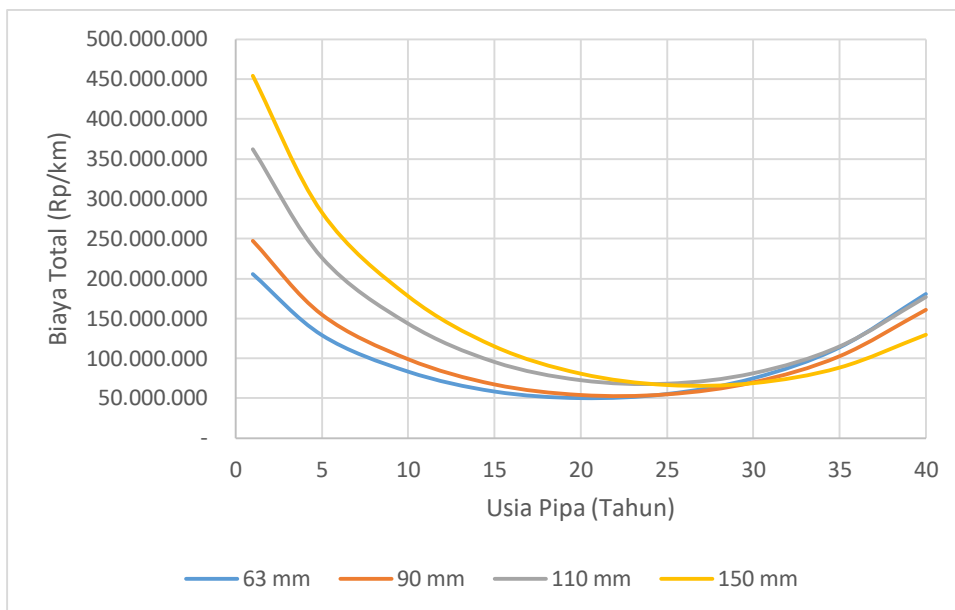
estimasi ML relatif lebih datar dibandingkan estimasi MCMC. Pada kedua diameter ini, estimasi MCMC tidak memberikan banyak pilihan kepada pengambil keputusan dalam memodifikasi interval pembaruan. Dalam analisis LCC, terdapat *trade-off* yang jelas antara dua batasan, yakni meningkatkan batasan waktu perpanjangan dapat mengurangi batas anggaran, dan menetapkan batasan waktu untuk pembaruan berdampak pada kemampuan untuk mematuhi batasan anggaran. Merupakan hal yang penting untuk menentukan bagaimana perbedaan anggaran dan batasan waktu akan berdampak pada fungsi target. Hal ini selaras dengan penelitian Ghobadi dkk (2021) yang menyatakan bahwa kombinasi batasan anggaran tertinggi dan batas pembaruan terendah menghasilkan rencana penjadwalan dengan biaya total terendah. Di sisi lain, jika kurva biaya total tidak merata dan menyimpang secara signifikan dari titik optimal, pembaruan harus dilakukan sedekat mungkin dengan usia optimal. Melakukan penyesuaian interval pembaruan akan mempengaruhi usia sistem secara keseluruhan.

Tabel 4.22 menampilkan rekapitulasi biaya total berdasarkan estimasi MCMC dan menunjukkan bahwa nilai biaya total terendah berada pada rentang usia 20 tahun hingga 25 tahun. Gambar 4.38 menunjukkan kurva biaya total berdasarkan estimasi MCMC pada berbagai diameter pipa.

Tabel 4.22. Rekapitulasi biaya total berdasarkan estimasi MCMC

Usia Pipa (Tahun)	Biaya Total (Rp/km/tahun)			
	63 mm	90 mm	110 mm	150 mm
1	205.594.977	247.252.497	362.044.922	454.153.545
5	129.091.569	154.788.508	226.175.870	282.966.523
10	83.305.305	98.889.480	143.457.793	177.837.903
15	58.395.392	67.285.061	95.471.717	114.950.521
20	50.146.399	54.027.686	72.598.092	80.802.072
25	55.269.315	54.832.057	68.219.925	66.552.834
30	74.949.745	69.884.332	81.323.971	68.905.086
35	113.742.356	102.668.079	114.942.918	88.403.213
40	180.624.973	160.770.482	176.857.243	129.559.692

Sumber : Hasil Analisis



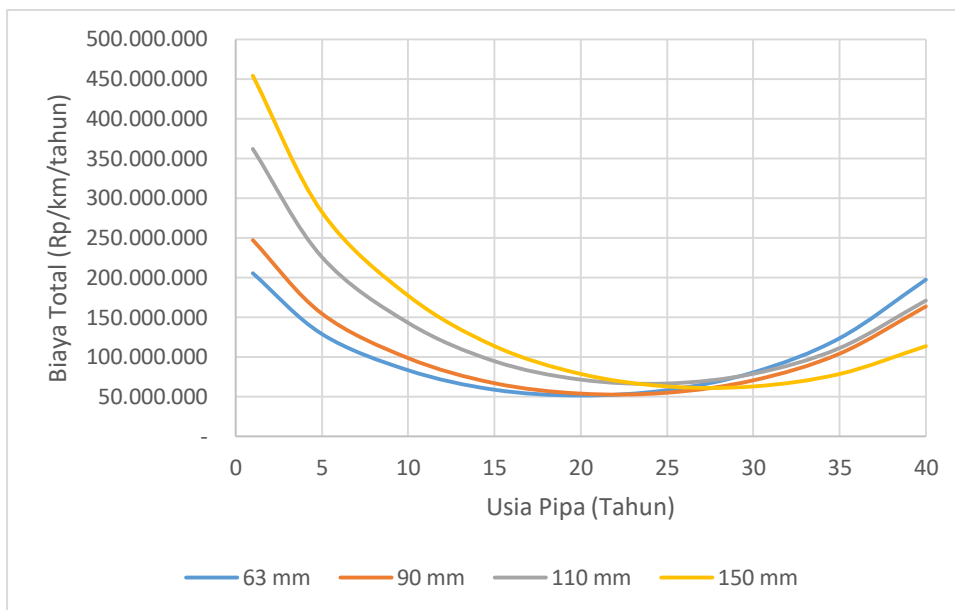
Gambar 4.38. Biaya total siklus hidup pipa berdasarkan estimasi MCMC

Tabel 4.23 menampilkan rekapitulasi biaya total berdasarkan estimasi ML dan menunjukkan bahwa nilai biaya total terendah berada pada rentang usia 20 tahun hingga 30 tahun. Gambar 4.39 menunjukkan kurva biaya total berdasarkan estimasi ML pada berbagai diameter pipa.

Tabel 4.23. Rekapitulasi biaya total berdasarkan estimasi ML

Usia Pipa (Tahun)	Biaya Total (Rp/km)			
	63	90	110	150
1	205.610.750	247.227.754	361.988.785	454.075.593
5	129.155.817	154.729.909	226.024.979	282.745.757
10	83.514.962	98.799.197	143.151.491	177.349.010
15	58.999.262	67.208.603	94.927.929	113.963.438
20	51.759.146	54.144.078	71.736.833	78.901.193
25	58.506.868	55.259.038	66.847.376	63.180.275
30	80.804.063	70.811.518	79.127.986	63.162.372
35	123.811.000	104.400.851	111.420.780	78.843.341
40	197.480.833	163.800.659	171.199.323	113.852.248

Sumber : Hasil Analisis



Gambar 4.39. Biaya total siklus hidup pipa berdasarkan estimasi ML

BAB V
PERANCANGAN SISTEM INFORMASI
MANAJEMEN ASET SPAM

5.1 Perancangan Sistem Informasi

Tahap dalam perancangan sistem informasi adalah sebagai berikut :

- A. Mengidentifikasi kebutuhan organisasi dan tujuan sistem informasi yang akan dikembangkan.

Langkah pertama dalam perencanaan adalah memahami apa yang sebenarnya dibutuhkan organisasi. Misalnya, apakah sistem informasi dibutuhkan untuk mempercepat pelayanan, mengurangi kesalahan pencatatan, atau mendukung pengambilan keputusan manajemen. Identifikasi kebutuhan ini penting agar sistem yang dibangun benar-benar selaras dengan visi, misi, dan strategi organisasi.

- B. Menentukan ruang lingkup sistem, batasan masalah, serta manfaat yang diharapkan.

Ruang lingkup menentukan seberapa luas cakupan sistem yang akan dibuat. Misalnya, apakah sistem hanya digunakan oleh internal organisasi atau juga melibatkan pihak eksternal. Batasan masalah diperlukan agar pengerjaan tidak melebar terlalu jauh dari sasaran utama. Dari sini juga ditentukan manfaat yang akan diperoleh, baik secara operasional maupun strategis.

- C. Melakukan studi kelayakan dari aspek teknis, operasional, hukum, dan ekonomi.

Studi kelayakan dilakukan untuk memastikan sistem benar-benar bisa diwujudkan. Dari aspek teknis, dicek apakah infrastruktur yang ada memadai. Dari aspek operasional, dilihat apakah sumber daya manusia mampu mengoperasikan sistem. Dari aspek hukum, dipastikan bahwa sistem tidak melanggar aturan atau regulasi yang berlaku. Dari aspek ekonomi, dihitung biaya dan manfaat sehingga bisa dinilai apakah proyek ini layak secara finansial.

D. Menyusun jadwal pelaksanaan, estimasi biaya, serta alokasi sumber daya manusia.

Perencanaan ditutup dengan penyusunan rencana kerja yang detail. Jadwal proyek menggambarkan tahapan penyusunan sistem dari awal hingga akhir. Estimasi biaya dibuat agar tidak terjadi kekurangan anggaran di tengah jalan. Sumber daya manusia yang dilibatkan juga harus dialokasikan sesuai dengan keahlian masing-masing, seperti analis sistem, programmer, teknisi jaringan, hingga pelatih pengguna.

5.2. Analisis Perancangan Sistem

A. Mengumpulkan data melalui wawancara, observasi, kuesioner, dan studi dokumen.

Data dikumpulkan dari berbagai pihak yang terlibat dalam sistem lama, termasuk pengguna, operator, maupun manajer. Wawancara memberikan informasi mendalam, observasi memperlihatkan kondisi nyata di lapangan, kuesioner membantu menjaring pendapat banyak orang, sedangkan studi dokumen memberi gambaran administratif yang lebih formal.

B. Mengidentifikasi kelemahan serta kendala pada sistem lama.

Hasil pengumpulan data kemudian dianalisis untuk menemukan kelemahan. Misalnya, data sering terlambat diinput, ada duplikasi pencatatan, sistem sulit dipahami, atau proses terlalu lambat. Dengan mengetahui kelemahan, sistem baru bisa dirancang agar lebih baik.

C. Menentukan kebutuhan fungsional sistem (fitur yang harus ada).

Kebutuhan fungsional meliputi apa saja yang harus bisa dilakukan oleh sistem. Contohnya, sistem akademik harus bisa menerima input nilai, mencetak KRS, dan membuat laporan transkrip. Fitur ini menjadi inti dari sistem yang akan dibangun.

D. Menentukan kebutuhan non-fungsional, seperti kecepatan, keamanan, dan kemudahan penggunaan.

Selain fungsi utama, sistem juga harus memenuhi standar kualitas. Misalnya, sistem harus dapat diakses dalam waktu singkat, memiliki keamanan data yang baik

dengan login dan enkripsi, serta tampilan antarmuka yang ramah pengguna agar mudah dipelajari.

E. Menyusun spesifikasi kebutuhan sistem sebagai dasar perancangan.

Semua kebutuhan tadi dituangkan dalam dokumen spesifikasi sistem. Dokumen ini menjadi acuan resmi bagi tim perancang dan pengembang dalam membuat sistem agar tidak terjadi kesalahpahaman dengan pihak pengguna.

5.3 Perancangan Sistem Informasi

Perancangan sistem informasi dilakukan dengan tahap sebagai berikut:

A. Merancang arsitektur sistem, termasuk perangkat keras, perangkat lunak, dan jaringan.

Arsitektur sistem menentukan pondasi dari sistem yang akan dibuat. Apakah sistem berbasis desktop, berbasis web, atau aplikasi mobile. Perangkat keras dan jaringan yang mendukung juga harus dipilih sesuai kebutuhan dan kemampuan organisasi.

B. Membuat rancangan basis data untuk penyimpanan dan pengolahan data.

Database menjadi inti dari sistem informasi. Perancang harus membuat tabel, relasi antar data, serta aturan integritas agar data tersimpan dengan rapi, efisien, dan terhindar dari duplikasi.

C. Merancang alur kerja sistem menggunakan flowchart, DFD, atau UML.

Diagram digunakan untuk menggambarkan bagaimana data diproses dari input hingga output. Flowchart memperlihatkan langkah-langkah proses, DFD menunjukkan aliran data, sementara UML dipakai untuk desain yang lebih detail dan kompleks.

D. Menyusun rancangan antarmuka pengguna agar mudah digunakan (user friendly).

User interface dirancang agar pengguna bisa mengoperasikan sistem dengan cepat dan nyaman. Antarmuka yang sederhana, konsisten, dan jelas sangat membantu kelancaran penggunaan sistem.

E. Menyusun rancangan output (laporan), input (form), dan proses yang terintegrasi.

Laporan yang dihasilkan sistem harus sesuai kebutuhan manajemen, formulir input harus mudah diisi, dan semua proses harus terhubung agar sistem berjalan sebagai satu kesatuan yang efektif.

5.4 Pengembangan Aplikasi

Pengembangan aplikasi dilakukan dengan tahap sebagai berikut:

A. Menuliskan kode program (coding) sesuai dengan desain yang sudah dibuat.

Programmer mulai menuliskan kode sesuai rancangan. Bahasa pemrograman yang dipilih disesuaikan dengan platform, misalnya PHP untuk web, Java untuk Android, atau Python untuk aplikasi berbasis data.

B. Melakukan uji coba awal pada modul-modul program (unit testing).

Setiap modul diuji satu per satu. Misalnya, modul login diuji apakah bisa menerima username dan password dengan benar.

C. Mengintegrasikan seluruh modul agar bekerja sebagai sistem utuh (integration testing).

Setelah modul diuji, semuanya digabung menjadi satu sistem lengkap. Proses ini memastikan tidak ada konflik antar modul.

D. Menyiapkan infrastruktur seperti server, jaringan, dan perangkat pendukung lainnya.

Server diatur, jaringan disiapkan, dan perangkat keras dipasang agar sistem bisa berjalan optimal.

E. Menginstal perangkat lunak ke lingkungan kerja organisasi.

Aplikasi sistem dipasang ke komputer pengguna atau server utama sehingga siap digunakan untuk operasional.

5.5 Uji Coba Sistem Informasi

Tahap uji coba aplikasi terdiri atas:

A. Melakukan pengujian fungsional untuk memastikan semua fitur berjalan dengan baik.

Setiap fungsi utama diuji. Misalnya, fitur input data diuji apakah bisa menyimpan ke database dengan benar.

B. Melakukan pengujian performa untuk mengecek kecepatan dan kestabilan sistem.

Dilihat bagaimana sistem bekerja saat diakses banyak pengguna secara bersamaan atau saat mengolah data dalam jumlah besar.

C. Melakukan pengujian keamanan agar data terlindungi dari risiko penyalahgunaan.

Keamanan diuji dengan memastikan login bekerja, akses hanya bisa dilakukan sesuai hak pengguna, dan data penting terenkripsi.

D. Melakukan user acceptance test (UAT) bersama pengguna untuk memastikan sistem sesuai harapan.

Pengguna mencoba sistem langsung. Jika mereka merasa puas, berarti sistem sudah sesuai kebutuhan.

E. Menyempurnakan sistem berdasarkan umpan balik dari hasil pengujian.

Sistem diperbaiki dan disempurnakan berdasarkan masukan pengguna maupun temuan dari tim pengembang.

5.6 Penerapan (Deployment) Sistem Informasi

Pada tahap awal implementasi, biasanya masih banyak kendala yang muncul, baik dari sisi teknis maupun pengguna. Karena itu, tim pengembang atau tim IT biasanya memberikan support intensif.

Dukungan teknis meliputi:

- a. Helpdesk atau support center → pengguna bisa melaporkan kendala.
- b. Pendampingan on-site → tim teknis hadir langsung di lapangan untuk membantu.
- c. Remote support → tim membantu pengguna melalui aplikasi remote desktop atau sistem tiket.
- d. Update cepat → jika ada bug atau error yang kritis, segera diperbaiki tanpa menunggu lama.

Dukungan teknis bertujuan membangun kepercayaan pengguna bahwa sistem baru dapat diandalkan.

Data adalah aset berharga organisasi. Oleh karena itu, ketika beralih ke sistem baru, data lama harus dipindahkan dengan aman dan akurat agar sistem baru bisa langsung digunakan tanpa harus memulai dari nol.

Tahapan data migration meliputi:

1. Analisis data lama → mengecek struktur, format, dan kualitas data di sistem lama.
2. Pembersihan data (data cleansing) → menghapus data ganda, memperbaiki kesalahan input, dan memastikan konsistensi.
3. Transformasi data (data transformation) → menyesuaikan format data agar sesuai dengan sistem baru.
4. Migrasi (data transfer) → proses pemindahan data ke sistem baru, bisa dilakukan secara manual atau otomatis dengan skrip.
5. Verifikasi data → memastikan data yang dipindahkan lengkap, akurat, dan tidak ada yang hilang.

Data migration memastikan sistem baru langsung siap pakai dengan data yang sudah ada sebelumnya.

5.7 Pemeliharaan Sistem Informasi

A. *Corrective Maintenance* (Pemeliharaan Korektif)

Corrective maintenance dilakukan ketika sistem mengalami error, bug, atau kerusakan yang menyebabkan fungsi tidak berjalan sebagaimana mestinya. Tujuan utamanya adalah memulihkan sistem agar kembali stabil dan bisa digunakan normal.

Kegiatan yang dilakukan meliputi:

- a. Memperbaiki error pada perhitungan laporan keuangan.
 - b. Mengatasi bug yang membuat aplikasi sering *crash*.
 - c. Mengatasi error kompatibilitas setelah sistem operasi diperbarui.
- ### B. *Adaptive Maintenance* (Pemeliharaan Adaptif)

Adaptive maintenance dilakukan ketika ada perubahan lingkungan eksternal atau internal organisasi yang memengaruhi sistem. Sistem harus diubah atau disesuaikan agar tetap relevan dan bisa digunakan.

Kegiatan yang dilakukan meliputi:

- a. Menyesuaikan sistem payroll ketika ada perubahan kebijakan perpajakan pemerintah pada aspek keuangan aset
 - b. Menambahkan modul baru karena organisasi mengubah prosedur kerja.
 - c. Migrasi sistem ke server cloud karena kebijakan organisasi mengadopsi teknologi baru dalam manajemen aset
- ### C. *Perfective Maintenance* (Pemeliharaan Perfektif)

Perfective maintenance dilakukan untuk meningkatkan kualitas sistem, kinerja, maupun kenyamanan pengguna, meskipun tidak ada error. Biasanya terkait dengan peningkatan fungsi atau penambahan fitur baru.

Kegiatan meliputi:

- Membuat tampilan antarmuka (UI) lebih sederhana dan mudah digunakan.

- Meningkatkan performa aplikasi agar lebih cepat memproses data.
- Menambahkan fitur baru seperti integrasi dengan aplikasi ID. *Preventive Maintenance* (Pemeliharaan Preventif)

Preventive maintenance dilakukan untuk mencegah masalah di masa depan. Meskipun sistem saat ini berjalan normal, tindakan pencegahan diambil agar tetap aman, stabil, dan tidak mudah rusak.

Kegiatan meliputi:

- Melakukan backup data rutin agar siap jika terjadi kerusakan.
- Update sistem operasi atau database untuk menutup celah keamanan.
- Audit sistem secara berkala untuk mendeteksi potensi masalah.

Pembaruan Teknologi (Technology Update / Modernization)

Jenis pemeliharaan ini tidak selalu disebutkan dalam standar klasik (seperti ISO/IEC 14764), tetapi dalam praktik modern sangat penting agar sistem tidak ketinggalan zaman.

Kegiatan yang dilakukan meliputi:

- Migrasi dari sistem lama (*legacy system*) ke platform baru yang lebih efisien.
- Memindahkan aplikasi dari desktop ke berbasis web atau mobile.
- Menggunakan teknologi terbaru (misalnya dari database konvensional ke *cloud database*).

Tabel 5.1. Jenis Pemeliharaan Sistem Informasi yang dilakukan

Jenis Pemeliharaan	Fokus Utama	Kegiatan	Karakteristik
Corrective (A)	Memperbaiki bug/error	Fix bug laporan, perbaikan error sistem	Reaktif (setelah masalah muncul)
Adaptive (B)	Menyesuaikan dengan perubahan kebutuhan/lingkungan	Update aturan pajak, migrasi ke cloud	Menjaga relevansi

Jenis Pemeliharaan	Fokus Utama	Kegiatan	Karakteristik
Perfective (C)	Meningkatkan kualitas & fitur	UI lebih mudah, tambah fitur baru	Penyempurnaan
Preventive (D)	Pencegahan masalah di masa depan	Backup, update keamanan, audit sistem	Proaktif
Technology Update (E)	Modernisasi agar tidak ketinggalan zaman	Migrasi ke platform baru, adopsi teknologi terbaru	Strategis, jangka panjang

5.8 Ruang Lingkup Sistem

Sistem informasi manajemen aset SPAM akan mencakup modul-modul utama berikut:

A. Manajemen Master Aset

Modul ini berfungsi untuk mendokumentasikan seluruh aset SPAM dalam satu database terpusat. Setiap aset akan didaftarkan dengan informasi identifikasi unik (ID, barcode/QR), kategori, subkategori, spesifikasi teknis, lokasi geografis, nilai perolehan, umur ekonomis, status operasional, dan dokumentasi pendukung (gambar teknis, manual operasi, foto). Fungsi tambahan termasuk:

- a. Pencetakan label barcode/QR untuk ditempel pada aset.
- b. Relasi parent-child untuk mendefinisikan struktur aset yang kompleks.
- c. Pencarian cepat berbasis kata kunci, filter, maupun lokasi.

B. GIS & Visualisasi Jaringan

Modul ini memungkinkan organisasi memetakan seluruh jaringan SPAM pada peta digital. Peta bersifat interaktif, dapat diperbesar atau diperkecil, dan dilengkapi dengan berbagai layer (pipa utama, pipa distribusi, pompa, reservoir, valve, meter pelanggan). Fitur tambahan meliputi:

- a. Klik pada titik atau garis untuk membuka detail aset.
- b. Analisis spasial dasar (contoh: menghitung panjang jaringan di suatu wilayah, mengidentifikasi aset dalam radius tertentu).

- c. Import dan export data GIS dalam format standar (shapefile, GeoJSON).
- d. Integrasi dengan PostGIS untuk penyimpanan geospasial.

C. Manajemen Pemeliharaan (Work Order & Preventive Maintenance)

Modul CMMS memfasilitasi pengelolaan aktivitas pemeliharaan aset, baik preventif maupun korektif. Sistem dapat membuat Work Order (WO) otomatis berdasarkan jadwal PM (misalnya setiap 3 bulan) atau manual sesuai kebutuhan. Lifecycle WO mencakup pembuatan, penugasan teknisi, pelaksanaan, penutupan, dan verifikasi oleh manajer. Teknisi dapat:

- a. Mengakses WO melalui aplikasi mobile.
- b. Melengkapi checklist inspeksi.
- c. Mengunggah foto kondisi lapangan.
- d. Menyimpan catatan tindakan yang dilakukan.
- e. Memberikan tanda tangan digital sebagai bukti.

Semua histori pemeliharaan disimpan dan dapat digunakan untuk analisis.

D. Inventaris Sparepart & Bill of Material (BOM)

Modul ini memastikan ketersediaan suku cadang untuk mendukung pemeliharaan aset. Fungsi utamanya:

- a. Menyimpan data sparepart: kode, nama, stok, lokasi penyimpanan, supplier, harga.
- b. Menentukan reorder point agar sistem mengirim notifikasi saat stok menipis.
- c. Mengelola mutasi stok (penerimaan, pengeluaran, pemakaian).
- d. Menyusun BOM yang menghubungkan aset utama dengan daftar sparepart yang diperlukan.

E. Manajemen Kontrak & Vendor

Modul ini mengelola hubungan dengan pihak ketiga. Setiap kontrak disimpan dengan atribut nomor kontrak, pihak vendor, ruang lingkup, SLA, nilai kontrak, tanggal mulai dan berakhir, serta dokumen pendukung. Sistem juga mengingatkan manajemen jika kontrak akan berakhir, sehingga proses perpanjangan atau pengadaan baru dapat dipersiapkan lebih awal.

F. Keuangan & Depresiasi (Integrasi Dasar)

Modul ini menghubungkan informasi teknis aset dengan aspek finansialnya. Sistem menyimpan nilai perolehan, umur ekonomis, metode depresiasi, dan menghitung depresiasi secara otomatis. Outputnya dapat berupa jurnal depresiasi yang diekspor ke CSV untuk diunggah ke sistem ERP atau akuntansi. Hal ini memungkinkan laporan biaya yang lebih akurat dan transparan.

G. Dashboard & Pelaporan

Modul ini menampilkan indikator kinerja utama dalam bentuk visual yang mudah dipahami: grafik batang, garis tren, dan diagram lingkaran. Beberapa contoh KPI yang ditampilkan:

- a. Availability aset (% ketersediaan).
- b. Downtime per bulan.
- c. Jumlah WO preventif vs korektif.
- d. MTTR dan MTBF.
- e. Biaya pemeliharaan per aset atau per wilayah.

Laporan dapat difilter berdasarkan periode waktu dan diekspor dalam format PDF atau Excel.

H. Mobile App untuk Teknisi (Offline-Capable)

Aplikasi mobile dirancang khusus untuk mendukung teknisi di lapangan.

Fungsinya mencakup:

- a. Menerima daftar WO dan detail instruksi.
- b. Mengakses informasi aset di lokasi.
- c. Melengkapi checklist inspeksi.
- d. Mengunggah foto kondisi aset dan sparepart.
- e. Menandatangani digital laporan pekerjaan.

Fitur offline memastikan teknisi tetap dapat bekerja tanpa koneksi internet, dengan sinkronisasi otomatis saat perangkat online kembali.

I. Manajemen Pengguna & Audit

Modul ini mengatur hak akses pengguna berdasarkan peran. Peran dasar meliputi:

- a. Administrator: mengelola seluruh aspek sistem.
- b. Manajer Aset: membuat WO, memverifikasi pekerjaan, mengakses laporan.
- c. Teknisi: menerima tugas, melaporkan pekerjaan.
- d. Viewer: hanya dapat melihat data.

Setiap perubahan signifikan dalam sistem dicatat pada audit log, termasuk siapa yang melakukan, kapan dilakukan, dan perubahan apa yang terjadi.

Lingkup yang tidak termasuk pada fase awal:

- a. Integrasi penuh SCADA real-time: pemantauan otomatis dari sensor pompa, level reservoir, dan parameter kualitas air akan ditangani di fase lanjutan.
- b. Analitik prediktif berbasis Machine Learning: prediksi kegagalan pompa atau kebocoran jaringan berdasarkan data historis akan dikembangkan sebagai fitur tambahan di masa depan.
- c. Multi-tenant untuk beberapa PDAM: sistem awal difokuskan pada satu instansi. Fitur multi-tenant baru akan dipertimbangkan apabila ada kebutuhan lintas organisasi.

5.9 Pemangku Kepentingan

Pemangku kepentingan utama dalam proyek ini meliputi:

1. Pemilik Proyek / Manajer Aset

Bertanggung jawab atas keberhasilan implementasi sistem. Menentukan kebutuhan, memvalidasi hasil, dan menjadi penghubung utama antara tim pengembang dan organisasi.

2. Tim Operasional & Teknisi Lapangan

Pengguna sehari-hari sistem, terutama aplikasi mobile. Mereka membutuhkan antarmuka sederhana untuk menerima dan menutup WO, mengisi checklist, dan melaporkan kondisi aset.

3. Bagian Keuangan / Akuntansi

Menggunakan sistem untuk memperoleh informasi depresiasi aset, biaya pemeliharaan, serta laporan yang dapat diintegrasikan ke ERP. Fokus pada transparansi dan akurasi data finansial.

4. Tim GIS / Perencanaan

Bertugas memastikan data spasial (peta jaringan, lokasi aset) akurat dan mutakhir. Modul GIS mendukung mereka dalam perencanaan pengembangan jaringan dan analisis spasial.

5. Vendor / Kontraktor

Pihak eksternal yang mungkin diberi akses terbatas untuk mengelola kontrak, SLA, atau klaim garansi. Mereka akan diuntungkan dengan transparansi status kontrak dan pekerjaan.

6. Auditor / Regulator

Menggunakan sistem untuk memverifikasi kepatuhan pengelolaan aset, pemeliharaan, dan laporan keuangan. Modul audit log penting untuk kebutuhan ini.

7. Pengguna Akhir (Admin Sistem)

Bertugas menjaga operasional sistem sehari-hari: manajemen user, konfigurasi modul, backup data, serta memastikan sistem tetap berjalan stabil.

REFERENSI

- Atique, F., & Attoh-Okine, N. (2018). Copula parameter estimation using Bayesian inference for pipe data analysis. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 45(1), 61–70. <https://doi.org/10.1139/cjce-2017-0084>
- Barton, N. A., Hallett, S. H., Jude, S. R., & Tran, T. H. (2022). An evolution of statistical pipe failure models for drinking water networks: a targeted review. *Water Supply*, 22(4), 3784–3813. <https://doi.org/10.2166/ws.2022.019>
- Bergion, V., Lindhe, A., Sokolova, E., & Rosén, L. (2018). Risk-based cost-benefit analysis for evaluating microbial risk mitigation in a drinking water system. *Water Research*, 132, 111–123. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.054>
- D’Ercole, M., Righetti, M., Raspati, G. S., Bertola, P., & Maria Ugarelli, R. (2018). Rehabilitation Planning of Water Distribution Network through a Reliability—Based Risk Assessment. In *Water* (Vol. 10, Issue 3). <https://doi.org/10.3390/w10030277>
- Dawood, T., Elwakil, E., Novoa, H. M., & Gárate Delgado, J. F. (2020). Water pipe failure prediction and risk models: state-of-the-art review. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 47(10), 1117–1127. <https://doi.org/10.1139/cjce-2019-0481>
- Expósito, A. (2018). Irrigated Agriculture and the Cost Recovery Principle of Water Services: Assessment and Discussion of the Case of the Guadalquivir River Basin (Spain). In *Water* (Vol. 10, Issue 10). <https://doi.org/10.3390/w10101338>
- Fathollahi, A., & Coupe, S. J. (2021). Life cycle assessment (LCA) and life cycle costing (LCC) of road drainage systems for sustainability evaluation: Quantifying the contribution of different life cycle phases. *Science of The Total Environment*, 776, 145937. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145937>
- Francisque, A., Tesfamariam, S., Kabir, G., Haider, H., Reeder, A., & Sadiq, R. (2016). Water mains renewal planning framework for small to medium sized water utilities: a life cycle cost analysis approach. *Urban Water Journal*, 14(5), 493–501. <https://doi.org/10.1080/1573062x.2016.1223321>
- Francisque, A., Tesfamariam, S., Kabir, G., Haider, H., Reeder, A., & Sadiq, R. (2017). Water mains renewal planning framework for small to medium sized water utilities: a life cycle cost analysis approach. *Urban Water Journal*, 14(5), 493–501. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2016.1223321>
- García-López, M., & Montano, B. (2020). Water Price Effects on Consumption and Territorial Imbalances in Spain in the Context of the Water Framework Directive. In *Water* (Vol. 12, Issue 6). <https://doi.org/10.3390/w12061604>
- Ghobadi, F., Jeong, G., & Kang, D. (2021). Water Pipe Replacement Scheduling Based on Life Cycle Cost Assessment and Optimization Algorithm. *Water*, 13(5). <https://doi.org/10.3390/w13050605>

- Godfrey, S., & Hailemichael, G. (2017). Life cycle cost analysis of water supply infrastructure affected by low rainfall in Ethiopia. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 7(4), 601–610.
<https://doi.org/10.2166/washdev.2017.026>
- Gómez-Rubio, V. (2016). Spatial Point Patterns: Methodology and Applications with R. *Journal of Statistical Software*. <https://doi.org/10.18637/jss.v075.b02>
- Gutiérrez-Martín, C., Borrego-Marín, M. M., & Berbel, J. (2017). The Economic Analysis of Water Use in the Water Framework Directive Based on the System of Environmental-Economic Accounting for Water: A Case Study of the Guadalquivir River Basin. In *Water* (Vol. 9, Issue 3).
<https://doi.org/10.3390/w9030180>
- 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>
- Harris, S., Tsalidis, G., Corbera, J. B., Espi Gallart, J. J., & Tegstedt, F. (2021). Application of LCA and LCC in the early stages of wastewater treatment design: A multiple case study of brine effluents. *Journal of Cleaner Production*, 307, 127298. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127298>
- Hastings, N. A. J. (2015). Asset Management Personnel. In *Physical Asset Management* (pp. 43–57). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14777-2_3
- Iriawan, N. (2021). Mengolah Data Statistik Dengan Mudah Menggunakan Minitab 14 (S. P. Astuti (ed.); 4th ed.). Andi Publisher.
<https://ebooks.gramedia.com/id/buku/mengolah-data-statistik-dengan-mudah-menggunakan-minitab-14>
- Jang, D., & Choi, G. (2017). Estimation of non-revenue water ratio using MRA and ANN in water distribution networks. *Water* (Switzerland).
<https://doi.org/10.3390/w10010002>
- Karimian, S. F. (2015). Failure Rate Prediction Models of Water Distribution Networks.
<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:114133072>
- Kerwin, S., Garcia de Soto, B., Adey, B., Sampatakaki, K., & Heller, H. (2023). Combining recorded failures and expert opinion in the development of ANN pipe failure prediction models. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 8(1), 86–108. <https://doi.org/10.1080/23789689.2020.1787033>
- Kim, K., Seo, J., Hyung, J., Kim, T., Kim, J., & Koo, J. (2019). Economic-based approach for predicting optimal water pipe renewal period based on risk and failure rate. *Environmental Engineering Research*, 24(1), 63–73.
<https://doi.org/10.4491/eer.2017.188>
- Kleiner, Y., & Rajani, B. (2011). Comparison of four models to rank failure likelihood of individual pipes. *Journal of Hydroinformatics*, 14(3), 659–681.
<https://doi.org/10.2166/hydro.2011.029>

- Kročová, Š. (2016). Water supply systems and their influence on increasing operational safety in industry. *Perspectives in Science*, 7, 236–239. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pisc.2015.11.038>
- Lin, P., & Yuan, X.-X. (2019). A two-time-scale point process model of water main breaks for infrastructure asset management. *Water Research*, 150, 296–309. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.11.066>
- López-Serrano, M. J., Lakho, F. H., Van Hulle, S. W. H., & Batlles-de-laFuente, A. (2023). Life cycle cost assessment and economic analysis of a decentralized wastewater treatment to achieve water sustainability within the framework of circular economy. *Oeconomia Copernicana*, 14(1 SE-Articles), 103–133. <https://doi.org/10.24136/oc.2023.003>
- Martínez-Codina, Á., Cueto-Felgueroso, L., Castillo, M., & Garrote, L. (2015). Use of Pressure Management to Reduce the Probability of Pipe Breaks: A Bayesian Approach. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(9). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000519](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000519)
- Martínez-Dalmau, J., Gutiérrez-Martín, C., Expósito, A., & Berbel, J. (2023). Analysis of Water Pricing Policy Effects in a Mediterranean Basin Through a Hydroeconomic Model. *Water Resources Management*, 37(4), 1599–1618. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03446-8>
- Mazumder, R. K., Salman, A. M., Li, Y., & Yu, X. (2018). Performance Evaluation of Water Distribution Systems and Asset Management. *Journal of Infrastructure Systems*, 24(3), 03118001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000426](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000426)
- Mcharo, M., & Maghenda, M. (2021). Cost-benefit analysis of sustainable land and water management practices in selected highland water catchments of Kenya. *Scientific African*, 12, e00779. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00779>
- Mo, W., Cornejo, P. K., Malley, J. P., Kane, T. E., & Collins, M. R. (2018). Life cycle environmental and economic implications of small drinking water system upgrades to reduce disinfection byproducts. *Water Research*, 143, 155–164. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.06.047>
- Nafi, A., & Brans, J. (2019). Cost–Benefit Prediction of Asset Management Actions on Water Distribution Networks. In *Water* (Vol. 11, Issue 8). <https://doi.org/10.3390/w11081542>
- Nishiyama, M., & Fillion, Y. (2014). Forecasting breaks in cast iron water mains in the city of Kingston with an artificial neural network model. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 41(10), 918–923. <https://doi.org/10.1139/cjce-2014-0114>
- Nugroho, W., 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>
- Ramirez, R., Torres, D., López-Jimenez, P. A., & Cobacho, R. (2020). A Front-Line and Cost-Effective Model for the Assessment of Service Life of Network Pipes. *Water*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/w12030667>

- Raspati, G. S., Bruaset, S., Bosco, C., Mushom, L., Johannessen, B., & Ugarelli, R. (2022). A Risk-Based Approach in Rehabilitation of Water Distribution Networks. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 19, Issue 3). <https://doi.org/10.3390/ijerph19031594>
- Saboori, H. (2023). Hybrid renewable energy powered reverse osmosis desalination – Minimization and comprehensive analysis of levelized cost of water. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 56, 103065. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103065>
- Sanabria, S., & Torres, J. (2020). Water Price: Environment Sustainability and Resource Cost. In *Water* (Vol. 12, Issue 11). <https://doi.org/10.3390/w12113176>
- Sarkar, D. (2023). Life cycle costing analysis of grey water recycling systems for commercial and residential projects of Ahmedabad, India. *Materials Today: Proceedings*, 77, 254–259. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.298>
- Scheidegger, A., Leitão, J. P., & Scholten, L. (2015). Statistical failure models for water distribution pipes – A review from a unified perspective. *Water Research*, 83, 237–247. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.06.027>
- Shin, H., Kobayashi, K., Koo, J., & Do, M. (2015). Estimating burst probability of water pipelines with a competing hazard model. *Journal of Hydroinformatics*, 18(1), 126–135.
- Skourtos, M., Damigos, D., Kontogianni, A., Tourkolias, C., Marafie, A., & Zainal, M. (2020). A combined probabilistic framework to support investment appraisal under uncertainty in desalination projects: an application to Kuwait's water/energy nexus. *Water Supply*, 21(1), 276–288. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.278>
- Thomas, S. J., Haribhau Bade, M., Sahoo, S. S., Thomas, S., Kumar, A., & Awad, M. M. (2022). Urban Water Management with a Full Cost Recovery Policy: The Impact of Externalities on Pricing. In *Sustainability* (Vol. 14, Issue 21). <https://doi.org/10.3390/su142114495>
- Watson, T. G., Christian, C. D., Mason, A. J., Smith, M. H., & Meyer, R. (2004). Bayesian-based pipe failure model. *Journal of Hydroinformatics*, 6(4), 259–264. <https://doi.org/10.2166/hydro.2004.0019>
- Wilson, D., Filion, Y., & Moore, I. (2015). State-of-the-art review of water pipe failure prediction models and applicability to large-diameter mains. *Urban Water Journal*, 14(2), 173–184. <https://doi.org/10.1080/1573062x.2015.1080848>
- Xu, Q., Chen, Q., Ma, J., & Blanckaert, K. (2013). Optimal pipe replacement strategy based on break rate prediction through genetic programming for water distribution network. *Journal of Hydro-Environment Research*, 7(2), 134–140. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2013.03.003>
- Zangenehmadar, Z., Moselhi, O., & Golnaraghi, S. (2020). Optimized planning of repair works for pipelines in water distribution networks using genetic algorithm. *Engineering Reports*, 2(6). <https://doi.org/10.1002/eng2.12179>

- Zechman, B. E., Steven, B., Maria, C., M., F. K., Marcio, G., Erfan, G., Yehuda, K., Juneseok, L., Avi, O., Fayzul, P., E., P. J., Juan, S., Ehsan, S., Lauryn, S., E., van Z. J., & C., E. Y. Y. (2022). Effects of the COVID-19 Pandemic on Water Utility Operations and Vulnerability. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 148(6), 4022027. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001560](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001560)
- Zetland, D. (2021). The role of prices in managing water scarcity. *Water Security*, 12, 100081. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasec.2020.100081>