



TESIS - BM185407

**ANALISIS POLA PERSEBARAN LOKASI KEBOCORAN PIPA
PADA JARINGAN DISTRIBUSI AIR BERSIH KOTA MALANG
MENGUNAKAN *SPATIAL POISSON POINT PROCESS***

WIDYO NUGROHO
09211750025007

Dosen Pembimbing
Prof. Drs. Nur Iriawan, M.IKom., Ph.D.

Departemen Manajemen Teknologi
Fakultas Bisnis Dan Manajemen Teknologi
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2019



TESIS - BM185407

**ANALISIS POLA PERSEBARAN LOKASI KEBOCORAN PIPA
PADA JARINGAN DISTRIBUSI AIR BERSIH KOTA MALANG
MENGUNAKAN *SPATIAL POISSON POINT PROCESS***

**WIDYO NUGROHO
09211750025007**

**Dosen Pembimbing
Prof. Drs. Nur Iriawan, M.IKom., Ph.D.**

**Departemen Manajemen Teknologi
Fakultas Bisnis Dan Manajemen Teknologi
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2019**

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

Magister Manajemen Teknologi (M.MT)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Widyo Nugroho

NRP: 09211750025007

Tanggal Ujian: 3 Juli 2019

Periode Wisuda: September 2019

Disetujui oleh:

Pembimbing:

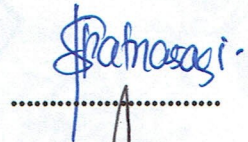
1. Prof. Drs. Nur Iriawan, M.Ikom, Ph.D
NIP: 19621015 198803 1 002



.....

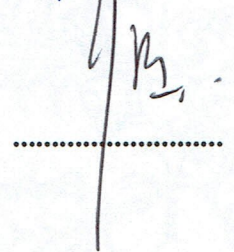
Penguji:

1. Dr. Vita Ratnasari, M.Si
NIP: 19700910 199702 2 001



.....

2. Dr. Ir. Endah Angreni, MT




.....

Kepala Departemen Manajemen Teknologi

Fakultas Bisnis dan Manajemen Teknologi




Prof. Ir. Nyoman Pujawan, M.Eng, Ph.D, CSCP
NIP: 19691231 199412 1 076

ANALISIS POLA PERSEBARAN LOKASI KEBOCORAN PIPA PADA JARINGAN DISTRIBUSI AIR BERSIH KOTA MALANG MENGGUNAKAN *SPATIAL POISSON POINT PROCESS*

Nama Mahasiswa : Widyo Nugroho
ID Mahasiswa : 09211750025007
Dosen Pembimbing : Prof. Drs. Nur Iriawan, M.Ikom., Ph.D.

ABSTRAK

Strategi manajemen kebocoran jaringan distribusi air bersih terdiri dari empat faktor penting, yang meliputi manajemen tekanan, waktu perbaikan, pengendalian kebocoran aktif, dan manajemen aset. Faktor-faktor ini mempengaruhi bagaimana kebocoran dapat dikelola dan dengan demikian volume dan nilai kebocoran secara ekonomi, dalam sebuah jaringan distribusi air bersih dapat diketahui. Volume kehilangan fisik tahunan pada sistem distribusi air bersih memiliki kecenderungan yang meningkat seiring dengan meningkatnya area layanan jaringan distribusi. Tingkat kenaikan tersebut dapat dihambat dengan menerapkan kombinasi yang tepat di antara keempat faktor dalam strategi pengelolaan kebocoran yang efektif.

Dalam penelitian ini, faktor-faktor yang mempengaruhi kehilangan air dalam sistem distribusi air di Kota Malang dianalisis dengan berfokus pada aspek fisik dan operasional jaringan. Dalam praktek operasional dan pemeliharaan jaringan, lazimnya otorita penyedia air bersih membagi divisi operasional dan pemeliharaan ke dalam beberapa sub divisi berdasarkan batas wilayah zona layanan. Sementara di sisi lain, tidak semua zona layanan memerlukan prioritas yang sama dalam penanganan kebocoran. Dengan demikian, kajian yang melibatkan parameter spasial dalam pengelolaan kebocoran merupakan kebutuhan otorita penyedia air bersih saat ini. Data dalam penelitian ini meliputi data spasial serta data kuantitatif parameter operasional dan fisik jaringan. Distribusi *poisson* dalam proses spasial dipilih sebagai pendekatan sebaran titik kebocoran.

Dari analisis didapatkan bahwa pola persebaran kebocoran pipa di Kota Malang termasuk dalam kriteria *inhomogeneous poisson process* dengan adanya dua jenis intensitas persebaran lokasi kebocoran. Berdasarkan hasil estimasi parameter didapatkan bahwa pada wilayah intensitas kebocoran tinggi dipengaruhi oleh waktu perbaikan, diameter pipa, rasio panjang pipa, rasio debit, dan rasio deteriorisasi pipa namun tidak dipengaruhi oleh rasio kebutuhan tekanan hidraulik. Sedangkan pada intensitas kebocoran rendah dipengaruhi oleh diameter pipa, rasio panjang pipa, rasio debit, rasio deteriorisasi pipa, dan rasio kebutuhan energi hidraulik namun tidak dipengaruhi oleh waktu perbaikan.

Kata Kunci : Spatial Point Process, Kehilangan Air, Kebocoran

ANALYSIS OF LEAKAGE LOCATION DISTRIBUTION PATTERN IN MALANG CITY WATER DISTRIBUTION NETWORKS USING SPATIAL POISSON POINT PROCESS

Name of Student : **Widyo Nugroho**
ID of Student : **09211750025007**
Supervisor : **Prof. Drs. Nur Iriawan, M.Ikom., Ph.D.**

ABSTRACT

There are four pillars in the leakage management strategy for water distribution networks which include pressure management, speed of recovery, active leakage control, and asset management. These factors influence how leakage can be managed and thus the volume and value of leakage economically, in a water distribution network can be known. The annual volume of physical losses in the water distribution system tends to increase along with the increase in the distribution network service area. The rate of increase can be inhibited by applying the right combination of the four factors in an effective leak management strategy.

In this study, the factors that influence physical water loss in the water distribution system in Malang City are analyzed by focusing on the physical and operational aspects of the network. In network operations and maintenance practices, it is common for water supply providers to divide operational and maintenance divisions into subdivisions based on service zone boundaries. While on the other hand, not all service zones require the same priority in handling leakage. Thus, studies involving spatial parameters in managing leakage are the current needs of the water supply provider authority. The data in this study include spatial data as well as quantitative data on operational and physical network parameters. The Poisson distribution in the spatial process is chosen as the leakage point distribution approximation.

From the analysis, it was found that the distribution pattern of pipeline leakage in Malang City was included in the inhomogeneous Poisson process criteria, with the existence of two types of intensity. Based on the results of parameter estimation, it is found that in areas of high leakage intensity is affected by speed of recovery, pipe diameter, pipe length ratio, supply discharge ratio, and pipe deterioration ratio but is not affected by the energy demand ratio. While the low leakage intensity is influenced by pipe diameter, pipe length ratio, supply discharge ratio, pipe deterioration ratio, and the energy demand ratio but is not affected by the speed of recovery.

Keywords : Spatial Point Process, Water Losses, Leakage

KATA PENGANTAR

Penerapan teknologi dan inovasi dalam bidang penyediaan air bersih diharapkan dapat berujung pada peningkatan layanan kepada pelanggan. Dengan adanya SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) dalam pengelolaan sistem distribusi air bersih, maka penyediaan air bersih dapat memenuhi kriteria baik dari segi kualitas, kuantitas maupun kontinuitas. Ketersediaan data spasial pada SCADA seharusnya membantu otorita penyedia air bersih dalam pengambilan keputusan untuk penerapan rencana kerja operasional dan pemeliharaan. Tetapi dalam pelaksanaannya, keberadaan data spasial belum dimanfaatkan dengan optimal karena penggunaan data spasial hanya sebatas penunjang *database* spasial. Kendala yang lain adalah tidak semua data tabular berbasis spasial sehingga untuk memasukkannya ke dalam *database* spasial memerlukan digitasi agar data tersebut berbasis kepada koordinat geografi. Setelah data terintegrasi maka keberadaan *database* spasial dapat dikembangkan menjadi sistem pengambilan keputusan yang terintegrasi ke dalam SCADA sistem distribusi air bersih.

Penulis berharap, penelitian ini dapat memberikan setitik kontribusi di dalam pengembangan satu sistem pengambilan keputusan terutama pada bidang pengelolaan kehilangan air pada jaringan distribusi. Selain itu dapat pula membantu dalam penyusunan organisasi pemeliharaan jaringan serta merealisasikan *Active Leakage Control Planning* (ALCP) dengan tingkat kewaspadaan penanganan kebocoran yang semakin meningkat dengan adanya analisis pola distribusi kerusakan jaringan dan faktor pengaruh yang berbeda pada masing-masing zona layanan.

Surabaya, 3 Juli 2019

Widyono Nugroho

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	12
1.3. Tujuan Penelitian	12
1.4. Manfaat Penelitian	12
1.5. Batasan Penelitian	13
BAB II KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	
2.1. Sistem Penyediaan Air Bersih	15
2.1.1. Sistem Distribusi	15
2.1.2. <i>Intake</i> dan Jaringan Pipa Transmisi	16
2.1.3. Unit <i>Reservoir</i>	16
2.2. Kehilangan Air pada Jaringan Distribusi Air Bersih	18
2.2.1. Kehilangan Air Fisik	18
2.2.2. Kehilangan Air Non Fisik	19
2.3. Pengelolaan Kehilangan Air	20
2.3.1. Pengertian <i>Non Revenue Water</i> (NRW)	20
2.3.2. Penyusunan Neraca Air (<i>Water Balance</i>)	21
2.3.3. Parameter yang Mempengaruhi Kehilangan Air	23
2.3.4. Strategi Pengelolaan Kebocoran	26

2.4. <i>Spatial Point Process</i>	28
2.4.1. <i>Spatial Point Pattern</i>	28
2.4.2. <i>Poisson Point Process</i>	29
2.4.3. Uji Kesesuaian Distribusi	31
2.4.4. Keluarga Eksponensial	32
2.4.5. Regresi <i>Poisson</i>	34
2.4.6. Metode Bayesian	35
2.4.7. Transformasi <i>Pixel Image</i>	35
2.5. Kajian Studi Terdahulu	36

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Pendekatan Penelitian	39
3.2. Lokasi Penelitian	41
3.3. Rancangan Penelitian	41
3.3.1. Jenis dan Sumber Data Penelitian	41
3.3.2. Metode Pengumpulan Data	41
3.3.3. Variabel Penelitian	42
3.3.4. Proses Analisis Data	44

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1. Eksplorasi Data Lokasi Kebocoran Pipa dan Variabel <i>Covariate</i>	47
4.1.1. Variabel Waktu Perbaikan Kebocoran	49
4.1.2. Variabel Diameter Pipa	50
4.1.3. Variabel Rasio Panjang Pipa per Sambungan Pelanggan	51
4.1.4. Variabel Rasio Debit Pasokan per Sambungan Pelanggan	52
4.1.5. Variabel Rasio Deteriorasi Pipa	53
4.1.6. Variabel Rasio Kebutuhan Energi Hidraulik	54
4.2. Model <i>Spatial Poisson Point Process</i>	56

4.2.1. Uji Homogenitas Intensitas	56
4.2.2. Uji Kesesuaian Distribusi	57
4.2.3. Identifikasi <i>Mixture</i>	57
4.2.4. Pemodelan <i>Mixture Poisson Regression</i>	59

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan	67
5.2. Saran	68

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1.1. Implikasi Kehilangan Air	7
Gambar 1.2. Komponen Kehilangan Pada Sebuah Neraca Air	8
Gambar 1.3. Skema Pengelolaan Kebocoran	10
Gambar 2.1. Parameter yang Mempengaruhi Kehilangan Air	25
Gambar 2.2. Ilustrasi <i>Kernel Smoothed</i>	36
Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian	40
Gambar 3.2. Gambaran Bentuk <i>Planar Point Pattern</i>	42
Gambar 3.3. Gambaran Bentuk <i>Pixel Image</i>	42
Gambar 3.4. Gambaran Bentuk <i>Marks Point Pattern</i>	43
Gambar 3.5. Gambaran Pembagian Grid	43
Gambar 4.1. (a) <i>Planar Point Pattern</i> Lokasi Kebocoran Pipa	48
Gambar 4.1. (b) <i>Pixel Image</i> Intensitas Kebocoran Pipa	48
Gambar 4.2. <i>Pixel Image</i> Waktu Perbaikan	49
Gambar 4.3. <i>Pixel Image</i> Diameter Pipa yang Rusak.....	51
Gambar 4.4. <i>Pixel Image</i> Rasio Panjang Pipa per Sambungan Pelanggan.....	52
Gambar 4.5. <i>Pixel Image</i> Debit Pasokan per Sambungan Pelanggan	53
Gambar 4.6. <i>Pixel Image</i> Rasio Deteriorasi Pipa	54
Gambar 4.7. <i>Pixel Image</i> Rasio Kebutuhan Energi Hidraulik.....	55
Gambar 4.8. Plot Titik Kebocoran pada Peta Zona	58
Gambar 4.9. Histogram Jumlah Kebocoran pada Tiap Zona	59
Gambar 4.10 <i>Directed Acyclic Graph (DAG) Mixture Poisson Regression</i>	60
Gambar 4.11 <i>Syntax</i> pengelompokkan komponen <i>mixture</i>	60

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1. Neraca Air Standar IWA	22
Tabel 2.2. Parameter yang mempengaruhi tingkat kebocoran	37
Tabel 3.1. Variabel Penelitian	44
Tabel 3.2. Struktur Data Penelitian	44
Tabel 4.1. Variabel <i>Covariate</i>	47
Tabel 4.2. Pengujian Homogenitas Intensitas	56
Tabel 4.3. Pengujian Kesesuaian Distribusi	57
Tabel 4.4. Hasil Estimasi Parameter	62

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Infrastruktur publik, selain berperan sebagai faktor pendorong bagi pertumbuhan ekonomi, juga memiliki pengaruh penting dalam peningkatan derajat kualitas hidup masyarakat. Infrastruktur dalam bidang air bersih, khususnya sistem penyediaan air bersih, selayaknya berfungsi untuk memberikan kepastian akses masyarakat terhadap ketersediaan air bersih. Namun dalam pelaksanaannya, ketika ditinjau baik dari segi kualitas, kuantitas maupun kontinuitas, belum berjalan secara berkesinambungan. Pada sisi lain, tuntutan akan kebutuhan air bersih yang memenuhi standar kesehatan terus mengalami peningkatan tanpa diimbangi dengan perbaikan kualitas pelayanan. Sistem penyediaan air bersih mengalami penurunan kualitas pelayanan seiring dengan waktu, yang pada umumnya kemudian mengarah pada berbagai masalah seperti berkurangnya utilitas dari fasilitas hidraulika, meningkatnya kehilangan air, gangguan layanan, dan menurunnya kualitas air. Selain itu, kenaikan bertahap dalam permintaan konsumen akan air bersih menciptakan masalah baru seperti tekanan hidraulik yang rendah pada sambungan pelanggan. Hal ini meningkatkan tekanan udara pada sistem distribusi air, yang di masa mendatang dapat meningkatkan frekuensi kebocoran jaringan.

International Water Association (IWA) menyatakan bahwa parameter kehilangan air merupakan sebuah indikator efisiensi kinerja sebuah perusahaan air bersih yang telah diberlakukan secara internasional. Obradovic dan Landsdale (1998) menyatakan bahwa kehilangan air secara umum merupakan selisih antara banyaknya air yang disuplai dengan air yang dikonsumsi. Kehilangan air ini dapat bersifat teknis, misalnya kehilangan air pada pipa itu sendiri, sedangkan yang bersifat non teknis misalnya pencurian air dalam pipa distribusi. Lebih lanjut, Obradovic dan Landsdale (1998) menyatakan bahwa dalam pengembangan sistem penyediaan air bersih,

kehilangan air merupakan faktor utama yang harus diperhitungkan agar titik-titik pelayanan tetap dapat terpenuhi secara kontinyu. Farley dan Liemberger (2004) menyatakan secara lebih terperinci bahwa kehilangan air, yang dinyatakan sebagai rasio *Non Revenue Water* (NRW) setara dengan jumlah total air yang mengalir ke jaringan distribusi air bersih dari sebuah instalasi pengolahan air bersih (Volume Input Sistem) dikurangi dengan jumlah total air yang resmi menjadi rekening dari pelanggan (Konsumsi Resmi). Komponen-komponen NRW mencakup seluruh sistem layanan perusahaan air bersih mulai dari pencatat meter *outlet* instalasi pengolahan air (IPA) hingga pencatat meter pada pelanggan.

Volume kehilangan air yang dinyatakan sebagai rasio *Non Revenue Water* (NRW) di tingkat global menunjukkan angka yang mencengangkan. Setiap tahun lebih dari 32 milyar m³ air yang sudah diolah, hilang karena kebocoran dari jaringan distribusi. Sementara, 16 milyar m³ lainnya tersalurkan ke pelanggan tanpa bisa ditagih karena pencurian air, pembacaan meter yang tidak akurat, atau korupsi. Sebuah perkiraan konservatif dari *World Bank* tentang biaya tahunan total yang harus ditanggung oleh perusahaan air bersih di seluruh dunia adalah US\$ 14 milyar. Di sejumlah negara berpenghasilan rendah, kerugian ini mewakili 50 hingga 60% dari pelayanan air dengan perkiraan global sekitar 35%. Diperkirakan apabila dilakukan penghematan separuh dari jumlah ini akan memiliki implikasi penambahan pelayanan air kepada 100 juta penduduk lainnya tanpa investasi lebih lanjut (Frauendorfer dan Liemberger, 2010).

Di negara maju, pengelolaan dan pengendalian kehilangan air didukung oleh keberadaan infrastruktur dan pelaksanaan operasional yang memadai serta didukung oleh kesadaran bahwa rasio NRW merupakan parameter yang penting bagi kinerja otorita penyedia air bersih. Para peneliti di Korea Selatan menyadari bahwa NRW merupakan parameter penting untuk penetapan prioritas perbaikan sistem distribusi air. Untuk itu, beberapa peneliti di Korea Selatan melakukan identifikasi parameter-parameter yang mempengaruhi kehilangan air. Sedemikian pentingnya, hingga dalam penelitian yang dilakukan di Kota Incheon, Korea Selatan, Dongwoo Jang dan

Gyeewon Choi (2017) menerapkan metode dengan akurasi tinggi yakni *Artificial Neural Network* (ANN) untuk meningkatkan akurasi perhitungan dan mengidentifikasi parameter yang mempengaruhi rasio NRW secara signifikan. Terdapat dua klasifikasi parameter yang ditetapkan, meliputi parameter operasional yang terdiri atas rasio kebutuhan energi dan jumlah kebocoran jaringan, serta parameter fisik yang terdiri atas diameter pipa, panjang pipa per jumlah sambungan pelanggan, debit air suplai per sambungan pelanggan, serta rasio deteriorasi pipa. Dalam studi yang dilakukan di Kota Incheon tersebut, Dongwoo Jang dan Gyewoon Choi (2017) melakukan estimasi rasio NRW menggunakan *Artificial Neural Network* (ANN) dan *Multivariate Regression Analysis* (MRA) dengan memasukkan parameter spesifik yang mempengaruhi frekuensi kebocoran dalam sistem distribusi air di Kota Incheon. Studi ini dilakukan dengan tahap awal dilakukan penggunaan MRA dan ANN untuk memperkirakan rasio NRW, kemudian membandingkan hasil dari kedua metode tersebut. Penilaian akurasi menunjukkan bahwa model ANN memiliki akurasi prediksi yang lebih tinggi daripada MRA. Hasil penelitian ini untuk selanjutnya menjadi model untuk memperkirakan rasio NRW menggunakan ANN berdasarkan parameter tertentu yang mempengaruhi kebocoran dalam sistem distribusi air di Kota Incheon, Korea Selatan. Penilaian akurasi dan analisis persebaran plot digunakan untuk memilih kasus model ANN yang optimal, yang dalam hal ini adalah parameter khusus yang memengaruhi kebocoran dalam sistem distribusi air di Kota Incheon. Dalam penelitian tersebut, Dongwoo Jang dan Gyewoon Choi (2017) mendapatkan hasil bahwa jumlah suplai air bersih per sambungan pelanggan dan rasio deteriorasi pipa merupakan faktor utama yang berpengaruh paling signifikan terhadap pengelolaan NRW dan metode ANN memiliki ketelitian yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode MRA.

Di sisi lain, banyak negara berkembang yang alih-alih mengelola kehilangan air secara efektif, bahkan untuk memastikan bahwa para pelanggan mendapatkan pasokan air bersih yang aman dalam jumlah yang cukup pun diperlukan kerja keras. Ditambah lagi, dengan permasalahan distribusi di mana air hasil pengolahan yang

kemudian disalurkan melalui jaringan distribusi yang tidak memadai, dengan sistem pencatatan yang lemah, serta tidak didukung oleh tingkat kemampuan teknis dan teknologi yang memenuhi ketentuan teknis. Sistem penetapan tarif dan kebijakan pengumpulan pendapatan seringkali tidak mencerminkan nilai yang sesungguhnya dari air yang disuplai, sehingga akan membatasi pendapatan perusahaan sehingga para pelanggan akan mendapat kualitas layanan yang rendah. Hal ini disebabkan tidak semua kota atau kawasan, khususnya di negara berkembang, mempunyai prasarana dan prosedur operasional yang memenuhi syarat dalam penanganan kehilangan air. Otorita penyediaan air bersih di negara berkembang saat ini masih berjuang untuk memastikan bahwa para pelanggan mendapatkan layanan air yang cukup untuk menjaga kesehatan dan kebutuhan hidup sehari-hari. Tantangan yang dihadapi oleh otorita penyediaan air bersih di negara berkembang secara umum adalah sebagai berikut (Farley et.al, 2008).:

1. Tingkat urbanisasi yang cepat
2. Semakin berkurangnya pasokan air
3. Polusi lingkungan yang berpengaruh terhadap sumber air
4. Infrastruktur yang sudah menua
5. Operasional dan kebijakan pemeliharaan yang buruk, termasuk sistem pencatatan yang tidak efektif
6. Keterampilan teknis dan teknologi yang tidak memadai
7. Kendala keuangan yang lebih besar, termasuk struktur tarif dan kebijakan pengumpulan pendapatan yang tidak sesuai
8. Pengaruh politik, budaya, dan sosial
9. Kejadian kehilangan air non fisik yang lebih tinggi, khususnya berkaitan dengan keberadaan sambungan ilegal

Beberapa peneliti melakukan kajian mendalam terhadap kehilangan air di beberapa kota pada negara berkembang. Goodson Masheka (2016) melakukan penelitian di Kota Livingstone, Zambia dan mendapati nilai rasio NRW yang mencapai 43%. Tujuan dari penelitian yang dilakukannya adalah untuk menetapkan komponen yang

berkontribusi terbesar terhadap rasio NRW dan memperkirakan kehilangan air fisik dengan menggunakan pemodelan hidraulika. Studi ini menyimpulkan bahwa tidak terdapat pola khas bagi kecenderungan rasio NRW pada wilayah studi dan faktor kontribusi utama untuk kehilangan air adalah kehilangan fisik di jaringan akibat konsumsi yang ilegal. Peneliti yang lain, yakni Collins K.Owiti (2013) melakukan penelitian untuk mengetahui faktor-faktor yang mempengaruhi kehilangan air di Kota Garissa, Kenya. Temuan utama dari penelitian ini adalah terdapat tiga komponen utama yang mempengaruhi NRW, meliputi pencatatan volume air yang tidak tepat terutama berkaitan dengan malfungsi dan akurasi alat ukur yang rendah, kehilangan air fisik di jaringan distribusi, dan konsumsi ilegal pada jaringan pipa pelanggan. Tiga strategi utama yang direkomendasikan untuk mengurangi NRW meliputi penerapan zonasi dalam pemantauan kehilangan air, peningkatan kualitas staf operasional dan pemeliharaan serta pencanangan program penggantian alat ukur dengan tipe dan jenis yang memiliki akurasi yang lebih tinggi. Ketidakpedulian masyarakat pada kehilangan air ditemukan menjadi tantangan utama yang dihadapi dalam program pengurangan kehilangan air yang berkaitan dengan sambungan ilegal. Dari temuan tersebut, Collins K.Owiti (2013) merekomendasikan penggantian keseluruhan alat ukur berkualitas tinggi untuk semua konsumen yang terhubung, melakukan peningkatan kesadaran publik dengan berbagai program peningkatan partisipasi masyarakat dalam pengurangan kehilangan air, dan peningkatan kualitas penagihan sertak pengalihan pembayaran ke sistem terkomputerisasi untuk mengurangi dapat mengurangi rasio NRW dari 45% menjadi 25%.

Peter A. Yeboah (2008) menyatakan bahwa kehilangan air dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor dalam hal ini adalah permasalahan keterbatasan infrastruktur dan logistik, serta penerapan strategi yang tepat dalam pengelolaan kehilangan air. Adapun pola pendekatan yang saat ini yang diadopsi oleh otorita penyedia air bersih di Kota Accra, Ghana hanya mengasumsikan bahwa sebagian besar kehilangan air dalam sistem ini berasal dari kehilangan fisik. Hal tersebut menyebabkan sebagian besar perhatian pengelola saat ini terfokus pada kehilangan fisik dan bukan

merupakan pendekatan terbaik yang akhirnya akan menghasilkan pencapaian hasil yang dibutuhkan, yang dalam hal ini adalah strategi manajemen infrastruktur air bersih yang merupakan komponen komprehensif. Kesulitan dihadapi ketika komponen ini harus dikelola oleh beberapa bagian yang berbeda namun dengan tujuan mencoba mencapai hasil yang sama. Efektivitas kemampuan masing-masing bagian untuk mengelola infrastruktur dalam pengelolaan kehilangan air adalah dasar yang direkomendasikan untuk menilai tingkat kehilangan air dalam infrastruktur penyediaan air bersih. Tetapi di sisi lain ditemukan kendala kurang adanya pengawasan dan standar untuk pemenuhan persyaratan dan ketentuan dalam pelaksanaan program. Aspek-aspek tertentu dari kontrak yang dibebankan kepada pihak pengelola tidak menawarkan insentif untuk pengelolaan NRW yang efektif terutama pada aspek yang berkaitan dengan manajemen infrastruktur. Dari kondisi tersebut, dapat disimpulkan bahwa masih rendahnya kesadaran pengelola akan pentingnya manfaat pengurangan kehilangan air. Padahal sedemikian banyak manfaat dari pengurangan kehilangan air di antaranya adalah (Frauendorfer dan Liemberger, 2010) :

1. Otorita penyedia air bersih mendapatkan dana tambahan dalam bentuk perputaran uang yang dihasilkan sendiri (*self-generated cash flow*)
2. Otorita penyedia air bersih mengurangi sambungan-sambungan ilegal sehingga menciptakan keadilan antar para pengguna
3. Kinerja otorita penyedia air bersih yang lebih efisien dan berkelanjutan bisa meningkatkan layanan air bersih kepada pelanggan
4. Peluang-peluang usaha baru menciptakan lebih banyak lagi lapangan pekerjaan bagi masyarakat

Dari senarai di atas, disebutkan bahwa salah satu tujuan pengurangan kehilangan air adalah untuk memberikan layanan yang lebih baik dan lebih efisien bagi masyarakat. Untuk mencapainya, masyarakat harus juga memahami bahwa mereka dapat berperan dalam pengelolaan kehilangan air dengan memberikan laporan secara responsif tentang adanya kebocoran jaringan, peralatan atau asesoris yang

tidak berfungsi, atau masalah-masalah lain yang mungkin tidak terdeteksi oleh petugas otorita penyedia air bersih. Semakin dini otorita penyedia air bersih menyadari adanya rembesan pipa atau kebocoran, maka semakin cepat kebocoran itu akan diperbaiki sehingga mengurangi rasio NRW.

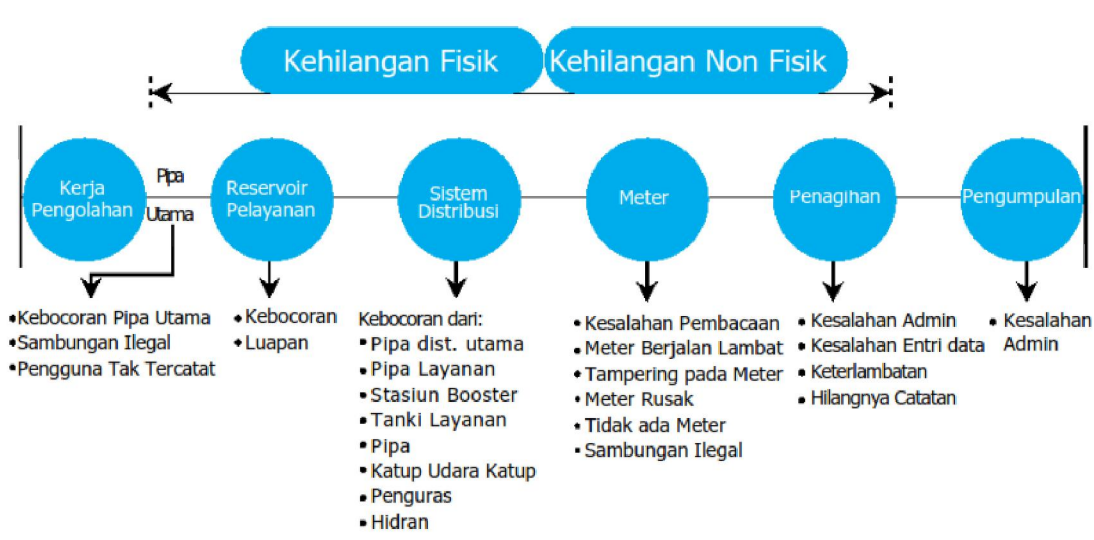


Gambar 1.1. Implikasi kehilangan air (Farley et.al, 2008)

Farley et.al (2008) menyatakan bahwa langkah pertama dalam mengatasi kehilangan air adalah dengan mengembangkan satu pemahaman tentang sistem, yang mencakup penyusunan satu neraca air (*water balance*). Proses ini membantu para pimpinan perusahaan air bersih untuk memahami besaran kehilangan, sumber kehilangan dan biaya akibat kehilangan air. *International Water Association* (IWA) telah mengembangkan satu struktur dan terminologi baku untuk neraca air internasional yang telah diadopsi oleh asosiasi-asosiasi nasional di banyak negara di seluruh dunia.

Komponen yang mempengaruhi besar NRW dalam neraca air secara garis besar adalah sebagai berikut:

1. Pada unit pengolahan : Kebocoran pipa utama, sambungan illegal, pengguna liar
2. Pada unit distribusi : Kebocoran pipa, tangki, katup, hidran, reservoir, dll
3. Pada unit pelanggan : Kesalahan/ketidakkuratan/kerusakan meter
4. Pada unit penagihan : Kesalahan pencatatan/pembukuan



Gambar 1.2. Komponen kehilangan pada sebuah neraca air
(Farley et.al, 2008)

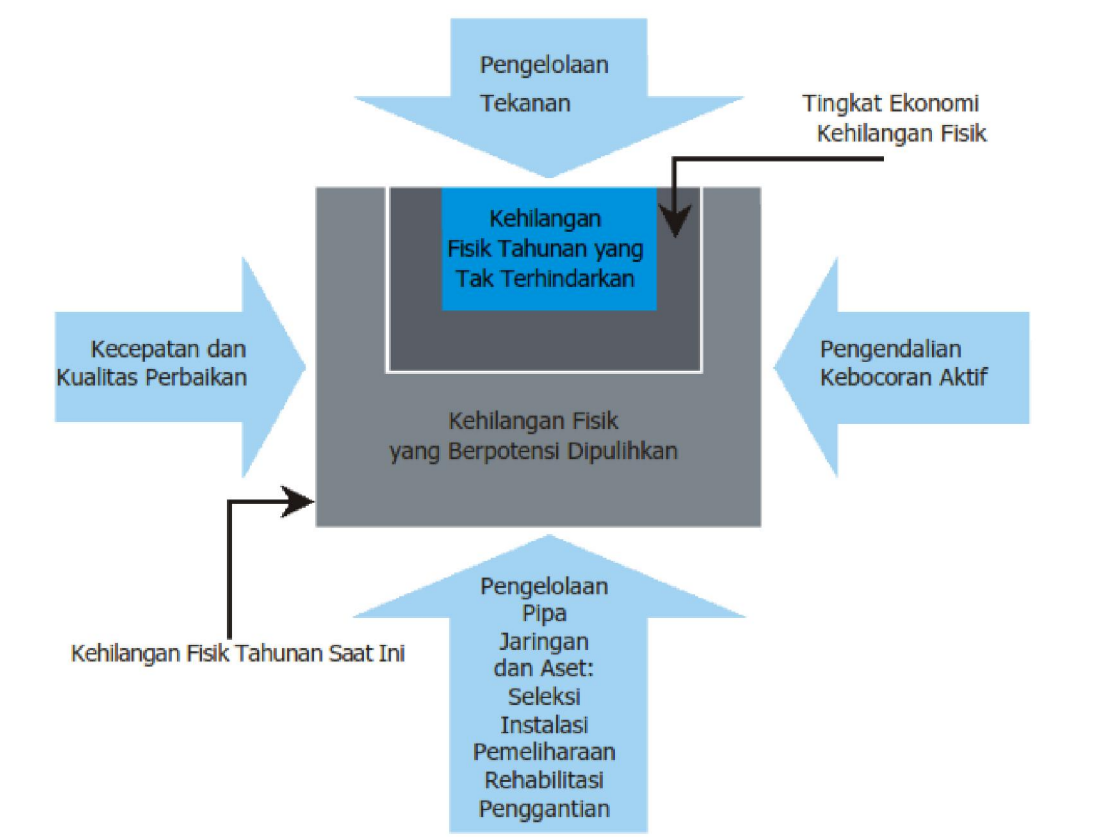
Kehilangan air dapat terjadi di semua bagian jaringan distribusi, bahkan dapat terjadi pada jaringan yang baru dipasang. Kehilangan air fisik (*physical losses*) sering disebut sebagai kehilangan air sebenarnya (*real losses*) atau dalam istilah praktisi dikenal sebagai kebocoran (*leakage*). Kehilangan air fisik pada umumnya merupakan komponen dengan volume kehilangan terbesar pada analisis neraca air. Kehilangan ini mencakup total volume kehilangan air tetapi tidak termasuk kehilangan akibat proses bisnis dan komersial. Pada analisis neraca air, ditunjukkan bahwa sebagian angka kehilangan fisik merupakan hasil estimasi dan dengan demikian hasil perhitungan volume kebocoran merupakan pendekatan yang dapat berpotensi salah atau tidak akurat. Dengan demikian, maka pimpinan otorita penyedia air bersih harus

melakukan verifikasi terhadap hasil analisis mereka dengan melakukan analisis komponen yang melibatkan pendekatan *top-down* atau pengkajian komponen kehilangan fisik dengan lebih mendalam (Farley dan Liemberger, 2004).

Tiga bagian sistem penyediaan air bersih yang harus diperhatikan dalam hubungannya dengan kehilangan fisik terdapat pada (Farley dan Liemberger, 2004):

1. Kebocoran dari pipa transmisi
2. Kebocoran dan limpahan (*overflow*) dari *reservoir* dan tanki penyimpanan perusahaan air bersih
3. Kebocoran pada pipa distribusi hingga ke meter pelanggan

Malcolm Farley dan Roland Liemberger (2004) menyatakan bahwa terdapat empat faktor yang dapat diterapkan secara terpadu di dalam satu strategi pengelolaan kebocoran. Faktor-faktor ini mempengaruhi bagaimana kebocoran kemudian dikelola dan dengan demikian volume dan nilai ekonomi kebocoran dapat dianalisis dalam sebuah jaringan distribusi perusahaan air bersih. Faktor tersebut mencakup pengelolaan tekanan hidraulik pada jaringan, kecepatan dan kualitas perbaikan kebocoran, pengendalian kebocoran secara aktif (*Active Leakage Control*) serta pengelolaan aset pada jaringan. Pada Gambar 1.3. terlihat bahwa CAPL (*Current Annual Physical Losses*) akan cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya usia aset pada jaringan distribusi. Namun laju kenaikan kehilangan air dapat dihambat dengan penerapan kombinasi yang tepat antara empat faktor dalam strategi pengelolaan kebocoran di atas. Kotak hitam mewakili MAAPL (*Minimum Achievable Annual Physical Losses*), atau volume kehilangan fisik terendah secara teknis pada tingkat tekanan pengoperasian saat ini. Meningkatkan atau memperkuat salah satu dari empat komponen dari skema tersebut akan berdampak pada penurunan kehilangan pada lokasi yang memiliki potensi untuk dipulihkan (Farley dan Liemberger, 2004).



Gambar 1.3. Skema Pengelolaan Kebocoran (Farley dan Liemberger, 2004)

Jaringan air bersih Kota Malang memiliki luas wilayah pelayanan kurang lebih 80% dari luas wilayah Kota Malang yang sebesar 110 km². Sedangkan cakupan wilayah pelayanan saat ini mencapai 95% dari jumlah penduduk Kota Malang sebanyak 843.858 jiwa. Sistem yang diterapkan pada jaringan air bersih Kota Malang menggunakan dua sistem pengaliran air dari sumber air baku (lokasi produksi) ke tandon pelayanan (transmisi) dan distribusi air bersih ke pelanggan (distribusi) yaitu sistem gravitasi dan sistem pompa. Jaringan ini dikelola oleh Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) Tirta Dharma yang bertindak sebagai korporasi penyedia air bersih di Kota Malang. Sejak tahun 2010 PDAM Tirta Dharma melaksanakan strategi pengendalian kebocoran berdasar dari skema yang direkomendasikan oleh Malcolm Farley dan Roland Liemberger (2004) yang menitikberatkan kepada pengendalian kebocoran secara aktif (ALC), pengelolaan asset jaringan, manajemen tekanan

hidraulik dan peningkatan tingkat kecepatan perbaikan (*speed of recovery*). Salah satu hal yang penting dalam melaksanakan strategi pengelolaan kebocoran sebagaimana yang disampaikan oleh Farley dan Liemberger (2004) adalah mengetahui jumlah kejadian kebocoran pada daerah layanan (D. Jang, 2018).

Dalam praktek operasional dan pemeliharaan jaringan, lazimnya otorita penyedia air bersih membagi divisi operasional dan pemeliharaan ke dalam beberapa sub divisi yang hingga saat ini susunan organisasinya hanya mengikuti batas wilayah zona layanan. Sementara di sisi lain, tidak semua zona layanan memerlukan prioritas yang sama dalam penanganan kebocoran. Tentunya hal ini akan berpengaruh terhadap efektivitas jumlah personil yang ditempatkan pada wilayah tersebut. Dengan demikian, kajian yang melibatkan parameter spasial dalam pengelolaan kebocoran merupakan kebutuhan otorita penyedia air bersih saat ini.

Karakteristik hidraulik yang berbeda pada masing-masing lokasi zona layanan atau distrik pun berpengaruh terhadap penanganan kebocoran yang tersusun pada rencana *Active Leakage Control* (ALC) yang disusun oleh masing-masing otorita penyedia air bersih. Meskipun demikian, dari faktor-faktor di atas, tidak pernah diketahui faktor manakah yang memiliki pengaruh signifikan terhadap persebaran pola kebocoran yang berkaitan dengan karakteristik masing-masing zona layanan atau distrik pada jaringan distribusi air bersih Kota Malang. Dengan adanya karakteristik sistem jaringan distribusi yang unik, maka strategi penanganan kebocoran pada setiap zona layanan atau distrik akan berbeda pula. Dengan mengetahui faktor-faktor yang berpengaruh signifikan terhadap persebaran pola kebocoran, maka untuk selanjutnya dapat meningkatkan *recovery level* jaringan sebagai bagian dari strategi menurunkan rasio NRW mengingat bahwa kehilangan air fisik merupakan komponen terbesar dari kasus kehilangan air di Kota Malang.

Berdasarkan latar belakang tersebut, pada penelitian ini akan dilakukan analisis pola persebaran lokasi kebocoran dengan menggunakan metode *spatial poisson point process*. Penggunaan *poisson point process* pada penelitian ini

dilakukan sebagai pendekatan persebaran titik kebocoran, yang dalam hal ini diduga berdistribusi *Poisson*.

1.2. Rumusan Masalah

Permasalahan yang akan dikaji dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimanakah pola persebaran titik lokasi kebocoran pipa pada jaringan distribusi air bersih Kota Malang ?
2. Parameter apakah yang berperan signifikan terhadap persebaran titik kebocoran pipa pada masing-masing zona layanan sistem distribusi air bersih Kota Malang?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah :

1. Untuk mengetahui pola persebaran titik lokasi kebocoran pipa pada jaringan distribusi air bersih Kota Malang dengan analisis homogenitas intensitas sebaran titik kebocoran.
2. Untuk mengetahui parameter apakah yang berperan signifikan terhadap persebaran titik kebocoran pipa pada masing-masing zona layanan sistem distribusi air bersih Kota Malang dengan melakukan estimasi parameter dari model *mixture poisson regression*.

1.4. Manfaat Penelitian

Manfaat praktis yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah :

1. Sebagai bagian dari penyusunan sistem pengambilan keputusan (*Decision Support System*) sebagai bagian dari SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) jaringan distribusi air bersih Kota Malang.
2. Rekomendasi dari penelitian ini dapat membantu dalam penyusunan organisasi pemeliharaan jaringan serta merealisasikan *Active Leakage Control Planning* (ALCP)

Adapun manfaat teoritis yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah mengetahui parameter yang berpengaruh terhadap persebaran kebocoran pipa dengan kontribusi pengisian *gap* penelitian dengan memperhitungkan tinjauan spasial.

1.5. Batasan Penelitian

Batasan yang ada dalam penelitian ini adalah :

1. Penelitian ini tidak mengkaji kehilangan air komersial.
2. Penelitian ini tidak mengkaji parameter sosial dan ekonomi.
3. Wilayah penelitian ini hanya meliputi wilayah jaringan distribusi pada daerah layanan air bersih Kota Malang.

1.1 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan pada tesis ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Bab I Pendahuluan, membahas tentang latar belakang dalam penulisan tesis ini, perumusan masalah yang akan dikaji beserta batasan masalahnya. Selain itu, tujuan dan manfaat penulisan juga dijelaskan pada bab pendahuluan ini.
2. Bab II Kajian Pustaka dan Dasar Teori, membahas tentang dasar teori dan studi terdahulu yang mendukung dalam penyusunan tesis ini.
3. Bab III Metodologi Penelitian, membahas tentang metode yang digunakan beserta langkah-langkah yang akan dilakukan untuk menemukan jawaban atas perumusan masalah.
4. Bab IV Analisis dan Pembahasan, membahas tentang analisis data yang telah dilakukan beserta pembahasannya.
5. Bab V Kesimpulan, membahas tentang kesimpulan yang diperoleh pada penelitian ini.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Sistem Penyediaan Air Bersih

2.1.1. Sistem Distribusi

Sistem distribusi air bersih adalah satu kesatuan bangunan, peralatan dan saluran yang terintegrasi yang membawa air yang telah diolah dari *reservoir* menuju daerah pelayanan tempat konsumen berada (Al-layla, 1980). Perencanaan sistem distribusi air bersih didasarkan atas dua faktor utama yaitu kebutuhan air (*water demand*) dan tekanan air (*hydraulic pressure*), serta ditunjang oleh faktor kontinuitas dan keamanan (*safety*). Jaringan pipa induk merupakan pipa distribusi yang memiliki diameter terbesar dan jangkauan pelayanan yang terluas. Secara fisik pipa induk harus dapat mengalirkan air sampai akhir daerah pelayanan dengan debit jam puncak, memiliki ketahanan yang tinggi namun tidak melayani penyadapan langsung ke konsumen.

Sebagaimana pada saat tahap perencanaan, operasional sistem distribusi air bersih juga didasarkan atas dua faktor utama yaitu kebutuhan air (*water demand*) dan tekanan air (*hydraulic pressure*), serta ditunjang dengan faktor kontinuitas dan keamanan (*safety*). Fungsi pokok jaringan distribusi adalah menghantarkan air bersih ke seluruh pelanggan dengan tetap memperhatikan faktor kualitas, kuantitas, kontinuitas dengan tekanan dan kecepatan air yang memenuhi standar. Kondisi yang diinginkan pelanggan adalah kapan saja mereka membuka katup, air harus selalu tersedia. Air yang disuplai melalui jaringan pipa distribusi, sistem distribusinya terbagi atas dua alternatif, meliputi :

1. Sistem Berkelanjutan (*Continuous System*)

Pada sistem ini, suplai dan distribusi air kepada pelanggan dilaksanakan secara terus-menerus selama dua puluh empat jam. Sistem ini diterapkan bila pada setiap waktu kuantitas air bersih dapat memenuhi kebutuhan konsumsi

air di daerah pelayanan. Keuntungan menggunakan sistem ini adalah pelanggan akan mendapatkan air bersih setiap saat. Adapun kerugian sistem ini adalah pemakaian air akan cenderung lebih boros, dan bila ada sedikit kehilangan air, jumlah air terbuang akan sangat besar.

2. Sistem Bergilir (*Intermittent System*)

Pada sistem ini air bersih yang disuplai dan didistribusikan kepada pelanggan dilakukan hanya selama beberapa jam dalam satu hari, yaitu dua sampai empat jam pada pagi dan sore hari. Sistem ini biasanya diterapkan apabila kuantitas air dan tekanan air tidak mencukupi. Keuntungan sistem ini adalah pemakaian air cenderung lebih hemat dan bila terjadi kehilangan air maka jumlah air yang terbuang relatif kecil.

2.1.2. *Intake dan Jaringan Pipa Transmisi*

Intake adalah bangunan pengambilan air atau tempat air masuk dari sungai, danau atau sumber air permukaan lainnya ke instalasi pengolahan. Bangunan *intake* ini berfungsi sebagai bangunan pertama untuk masuknya air dari sumber air. Pada umumnya, sumber air untuk pengolahan air bersih, diambil dari sungai. Pada bangunan *intake* ini biasanya terdapat *bar screen* yang berfungsi untuk menyaring benda-benda atau sampah yang ikut tergenang dalam air. Selanjutnya, air akan masuk ke dalam sebuah bak yang nantinya akan dipompa ke bangunan selanjutnya, yaitu WTP (*Water Treatment Plant*). Jaringan pipa transmisi adalah jalur pipa pembawa air bersih dari titik awal transmisi air bersih ke titik akhir transmisi air bersih. Fungsi transmisi (*transmission*) adalah mengalirkan air dari sumbernya (*collection system*) ke awal sistem distribusi.

2.1.3. *Unit Reservoir*

Sebelum didistribusikan, air masuk ke dalam *reservoir*. *Reservoir* merupakan suatu bangunan konstruksi yang berfungsi untuk menampung air yang telah diolah untuk didistribusikan kepada konsumen. *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 harus ditampung minimal $\frac{1}{3}$ dari volume total kebutuhan harian maksimum daerah pelayanan.

2.2. Kehilangan Air pada Jaringan Distribusi Air Bersih

Dalam suatu jaringan distribusi air bersih, kehilangan air merupakan hal yang tidak dapat dihindari. Kehilangan air bersifat dapat bersifat teknis maupun non teknis. Besarnya kehilangan air harus diperhatikan dengan tujuan agar titik-titik pelayanan tetap dapat terpenuhi kebutuhan airnya. Jang dan Choi (2017) menyatakan bahwa kehilangan air pada jaringan distribusi air bersih meliputi :

1. Kerugian fisik yang terdiri dari kebocoran dari semua bagian sistem distribusi air dan luapan di *reservoir*. Kerugian tersebut dapat disebabkan oleh operasi dan pemeliharaan yang buruk, kurangnya pengendalian kebocoran secara aktif, dan kualitas buruk dari aset bawah tanah.
2. Kerugian non fisik yang disebabkan oleh kesalahan registrasi pelanggan, kesalahan pembacaan meter air, kesalahan penanganan data, dan pencurian air dalam berbagai bentuk.

2.2.1. Kehilangan Air Fisik

Kehilangan air fisik adalah hilangnya sejumlah air bersih pada proses penyediaan, pendistribusian dan pelayanan air bersih yang diperlihatkan oleh adanya aliran air secara fisik yang keluar dari sistem jaringan pipa distribusi dan pelayanan (Farley dan Liemberger, 2004). Penyebab terjadinya kehilangan air secara fisik yaitu (Farley et.al, 2008) :

1. Faktor Teknis, antara lain :
 - a. Kehilangan air pada pipa distribusi dan perlengkapannya .
 - b. Kehilangan air pada pipa dinas dan komponen instalasi Sambungan Rumah (SR) sebelum meter air.
 - c. Penggunaan *fire hydrant*, pengurasan jaringan pipa, penggunaan air instalasi produksi.
2. Faktor Non Teknis, antara lain:
 - a. Sambungan tidak terdaftar/illegal.

- b. Pencurian air.
- c. Kecurangan pelanggan (pemasangan pipa *by pass* di instalasi sambungan rumah).

Kehilangan air fisik ada beberapa jenis, diantaranya adalah:

1. Semburan/kebocoran yang dilaporkan (*reported burst*)
Semburan airnya terlihat dan muncul di permukaan tanah, sehingga mudah dilaporkan oleh masyarakat.
2. Semburan/kebocoran yang tidak dilaporkan (*unreported burst*)
Kebocoran terletak di bawah tanah dan tidak terlihat di permukaan. Semburan/kebocoran jenis ini dapat ditemukan dengan melakukan survey deteksi kebocoran menggunakan alat *leak detector*.
3. Semburan/kebocoran kecil (*background leakage*)
Kebocoran merupakan rembesan yang sangat kecil dan sangat sulit terdeteksi meskipun menggunakan alat *leak detector*.

Sedangkan upaya untuk mengurangi terjadinya kehilangan air yang lebih besar dalam perencanaan sistem distribusi air dilakukan pembagian zona atau distrik untuk memudahkan pengendalian kehilangan air.

2.2.2. Kehilangan Air Non Fisik

Kehilangan air non fisik adalah hilangnya sejumlah air bersih pada proses pendistribusian dan pelayanan air bersih kepada pelanggan yang tidak diperlihatkan oleh adanya aliran air secara fisik yang keluar dari sistem jaringan pipa distribusi dan pelayanan (Farley dan Liemberger, 2004). Penyebab terjadinya kehilangan air non fisik yaitu (Farley et.al, 2008) :

1. Faktor teknis, antara lain :

a. Meter air tidak akurat

Salah satu penyebab kehilangan air komersial yang paling banyak ditemui adalah akurasi meter. Meter air mekanikal, yang didalamnya terdapat roda atau gigi yang terbuat dari bahan plastik, seiring dengan usia maka akan

menjadi aus, dan menyebabkan meter air mencatat lebih rendah dari pemakaian semestinya. Oleh sebab itu meter harus secara berkala diteraulang (rekalibrasi). Meter air jenis *ultra sonic* dan *magnetic* tidak terlalu terpengaruh ketelitiannya oleh usia meter. Kualitas air yang buruk juga merupakan salah satu penyebab turunnya kinerja meter air. Pengendapan kotoran bisa mempengaruhi mekanik meter, sehingga meter tidak dapat mencatat secara akurat.

2. Faktor Non Teknis, antara lain :

- a. Kesalahan pembacaan angka pada meter air Sambungan Rumah (SR)
- b. Kesalahan pencatatan hasil pembacaan meter air Sambungan Rumah (SR)
- c. Kesalahan perhitungan hasil pembacaan meter air Sambungan Rumah (SR)
- d. Hasil pembacaan meter air Sambungan Rumah (SR) berupa perkiraan
- e. Meter air Sambungan Rumah (SR) tidak dibaca
- f. Kecurangan pelanggan (meter air ditempel magnit, ditusuk jarum, ditetesi larutan garam, dimiringkan, dibalik dsb).

Keakuratan meter pencatat debit dan air masuk (*flow meter*) produksi sangat menentukan untuk menghitung kehilangan air pada sistem distribusi.

2.3. Pengelolaan Kehilangan Air

2.3.1. Pengertian *Non Revenue Water (NRW)*

Rasio kehilangan air yang dinyatakan dengan *Non Revenue Water (NRW)* setara dengan jumlah total air yang mengalir ke jaringan layanan air bersih dari sebuah instalasi pengolahan air bersih (volume input sistem) dikurangi dengan jumlah total air konsumsi resmi baik yang digunakan oleh industri dan pelanggan rumah tangga. NRW dapat dihitung dengan persamaan berikut (Jang dan Choi, 2017) :

$$NRW = \frac{A_p - A_b}{A_p} \% \quad (2.1)$$

Di mana:

NRW	: <i>Non Revenue Water</i>
Ap	: Input volume air dalam sistem penyediaan air bersih
Ab	: Volume air yang dikonsumsi secara resmi

2.3.2. Penyusunan Neraca Air (*Water Balance*)

Farley et.al (2008) menyatakan bahwa langkah pertama dalam mengatasi NRW adalah dengan mengembangkan satu pemahaman tentang sistem, yang mencakup penyusunan satu neraca air (*water balance*). Proses ini membantu para pimpinan perusahaan air bersih untuk memahami besaran, sumber dan biaya NRW. IWA telah mengembangkan satu struktur dan terminologi baku untuk neraca air internasional yang telah diadopsi oleh asosiasi-asosiasi nasional di banyak negara di seluruh dunia.

Pada hakekatnya neraca air merupakan kerangka untuk menilai kondisi kehilangan air. Perhitungan neraca air dapat juga berguna untuk (Farley et.al, 2008) :

1. Mengungkap ketersediaan/keandalan data dan tingkat pemahaman terhadap situasi NRW.
2. Menciptakan kesadaran tentang adanya masalah NRW.
3. Petunjuk langsung menuju perbaikan.
4. Neraca air juga menjadi alat untuk komunikasi dan benchmarking, karena menggunakan indikator-indikator yang disepakati, seragam dan dapat diperbandingkan di seluruh dunia.
5. Memahami neraca air wajib untuk penyusunan prioritas perhatian dan investasi

Untuk dapat menghitung neraca air, diperlukan pemahaman terhadap sistem produksi dan distribusi yang diterapkan dalam suatu perusahaan penyedia air bersih. Umumnya perusahaan penyedia air bersih mempunyai sistem produksi, transmisi, distribusi, meter pelanggan, sistem pencatatan pemakaian air dan rekening. Pada sistem-sistem yang tersebut diatas terdapat kemungkinan-kemungkinan kehilangan air. Untuk memudahkan analisis dapat dipermudah dengan keberadaan piranti bantu

berupa perangkat lunak komputer untuk menghitung neraca air, yang dalam hal ini adalah WBEC (*Water Balance Easy Calc*) yang dikembangkan oleh Limberger and Partner, Inc. Adapun data-data yang diperlukan untuk menghitung neraca air, diantaranya adalah data volume air yang didistribusikan, data tarif, data teknis, dan data operasional lainnya. Secara lebih rinci data dan alat yang dibutuhkan adalah sebagai berikut:

1. Gambar nyata laksana jaringan perpipaan (*as built drawing*), terutama untuk zona layanan.
2. Jumlah pelanggan tahun yang dihitung.
3. Jumlah konsumsi air
4. Tarif air per kategori dan tarif rata-rata.
5. Jumlah sambungan.
6. Rincian biaya produksi tahun yang dihitung.
7. Rincian biaya operasional tahun yang dihitung.
8. Kehilangan air dalam periode terakhir.
9. Target kehilangan air dalam periode ke depan.
10. Data dasar untuk pengisian neraca air.

Tabel 2.1. Neraca Air Standar IWA

Volume Input Sistem	Konsumsi Resmi	Konsumsi Resmi Berekening	Konsumsi Bermeter Berekening	Air Berekening	
		Konsumsi Resmi Tak Berekening	Konsumsi Tak Bermeter Berekening		
	Kehilangan Air		Kehilangan Air Non-Fisik	Kehilangan Air Resmi Tak Berekening	Konsumsi Bermeter Tak Berekening
		Konsumsi Tak Bermeter Tak Berekening			
Kehilangan Air Fisik		Kehilangan Air Fisik	Konsumsi Tak Resmi		
			Ketidakakuratan Meter Pelanggan dan Kesalahan Penanganan Data		
Kebocoran pada Pipa Distribusi dan Transmisi	Kebocoran dan Luapan dari Tangki-Tangki Penyimpanan Perusahaan Air Minum				
Kebocoran di Pipa Dinas hingga ke Meter Pelanggan					

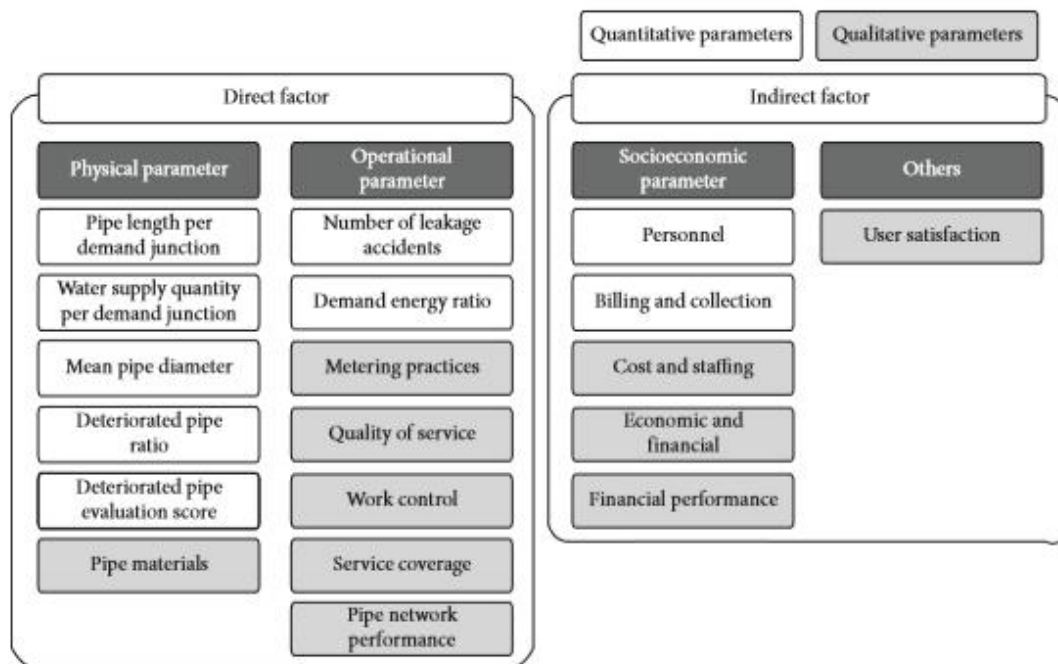
Sumber : Farley et.al (2008)

2.3.3. Parameter yang Mempengaruhi Kehilangan Air

Dongwoo Jang (2018) menyatakan bahwa kehilangan air yang dinyatakan dalam rasio *Non Revenue Water* (NRW) merupakan kriteria penting dalam penetapan rencana peningkatan jaringan distribusi air bersih, maka perlu dilakukan identifikasi parameter yang mempengaruhinya. Sistem klasifikasi faktor yang berpengaruh terhadap NRW telah dikembangkan oleh berbagai lembaga. Para peneliti dari berbagai negara juga telah mengusulkan sistem klasifikasi faktor NRW yang efektif dalam jaringan distribusi air bersih. Klasifikasi faktor yang digunakan secara garis besar meliputi faktor fisik, operasional, dan sosial ekonomi. Selanjutnya diperlukan standar yang tepat dalam mengklasifikasikan parameter utama (D. Jang, 2018). Standar yang memadai adalah hal yang wajib dimiliki ketika mengklasifikasikan parameter jaringan distribusi air yang dipilih dari para peneliti atau berbagai organisasi. Dongwoo Jang (2018), mengusulkan tiga kriteria sebagai faktor independen. Sistem klasifikasi faktor didasarkan pada sifat inheren dari parameter. Dongwoo Jang (2018) menyarankan jika parameter yang terkait dengan jaringan distribusi air bersih lebih sesuai menggunakan parameter fisik, operasional, atau sosial ekonomi dan mengklasifikasikan menjadi salah satu dari tiga kelompok ini, di mana ruang lingkup cakupan, ketersediaan data, dan karakteristik data dipertimbangkan. Ketika data diperoleh, karakteristik regional dapat diidentifikasi berdasarkan apakah data batas dibagi menjadi wilayah administrasi atau zona layanan. Kuantifikasi data untuk pemilihan parameter dimungkinkan dengan pertimbangan apakah data yang dikumpulkan valid secara numerik dan dapat digunakan sebagai standar untuk perbandingan atau penilaian wilayah yang dianalisis. Jika parameter yang ditunjuk hanya mengungkapkan karakteristik kualitatif yang tidak dapat dikuantifikasi, maka akan sulit untuk menerapkannya dalam pengelolaan NRW. Sistem klasifikasi parameter dikembangkan secara obyektif sesuai dengan karakteristik masing-masing parameter, dan ini memungkinkan untuk mempertimbangkan semua parameter jaringan distribusi air yang disarankan oleh lembaga internasional dan peneliti sebelumnya.

Parameter yang terkait dengan NRW diperiksa sehubungan dengan parameter fisik, operasional, dan sosial ekonomi. Parameter efektif untuk NRW dipilih sesuai dengan sistem klasifikasi yang dikembangkan dari parameter utama. Parameter fisik seperti rata-rata diameter pipa, panjang pipa, jumlah sambungan pelanggan, panjang pipa per sambungan pelanggan, jumlah pasokan air per sambungan pelanggan, dan rasio deteriorasi pipa telah direkomendasikan dalam penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Dongwoo Jang dan Gyewoon Choi (2017). Jika digunakan untuk pengelolaan NRW, maka jumlah suplai air dan rasio deteriorasi pipa merupakan parameter yang berpengaruh dominan. Selain itu juga terdapat parameter tidak langsung yang terkait dengan NRW meliputi parameter sosial dan ekonomi. Apabila NRW dianalisis berdasarkan pada data hasil pengukuran, maka sulit untuk memasukkan parameter sosial dan ekonomi ke dalam analisis. Sedangkan pada kenyataannya parameter fisik dan operasional secara tidak langsung dipengaruhi oleh parameter sosial dan ekonomi, dengan demikian, karakteristik regional dan faktor sosial ekonomi harus dipertimbangkan ketika mengevaluasi data operasional. Dalam penelitian yang dilakukannya, Dongwoo Jang (2018) menetapkan tiga kriteria untuk menyusun parameter yang berpengaruh terhadap NRW. Pertama, berkaitan dengan sifat-sifat dari parameter ketika menentukan apakah parameter yang terkait dengan jaringan air bersih lebih sesuai untuk faktor fisik, operasional, atau sosial ekonomi dan mengklasifikasikannya menjadi salah satu dari tiga parameter ini. Kedua, perlu mempertimbangkan ketersediaan data dan karakteristik data dengan mempertimbangkan ruang lingkup cakupan area yang dalam hal ini harus memungkinkan untuk mengukur parameter yang dipilih, meliputi apakah data valid yang dikumpulkan secara numerik dan apakah data itu dapat digunakan sebagai standar untuk penilaian atau perbandingan antar daerah yang harus diperiksa. Bagian kuantifikasi dari data kualitatif NRW adalah penting dan perlu digunakan sesuai dengan standar yang ditetapkan. Lebih banyak faktor dapat digunakan tergantung pada yang dipilih, dan ditemukan bahwa prediksi NRW yang mencerminkan karakteristik regional adalah hal yang memungkinkan.

Berbeda dengan Jang (2018), penelitian yang dilakukan oleh Jang dan Choi (2017) tidak memperhitungkan parameter tidak langsung. Studi ini berfokus pada parameter fisik dan operasional yang terkait dengan sistem distribusi air. Parameter fisik dipertimbangkan, dan data yang diukur seperti jumlah kebocoran juga digunakan untuk mengelola NRW. Komponen neraca air dalam sistem distribusi air dapat dihitung menggunakan data yang diukur secara nyata tetapi sulit untuk melakukannya dalam sistem distribusi air karena zona layanan yang tidak dibangun dan kesalahan desain dalam sistem distribusi air. Selain itu, manajemen berkala merupakan elemen penting dalam sistem distribusi air termasuk identifikasi pipa bocor, manajemen tekanan hidrolik, dan operasi pompa yang tepat. Di bawah perhitungan NRW konvensional, pertimbangan parameter fisik lebih diutamakan daripada parameter sosial ekonomi. Jika parameter fisik hanya digunakan untuk menghitung NRW, ini dapat mengurangi biaya ekonomi untuk mengukur NRW dan membantu dalam memilih pemeliharaan zona layanan dalam sistem distribusi air.



Gambar 2.1. Parameter yang Mempengaruhi Kehilangan Air (D. Jang, 2018)

2.3.4. Strategi Pengelolaan Kebocoran

Malcolm Farley dan Roland Liemberger (2004) menyatakan bahwa terdapat empat faktor yang dapat diterapkan secara terpadu di dalam satu strategi pengelolaan kebocoran. Faktor-faktor ini mempengaruhi bagaimana kebocoran kemudian dikelola dan dengan demikian volume dan nilai ekonomi kebocoran dapat dianalisis dalam sebuah jaringan distribusi perusahaan air bersih. Faktor tersebut mencakup (Farley dan Liemberger, 2004):

1. Pengelolaan tekanan pada jaringan.
2. Kecepatan dan kualitas perbaikan kebocoran.
3. Pengendalian kebocoran secara aktif (*Active Leakage Control*).
4. Pengelolaan asset pada jaringan.

Teknologi terkini meter air dan keakuratan data memiliki peran penting dalam identifikasi kebocoran secara cepat dan memperkirakan akumulasi kebocoran secara bertahap. Beberapa otorita penyedia air bersih mengintegrasikan pengumpulan data dari tingkat *District Metered Area (DMA)* untuk identifikasi lokasi kebocoran dengan langkah sebagai berikut (Farley et.al, 2008):

1. Menggunakan data meter air dan data tekanan untuk mengidentifikasi zona layanan yang mengalami kebocoran atau akumulasi kebocoran.
2. Mempersempit area kebocoran di dalam zona layanan
3. Menentukan titik detail lokasi kebocoran

Proses perbaikan kebocoran memerlukan keakuratan yang baik pada tiap tahapan untuk menghindari biaya galian yang tinggi terutama kondisi *dry hole* (galian di titik-titik yang diduga mengalami kebocoran yang terbukti tidak mengalami kebocoran). Efektivitas pada aktivitas ini tergantung pada (Farley et.al, 2008):

1. Tekanan sistem
2. Volume dan jenis kebocoran
3. Jenis material pipa.

Lama waktu kebocoran yang dibiarkan berlangsung berpengaruh pada volume kehilangan fisik sehingga perbaikan harus segera dilaksanakan begitu kebocoran dideteksi. Kualitas perbaikan juga berdampak pada apakah perbaikan akan bertahan lama. Isu-isu kunci yang harus dipertimbangkan ketika menyusun kebijakan perbaikan antara lain adalah (Farley et.al, 2008):

1. Organisasi dan prosedur-prosedur yang efisien sejak pemberitahuan awal hingga perbaikan itu sendiri
2. Ketersediaan peralatan dan bahan-bahan
3. Pendanaan yang memadai
4. Standar-standar yang tepat untuk bahan-bahan dan kinerja
5. Manajemen dan staf yang berkomitmen
6. Kualitas pipa

Apabila memungkinkan, perlu untuk melakukan perhitungan kehilangan kecil (*background losses*) dan *excess losses* (kebocoran yang tidak terdeteksi saat ini). *Background losses* adalah peristiwa-peristiwa terpisah (yaitu kebocoran-kebocoran kecil dan rembesan pada sambungan pipa) yang mengalir pada kecepatan terlalu rendah untuk dideteksi oleh sebuah survei pendeteksi kebocoran aktif. Kehilangan tersebut akhirnya terdeteksi secara tidak sengaja atau setelah memburuk hingga survei pendeteksi kebocoran aktif akhirnya menemukannya.

Excess losses mencakup air yang hilang karena kebocoran-kebocoran yang tidak terdeteksi dan diperbaiki dalam kebijakan pengendalian kebocoran yang berlaku saat ini yang dapat didekati dengan persamaan (Farley et.al, 2008) :

$$EL = RL - BL \quad (2.2)$$

Di mana

EL = *Excess Losses*

RL = *Real Losses*

BL = *Background Losses*

Jika persamaan ini menghasilkan nilai negatif untuk *excess losses*, asumsi untuk analisis komponen kehilangan fisik (misalnya nilai durasi kebocoran) harus diperiksa ulang dan, jika perlu, dikoreksi. Jika nilainya masih negatif setelah asumsi diperiksa ulang, ini menunjukkan bahwa digunakan data yang tidak benar dalam penghitungan neraca air. Sebagai contoh, para manajer perusahaan air bersih mungkin telah kurang memperhitungkan input sistem atau terlalu melebih-lebihkan kehilangan non fisik dan semua komponen harus diperiksa ulang.

2.4. *Spatial Point Process*

2.4.1. *Spatial Point Pattern*

Spatial point pattern merupakan pola acak titik dalam ruang d dimensi (dengan jumlah dimensi sama dengan atau lebih dari dua). *Spatial point pattern* digunakan sebagai model statistik untuk menganalisis pola persebaran titik, di mana titik tersebut mewakili lokasi dari suatu objek penelitian. Sebagai contoh adalah persebaran lokasi pohon di hutan, deposit emas yang dipetakan dalam survei geologis, bintang-bintang di gugusan rasi bintang, titik kecelakaan di jalan, titik lokasi gempa bumi, titik panggilan telepon seluler, titik penampakan hewan, atau kasus penyakit langka. Analisis pola persebaran dalam hal ini adalah fokus utama yang penting untuk diteliti dalam *spatial point pattern* (Baddeley et.al, 2016).

Ketertarikan pada metode untuk menganalisis data semacam itu berkembang pesat di berbagai bidang ilmu pengetahuan, terutama dalam bidang ekologi, epidemiologi, geosains, *engineering*, astronomi, ekonometrik, dan kriminologi. Satu tugas penting adalah mengidentifikasi tren spasial dalam intensitas titik. Analisis statistik dari penataan ruang titik dapat mengungkapkan fitur-fitur penting, seperti kecenderungan deposit emas ditemukan dekat dengan patahan geologi utama, atau untuk kasus penyakit yang lebih lazim ditemukan di dekat sumber polusi. Analisis data *point pattern* telah memberikan bukti penting untuk penelitian penting tentang segala sesuatu mulai dari penularan kolera, perilaku pembunuh berantai, hingga struktur skala besar alam semesta (Baddeley et.al, 2016).

Analisis *spatial point pattern* merupakan pengganti variabel spasial yang tidak dapat diobservasi (seperti kesuburan tanah atau paparan polusi), atau peristiwa sejarah yang tidak tercatat (seperti perilaku teritorial, historis mineralisasi geologis, atau evolusi kosmologis). Sebaliknya, pola spasial banyak mempengaruhi proses lain seperti pola spasial organisme individu memengaruhi banyak aspek ekosistem. Tidak ada solusi sederhana untuk analisis statistik dalam *spatial point pattern*, di mana kita berharap hanya akan sekedar menginstruksikan komputer untuk menganalisis data yang kita miliki. Merupakan prinsip utama metode statistik bahwa analisis perlu dilakukan dengan cara yang benar dan untuk menganalisis data tidak hanya tergantung pada format data. Itu tergantung pada bagaimana data diperoleh, dan tentu saja pada tujuan analisis. Meskipun demikian, secara khusus Baddeley (2016) menekankan bahwa data titik tidak dapat selalu diperlakukan sebagai pola titik. Misalnya, pengukuran keasaman tanah pada serangkaian lokasi pengambilan sampel di lapangan biasanya tidak diperlakukan sebagai *point pattern* di mana pada kasus tersebut lokasi pengambilan sampel tidak relevan dengan studi keasaman tanah.

2.4.2. Poisson Point Process

Poisson Point Process dapat digunakan sebagai pendekatan pada *spatial point process* apabila memiliki asumsi bahwa tidak ada interaksi antara satu titik lokasi dengan lokasi lainnya. Pada penelitian ini diasumsikan bahwa lokasi antara satu kebocoran dengan kebocoran yang lain tidak memiliki interaksi, sehingga memenuhi syarat untuk menggunakan metode *spatial poisson point process*. *Poisson Point Process* terbagi menjadi dua jenis yaitu *inhomogeneous* dan *homogeneous*.

Proses *poisson* dinyatakan homogen apabila fungsi dari intensitas λ bernilai konstan atau tunggal. Pada jenis *homogeneous poisson process* banyaknya kejadian dalam interval waktu atau suatu area mempunyai nilai parameter λ yang tunggal (Gustin, 2011). Estimasi parameter λ dapat dilakukan dengan *Maximum Likelihood Estimation (MLE)*. Berikut merupakan fungsi untuk *homogeneous poisson process* dengan intensitas λ

$$f(x) = e^{(1-\lambda)|W|} \lambda^{n(x)} \quad (2.3)$$

Di mana $n(x)$ adalah jumlah titik pada setiap grid yang dibentuk, *maximum likelihood estimation* dari λ adalah sebagai berikut (Baddeley, 2008) :

$$\hat{\lambda} = \frac{n(x)}{\text{area}(W)} \quad (2.4)$$

$$\text{var}(\hat{\lambda}) = \frac{\lambda}{\text{area}(W)} \quad (2.5)$$

Inhomogeneous poisson process merupakan suatu proses *poisson* dengan fungsi intensitas λ yang tidak konstan dan bervariasi sesuai dengan perubahan waktu atau lokasi (Gustin, 2011). *Inhomogeneous poisson process* dengan fungsi intensitas $\lambda(u)$ bergantung pada parameter u . Berikut merupakan fungsi untuk *inhomogeneous poisson process* (Baddeley, 2008):

$$f(x) = \exp\left(\int_W^1 (1 - \lambda_0(u)) du\right) \prod_i \lambda_0(x_i) \quad (2.6)$$

Uji homogenitas pada proses *poisson* dilakukan untuk mengetahui apakah intensitas pola titik yang diteliti termasuk dalam pola titik homogen atau pola titik non homogen, sehingga pada saat melakukan estimasi parameter didapatkan model yang sesuai dengan karakteristik pola titik yang diteliti. Intensitas yang dimaksud pada penelitian ini adalah banyaknya kebocoran dalam setiap grid lokasi.

Uji homogenitas intensitas proses *poisson* dilakukan menggunakan metode *chi-square*. Hipotesis dari uji homogenitas intensitas adalah sebagai berikut.

H_0 = Data titik lokasi kebocoran homogen

H_1 = Data titik lokasi kebocoran tidak homogen

Penolak hipotesis tersebut dapat dilakukan dengan menggunakan statistik uji sebagai berikut (Baddeley et.al, 2016)) :

$$\chi^2 = \sum_j \frac{(n_j - e_j)^2}{e_j} = \sum_j \frac{(n_j - \bar{\lambda} a_j)^2}{\bar{\lambda} a_j}, \quad (2.7)$$

Di mana,

$$\bar{\lambda} = \frac{n}{a} \quad (2.8)$$

Dengan :

n = total jumlah data

a = total jumlah area

2.4.3. Uji Kesesuaian Distribusi

Terdapat beberapa cara untuk melakukan uji *goodness of fit* diantaranya uji Kolmogorov-Smirnov, uji Anderson-Darling, dan uji *chi-square*. Pada penelitian ini metode yang digunakan untuk uji *goodness of fit* adalah dengan menggunakan uji Anderson-Darling. Metode Anderson-Darling merupakan metode untuk menguji distribusi dari suatu data, yang merupakan modifikasi dari uji Kolmogorov-Smirnov (Law & Kelton, 2000). Berikut merupakan hipotesis dari uji Anderson-Darling.

H_0 = Data mengikuti pola fungsi distribusi tertentu

H_1 = Data tidak mengikut pola fungsi distribusi tertentu

Penolakan hipotesis tersebut dapat dilakukan dengan menggunakan statistik uji sebagai berikut :

$$A^2 = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [2i - 1] [\ln(F(x_i)) + \ln(1 - F(x_{n+1-i}))] \quad (2.9)$$

Keterangan :

A^2 = Nilai statistik uji Anderson-Darling

n = Jumlah Sample

x_i = data ke-i yang telah diurutkan

$F(x_i)$ = fungsi distribusi kumulatif dari distribusi tertentu

Di mana hipotesis akan tolak H_0 apabila $A^2 > \text{Critical Value}(CV)$, nilai kritis untuk Anderson-Darling dirumuskan sebagai berikut (Ang dan Tang, 2007) :

$$CV = \frac{0,752}{1 + \frac{0,75}{n} + \frac{2,25}{n^2}} \quad (2.10)$$

2.4.4. Keluarga Eksponensial

Distribusi yang termasuk ke dalam keluarga eksponensial diantaranya adalah distribusi normal, distribusi *Poisson*, distribusi binomial, distribusi eksponensial, distribusi gamma, distribusi binomial negatif, dan distribusi *inverse gaussian*. Suatu distribusi variabel random Y termasuk dalam keluarga eksponensial apabila dapat ditulis dalam persamaan berikut (Dobson, 1996) :

$$f(x; \lambda) = \exp[a(x)b(\lambda) + c(\lambda) + d(x)] \quad (2.11)$$

Di mana b dan c merupakan koefisien dari parameter θ , a dan d merupakan parameter dari x . berikut akan diuraikan penjelasan mengenai distribusi *Poisson* dan *link function* dari distribusi *Poisson*.

Distribusi *Poisson* adalah salah satu jenis distribusi dari banyaknya kejadian pada interval waktu tertentu atau suatu wilayah tertentu. Kejadian tersebut tergantung pada selang waktu tertentu atau suatu wilayah tertentu, di mana hasil pengamatan berupa data diskrit dan antar kejadian saling independen. Berikut merupakan fungsi peluang dari distribusi *Poisson* (McCullagh dan Nelder, 1983) :

$$f(x; \lambda) = x = \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!}, x = 0, 1, 2, \dots \quad (2.12)$$

Nilai parameter $\lambda > 0$, apabila x merupakan variable random yang berdistribusi *Poisson* maka *mean* dan variasinya sama yaitu λ , atau dapat dituliskan seperti pada persamaan berikut.

$$E(x) = \text{Var}(x) = \lambda \quad (2.13)$$

Link function merupakan perhubung antara prediktor linier dengan *mean* dari fungsi distribusi. *Link function* dari suatu distribusi didapatkan dengan membentuk

fungsi peluang dari distribusi kedalam bentuk keluarga exponensial. Berikut merupakan penalaran *link fuction* dari distribusi *Poisson*.

$$Pr(X = x) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!} \quad (2.14)$$

$$f(x, \lambda) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!} \quad (2.15)$$

$$f(x, \lambda) = \exp \left(\ln \left[\frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!} \right] \right) \quad (2.16)$$

$$f(x, \lambda) = \exp \left(\ln(e^{-\lambda}) + \ln(\lambda^x) - \ln(x!) \right) \quad (2.17)$$

$$f(x, \lambda) = \exp(-\lambda) \cdot \exp(x \ln(\lambda)) \cdot \exp(-\ln(x!)) \quad (2.18)$$

$$f(x, \lambda) = \exp \left[\frac{(-\lambda)}{\ln(x!)} + \ln(\lambda) + x \right] \quad (2.19)$$

Sehingga,

$$\exp[a(x)b(\lambda) + c(\lambda) + d(x)] = \exp \left[\frac{(-\lambda)}{\ln(x!)} + \ln(\lambda) + x \right] \quad (2.20)$$

Persamaan (2.20) didapatkan dari persamaan (2.19) yang disetarakan dengan persamaan (2.17) sehingga didapatkan bentuk persamaan yang sama. Berdasarkan persamaan (2.20) maka dapat ketahui nilai $a(x) = (1/\ln(x!))$, $b(\lambda) = (-\lambda)$, $c(\lambda) = \ln(\lambda)$, $d(x) = x$. Komponen pada bentuk keluarga eksponensial yang merupakan link function adalah $c(\lambda)$, sehingga link function untuk distribusi *Poisson* adalah $\ln(\lambda)$, dengan penalaran sebagai berikut :

$$c(\lambda) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p \quad (2.21)$$

$$\ln(\lambda) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p \quad (2.22)$$

$$\ln(\lambda) = \vec{x}^t \vec{\beta} \quad (2.23)$$

2.4.5. Regresi *Poisson*

Regresi *Poisson* merupakan regresi yang menggambarkan hubungan antara variable Y yang berdistribusi *Poisson* dan terdapat satu atau lebih variabel prediktor (X). Regresi *Poisson* sering diaplikasikan untuk melakukan analisis pada data jenis *count* (Agresti, 1990). Berikut merupakan bentuk regresi *Poisson* :

$$\begin{aligned} y_i &\sim \text{Poisson}(\lambda_i), \\ \lambda_i &= \exp(\mathbf{x}_i^T \boldsymbol{\beta}) \end{aligned} \quad (2.24)$$

Di mana :

λ_i = rata-rata jumlah kejadian pada suatu interval tertentu atau suatu area tertentu

\vec{X}_i = variable prediktor yang dinotasikan sebagai berikut

$$\vec{x}_i = [1 \ x_{1i} \ x_{2i} \ \dots \ x_{ki}]$$

$\vec{\beta}$ = parameter regresi *Poisson* yang dinotasikan sebagai berikut

$$\vec{\beta} = [\beta_0 \ \beta_1 \ \beta_2 \ \dots \ \beta_k]^T$$

Pada penelitian ini digunakan *mixture poisson regression*, hal ini dikarenakan setelah dilakukan pengujian, hasilnya menunjukkan bahwa sebaran data bersifat *inhomogeneous poisson process*, sehingga dimungkinkan memiliki model persamaan lebih dari 1 mengikuti jumlah pola yang tersebut. *Mixture model* merupakan model gabungan dari beberapa sub populasi. Berikut merupakan bentuk distribusi probabilitas, dengan asumsi terdapat dua komponen *mixture poisson* (Wang et.al, 2002) :

$$Pr(X = x) = p \frac{e^{-\lambda_1} \lambda_1^x}{x!} + (1 - p) \frac{e^{-\lambda_2} \lambda_2^x}{x!} \quad (2.25)$$

Sehingga model regresi *mixture* adalah sebagai berikut.

$$\log \lambda = p(\lambda_1(u)) + (1 - p)(\lambda_2(u)) \quad (2.26)$$

Pada penelitian ini, data *covariate* merupakan fungsi *covariate* $Z(u)$ yang mendefinisikan semua lokasi spatial u , di mana ditampilkan dalam bentuk *pixel*

image atau *countour plot*. Berikut merupakan bentuk model *inhomogeneous poisson process* dengan fungsi *covariate* (Baddeley, 2008)

$$\lambda_i(u) = \exp(\beta_0 + \beta_1 Z(u)) \quad (2.27)$$

2.4.6. Metode Bayesian

Estimasi parameter untuk model *inhomogeneous poisson process* dilakukan dengan menggunakan metode Bayesian. Metode statistik klasik, hal ini dikarenakan dalam statistik Bayesian memanfaatkan data sample yang diperoleh dari populasi. Pada statistik inferensia memandang parameter sebagai nilai tetap, sedangkan pada statistik Bayesian semua parameter yang tidak diketahui akan diperlakukan sebagai variable *random* atau acak (Ntzoufras, 2009). Teorema Bayes dituliskan sebagai berikut :

$$p(\lambda|x) = \frac{p(x|\lambda)p(\lambda)}{p(x)} \quad (2.28)$$

dengan,

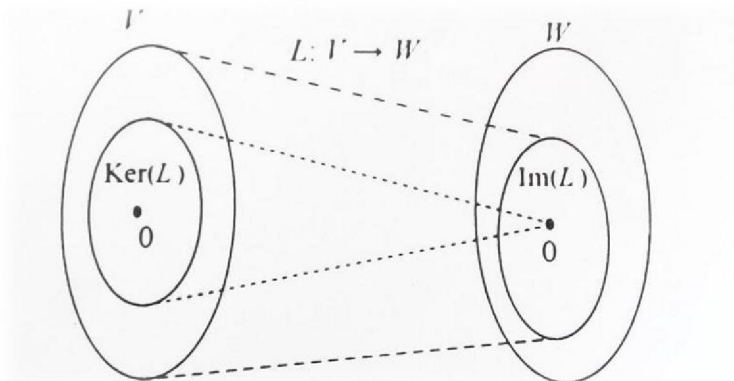
$p(\lambda|x)$: distribusi posterior

$p(x|\lambda)$: fungsi *likelihood*

$p(\lambda)$: distribusi prior

2.4.7. Transformasi *Pixel Image*

Pada penelitian ini data *covariate* ditampilkan dalam bentuk *pixel image*. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah *kernel smoothed for point pattern*. Metode ini digunakan untuk fungsi densitas, di mana menghitung konvolusi dari *isotropic gaussian kernel* dari standar deviasi sigma dengan titik massa di masing masing titik data pada lokasi x (Baddeley et.al, 2016). Konvolusi dilakukan dengan mengalikan *pixel* dengan *pixel* sebelahnya dengan matrik. Kernel biasanya merupakan nilai matrik kecil yang digunakan dalam *image convolution* (Ludwig, 2016).



Gambar 2.2. Ilustrasi *Kernel Smoothed* (Ludwig, 2016)

2.5. Kajian Studi Terdahulu

Berdasar empat faktor yang mempengaruhi kejadian kebocoran dari Malcolm Farley dan Roland Liemberger (2004), beberapa peneliti melakukan perincian parameter yang berpengaruh terhadap jumlah kejadian kebocoran pada jaringan distribusi air bersih. Peneliti Korea Selatan H.S. Park (2014) mengusulkan penggunaan beberapa parameter meliputi kapasitas reservoir, jumlah pelanggan, kecepatan perbaikan jaringan, tingkat penggantian meter air, jumlah pasokan air harian per orang, deteriorasi pipa dan panjang pipa dalam jaringan, skala pasokan air, skala fasilitas, serta fasilitas yang rusak. J.K. Jang (2012) mengusulkan penggunaan parameter jumlah kebocoran dan sambungan pelanggan, usia pipa, tekanan hidraulik, dan besar aliran minimum malam hari. J.M Lee (2013) mengusulkan penggunaan parameter tingkat penggantian pipa dalam zona layanan, tingkat penggantian meter air serta tingkat pemulihan kebocoran. Chung et.al (2014) mengusulkan penggunaan parameter jumlah pelanggan per panjang pipa dalam zona layanan, persentase rumah yang lebih tua dari 21 tahun, rasio unit apartemen, dan tingkat penggantian meter air. D. Jang dan G. Choi (2017) mengusulkan diameter pipa, panjang pipa per sambungan pelanggan, jumlah suplai air bersih per sambungan pelanggan, rasio deteriorasi pipa, jumlah kejadian kebocoran, rasio kebutuhan energi hidraulik.

Berdasarkan studi yang dilakukan H.S. Park (2014), J.K. Jang (2012), J.M Lee (2013), Chung et.al (2014) dan D. Jang dan G. Choi (2017), maka Dongwoo Jang

(2018) melakukan studi kualitatif untuk menyusun sistem klasifikasi parameter yang berpengaruh terhadap kehilangan air, khususnya kehilangan fisik. Berdasarkan penelaahan kualitatif terhadap penelitian sebelumnya Dongwoo Jang (2018) menyatakan bahwa *real losses* dipengaruhi oleh parameter fisik dan parameter operasional. Parameter yang berpengaruh terhadap kehilangan fisik antara lain jenis material pipa, diameter pipa, panjang pipa, jumlah suplai air bersih dan rasio deteriorasi pipa. Adapun parameter yang berpengaruh terhadap kehilangan air dalam proses operasional adalah jumlah kejadian kebocoran, kecepatan perbaikan dan rasio kebutuhan energi hidraulik.

Tabel 2.2. Parameter yang mempengaruhi tingkat kehilangan air fisik

PENELITI	PARAMETER	METODE	RESEARCH GAP
H.S. Park (2012)	Kapasitas <i>reservoir</i> , jumlah pelanggan, tingkat perbaikan jaringan, tingkat penggantian meter air, jumlah pasokan air harian per orang, deteriorasi pipa dan panjang pipa dalam jaringan, skala pasokan air, skala fasilitas keseluruhan dan fasilitas yang mengalami kerusakan.	<i>Multivariate Regression</i> (analisis non spasial)	Variabel tekanan hidraulik Analisis spasial
J.K. Jang (2012)	Sambungan pelanggan, usia guna pipa, tekanan hidraulik, dan debit aliran minimum malam hari	<i>Multivariate Regression</i> (analisis non spasial)	Variabel fisik jaringan Analisis spasial
J.M Lee (2013)	Tingkat penggantian pipa dalam zona layanan, tingkat penggantian meter air serta tingkat pemulihan kebocoran	<i>Multivariate Regression</i> (analisis non spasial)	Variabel fisik jaringan Analisis spasial
Chung et.al (2014)	Jumlah pelanggan per panjang pipa dalam zona layanan, persentase rumah yang lebih tua dari 21 tahun, rasio unit apartemen, dan tingkat pemasangan meter air	<i>Multivariate Regression</i> (analisis non spasial)	Variabel diameter pipa dan kecepatan perbaikan Analisis spasial

D. Jang dan G. Choi (2017)	Diameter pipa, panjang pipa per sambungan pelanggan, jumlah suplai air bersih per sambungan pelanggan, rasio deteriorasi pipa, jumlah kejadian kebocoran, rasio kebutuhan energi hidraulik.	<i>Multivariate Regression</i> dan <i>Artificial Neural Network (ANN)</i> (analisis non spasial)	Variabel kecepatan perbaikan Analisis spasial
D. Jang (2018)	Jenis material pipa, diameter pipa, panjang pipa per sambungan pelanggan, jumlah suplai air bersih per sambungan pelanggan, rasio deteriorasi pipa, jumlah kejadian kebocoran, kecepatan perbaikan, rasio kebutuhan energi hidraulik.	<i>Multivariate Regression</i> dan <i>Artificial Neural Network (ANN)</i> (analisis non spasial)	Analisis spasial

Sumber : Dongwoo Jang (2018)

Dari senarai di atas, dapat dicermati bahwa belum ada peneliti yang memasukkan parameter spasial dalam melakukan analisis kehilangan air fisik dalam jaringan distribusi. Ketiadaan parameter spasial pada penelitian sebelumnya menjadi *research gap* yang dikaji pada penelitian ini.

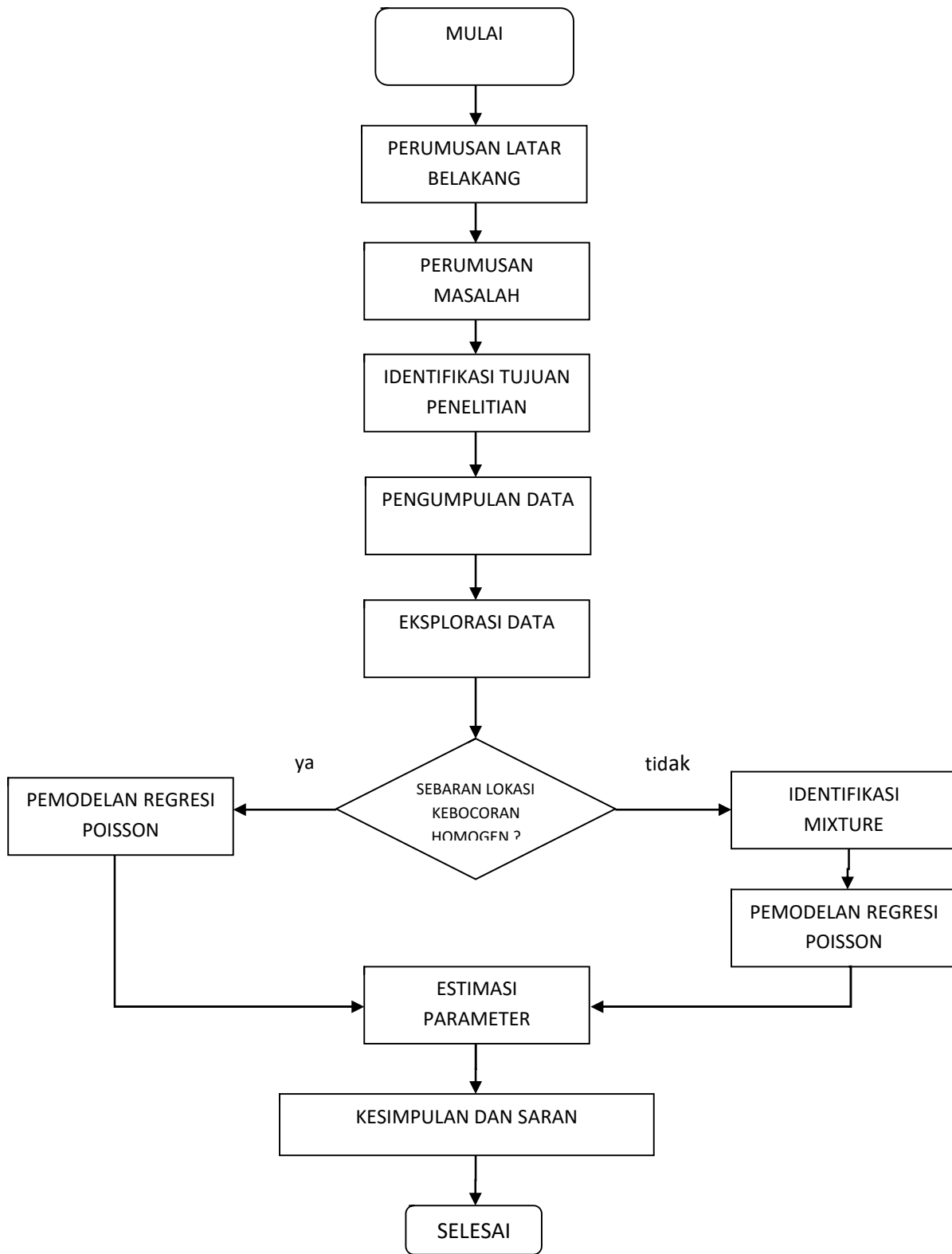
BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Pendekatan Penelitian

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

1. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif untuk menjawab perumusan masalah, variabel yang diteliti bersifat kuantitatif. Peralatan analisis yang digunakan dalam analisis data adalah *Spatial Poisson Point Process*.
2. Secara garis besar tahapan proses penelitian yang dilaksanakan adalah sebagai berikut:
 - a. Merumuskan latar belakang
 - b. Merumuskan masalah
 - c. Mengidentifikasi tujuan penelitian
 - d. Mengumpulkan data
 - e. Analisis data
 - f. Merumuskan hasil penelitian
3. Proses analisis data yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:
 - a. Melakukan analisis karakteristik pola persebaran kebocoran.
 - b. Melakukan pengujian homogenitas.
 - c. Melakukan identifikasi model *mixture* apabila tidak homogen
 - d. Melakukan estimasi parameter model dengan metode Bayesian



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

3.2. Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian ini adalah jaringan distribusi air bersih Kota Malang, Jawa Timur. Adapun alasan pemilihan lokasi penelitian adalah :

- a. Kota Malang memiliki jaringan distribusi air bersih yang telah tertata dan terbagi menjadi beberapa zona.
- b. Jaringan distribusi air bersih Kota Malang dikelola oleh PDAM Tirta Dharma yang telah menerapkan strategi penurunan rasio kehilangan air sejak tahun 2010.
- c. PDAM Tirta Dharma memiliki sistem pengelolaan data yang baik dalam penerapan strategi penurunan kehilangan air.

3.3. Rancangan Penelitian

3.3.1. Jenis dan Sumber Data Penelitian

Jenis data yang dipergunakan adalah data primer dan data sekunder. Sumber data primer didapatkan dari survei dan identifikasi lapangan. Sedangkan sumber data sekunder berasal dari studi literatur dokumen PDAM Tirta Dharma yang berupa laporan tahunan perusahaan, laporan pelaksanaan program, laporan pemeliharaan berkala maupun data lain yang diperlukan bagi penelitian ini.

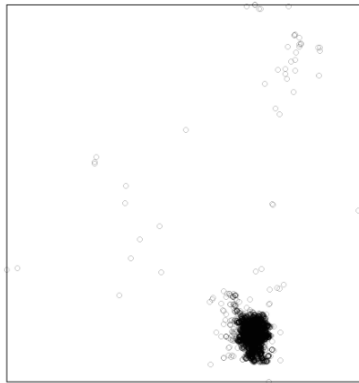
3.3.2. Metode Pengumpulan Data

Metode pengumpulan data penelitian ini adalah:

- a. Survei lapangan untuk memperoleh data koordinat geografi lokasi kebocoran pipa distribusi.
- b. Studi literatur untuk memperoleh data sekunder berupa data kapasitas produksi air baku dan kapasitas produksi eksisting, cakupan pelayanan, rekapitulasi neraca air, sistem dan peta jaringan distribusi, peta zona, peta DMA, jumlah penjualan air, jumlah sambungan pelanggan serta data fisik jaringan meliputi diameter pipa, panjang pipa, dan jenis material pipa.

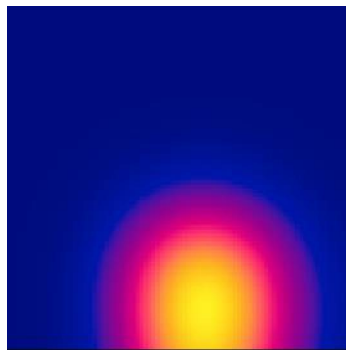
3.3.3. Variabel Penelitian

Variabel penelitian yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari variabel respon dan variabel *covariate*. Variabel respon yang digunakan berupa data jumlah kejadian kebocoran pada area lokasi yang memiliki koordinat *latitude* dan *longitude* tertentu. Data tersebut kemudian ditampilkan secara visual dalam bentuk *planar point pattern*, sebagaimana terlihat pada Gambar 3.2.



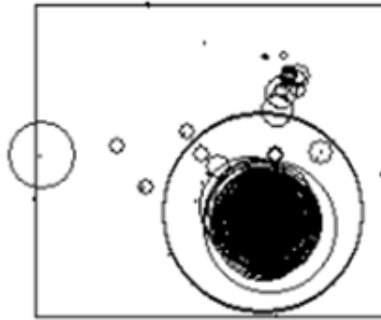
Gambar 3.2 Gambaran bentuk *Planar Point Pattern*

Data tersebut kemudian dilakukan transformasi ke dalam bentuk *pixel image*, sebagaimana yang ditampilkan pada Gambar 3.3.



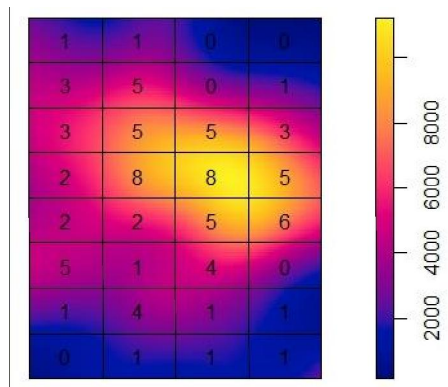
Gambar 3.3. Gambaran Bentuk *Pixel Image*

Variabel *covariate* yang digunakan merupakan variabel operasional dan fisik jaringan pada masing-masing titik kebocoran, ditampilkan dalam bentuk *pixel image* atau *marks point pattern*.



Gambar 3.4. Gambaran Bentuk *Marks Point Pattern*

Pada penelitian ini persebaran titik lokasi kebocoran dibagi menjadi beberapa grid. Dalam penelitian ini, pembagian grid dilakukan sebanyak 13 grid, sebagaimana jumlah zona. Titik lokasi kebocoran tersebut memiliki posisi *latitude* dan titik *longitude* tertentu. Setiap grid saling independen terhadap grid yang lainnya seperti pada Gambar 3.4.



Gambar 3.5. Gambaran Pembagian Grid

Pembagian grid tersebut digunakan sebagai dasar penggunaan variabel penelitian, di mana dilakukan transformasi variabel *covariate* ke dalam bentuk *pixel image* kemudian dilakukan ekstraksi menjadi 13 grid. Variabel penelitian ditunjukkan pada Tabel 3.2, sedangkan Tabel 3.3 menunjukkan struktur data pada penelitian ini.

Tabel 3.1. Variabel Penelitian

Variabel	Skala	Deskripsi
Y	Rasio	Jumlah titik kebocoran
X_1	Rasio	Waktu perbaikan kerusakan
X_2	Rasio	Diameter pipa yang rusak
X_3	Rasio	Panjang pipa per sambungan pelanggan
X_4	Rasio	Jumlah suplai per sambungan pelanggan
X_5	Rasio	Rasio deteriorasi pipa
X_6	Rasio	Rasio kebutuhan energi hidraulik

Tabel 3.2. Struktur Data Penelitian

Grid	Y	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
1	Y_1	$X_{1,1}$	$X_{1,1}$	$X_{1,1}$	$X_{1,1}$	$X_{1,2}$	$X_{1,3}$
2	Y_2	$X_{2,1}$	$X_{2,1}$	$X_{2,1}$	$X_{2,1}$	$X_{2,2}$	$X_{2,3}$
...
13	Y_{13}	$X_{13,1}$	$X_{13,2}$	$X_{13,3}$	$X_{13,4}$	$X_{13,5}$	$X_{13,6}$

3.3.4. Proses Analisis Data

Proses analisis data yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Melakukan analisis karakteristik pola persebaran kebocoran. Data koordinat geografi titik kebocoran yang didapatkan kemudian dibuat plot, sehingga didapatkan pola persebaran dari lokasi kebocoran, kemudian dilakukan analisis pola persebaran kebocoran untuk mengetahui secara visual apakah persebaran kebocoran tersebar secara merata atau tidak.
2. Melakukan pengujian homogenitas intensitas. Pengujian homogenitas intensitas dilakukan untuk meyakinkan secara statistik apakah hasil analisis secara visual yang didapatkan menunjukkan hasil yang sesuai dengan hasil perhitungan.
3. Melakukan identifikasi model *mixture*. Identifikasi model *mixture* dilakukan untuk mengetahui apakah data memiliki pola lebih dari satu. Jika terdapat indikasi *mixture* pada data, maka dilakukan pembagian data respon menjadi beberapa kategori.
4. Melakukan estimasi parameter model dengan metode Bayesian

Algoritma metode Bayesian yang digunakan untuk melakukan estimasi parameter dengan menggunakan WinBUGS adalah sebagai berikut :

- a. Membentuk fungsi *likelihood* dari distribusi *poisson*
 - b. Menentukan distribusi *prior* yang bergantung pada hasil *frequentist*
 - c. Membentuk distribusi *posterior* berdasarkan distribusi *prior*
 - d. Membentuk *full conditional posterior distribution* untuk parameter yang diestimasi
 - e. Menyusun *Directed Acyclic Graph* (DAG) pada WinBUGS
 - f. Menentukan besarnya sampel yang akan dibangkitkan sampai memenuhi sifat *irreducible*, *recurrent*, dan *aperiodic*.
 - g. Melakukan proses iterasi penaksiran parameter menggunakan *Gibbs sampling*
5. Membuat kesimpulan dan rekomendasi dari hasil analisis.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Eksplorasi Data Lokasi Kebocoran dan Variabel *Covariate*

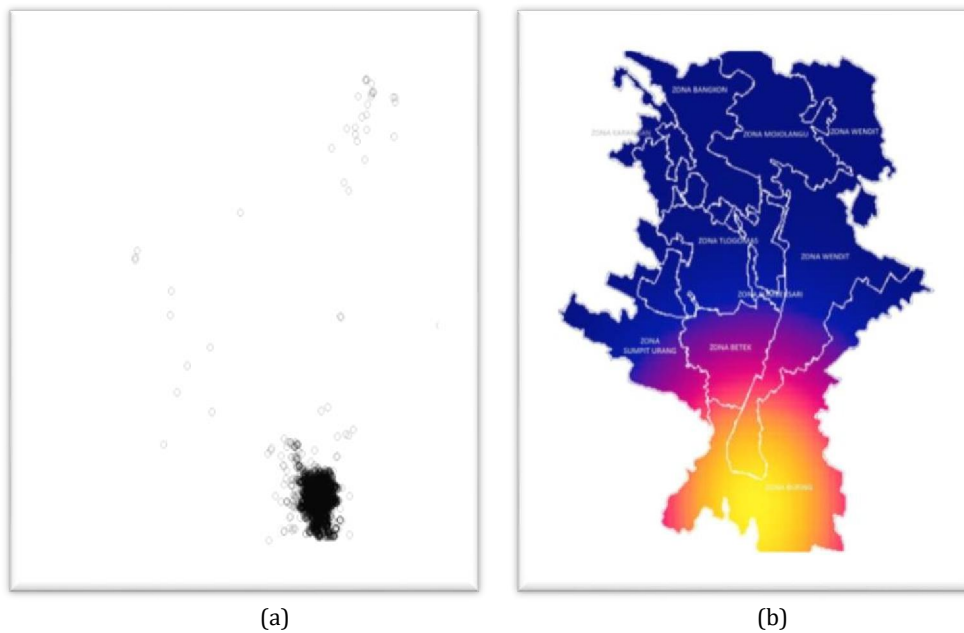
Analisis dan pembahasan dalam penelitian ini menjawab permasalahan dan mencapai tujuan penelitian. Hal-hal yang dibahas pada bab ini diantaranya adalah mengenai eksplorasi data lokasi kebocoran pipa di Kota Malang secara visual melalui intensitas dari pola persebaran kebocoran pipa. Kemudian dilakukan identifikasi terhadap data kebocoran pipa yang didapatkan dengan melakukan pengujian kesesuaian distribusi dan pengujian homogenitas intensitas untuk mengetahui intensitas dari pola persebaran kebocoran pipa memenuhi kriteria *homogeneous poisson process* atau *inhomogeneous poisson process*. Selain itu dilakukan identifikasi model *mixture* sebelum melakukan estimasi parameter. Estimasi parameter model *poisson process* dilakukan dengan menggunakan metode Bayesian, dari hasil yang didapatkan kemudian dilakukan analisis dan interpretasi.

Jumlah kebocoran pipa di Kota Malang selama masa operasional 2018 adalah sebanyak 4761 titik kebocoran pipa. Selain jumlah kebocoran pipa yang merupakan variabel respon, juga terdapat variabel *covariate* dalam penelitian ini meliputi variabel fisik dan operasional jaringan yang tertera pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Variabel *Covariate*

Variabel	<i>Covariate</i>
X_1	Waktu perbaikan
X_2	Diameter pipa
X_3	Rasio panjang pipa per sambungan pelanggan
X_4	Rasio debit pasokan per sambungan pelanggan
X_5	Rasio deteriorasi pipa
X_6	Rasio kebutuhan energi hidraulik

Karakteristik dari data lokasi kebocoran pipa dapat dilihat secara visual melalui *spatial point pattern*. Gambar 4.1 merupakan visualisasi dari data lokasi kebocoran pipa di Kota Malang dengan menggunakan *spatial point pattern* dengan menggunakan *software R* dengan *syntax* pada Lampiran 4.



Gambar 4.1(a) *Planar Point Pattern* lokasi kebocoran pipa
(b) *Pixel Image* intensitas kebocoran pipa

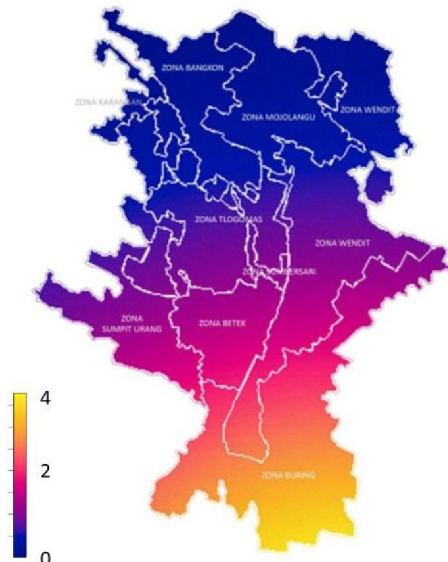
Gambar 4.1 (a) menunjukkan bahwa secara visual persebaran dari lokasi titik kebocoran tidak merata di mana terlihat bahwa pada daerah layanan bagian selatan terdapat titik kepadatan yang lebih tinggi dibanding dengan daerah layanan yang lain. Dari Gambar 4.1 (b) menunjukkan terdapat puncak titik intensitas dari persebaran lokasi kebocoran pipa, yaitu pada daerah layanan bagian selatan, tepatnya pada Zona Wendit dan Zona Buring. Apabila ditinjau dari aspek jumlah pelanggan, kedua zona tersebut memiliki jumlah pelanggan terbesar, di mana Zona Wendit melayani 28,16% dari keseluruhan jumlah pelanggan. Sementara itu Zona Buring melayani 21,48% dari keseluruhan sambungan pelanggan. Dari tinjauan aspek aset jaringan, kedua zona memiliki panjang pipa terbesar, di mana Zona Wendit memiliki 30,71% dari keseluruhan panjang pipa jaringan distribusi. Sedangkan Zona Buring memiliki

18,87% dari keseluruhan panjang pipa jaringan distribusi. Selain itu, Gambar 4.1 (b) menunjukkan bahwa secara jelas bahwa gradasi intensitas kebocoran tersebar secara tidak merata dengan pengamatan secara visual pada *pixel image* intensitas kebocoran. Hal tersebut yang mengindikasikan tidak homogenya persebaran lokasi kebocoran di daerah layanan air bersih Kota Malang, di mana terdapat dua kelompok intensitas, yakni intensitas kebocoran tinggi dan intensitas kebocoran rendah.

Karakteristik dari setiap variabel *covariate* ditunjukkan pada Gambar 4.2 hingga Gambar 4.7 yang merupakan hasil analisis dengan menggunakan perangkat lunak R-Studio dengan *syntax* yang tertera pada bagian Lampiran 4.

4.1.1. Variabel Waktu Perbaikan Kebocoran

Variabel *covariate* pertama yang digunakan dalam penelitian ini adalah waktu perbaikan kebocoran pipa yang digambarkan pada Gambar 4.2 dalam bentuk *pixel image*. Semakin cepat penanganan sebuah kebocoran maka semakin kecil kehilangan air fisik. Waktu perbaikan kebocoran merupakan waktu yang diperlukan antara mulai dari diketahuinya kebocoran hingga selesainya penanganan.



Gambar 4.2 *Pixel image* waktu perbaikan (dalam satuan hari)

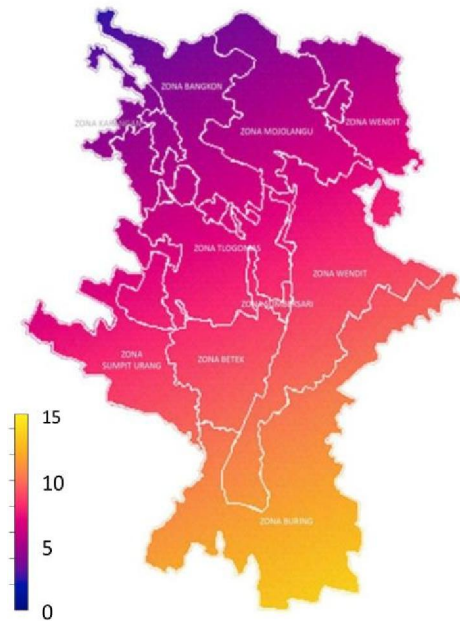
Waktu perbaikan kebocoran pipa merupakan faktor yang menentukan kehilangan air fisik yang merupakan salah satu di antara empat pilar penanganan kebocoran yang direkomendasikan oleh Malcolm Farley dan Roland Liemberger (2004) serta J.M Lee (2013).

Gambar 4.2 menunjukkan bahwa daerah layanan dengan daerah intensitas waktu perbaikan kebocoran paling lambat berada pada daerah layanan bagian tenggara, yakni pada Zona Betek, Zona Wendit dan Zona Buring dengan kisaran waktu perbaikan antara 2 hingga 4 hari. Kecenderungan gradasi waktu perbaikan semakin cepat ke arah daerah layanan bagian utara dan barat laut, yakni pada Zona Mojolangu, Zona Bangkon, Zona Tlogomas dan Zona Karang dengan lama perbaikan maksimal sebesar 1 hari.

4.1.2. Variabel Diameter Pipa

Diameter pipa merupakan salah satu parameter yang mempengaruhi kebocoran pipa. Penelitian yang dilakukan oleh D. Jang dan G. Choi (2017) serta D. Jang (2018) sangat menganggap penting keberadaan dimensi pipa terutama berkaitan dengan diameter. Hal ini karena pada sebuah jaringan distribusi diameter pipa berpengaruh terhadap parameter hidraulik aliran, yang meliputi kecepatan aliran, debit dan tekanan hidraulik.

Berdasarkan Gambar 4.3 diketahui bahwa pipa yang paling banyak mengalami kebocoran terjadi pada daerah layanan bagian selatan dan bagian tenggara, yakni pada Zona Buring dan Zona Wendit dengan sebagian besar diameter pipa antara 10 inch hingga 15 inch, dengan jenis pipa *Galvanised Iron*. Sebagian kecil kejadian kebocoran yang lain terjadi pada daerah layanan bagian utara hingga bagian barat laut, yakni pada Zona Mojolangu, Zona Bangkon, Zona Tlogomas dan Zona Karang dengan diameter pipa antara 0,5 hingga 5 inch dengan jenis pipa PVC dan *Galvanised Iron*. Kecenderungan gradasi diameter kebocoran pipa semakin mengecil dari daerah layanan bagian tenggara ke arah daerah layanan bagian barat laut.



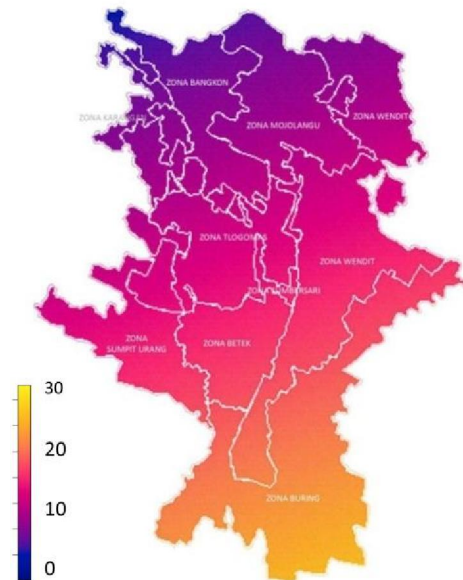
Gambar 4.3 *Pixel image* diameter pipa yang rusak (dalam satuan inch)

4.1.3. Variabel Rasio Panjang Pipa per Sambungan Pelanggan

Variabel panjang pipa direkomendasikan oleh D. Jang dan G. Choi (2017), D. Jang (2018), H.S. Park (2014) serta Chung et.al (2014) sebagai parameter yang berpengaruh terhadap kehilangan air fisik pada jaringan distribusi air bersih. Dalam penilaian kinerja sebuah jaringan distribusi air bersih, rasio panjang pipa per sambungan sangat diperlukan dalam kaitannya dengan beberapa aspek tertentu dalam merencanakan pengembangan pelayanan penyediaan air di masa mendatang.

Gambar 4.4 menunjukkan bahwa titik kebocoran dengan intensitas tinggi terjadi pada daerah layanan dengan rasio sebesar 20 hingga 30 m panjang pipa per sambungan pelanggan. Hal tersebut terjadi pada daerah layanan bagian selatan dan tenggara yakni Zona Betek, Zona Buring, Zona Summersari dan sebagian Zona Wendit bagian selatan. Sedangkan sebagian kecil lokasi kebocoran berada pada daerah layanan dengan rasio sebesar 15 hingga 20 m panjang pipa per sambungan pelanggan yang terjadi pada daerah layanan bagian utara, tengah dan barat laut, yakni Zona Bangkon, Zona Tlogomas, Zona Dieng, Zona Supit Urang dan Zona

Mojolangu. Kecenderungan gradasi rasio panjang pipa per sambungan pelanggan semakin mengecil dari daerah layanan bagian tenggara ke arah daerah layanan bagian barat laut.

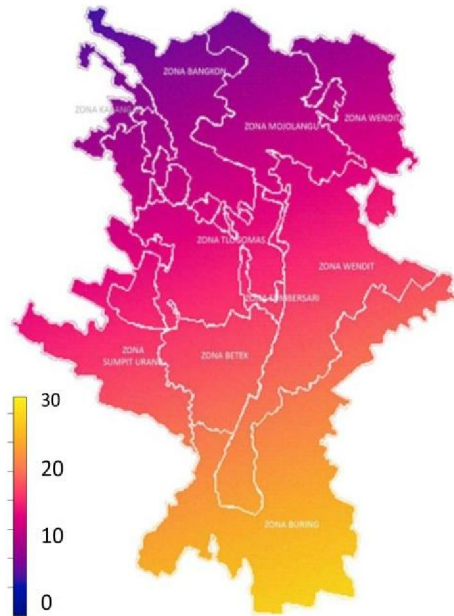


Gambar 4.4. *Pixel Image* rasio panjang pipa per sambungan pelanggan (dalam satuan meter per sambungan pelanggan)

4.1.4. Variabel Rasio Debit Pasokan per Sambungan Pelanggan

Variabel debit pasokan air bersih direkomendasikan oleh H.S. Park (2014), D. Jang dan G. Choi (2017) serta D. Jang (2018). Dalam penelitian oleh para peneliti tersebut ditemukan bahwa besar debit air bersih yang dipasok ke dalam jaringan distribusi merupakan parameter yang mempengaruhi kehilangan air fisik.

Dari Gambar 4.5 dapat diketahui bahwa titik kebocoran terbanyak terjadi pada daerah dengan rasio sebesar 20 hingga 30 m³/bulan debit pasokan per sambungan pelanggan yakni pada Zona Buring, Zona Wendit bagian selatan dan Zona Sumpitsari.



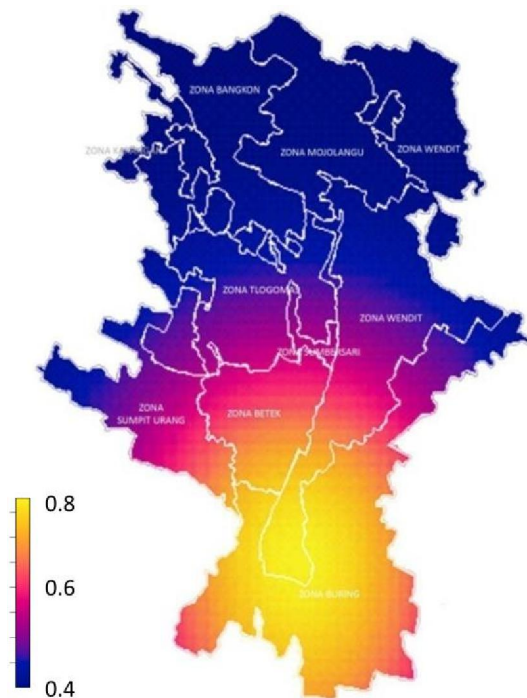
Gambar 4.5. *Pixel image* debit pasokan per sambungan pelanggan (dalam satuan m^3 /bulan/sambungan pelanggan)

4.1.5. Variabel Rasio Deteriorasi Pipa

Variabel usia guna dan deteriorasi direkomendasikan oleh H.S. Park (2014), D. Jang dan G. Choi (2017) dan D. Jang (2018). Dalam penelitian ini rasio deteriorasi dianalisis berdasarkan perbandingan rasio antara usia guna pipa dengan usia teoritik pipa berdasarkan jenis material pipa. Hal ini karena terdapat variasi jenis material pipa yang terpasang pada jaringan pelayanan Kota Malang, meliputi *Galvanised Iron*, Asbestos, PVC, dan HDPE. *Marks point pattern* dan *pixel image* deteriorasi pipa pada daerah layanan air bersih Kota Malang digambarkan pada Gambar 4.6.

Dari gradasi deteriorasi terlihat bahwa rasio terbesar terdapat Zona Buring dan Zona Wendit bagian selatan, yang merupakan lokasi titik kebocoran terbanyak. Pada kedua zona ini jenis material pipa yang rusak sebagian besar terdiri atas *Galvanised Iron* dan PVC dengan rasio sebesar 0,8 atau pipa yang rusak tersebut memiliki usia guna sebesar 80% dari usia guna pipa teoritik. Penyebab utama kerusakan adalah

karena material pipa galvanis tersebut berkarat dan sebagian kecil karena kualitas sambungan yang tidak mampu menahan tekanan yakni pada pipa berbahan PVC.

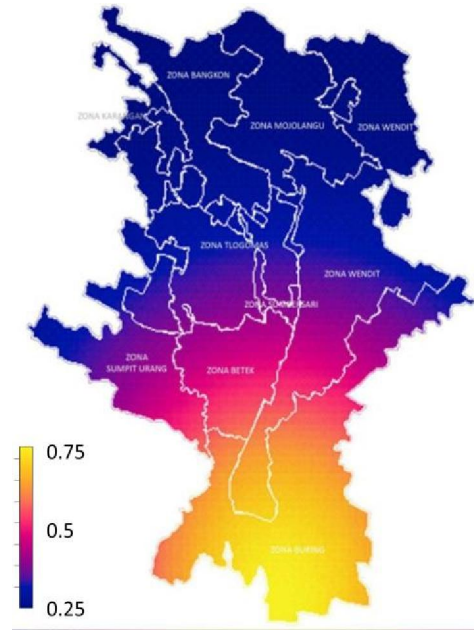


Gambar 4.6. *Pixel image* rasio deteriorasi pipa

4.1.6. Variabel Rasio Kebutuhan Energi Hidraulik

Kinerja pelayanan atau penyediaan air bersih di setiap daerah yang dilayani oleh suatu otorita penyedia air bersih belum tentu memiliki kualitas dan kuantitas yang sama antara daerah satu dengan daerah lainnya. Penilaian kinerja pelayanan air bersih pada suatu lokasi atau daerah tertentu digunakan acuan berupa kriteria teknis pelayanan air bersih dengan sistem jaringan distribusi. Tekanan air pada *tapping* pelanggan harus memenuhi kriteria minimal sebesar 1 hingga 2 atm. Hal ini mengingatkan bahwa kinerja pelayanan atau penyediaan air bersih di setiap daerah yang dilayani oleh sebuah otorita penyedia air bersih bervariasi kualitas dan kuantitasnya. Pada daerah layanan air bersih di Kota Malang, tekanan hidraulik rata-rata ada sebesar 0,75 atm dengan nilai tekanan kritis adalah sebesar 0,5 atm pada daerah

layanan terjauh dan tertinggi. Rasio kebutuhan *energi* hidraulik diperoleh dengan membandingkan antara angka tekanan hidraulik pada daerah tersebut dengan nilai minimal yang disyaratkan yakni sebesar 1 atm.



Gambar 4.7. *Pixel Image* rasio kebutuhan energi hidraulik

Parameter energi tekanan hidraulik ini direkomendasikan oleh D. Jang dan G. Choi (2017), D. Jang (2018) dan JK Jang (2012). *Marks point pattern* dan *pixel image* rasio kebutuhan tekanan hidraulik digambarkan pada Gambar 4.7. Dari gambar tersebut diketahui bahwa kebocoran terjadi pada daerah layanan dengan rasio terbesar terdapat pada daerah layanan bagian tenggara, yakni Zona Buring dan Zona Wendit, yakni sebesar 0,75. Tekanan kerja pada kedua zona tersebut lebih tinggi karena zona ini melayani daerah layanan dengan kondisi topografi rata-rata yang lebih tinggi apabila dibandingkan dengan zona layanan yang lain. Dengan kebutuhan tekanan kerja yang tinggi maka akan mempengaruhi operasional pompa, *reservoir* dan jaringan distribusi.

Berdasarkan keenam variabel akan dilakukan analisis lebih lanjut dengan mendapatkan model *spatial poisson point process* untuk mengetahui variabel *covariate* yang mempengaruhi pola titik kebocoran.

4.2. Model Spatial Poisson Point Process

Data lokasi kebocoran yang telah dilakukan eksplorasi secara visual kemudian dilakukan identifikasi *inhomogeneous poisson process* melalui uji kesesuaian distribusi serta uji homogenitas intensitas. Apabila data lokasi kebocoran memiliki lebih dari satu distribusi atau bimodal, maka untuk selanjutnya dilakukan identifikasi model *mixture*. Estimasi parameter model *spatial poisson point process* menggunakan metode Bayesian dilakukan setelah kedua identifikasi selesai dilakukan.

4.2.1. Uji Homogenitas Intensitas

Uji homogenitas intensitas dilakukan untuk mengetahui apakah persebaran kebocoran tersebar secara merata atau tidak merata. Hasil yang akan didapatkan dari pengujian homogenitas intensitas merupakan salah satu karakteristik dari jenis *poisson process* yaitu persebaran kebocoran mengikuti pola *homogeneous poisson process* atau *inhomogeneous poisson process*. Hipotesis yang digunakan dalam pengujian homogenitas intensitas dengan menggunakan *chi-square* sebagai berikut :

H_0 : Intensitas lokasi kebocoran homogen.

H_1 : Intensitas lokasi kebocoran tidak homogen.

Tabel hasil pengujian homogenitas intensitas menggunakan *software* R dengan *syntax* pada Lampiran 5 sebagai berikut.

Tabel 4.2. Pengujian Homogenitas Intensitas

Nilai Statistik	<i>alpha</i>	<i>p-value</i>
46537	0,05	$2,2 \times 10^{-16}$

Hasil pengujian pada Tabel 4.2 memberikan informasi bahwa nilai statistik *chi-square* sebesar 46537 dan *p-value* sebesar $2,2 \times 10^{-16}$ dengan menggunakan alpha sebesar 0,05 atau 5%. Keputusan yang didapatkan berdasarkan hasil pengujian tersebut adalah tolak H_0 yang dapat disimpulkan bahwa tingkat intensitas persebaran lokasi kebocoran wilayah Kota Malang tidak homogen atau termasuk dalam jenis *inhomogeneous poisson process*. Hal tersebut sesuai dengan visualisasi gradasi

densitas jumlah kebocoran pada Gambar 4.1, di mana secara visual terdapat perbedaan intensitas, yaitu intensitas kebocoran tinggi pada daerah layanan bagian selatan dan intensitas kebocoran rendah pada daerah layanan bagian tengah dan utara.

4.2.2. Uji Kesesuaian Distribusi

Uji kesesuaian distribusi dilakukan untuk mengetahui bahwa variabel respon atau data jumlah kebocoran setiap zona wilayah Kota Malang berdistribusi *poisson unimodal*. Hipotesis yang digunakan dalam pengujian kesesuaian distribusi dengan menggunakan Anderson-Darling sebagai berikut

H_0 : Data mengikuti pola fungsi distribusi *poisson unimodal*.

H_1 : Data tidak mengikuti pola fungsi distribusi *poisson unimodal*.

Tabel pengujian kesesuaian distribusi adalah sebagai berikut.

Tabel 4.3. Pengujian Kesesuaian Distribusi

Nilai Statistik	Critical Value	Alpha
141,34	2,5018	0,05

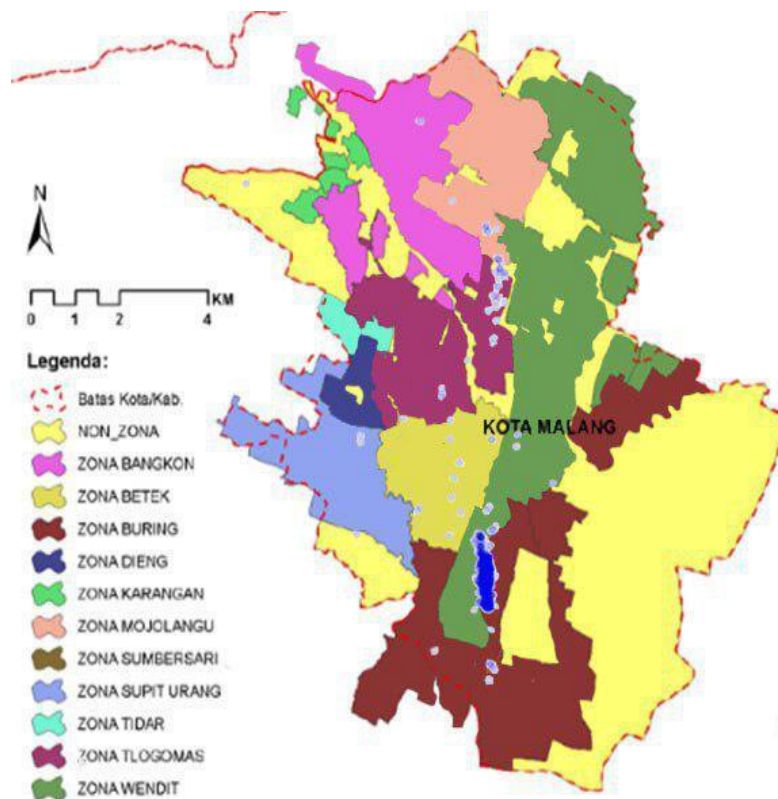
Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.1 didapatkan nilai statistik sebesar 141,34 sedangkan *critical value* yang didapatkan sebesar 2,5018 dengan menggunakan alpha sebesar 5%. Keputusan yang dapat diambil dari pengujian kesesuaian distribusi adalah tolak H_0 . Hal ini dapat disimpulkan bahwa distribusi dari data jumlah kebocoran tidak berdistribusi *poisson unimodal* sehingga harus melalui proses analisis *mixture poisson model*.

4.2.3. Identifikasi Mixture

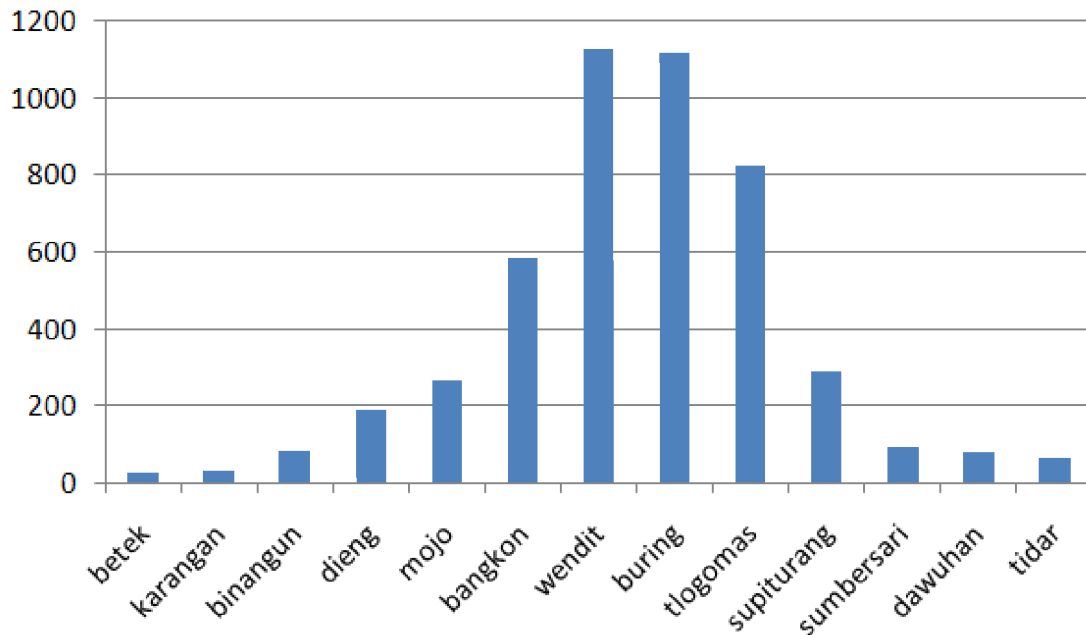
Identifikasi *mixture* dilakukan apabila pola persebaran lokasi kebocoran tersebar secara tidak merata atau memiliki karakteristik *inhomogeneous poisson*

process. Identifikasi *mixture* dilakukan untuk mengidentifikasi bahwa terdapat lebih dari satu pola data lokasi kebocoran pipa di Kota Malang.

Pola persebaran lokasi kebocoran pipa yang tidak homogen secara uji statistic dan secara visual, merupakan identifikasi bahwa terdapat lebih dari satu pola data lokasi kebocoran pipa. Berdasarkan Gambar 4.8 diketahui bahwa data jumlah lokasi kebocoran dalam setiap zona menunjukkan lebih dari satu pola. Hal inilah yang mendasari penggunaan model *mixture* yang dapat memodelkan data dengan sifat bimodal.



Gambar 4.8. Plot Titik Kebocoran Pada Peta Zona



Gambar 4.9. Histogram Jumlah Kebocoran Pada Tiap Zona

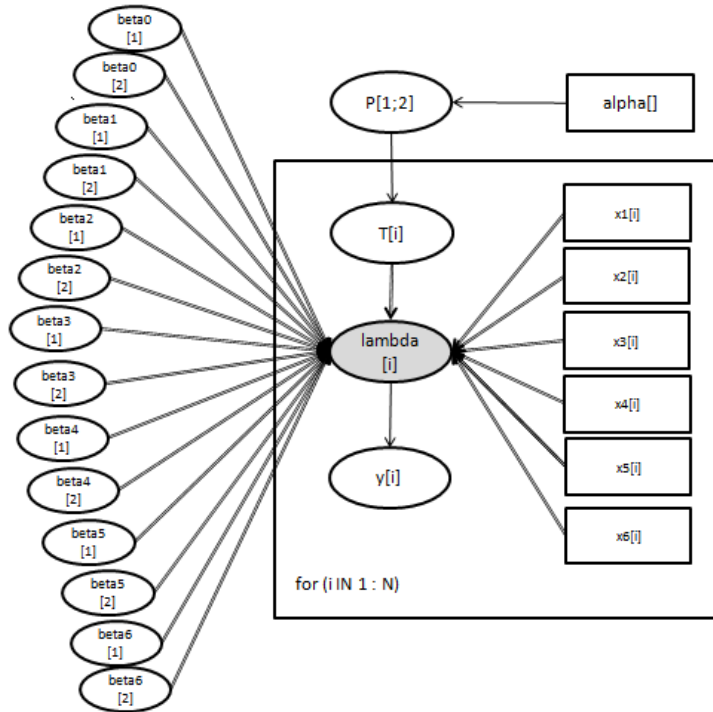
4.2.4. Pemodelan *Mixture Poisson Regression*

Hasil identifikasi *mixture* menunjukkan bahwa pada penelitian ini akan digunakan model *mixture poisson regression* dengan dua komponen. Pemodelan *mixture poisson regression* dilakukan menggunakan *software* WinBUGS.

Struktur parameter model *mixture poisson regression* dapat dibentuk dengan *Directed Acyclic Graph* (DAG) seperti pada Gambar 4.10. Struktur parameter model *mixture poisson regression* pada Gambar 4.10 yang terdiri dari variable $y[i]$ sebagai node berdistribusi *poisson* yang didapatkan dari $\log \lambda[i]$. Bentuk persamaan $\lambda[i]$ adalah sebagai berikut :

$$\lambda[i] = (\beta_0[T[i]] + \beta_1[T[i]] * X_1[i] + \beta_2[T[i]] * X_2[i] + \beta_3[T[i]] * X_3[i] + \beta_4[T[i]] * X_4[i] + \beta_5[T[i]] * X_5[i] + \beta_6[T[i]] * X_6[i])$$

Nilai $T[i]$ digunakan untuk mengidentifikasi $\lambda[i]$, di mana nilai $T[i]$ berubah sesuai distribusi *dirichlet* $P[1:2]$ yang memiliki dua kategori sesuai banyaknya komponen *mixture* yang akan dimodelkan.



Gambar 4.10. Directed Acyclic Graph (DAG) Mixture Poisson Regression

```

model:
{
  for(i in 1 : N) {
    y[i] ~ dpois(mu[i])
    mu[i] <- lambda[T[i]]
    T[i] ~ dcat(P[])
  }
  P[1:2] ~ ddirch(alpha[])
  lambda[1] ~ dgamma(2,1)
  lambda[2] ~ dgamma(0.01,0.01)
}

DATA
list(y=c(440,17,61,1106,55,140,18,202,74,215,54,825,1060),
      N=13,
      alpha=c(1,1),
      T=c(1,NA,NA,NA,NA,NA,NA,NA,NA,NA,NA,NA,2))

INITS
list(lambda=c(1,NA))

```

Gambar 4.11. Syntax R untuk pengelompokkan komponen *mixture*

Distribusi *prior* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *pseudo prior*, di mana *prior* bergantung pada hasil *frequentist* yang ditunjukkan oleh node di luar kotak pada Gambar 4.6. *Prior* dibangkitkan berdistribusi normal dengan *mean* dan standard deviasi didapatkan dari hasil estimasi parameter dan $\frac{1}{\text{Standard Error}}$ dari fungsi *frequentist* GLMs.

Distribusi *posterior* digunakan untuk memperoleh estimasi parameter model, di mana digunakan metode MCMC dengan *Gibbs Sampling* untuk pengambilan sampel. Hasil yang didapatkan harus memenuhi sifat *irreducible*, *aperiodic*, dan *reccurent* yang dapat dilihat dari hasil *history plot*, *autocorrelation*, dan *kernel density*.

Hasil *history plot process* MCMC yang dilakukan dalam penelitian ini ditunjukkan oleh Lampiran 11. Berdasarkan pada Lampiran 11 tersebut dapat diketahui bahwa *history plot* bersifat *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 *fastly mixing* sehingga dapat menangkap semua kemungkinan nilai parameter. Hal ini menunjukkan bahwa *history plot* memenuhi sifat *irreducible*. Hasil *history plot* pada Lampiran 11 menunjukkan bahwa nilai yang dibangkitkan tidak berada pada keperiodikan tertentu, dengan kata lain process MCMC yang dilakukan memenuhi sifat *aperiodic*. Lampiran 11 membuktikan bahwa proses iterasi MCMC yang dilakukan memenuhi sifat *recurrent*, karena nilai parameter yang dibangkitkan dalam state-*i* dapat kembali pada state-*i*.

Pada Lampiran 15 mengenai *autocorrelation plot* menunjukkan bahwa pada korelasi antara nilai sampel yang dibangkitkan berada pada daerah distribusi posterior. Lampiran 12 adalah hasil *kernel density* yang didapatkan, di mana menunjukkan bahwa *density posterior* untuk parameter model memberikan bentuk densitas *bell shape* atau mengikuti pola distribusi dari parameter model. Berdasarkan pengecekan yang dilakukan didapatkan bahwa 3 sifat rantai markov telah terpenuhi sehingga dapat dinyatakan bahwa rantai markov yang dihasilkan sudah konvergen.

Hipotesis yang digunakan dalam penelitian ini untuk pengujian hasil estimasi masing-masing parameter adalah sebagai berikut.

Hipotesis untuk masing-masing parameter β

$H_0: \beta_j(i)=0$ (parameter β pada komponen *mixture* ke-i tidak signifikan digunakan, di mana $i=1$ dan 2)

$H_1: \beta_j(i)\neq 0$ (parameter β pada komponen *mixture* ke-i signifikan digunakan, di mana $i=1$ dan 2)

Hipotesis untuk masing masing parameter P :

$H_0: P_j(i)=0$ (parameter P pada komponen *mixture* ke-i tidak signifikan digunakan, di mana $i=1$ dan 2)

$H_1: P_j(i)\neq 0$ (parameter P pada komponen *mixture* ke-i signifikan digunakan, di mana $i=1$ dan 2)

Keputusan uji akan menolak H_0 didasarkan pada *credible interval* dari distribusi posterior. Apabila *credible interval* tidak melewati 0 (nol) maka H_0 ditolak, hal ini berarti parameter model signifikan untuk digunakan. Hasil estimasi parameter model *mixture poisson regression* ditampilkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4. Hasil Estimasi Parameter

Parameter	Rata-Rata	Standard Deviasi	2,5%	Median	97,5%
P[1]	0,7654	0,00567	0,5894	0,7645	0,8956
P[2]	0,2346	0,07843	0,1563	0,2355	0,3457
Beta 0 [1]	6,333	0,09194	6,152	6,333	6,513
Beta 0 [2]	4,695	0,03919	4,623	4,696	4,766
Beta 1 [1]	-1,002	0,175	-1,346	-1,002	-0,6593
Beta 1 [2]	-0,02485	0,0407	-0,105	-0,02472	0,0544
Beta 2 [1]	0,2917	0,1456	0,00478	0,2924	0,5764
Beta 2 [2]	-0,2863	0,04637	-0,3778	-0,286	-0,1967
Beta 3 [1]	0,9196	0,1372	0,6505	0,9195	1,188
Beta 3 [2]	0,5916	0,1231	0,3518	0,5915	0,8318
Beta 4 [1]	-1,302	0,1875	-1,671	-1,302	-0,9366
Beta 4 [2]	-0,6442	0,1158	-0,8715	-0,6441	-0,4176
Beta 5 [1]	0,6465	0,1473	0,3576	0,6468	0,9349
Beta 5 [2]	0,3789	0,05417	0,2739	0,3785	0,4861
Beta 6 [1]	0,01481	0,03794	-0,05982	0,01496	0,08878
Beta 6 [2]	0,7729	0,0648	0,6468	0,7727	0,9008

Berdasarkan Tabel 4.4 diketahui bahwa hampir seluruh parameter signifikan kecuali pada parameter Beta 1[2] dan Beta 6[1] yang tidak signifikan. Hal ini dikarenakan *credible interval* tidak melewati 0 (nol), sehingga semua parameter kecuali Beta1[2] dan Beta6[1] signifikan untuk digunakan dalam model. Adapun bentuk regresi *poisson* yang digunakan adalah persamaan (2.24).

Pada penelitian ini digunakan regresi *mixture poisson*, hal ini karena setelah dilakukan pengujian hasil menunjukkan bahwa data *inhomogeneous poisson process*, sehingga dimungkinkan memiliki model persamaan lebih dari 1 mengikuti jumlah pola yang tersebut. *Mixture model* merupakan model gabungan dari beberapa sub-populasi. Berikut merupakan bentuk distribusi probabilitas, dengan asumsi terdapat dua komponen *mixture poisson* (Wang et.al, 2002) :

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

Sehingga model regresi *mixture* adalah sebagai berikut :

$$\log \lambda = p \left((\lambda_1(u)) \right) + (1 - p) (\lambda_2(u))$$

Apabila $\lambda_i(u) = \exp(\beta_0 + \beta_1 Z(u))$, maka persamaan model *Mixture Poisson Point Process* dapat ditulis sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \log \lambda = & p(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_6 X_6) + (1 \\ & - p)(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_6 X_6) \end{aligned}$$

Sehingga didapatkan persamaan,

$$\begin{aligned} \log \lambda = & 0,7654(6,333 - 1,002 X_1 + 0,2917 X_2 + 0,9196 X_3 - 0,13024 X_4 \\ & + 0,6465 X_5 + 0,01481 X_6) + (1 - 0,7654)(4,695 \\ & - 0,02485 X_1 - 0,2863 X_2 + 0,5916 X_3 - 0,6442 X_4 + 0,3789 X_5 \\ & + 0,7729 X_6 \end{aligned}$$

Berdasarkan model tersebut diketahui bahwa proporsi untuk banyaknya titik kebocoran per grid paling tinggi terdapat di komponen 1, hal ini dilihat dari nilai proporsi pada komponen 1 yaitu sebesar 0,7654 atau 76,54% banyaknya kejadian kebocoran setiap grid berada pada daerah model komponen 1 (daerah dengan intensitas kebocoran tinggi).

Berdasarkan Tabel 4.4 didapatkan bahwa pada daerah model komponen 1 (daerah dengan intensitas kebocoran tinggi) dipengaruhi oleh waktu perbaikan, diameter pipa, rasio panjang pipa per sambungan pelanggan, rasio debit pasokan per sambungan pelanggan, dan rasio deteriorisasi pipa namun tidak dipengaruhi oleh rasio kebutuhan tekanan hidraulik. Parameter yang memiliki pengaruh dengan signifikansi terhadap jumlah kejadian kebocoran terbesar adalah rasio panjang pipa per sambungan pelanggan dan rasio deteriorasi pipa. Dengan demikian, pada daerah model komponen 1, dalam perawatan jaringan distribusinya hendaknya lebih memprioritaskan perihal *Active Leakage Control (ALC)* dan manajemen aset jaringan. Dengan rasio panjang pipa per sambungan pelanggan yang tinggi, maka akan memiliki kecenderungan tekanan hidraulik yang tinggi, yang tentunya akan semakin memperbesar resiko kebocoran pipa. Pemantauan kebocoran secara aktif pada daerah yang memiliki rasio deteriorasi yang tinggi dapat mengurangi resiko kebocoran, selain juga penggantian pipa yang telah mendekati atau melampaui usia teoritisnya. Selain itu, manajemen aset jaringan khususnya pipa distribusi dan pipa sambungan pelanggan penting pula untuk dilakukan mengingat rasio deteriorasi pipa merupakan parameter kedua yang memiliki signifikansi pengaruh yang besar.

Adapun daerah model komponen 2 (intensitas kebocoran rendah) dipengaruhi oleh diameter pipa, rasio panjang pipa per sambungan pelanggan, rasio debit pasokan per sambungan pelanggan, rasio deteriorisasi pipa, dan rasio kebutuhan tekanan hidraulik namun tidak dipengaruhi oleh waktu perbaikan. Parameter yang memiliki pengaruh dengan signifikansi terbesar terhadap jumlah kejadian kebocoran adalah rasio kebutuhan tekanan hidraulik dan rasio debit pasokan per sambungan pelanggan. Dengan demikian, pada daerah model komponen 2, dalam perawatan jaringan

distribusi hendaknya lebih memprioritaskan perihal manajemen tekanan dan peningkatan kuantitas debit pasokan air bersih ke daerah layanan. Manajemen tekanan dapat dilakukan dengan penempatan instrumen pelepas tekanan seperti PRV (*Pressure Reducing Valve*) pada beberapa titik di daerah layanan.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. Dari analisis homogenitas intensitas didapatkan hasil bahwa pola persebaran kebocoran pipa di Kota Malang tidak tersebar secara merata atau termasuk dalam kriteria *inhomogeneous poisson process*.
2. Berdasarkan hasil estimasi parameter yang dilakukan, didapatkan hasil bahwa pada daerah intensitas kebocoran tinggi (model komponen 1), jumlah kejadian kebocoran dipengaruhi oleh waktu perbaikan, diameter pipa, rasio panjang pipa per sambungan pelanggan, rasio debit pasokan per sambungan pelanggan, dan rasio deteriorisasi pipa, dengan signifikansi terbesar adalah rasio panjang pipa per sambungan pelanggan dan rasio deteriorasi pipa. Adapun pada daerah dengan intensitas kebocoran rendah (model komponen 2), jumlah kejadian kebocoran dipengaruhi oleh diameter pipa, rasio panjang pipa per sambungan pelanggan, rasio debit pasokan per sambungan pelanggan, rasio deteriorisasi pipa, dan rasio kebutuhan tekanan hidraulik, dengan signifikansi terbesar adalah rasio kebutuhan tekanan hidraulik dan rasio debit pasokan per sambungan pelanggan.

5.2. Saran dan Rekomendasi

Saran yang diharapkan pada penelitian selanjutnya adalah proses analisis dilakukan dengan mengkombinasikan peta persebaran lokasi kebocoran pipa dengan peta *District Metered Area (DMA)*. Hal ini diharapkan akan memberikan hasil yang lebih akurat dibandingkan apabila menggunakan peta zona layanan.

Dengan mengacu kepada hasil penelitian, maka dapat dirumuskan rekomendasi yang berkaitan dengan operasional dan pemeliharaan jaringan distribusi air bersih Kota Malang sebagai berikut :

1. Pada daerah Zona Buring dan Zona Wendit bagian selatan hendaknya memprioritaskan perihal *Active Leakage Control (ALC)* dan manajemen aset jaringan. Dengan rasio panjang pipa per sambungan pelanggan yang tinggi, maka akan memiliki kecenderungan tekanan hidraulik yang tinggi, yang tentunya akan semakin memperbesar resiko kebocoran pipa. Pemantauan kebocoran secara aktif pada daerah yang memiliki rasio deteriorasi yang tinggi dapat mengurangi resiko kebocoran, Selain itu, manajemen aset jaringan khususnya penggantian pipa distribusi dan pipa sambungan pelanggan yang telah melebihi usia teoritiknya penting untuk dilakukan mengingat rasio deteriorasi pipa merupakan parameter kedua yang memiliki signifikansi pengaruh yang besar.
2. Pada zona yang lain, dalam operasional dan pemeliharaan jaringan distribusi hendaknya memprioritaskan perihal manajemen tekanan hidraulik dan peningkatan kuantitas debit pasokan air bersih ke daerah layanan. Manajemen tekanan hidraulik dapat dilakukan dengan penempatan instrumen pelepas tekanan seperti PRV (*Pressure Reducing Valve*) pada beberapa titik di daerah layanan.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim (2009) *Standard Pelayanan Bidang Air Minum*. Direktorat Jenderal Cipta Karya, Kementerian Pekerjaan Umum
- Anonim (2018) *Laporan Tahunan 2018*. PDAM Tirta Dharma
- Agresti, A. (2002). *Categorical Data Analysis Second Edition*; John Wiley and Sons, Inc.
- Ang, A., dan Tang, W. (2007). *Probability Concepts in Engineering*; John Wiley and Sons, Inc.
- Al-Layla, M.A., Ahmad S., dan Middlebrooks, E.J. (1978). *Water supply Engineering Design*; Ann Arbor Science
- Baddeley, A. (2008). *Spatial Point Processes and their Applications*; School of Mathematics & Statistics, University of Western Australia.
- Baddeley, A., Rubak, E., dan Turner, R. (2016). *Spatial Point Patterns Methodology and Applications with R*; CRC Press Taylor & Francis Group.
- Box, G., dan Tiao, G. (1973). *Bayesian Inference in Statistical Analysis*; John Wiley and Sons Inc.
- Farley, M., dan Liemberger, R. (2004). *Developing a Non Revenue Water Strategy*; Journal of Water Science and Technology ed. 324 hal. 65
- Farley, M., Wyeth, G., Ghazali, Z., Istandar, A. dan Singh, S. (2008). *The Managers Non Revenue Water Handbook: A Guide To Understanding Water Losses*; USAID
- Frauentorfer, R. dan Liemberger, R. (2010). *The Issues and Challenges of Reducing Non-Revenue Water*; Asian Development Bank.
- Gustin. (2011). *Investigation of some test for homogeneity of intensity with applications to insurance data*; Uppsala University.
- Law, A. M., dan Kelton, W. D. (2000). *Simulation Modeling and Analysis (Third Edition)*. New York: Mc Graw Hill.

- Jang, D., dan Choi, G. (2017). *Estimation of Non Revenue Water using MRA and ANN in Water Distribution Networks*; Journal of Water, MDPI ed. 10
- Jang, D. (2018). *A Parameter Classification System for Non Revenue Water Management in Water Distribution Networks*; Hindawi ed. 2018
- Masheka, G. (2016). *An Optimisation of Non Revenue Water Management for Livingstone Town, Zambia*; University of Zimbabwe
- McCullagh, P., dan Nelder FRS, J. (1983). *Generalized Linear Models*. London: Chapman and Hall.
- Ntzoufras, A. P. (2009). *Bayesian Modeling Using WinBUGS*. New Jersey: Wiley.
- Owiti, C.K (2013). *Factors influencing Non Revenue Water in Garissa Township*; University of Nairobi
- Saparina, W (2017). *Penurunan Kehilangan Air pada PDAM Kota Malang*; Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Wang, K., Yau, K., dan Lee, A. (2002). *A Hierarchical Poisson Mixture Regression Model to Analyse Maternity Length of Hospital Stay. Statistics in Medicine*, 3641.
- Yeboah, P.A (2008). *Management of Non Revenue Water : A Case Study of Water Supply in Accra, Ghana*; University of Loughborough

Lampiran 1. Data Lokasi Kebocoran Pipa Air PDAM

No	Lokasi Kebocoran	Lintang	Bujur
1	JL. CIAMIS 12	-7,9577486	112,6193714
2	JL,TRS.BOROBUDUR MK 80 A	-7,9387859	112,6318488
3	JL,BOROBUDUR MK, BRT WAUNG PAK PII	-7,9380544	112,6271741
4	JL.KOL.SUGIONO G.5 RT.03/RW.03 /DPN TOKO BINTANG	-7,998016	112,6316293
5	JL.IJEN 60	-7,9722083	112,6193023
6	JL.RAYA TLOGOMAS SEBRANG JALAN KANTOR POS	-7,929317	112,5985596
7	JL. PEL. BAKAHUNI 18 /MBR	-8,0055826	112,6075737
8	JL,BUKIT BARISAN JEMBATAN	-7,9710438	112,6091071
9	JL. D RANAU I/G2-B.05	-7,9780974	112,6544596
10	JL. DANAU SRUBEQ A3 F16	-8,0205851	112,6458273
11	JL. KALI SARI WONOKOYO MK PERUM ABI	-8,0307832	112,6502207
12	JL. SEKAR PUTIH WONOKOYO RT I	-8,0307831	112,6436545
....
....
4752	JL. MAWAR I/5F	-8.0094031	112.6269216
4753	JL. MAWAR I/5D	-8.0205838	112.6474688
4754	JL,SARANGAN MK SWALAYAN IKAN	-7.9581233	112.6308975
4755	JL. RAWISARI, MULYOREJO, SUKUN, KOTA MALANG, JAWA TIMUR 65147, INDONESIA	-7.9581346	112.630506
4756	SAWOJAJAR C3 E10	-7.959369	112.6313304
4757	JL. SAWOJAJAR C3E.09	-7.9853555	112.591276
4758	JL. RONGGOLawe ASRAMA	-7.9726734	112.6584646
4759	JL. RONGGOLawe	-7.9736031	112.6558412
4760	JL. RONGGOLawe	-7.9740592	112.6420863
4761	JL. S SUPRIADI MK GG7	-7.9732289	112.642185

Lampiran 2. Data Variabel Kovariat

No	Lokasi Kebocoran	X1	X2	X3	X4	X5	X6
1	JL. CIAMIS 12	2	0,5	15,94	19,24	0,23	0,5
2	JL,TRS.BOROBUDUR MK 80 A	0	2	17,9	21,61	0,23	0,75
3	JL,BOROBUDUR MK, BRT WAUNG PAK PII	2	0,5	17,9	21,61	0,23	0,75
4	JL.KOL.SUGIONO G.5 RT.03/RW.03 /DPN TOKO BINTANG	0	0,5	15,7	18,95	0,23	0,75
5	JL.IJEN 60	0	0,5	15,94	19,24	0,23	0,5
6	JL.RAYA TLOGOMAS SEBRANG JALAN KANTOR POS	0	1	19,44	23,47	0,23	0,5
7	JL. PEL. BAKAHUNI 18 /MBR	0	2	14,89	17,98	0,4	0,5
8	JL,BUKIT BARISAN JEMBATAN	0	12	17,99	21,72	0,4	0,5
9	JL. D RANAU I/G2-B.05	0	0,5	19,75	23,85	0,23	0,75
10	JL. DANAU SRUBEQ A3 F16	0	0,5	15,7	18,95	0,23	0,75
11	JL. KALI SARI WONOKOYO MK PERUM ABI	0	0,5	15,7	18,95	0,23	0,75
12	JL. SEKAR PUTIH WONOKOYO RT I	0	2	15,7	18,95	0,4	0,75
....
....
4752	JL. MAWAR I/5F	0	0,5	15,9	13,49	0,43	0,75
4753	JL. MAWAR I/5D	0	0,5	15,9	13,49	0,43	0,75
4754	JL,SARANGAN MK SWALAYAN IKAN	0	0,5	18,55	17,51	0,43	0,5
4755	JL. RAWISARI, MULYOREJO, SUKUN, KOTA MALANG, JAWA TIMUR 65147, INDONESIA	0	0,5	18,55	17,51	0,43	0,5
4756	SAWOJAJAR C3 E10	0	0,5	18,55	17,51	0,24	0,5
4757	JL. SAWOJAJAR C3E.09	0	0,75	15,29	4,02	0,43	0,5
4758	JL. RONGGOLawe ASRAMA	0	0,5	19,74	22,97	0,43	0,75
4759	JL. RONGGOLawe	0	0,75	19,74	22,97	0,43	0,75
4760	JL. RONGGOLawe	0	0,5	19,74	22,97	0,43	0,75
4761	JL. S SUPRIADI MK GG7	0	0,5	19,74	22,97	0,43	0,75

Lampiran 3. Data Hasil Trasformasi Slope Dari Covariate

No	Zona	Y	X1	X2	X3	X4	X5	X6
1	Bangkon	440	0,122727	1,369886	21,25893	25,10698	0,385818	0,50
2	Betek	17	0,411765	1,808824	14,79588	15,56176	0,389412	0,50
3	Binangun	61	0,065574	1,471311	22,0182	24,48279	0,367836	0,50
4	Buring	1106	0,129295	1,318038	15,8962	16,61424	0,390626	0,75
5	Dawuhan	55	0,163636	2,259091	17,94	17,62745	0,391673	0,50
6	Dieng	140	0,128571	2,232143	14,9365	16,83007	0,412186	0,50
7	Karangan	18	0,055556	1,319444	16,08	20,16167	0,405556	0,50
8	Mojolangu	202	0,19802	1,490099	17,98223	20,96777	0,369248	0,73
9	Sumbersari	74	0,22973	0,959459	32,88243	39,69784	0,381351	0,50
10	Supit Urang	215	0,195349	1,209302	14,10279	14,25381	0,403293	0,50
11	Tidar	54	0,296296	3,74537	19,39093	19,22481	0,389074	0,50
12	Tlogomas	825	0,146667	1,222727	17,42167	19,39205	0,394987	0,50
13	Wendit	1060	0,126415	1,166509	19,74104	20,03946	0,389879	0,75

Lampiran 4. *Syntax* R-Studio untuk plot data

```
library(spatstat)
library(maptools)
library(ggplot2)
coordinates(final2) <- ~Bujur+Lintang
final2PPP <- as(final2, "ppp")
summary(final2PPP)
marks(final2PPP, dfok = TRUE, drop = TRUE)
p1 <- plot.ppp(final2PPP, use.marks = TRUE, which.marks = 2, maxsize = TRUE, show.window = TRUE)
p2 <- plot.ppp(final2PPP, use.marks = TRUE, which.marks = 3, maxsize = TRUE, show.window = TRUE)
p3 <- plot.ppp(final2PPP, use.marks = TRUE, which.marks = 4, maxsize = TRUE, show.window = TRUE)
p4 <- plot.ppp(final2PPP, use.marks = TRUE, which.marks = 5, maxsize = TRUE, show.window = TRUE)
p5 <- plot.ppp(final2PPP, use.marks = TRUE, which.marks = 6, maxsize = TRUE, show.window = TRUE)
p6 <- plot.ppp(final2PPP, use.marks = TRUE, which.marks = 7, maxsize = TRUE, show.window = TRUE)
p0 <- plot.ppp(final2PPP, use.marks = FALSE, maxsize = TRUE, show.window = TRUE)
plot(density(split(final2PPP, 0.5)))
contour(density(final2PPP, 0.5), axes=FALSE)
plot(density(final2PPP, 0.1))
s <- with(marks(final2PPP$marks$X1))
plot(density(final2PPP, 0.3, weights = final$X1))
plot(density(final2PPP, 2, weights = final$X2))
plot(density(final2PPP, 3, weights = final$X3))
plot(density(final2PPP, 5, weights = final$X4))
plot(density(final2PPP, 0.08, weights = final$X5))
plot(density(final2PPP, 0.12, weights = final$X6))
contour(density(final2PPP, 0.3, final2PPP$marks$X1, axes=FALSE))
contour(density(final2PPP, 2, final2PPP$marks$X2, axes=FALSE))
contour(density(final2PPP, 3, final2PPP$marks$X3, axes=FALSE))
contour(density(final2PPP, 5, final2PPP$marks$X4, axes=FALSE))
contour(density(final2PPP, 0.08, final2PPP$marks$X5, axes=FALSE))
contour(density(final2PPP, 0.12, final2PPP$marks$X6, axes=FALSE))
contour(density(final2PPP, 0.1), axes=FALSE)
quadrat.test(final2PPP, 4, 3)
```

Lampiran 5. Sintaks R-Studio untuk Uji Homogenitas Intensitas

Chi-squared test of CSR using quadrat counts

Pearson X2 statistic

data: final2PPP

X2 = 46537, df = 12, p-value < 2.2e-16

alternative hypothesis: two.sided

Quadrats: 7 by 2 grid of tiles

Lampiran 6. Hasil Uji Kesesuaian Distribusi Sebelum Mixture

Goodness of Fit - Summary

#	Distribution	Kolmogorov Smirnov		Anderson Darling	
		Statistic	Rank	Statistic	Rank
1	D. Uniform	0,27633	2	7,8408	3
2	Geometric	0,25754	1	1,1289	1
3	Logarithmic	0,43703	3	3,3494	2
4	Poisson	0,69231	4	141,34	4
5	Bernoulli	No fit (data max > 1)			
6	Binomial	No fit			
7	Hypergeometric	No fit			
8	Neg. Binomial	No fit			

Goodness of Fit - Details [hide]

Poisson [#4]

Kolmogorov-Smirnov

Sample Size	13				
Statistic	0,69231				
P-Value	9,6061E-7				
Rank	4				
α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Critical Value	0,2847	0,32549	0,36143	0,40362	0,43247
Reject?	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

Anderson-Darling

Sample Size	13				
Statistic	141,34				
Rank	4				
α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Critical Value	1,3749	1,9286	2,5018	3,2892	3,9074
Reject?	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

Lampiran 7. *Syntax* Pengelompokkan Komponen Mixture

```
model;
{
for( i in 1 : N ) {
y[i] ~ dpois(mu[i])
mu[i] <- lambda[T[i]]
T[i] ~ dcat(P[])
}
P[1:2] ~ ddirch(alpha[])
lambda[1] ~ dgamma(2,1)
lambda[2] ~ dgamma(0.01,0.01)
}

DATA
list(y=c(440,17,61,1106,55,140,18,202,74,215,54,825,1060),
N=13,
alpha=c(1,1),
T=c(1,NA,NA,NA,NA,NA,NA,NA,NA,NA,NA,2))

INITS
list(lambda=c(1,NA))
```

Lampiran 8. Program Model Mixture Poisson Regression

```
model;
{
for( i in 1 : N ) {
y[i] ~ dpois(mu[i])
log(mu[i]) <- l0[T[i]] + l1[T[i]] * x1[i]+l2[T[i]] * x2[i]+l3[T[i]] * x3[i] +l4[T[i]] * x4[i] +l5[T[i]]
] * x5[i] +l6[T[i]] * x6[i]
T[i] ~ dcat(P[1:2])
}
P[1:2] ~ ddirch(alpha[])
l0[1] ~ dnorm(6.8,58.6)
l0[2] ~ dnorm(4.5,28.9)
l1[1] ~ dnorm(-1.7,22.3)
l1[2] ~ dnorm(0.6,7.5)
l2[1] ~ dnorm(-0.2,27.1)
l2[2] ~ dnorm(-1.9,12.3)
l3[1] ~ dnorm(1.5,21.6)
l3[2] ~ dnorm(-1.6,18.0)
l4[1] ~ dnorm(-0.4,12.4)
l4[2] ~ dnorm(-0.7,38.0)
l5[1] ~ dnorm(0.3,24.6)
l5[2] ~ dnorm(0.8,28.9)
l6[1] ~ dnorm(0.3,69.2)
l6[2] ~ dnorm(0.6,25.3)
}

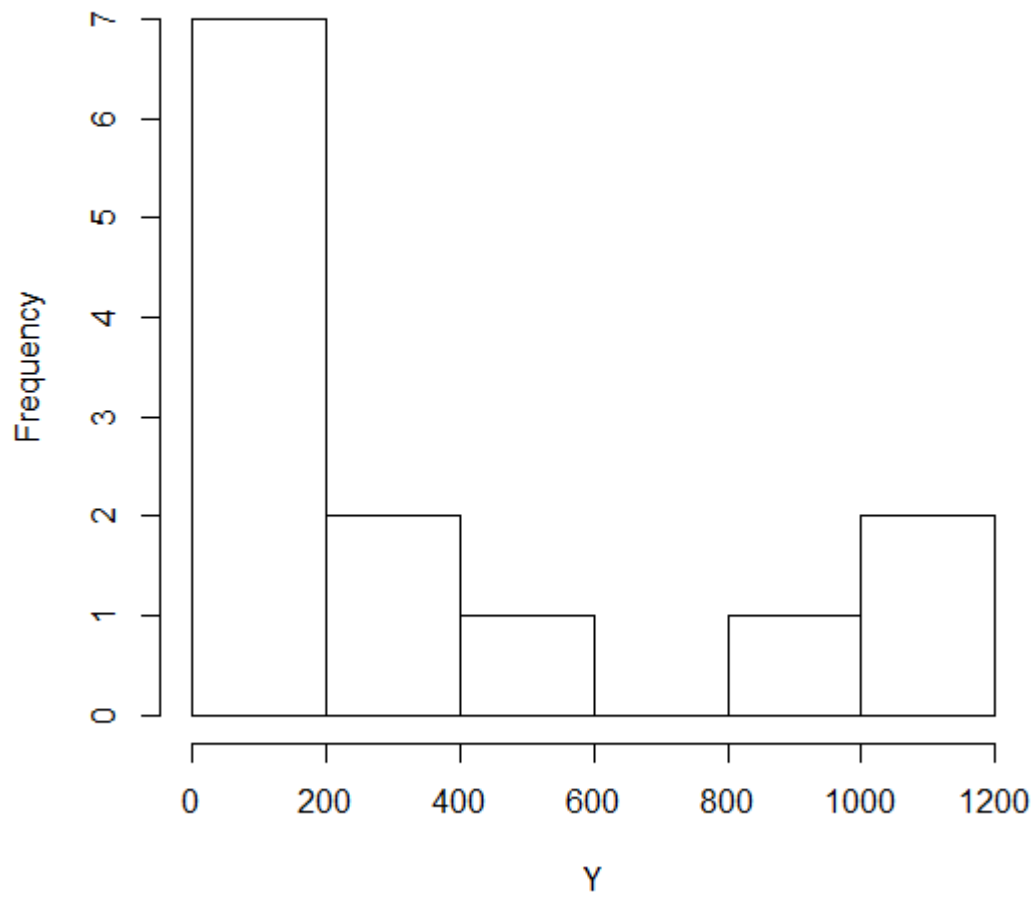
INITS
list(l0=c(-0.8,1.9),l1=c(-1.2,2.5),l2=c(-0.9,2.8),l3=c(-1,2.9),l4=c(-1,2.9),l5=c(-
1.7,1.7),l6=c(-0.5,1.8))
```

Lampiran 9. Program Model Mixture Poisson Regression (lanjutan)

```
DATA
list(y=c(440,17,61,1106,55,140,18,202,74,215,54,825,1060),
N=13,
alpha=c(1,1),
x1=c(-0.538658741,2.463663929,-1.132330134,-0.470440229,-0.113723155,-
0.477953657,-1.236392481,0.243428427,0.572809413,0.215684276,1.264257264,-
0.289992732,-0.500352179),
x2=c(-0.39134992,0.201982329,-0.254248771,-
0.461435854,0.810630167,0.774203204,-0.459534662,-0.228852767,-
0.946143492,-0.608419004,2.819704824,-0.590271864,-0.666264191),
x3=c(0.501092847,-0.817909294,0.656046331,-0.593352035,-0.176246573,-
0.789211544,-0.555841994,-0.167628589,2.873258229,-
0.959357906,0.119863555,-0.282028648,0.19131562),
x4=c(0.666928755,-0.79962641,0.571026267,-0.637920863,-0.482247611,-
0.604759951,-0.092883639,0.030968851,2.908712454,-1.000583897,-
0.236824375,-0.211130091,-0.111659491),
x5=c(-0.333340457,-0.051745794,-
1.742426628,0.04337697,0.125424181,1.732830447,1.213288428,-1.631824095,-
0.683363166,1.035995448,-0.078207374,0.385105861,-0.01511382),
x6=c(-0.525852637,-0.525852637,-0.525852637,1.806730174,-0.525852637,-
0.525852637,-0.525852637,1.645066018,-0.525852637,-0.525852637,-
0.525852637,-0.525852637,1.806730174),
T=c(1,2,2,1,2,2,2,2,2,2,2,1,1))
```

Lampiran 10. Histogram Frekuensi Y

Histogram of Y



BIODATA



WIDYO NUGROHO. Lahir di Kota Yogyakarta, pada tanggal 22 Nopember 1976, sebagai anak pertama dari pasangan dr. Widiarto, Sp.A dan Murtini. Penulis telah menempuh pendidikan dasar dan menengah di berbagai kota dimulai dari SDN Lempuyangwangi I Yogyakarta, SDN Ganung I Nganjuk, SDN Kampungdalem II Tulungagung, SMPN I Tulungagung, dan SMAN II Tulungagung. Gelar Sarjana Teknik diperoleh dari Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang, pada Jurusan Teknik Pengairan (*Water Resources Engineering*) dengan tugas akhir yang berfokus pada Hidrolika Lingkungan (*Environmental Hydraulics*). Merintis karir sebagai konsultan bidang *engineering* dan lingkungan pada tahun 2002, penulis kemudian memutuskan untuk memulai usaha di bidang konstruksi dan properti sejak 2005 hingga sekarang. Setelah mengalami suka duka dan jatuh bangun dalam dunia usaha selama 12 tahun, maka untuk memperdalam pengetahuan dan memperluas wawasan, pada tahun 2017 penulis melanjutkan pendidikan di Magister Manajemen Teknologi (MMT) Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya, dengan bidang konsentrasi Manajemen Proyek dan menyelesaikan tesis dengan judul “Analisis Pola Persebaran Lokasi Kebocoran Pipa pada Jaringan Distribusi Air Bersih Kota Malang Menggunakan *Spatial Poisson Point Process*”. Saran dan kritik bagi penyempurnaan penelitian ini dapat disampaikan pada alamat E-mail berikut : widyo.nugroho@gmail.com.