

**PENGEMBANGAN MODEL INSPEKSI KOROSI
PIPA JARINGAN DISTRIBUSI AIR MINUM**

DISERTASI



**Ditulis untuk memenuhi persyaratan mendapatkan
Gelar Doktor Pendidikan Teknologi dan Kejuruan**

**Oleh:
EDI SEPTE. S
NIM. 16193072**

**PROGRAM PASCASARJANA FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS NEGERI PADANG**

2021

ABSTRACT

Edi Septe. S, 2021. *Development of Corrosion Inspection Model on Drinking Water Distribution Pipelines.*

Loss of drinking water in distribution pipelines caused by pipe leakage due to corrosion is a global problem, especially in developing countries in the world. The high level of leakage and low quality of drinking water supplied to the community, placed this problem in the dangerous category, so it requires proactive action and preventive maintenance efforts on distribution pipeliness. This requires data and information on the actual condition of the pipe, which is obtained through inspection and analysis of pipe conditions and the surrounding environment. This study aims to develop a valid, practical and effective model of corrosion inspection of drinking water distribution pipelines, as well as a competency unit for executing the pipe corrosion inspection.

The model development procedure, referring to the Borg and Gall model, which is simplified into five stages, are: 1) Preliminary Study and Design, 2) Model Development, 3) Model Implementation and Research Product Improvement, 4) Model Operationalization, and 5) Model Normalization, Product Improvement and Dissemination. The research instruments and products consist of model books and procedure books for corrosion inspection of drinking water distribution pipelines, validated by experts in the relevant field through focus group discussions, and meet valid criteria based on the Aiken's V score. Meanwhile, the model content validation is formulated based on the statements of inspection experts and piping practitioners, analyzed using SEM PLS 3.2.8, and the compilation of competency units is carried out using the Hierarchical Task Analysis method.

The finding of this study is the model of corrosion inspection of drinking water distribution pipelines, with six stages, are: 1) Identification of pipe specifications and networks, 2) External environmental inspection, 3) Internal environmental inspection, 4) Pipe structure and surface inspection, 5) Analysis of inspection results. It is a valid model, based on Aiken's V value criteria and the rule of thumb analysis of SEM PLS 3.2.8. as well as practical and effective, based on practicality and effectiveness testing criteria. This study also formulated a competency unit for the Drinking Water Distribution Pipelines Corrosion Inspector, which was developed referring to the Indonesian National Work Competency Standards and the Indonesian Professional Certification Board. That is to complement the competency units of the drinking water management system.

Keywords: *Corrosion, Drinking Water Distribution Pipelines, Inspection Models, Inspection Procedures, Competency Units.*

ABSTRAK

Edi Septe. S, 2021. Pengembangan Model Inspeksi Korosi Pipa Jaringan Distribusi Air Minum. Disertasi Pascasarjana Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang.

Kehilangan air minum pada jaringan pipa distribusi yang disebabkan kebocoran pipa akibat korosi, merupakan masalah global, yang terjadi terutama pada negara-negara berkembang. Tingkat kebocoran yang tinggi dan rendahnya kualitas air minum yang disuplai kepada masyarakat, menempatkan masalah ini dalam kategori berbahaya, sehingga memerlukan tindakan proaktif dan upaya pemeliharaan preventif terhadap pipa distribusi. Untuk itu diperlukan data dan informasi kondisi aktual pipa, yang diperoleh melalui inspeksi dan analisis kondisi pipa dan lingkungan di sekitarnya. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model inspeksi korosi pipa jaringan distribusi air minum yang valid, praktis dan efektif, serta unit kompetensi pelaksana inspeksi korosi pipa tersebut.

Prosedur pengembangan model pada penelitian ini menggunakan model Borg and Gall yang disederhanakan menjadi lima tahap, yaitu: 1) Studi pendahuluan dan perancangan, 2) Pengembangan model, 3) Implementasi model dan perbaikan produk penelitian, 4) Operasionalisasi model, dan 5) Normalisasi model, perbaikan dan diseminasi produk. Instrumen penelitian dan produk penelitian, berupa buku model dan buku prosedur inspeksi korosi pipa jaringan pipa distribusi air minum, divalidasi oleh para ahli dalam bidang yang relevan melalui *focus group discussion*, dan memenuhi kriteria valid berdasarkan skor Aiken's V. Sedangkan validasi konten model yang dirumuskan berdasarkan pernyataan para ahli inspeksi dan praktisi perpipaan, dianalisis menggunakan SEM PLS 3.2.8, serta penyusunan unit kompetensi dilakukan dengan metode *Hierarchical Task Analysis*.

Temuan dari penelitian ini adalah Model Inspeksi Korosi Pipa Jaringan Distribusi Air Minum, dengan enam tahap, yaitu: 1) Identifikasi spesifikasi dan peta jaringan pipa, 2) Inspeksi jalur pipa, 3) Inspeksi lingkungan eksternal, 4) Inspeksi lingkungan internal, 5) Inspeksi struktur dan permukaan pipa, serta 6) Analisis hasil inspeksi. Model yang dihasilkan adalah model yang valid, berdasarkan kriteria nilai Aiken's V dan *rule of thumb* analisis SEM PLS 3.2.8. serta praktis dan efektif, berdasarkan uji kepraktisan dan efektivitas. Penelitian ini juga menghasilkan unit kompetensi Ahli Inspeksi Korosi Pipa Jaringan Distribusi Air Minum yang dikembangkan berdasarkan Standar Kompetensi Kerja Nasional Indonesia dan Badan Nasional Sertifikasi Profesi, untuk melengkapi unit kompetensi sistem pengelolaan air minum.

Kata Kunci: Korosi, Pipa Jaringan Distribusi Air Minum, Model Inspeksi dan Penilaian Pipa, Prosedur Inspeksi, Unit Kompetensi.

PERSETUJUAN AKHIR DISERTASI

Mahasiswa	: Edi Septe. S
NIM	: 16193072
Program Studi	: Doktor (S3) PTK

MENYETUJUI

Promotor I,



Prof. Dr. Nizwardi Jalinus, M.Ed.
NIP. 19520822 197710 1 001

Promotor II,



Dr. Refdinal, M.T.
NIP. 19590918 198510 1 001

PENGESAHAN

Dekan,



Dr. Fahmi Rizal, M.Pd., M.T.
NIP. 19591204 198503 1 004

Program Studi Doktor S3,



Prof. Dr. Ambivar, M.Pd.
NIP. 19550213 198103 1 003

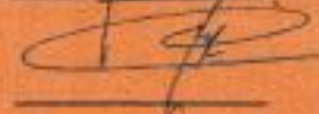
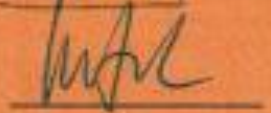
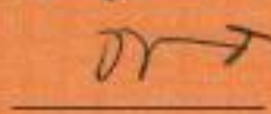
**PERSETUJUAN KOMISI
UJIAN DISERTASI**

DISERTASI

Mahasiswa : Edi Septe. S

NIM : 16193072

Dipertahankan di depan Dewan Penguji Disertasi
Program Doktor Pendidikan Teknologi dan Kejuruan
Program Pascasarjana Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang
Hari: Rabu, Tanggal : 17 Februari 2021

No.	Nama	Tanda Tangan
1	<u>Prof. Ganefri, Ph.D.</u> (Ketua)	
2	<u>Dr. Fahmi Rizal, M.Pd., M.T.</u> (Sekretaris)	
3	<u>Prof. Dr. Nizwardi Jalinus, M.Ed.</u> (Promotor)	
4	<u>Dr. Refdinal, M.T.</u> (Co Promotor)	
5	<u>Prof. Dr. Ambiyar, M.Pd.</u> (Penguji)	
6	<u>Prof. Dr. Wakhinuddin, M.Pd.</u> (Penguji)	
7	<u>Dr. Waskito, M.T.</u> (Penguji)	
8	<u>Prof. Dr. Hendra Suherman, M.T.</u> (Penguji Luar Institusi)	

Padang, 17 Februari 2021
Program Studi Doktor (S3) Pendidikan Teknologi dan Kejuruan
Ketua,


Prof. Dr. Ambiyar, M.Pd.
NIP. 19550213 198103 1 003

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa:

1. Karya tulis ilmiah saya, Disertasi dengan judul “**Pengembangan Model Inspeksi Korosi Pipa Jaringan Distribusi Air Minum**” adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapat gelar akademik, baik di Universitas Negeri Padang, maupun di Perguruan Tinggi lainnya.
2. Karya tulis ini murni gagasan, penilaian dan rumusan saya sendiri, tanpa bantuan tidak sah dari pihak lain, kecuali arahan tim promotor dan tim pembahas.
3. Di dalam karya tulis ini tidak terdapat hasil karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali dikutip secara tertulis dengan jelas dan dicantumkan pada daftar rujukan.
4. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila dikemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran pernyataan ini maka saya bersedia menerima sanksi akademik, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma dan ketentuan hukum yang berlaku.

Padang, 19 Januari 2021
Saya yang menyatakan,



Edi Septe. S
NIM. 16193072

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Kuasa, yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya, sehingga disertasi berjudul Pengembangan Model Inspeksi Korosi Pipa Jaringan Distribusi Air Minum ini dapat diselesaikan. Penelitian disertasi ini bertujuan untuk meningkatkan pengelolaan pipa jaringan distribusi air minum yang terkorosi, agar dapat mereduksi persentase kebocoran air yang disuplai kepada masyarakat.

Disertasi ini merupakan salah satu persyaratan untuk menyelesaikan studi pada Program Doktor Pendidikan Teknologi dan Kejuruan Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang. Pada kesempatan ini, peneliti mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang tinggi kepada:

1. Prof. Ganefri, M.Pd, Ph.D., selaku Rektor Universitas Negeri Padang.
2. Prof. Dr. Nizwardi Jalinus, M.Ed., selaku Promotor I dan Dr. Refdinal, M.T, selaku Promotor II, yang telah memberikan bimbingan, arahan dan petunjuk dalam penelitian dan penulisan disertasi ini.
3. Dr. Fahmi Rizal, M.Pd., M.T, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang dan Pembahas disertasi ini.
4. Dr. Waskito, M.T dan Prof. Dr. Wakhinuddin, M.Pd, selaku Pembahas disertasi ini.
5. Prof. Dr. Ambiyar, M.Pd, selaku Ketua Program S3 Pendidikan Teknologi dan Kejuruan Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang.
6. Prof. Dr. Hendra Suherman, S.T., M.T, selaku Penguji Luar Instansi yang telah memberikan pengarahan dan masukan dalam penyempurnaan disertasi ini.
7. Validator dan Responden, yang berkenan memberikan penilaian kuesioner penelitian disertasi ini.
8. H. Masri Ashar, S.H, Ketua Badan Pengurus Yayasan Pendidikan Bung Hatta, beserta jajaran, yang telah memberikan bantuan moril dan materil dalam penelitian disertasi ini.

9. Hendra Pebrizal, S.Sos, M.M, Direktur Umum Perusahaan Umum Daerah Air Minum Kota Padang, beserta jajaran, yang berkenan memfasilitasi pelaksanaan penelitian disertasi ini.
10. Dosen Program Doktor Pendidikan Teknologi dan Kejuruan Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang.
11. Tenaga Kependidikan Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang yang berkenan memberikan layanan administrasi dalam pelaksanaan disertasi ini.
12. Rekan-rekan Mahasiswa Program Doktor Pendidikan Teknologi dan Kejuruan Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang yang berkenan meluangkan waktu dan memberikan bantuan pemikiran dalam diskusi penulisan disertasi ini.

Semoga segala bantuan yang Bapak/Ibu berikan menjadi amal kebaikan dan mendapat balasan yang berlimpah dari Tuhan Yang Maha Pengasih, dan disertasi ini bermanfaat bagi kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi, serta peningkatan kualitas pendidikan.

Padang, 19 Januari 2021

Peneliti

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRACT	i
ABSTRAK	ii
PERSETUJUAN AKHIR DISERTASI	iii
PERSETUJUAN KOMISI UJIAN DISERTASI	iv
PERNYATAAN	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
 BAB I PENDAHULUAN	
A. Latar Belakang	1
B. Identifikasi Masalah	10
C. Rumusan Masalah	12
D. Tujuan Penelitian	14
E. Manfaat Penelitian	14
F. Spesifikasi Produk yang Diharapkan	15
G. Asumsi dan Keterbatasan Pengembangan	16
H. Definisi Operasional	18
 BAB II KAJIAN TEORI	
A. Landasan Filosofis	21
B. Landasan Teori	24
1. Inspeksi dan Penilaian Kondisi Pipa	24
2. Perspektif Pendekatan Inspeksi, Pemeliharaan dan Perbaikan	28
3. Inspeksi Korosi Pipa Jaringan Distribusi Air Minum	31
4. Teori Penyusunan Model Inspeksi Korosi Pipa	36
5. Korosi pada Pipa Distribusi Air Minum	58

6. Parameter yang Mempengaruhi Korosi pada Pipa	
Distribusi Air Minum.....	75
7. Analisis Tugas Inspeksi Korosi pada Pipa Distribusi	
Air Minum.....	86
C. Kajian Penelitian yang Relevan.....	93
D. Model <i>Existing</i>	98
E. Kerangka Konseptual Penelitian.....	98
BAB III METODOLOGI PENGEMBANGAN	
A. Model Pengembangan.....	101
B. Prosedur Pengembangan.....	106
C. Subjek Penelitian.	113
D. Jenis Data.....	117
E. Instrumen Pengumpulan Data.....	117
F. Teknis Analisis Data.....	121
BAB IV HASIL PENGEMBANGAN DAN PEMBAHASAN	
A. Hasil Pelaksanaan Pengembangan Model	133
1. Studi Pendahuluan dan Perancangan	133
2. Tahap Pengembangan Model Inspeksi Korosi Pipa Jaringan	
Distribusi Air Minum	140
3. Tahapan Inspeksi	148
4. Sistem Sosial	151
5. Prinsip Reaksi	151
6. Sistem Pendukung	152
7. Dampak Inspeksi Korosi Pipa Jaringan Distribusi Air	
Minum	154
B. Analisis Data.....	154
1. Uji Validitas	154
2. Uji Praktikalitas.....	221
3. Uji Efektivitas	223
C. Analisis Tugas (<i>Vocational Task Analysis</i>)	225
D. Revisi Produk.....	231

E. Pembahasan	232
F. Kebaruan Penelitian	238
G. Keterbatasan Penelitian.....	239
BAB V KESIMPULAN, IMPLIKASI, DAN SARAN	
A. Kesimpulan	240
B. Implikasi	241
C. Saran	242
DAFTAR RUJUKAN	244
LAMPIRAN.....	260

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1.1. Kriteria Risiko Jaringan Pipa Distribusi Air Minum	5
2.1. Tahapan Proses Berbagai Model Inspeksi dan Penilaian Korosi Pipa ..	36
2.2. Korosifitas dan Nilai Tahanan Tanah	83
2.3. Klasifikasi Arus Tanah Berdasarkan Intensitas Medan Listrik.....	86
2.4. Klasifikasi Lingkungan Korosif Berdasarkan Rapat Arus Tanah	86
3.1. Tahap Pengembangan Model Inspeksi Korosi Pipa Jaringan Distribusi Air Minum	105
3.2. Peta Kompetensi Sistem Transmisi dan Distribusi	110
3.3. Kisi-kisi Pedoman Wawancara	118
3.4. Kisi-kisi Instrumen Model	119
3.5. Kisi-kisi Kuesioner Prosedur Inspeksi Korosi Pipa	120
3.6. Kisi-kisi Kuesioner Survei Praktikalitas	120
3.7. Kisi-kisi Kuesioner Survei Efektivitas	121
3.8. Nilai Koefisien Validitas Aiken (Aiken's V)	123
3.9. Ringkasan <i>Rule of Thumb</i> Evaluasi Model Pengukuran	128
3.10. Ringkasan <i>Rule of Thumb</i> Evaluasi Model Struktural	130
3.11. Kriteria Kepraktisan	131
3.12. Kriteria Efektivitas	132
4.1. Masalah Korosi pada Pipa Distribusi Air Minum	134
4.2. Validasi Penilaian Pedoman Wawancara Terstruktur	155
4.3. Validasi Model Inspeksi Korosi Pipa Distribusi Air Minum	156
4.4. Validasi Lembar Kuesioner Survei	158
4.5. Validasi Prosedur Inspeksi Korosi Pipa Distribusi Air Minum	159
4.6. Validasi Instrumen Validasi Penelitian	161
4.7. Karakteristik Responden	162
4.8. Rentang Skala Penilaian dan Kriteria TCR	163
4.9. <i>Loading Factor</i> Variabel A, B dan C	175
4.10. <i>Reloading Factor</i> Variabel A, B dan C	175

4.11. <i>Convergent Validity</i> Variabel A. B dan C	176
4.12. <i>Discriminant Validity</i> dengan Metode <i>Fornell-Larcker Criterion</i>	177
4.13. <i>Discriminant Validity</i> dengan Metode <i>Cross Loading</i>	178
4.14. Nilai R^2 dan Q^2	179
4.15. Koefisien Jalur	180
4.16. <i>Loading Factor</i> Variabel C. E dan F	185
4.17. <i>Convergent Validity</i> Variabel C. E dan F	186
4.18. <i>Discriminant Validity</i> dengan Metode <i>Fornell-Larcker Criterion</i>	187
4.19. <i>Discriminant Validity</i> dengan Metode <i>Cross Loading</i>	187
4.20. Nilai R^2 dan Q^2 Variabel C. E dan F	188
4.21. Koefisien Jalur	189
4.22. <i>Loading Factor</i> Variabel C. E dan G	194
4.23. <i>Convergent Validity</i> Variabel C. E dan G	195
4.24. <i>Discriminant Validity</i>	196
4.25. <i>Discriminant Validity</i> dengan Metode <i>Cross Loading</i>	197
4.26. Nilai R^2 dan Q^2 Variabel C. E dan G	198
4.27. Koefisien Jalur	199
4.28. <i>Loading Factor</i> Variabel D. E dan F	203
4.29. <i>Convergent Validity</i> Variabel D. E dan F	204
4.30. <i>Discriminant Validity</i> dengan Metode <i>Fornell-Larcker Criterion</i>	205
4.31. <i>Discriminant Validity</i> dengan Metode <i>Cross Loading</i>	206
4.32. Nilai R^2 dan Q^2 Variabel D. E dan F	207
4.33. Koefisien Jalur	208
4.34. <i>Loading Factor</i> Variabel D. E dan G	213
4.35. <i>Convergent Validity</i> Variabel D. E dan G	214
4.36. <i>Discriminant Validity</i> dengan Metode <i>Fornell-Larcker Criterion</i>	215
4.37. <i>Discriminant Validity</i> dengan Metode <i>Cross Loading</i>	215
4.38. Nilai R^2 dan Q^2 Variabel D. E dan G	216
4.39. Koefisien Jalur	217

4.40. Hasil Analisis Praktikalitas Inspeksi Korosi Pipa Jaringan Distribusi	
Air Minum menurut Praktisi	221
4.41. Hasil Analisis Praktikalitas Inspeksi Korosi Pipa Jaringan Distribusi	
Air Minum menurut Sarjana <i>Fresh Graduates</i>	222
4.42. Hasil Analisis Efektivitas Inspeksi Korosi Pipa Jaringan Distribusi	
Air Minum menurut Praktisi	223
4.43. Hasil Analisis Efektivitas Inspeksi Korosi Pipa Jaringan Distribusi	
Air Minum menurut Sarjana <i>Fresh Graduates</i>	224
4.44. Kode dan Judul Unit Kompetensi Inspeksi Korosi Pipa Distribusi	
Air Minum	226
4.45. Unit dan Elemen Kompetensi Inspeksi Korosi Pipa Distribusi Air	
Minum	226

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1.1. Jaringan Pipa Distribusi Air Minum Kota Padang	4
2.1. Program Inspeksi dan Penilaian Kondisi Aset	27
2.2. Model Inspeksi dan Penilaian Kondisi Infrastruktur Air Linier	32
2.3. Model Inspeksi dan Penilaian Kondisi Pipa di Dalam Tanah	32
2.4. Model Inspeksi dan Penilaian Korosi Eksternal Pipa	33
2.5. Model Inspeksi dan Penilaian Kondisi Pipa Terkorosi	34
2.6. Model <i>External Corrosion Direct Assessment</i> – ECDA	35
2.7. Ilustrasi Tipe Kerusakan Korosi Longitudinal	48
2.8. Kerusakan Korosi Pendek Disederhanakan sebagai Kurva Parabola	49
2.9. Interaksi Antar Cacat Korosi	50
2.10. Interaksi Cacat Memanjang dan Melingkar	55
2.11. Diagram Pourbaix untuk Sistem Besi-Air pada 25°C	63
2.12. Diagram Skematik Keterkaitan antara Korosi, Pelarutan, Pembentukan Keran Oksida dan Partikulat	66
2.13. Kemungkinan dan Konsekuensi Kerusakan Pipa Akibat Korosi	67
2.14. Bentuk Korosi pada Permukaan Pipa	70
2.15. Grafitisasi Eksternal dan Internal pada Besi Cor	71
2.16. Korosi pada Permukaan Dinding Pipa	72
2.17. Korosi Erosi pada Permukaan Pipa	73
2.18. Fotomikro Potongan Melintang Tuberkulosa pada Pipa Air.....	74
2.19. Diagram Analisis Pekerjaan.....	87
2.20. Model <i>Existing</i> Inspeksi Korosi Pipa Jaringan Distribusi Air Minum....	98
2.21. Kerangka Konseptual Penelitian.....	99
3.1. Tahap Pengembangan Model Inspeksi Korosi Pipa Jaringan Distribusi Air Minum	106
3.2. Tahapan Analisis PLS SEM	124
4.1. Dokumentasi Kegiatan Wawancara Terstruktur Dengan Pengelola Air Minum pada Kab dan Kota Provinsi Sumatera Barat	138

4.2. Dokumentasi <i>Focus Group Discussion</i>	139
4.3. Model Hipotetik Inspeksi Korosi Pipa Jaringan Distribusi Air Minum	151
4.4. Kerangka Konseptual Model Inspeksi Korosi Pipa Jaringan Distribusi Air Minum	170
4.5. Model Struktural Inspeksi Korosi Pipa Jaringan Distribusi Air Minum	171
4.6. Model Struktural Identifikasi Spesifikasi dan Jalur Jaringan Pipa, Inspeksi Jalur Pipa, serta Inspeksi Lingkungan Eksternal	172
4.7. Algoritma PLS Identifikasi Spesifikasi dan Peta Jaringan Pipa, Inspeksi Jalur Pipa, dan Inspeksi Lingkungan Eksternal	176
4.8. Algoritma <i>Bootstrapping</i> Identifikasi Spesifikasi dan Peta Jaringan Pipa,.....	181
4.9. Model Struktural Inspeksi Lingkungan Eksternal, Inspeksi Kondisi Permukaan dan Sifat Mekanik Pipa, serta Analisis Kekuatan Pipa Menahan Tekanan Air	183
4.10. Algoritma PLS Inspeksi Lingkungan Eksternal, Inspeksi Kondisi Permukaan dan Sifat Mekanik Pipa, serta Analisis Kekuatan Pipa Menahan Tekanan Air	185
4.11. Algoritma <i>Bootstrapping</i> Inspeksi Lingkungan Eksternal, Inspeksi Kondisi Permukaan dan Sifat Mekanik Pipa, serta Analisis Kekuatan Pipa Menahan Tekanan Air	191
4.12. Model Struktural Inspeksi Lingkungan Eksternal, Inspeksi Kondisi Permukaan dan Sifat Mekanik Pipa, serta Analisis Laju Korosi Pipa....	192
4.13. Algoritma PLS Inspeksi Lingkungan Eksternal, Inspeksi Kondisi Permukaan dan Sifat Mekanik Pipa, serta Analisis Laju Korosi Pipa ...	195
4.14. Algoritma <i>Bootstrapping</i> Inspeksi Lingkungan Eksternal, Inspeksi Kondisi Permukaan dan Sifat Mekanik Pipa, serta Analisis Laju Korosi Pipa	200

4.15. Model Struktural Inspeksi Lingkungan Internal, Inspeksi Kondisi Permukaan dan Sifat Mekanik Pipa, Serta Analisis Kekuatan Pipa Menahan Tekanan Air	201
4.16. Algoritma PLS Inspeksi Lingkungan Internal, Inspeksi Kondisi Permukaan dan Sifat Mekanik Pipa, serta Analisis Kekuatan Pipa Menahan Tekanan Air	204
4.17. Algoritma <i>Bootstrapping</i> Inspeksi Lingkungan Internal, Inspeksi Kondisi Permukaan dan Sifat Mekanik Pipa, serta Analisis Kekuatan Pipa Menahan Tekanan Air	209
4.18. Model Struktural Inspeksi Lingkungan Internal, Inspeksi Kondisi Permukaan dan Sifat Mekanik Pipa, Serta Analisis Laju Korosi Pipa	211
4.19. Algoritma PLS Inspeksi Lingkungan Internal dan Analisis Laju Korosi Pipa melalui Inspeksi Kondisi Permukaan dan Sifat Mekanik Pipa	213
4.20. Algoritma <i>Bootstrapping</i> Inspeksi Lingkungan Internal dan Analisis Laju Korosi Pipa melalui Inspeksi Kondisi Permukaan dan Sifat Mekanik Pipa	219
4.21. Model Inspeksi Korosi Pipa Jaringan Distribusi Air Minum yang Dikembangkan	220

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1. Lembar Validasi Panduann Wawancara Analisis Kebutuhan	260
2. Lembar Panduan Wawancara Analisis Kebutuhan	262
3. Lembar Validasi Instrumen Validasi Pengembangan Model Inspeksi Korosi Pipa Jaringan Distribusi Air Minum	264
4. Lembar Validasi Kuesioner Survei	267
5. Lembar Kuesioner Konten Model Inspeksi Korosi Pipa Jaringan Distribusi Air Minum	269
6. Lembar Kuesioner Praktikalitas Inspeksi Korosi Pipa Jaringan Distribusi Air Minum	277
7. Lembar Kuesioner Efektivitas Inspeksi Korosi Pipa Jaringan Distribusi Air Minum	280
8. Lembar Validasi Model Inspeksi Korosi Pipa Jaringan Distribusi Air Minum	283
9. Lembar Validasi Buku Prosedur Inspeksi Korosi Pipa Jaringan Distribusi Air Minum	287
10. Deskriptif Variabel dan Hasil Perhitungan Distribusi Frekuensi Identifikasi Spesifikasi Dan Peta Jaringan Pipa	290
11. Deskriptif Variabel dan Hasil Perhitungan Distribusi Frekuensi Inspeksi Jalur Pipa	291
12. Deskriptif Variabel dan Hasil Perhitungan Distribusi Frekuensi Inspeksi Lingkungan Eksternal Jaringan Pipa	292
13. Deskriptif Variabel dan Hasil Perhitungan Distribusi Frekuensi Inspeksi Lingkungan Internal Jaringan Pipa	293
14. Deskriptif Variabel dan Hasil Perhitungan Distribusi Frekuensi Inspeksi Kondisi Permukaan dan Sifat Mekanik Pipa	294
15. Deskriptif Variabel dan Hasil Perhitungan Distribusi Frekuensi Analisis Kekuatan Pipa Menahan Tekanan Air	295

16. Deskriptif Variabel dan Hasil Perhitungan Distribusi Frekuensi	
Analisis Laju Korosi Pipa	296
17. Daftar Hadir <i>Focus Group Discussion</i>	297
18. Surat Penelitian	298
19. Dokumentasi Pelaksanaan Penelitian	302

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Sistem distribusi air minum merupakan infrastruktur penting yang digunakan untuk menyalurkan air minum dari tangki hasil pengolahan kepada masyarakat konsumen (Marzouk *et.al*, 2015:114). Sistem distribusi air minum harus memenuhi beberapa persyaratan, yaitu: 1). Kualitas air minum yang disalurkan kepada masyarakat konsumen, tidak boleh mengalami penurunan selama mengalir di dalam pipa distribusi., 2) Dapat menyalurkan air minum ke semua tempat yang dituju dengan tekanan yang cukup, 3) Dapat memasok air yang diperlukan untuk sistem pemadam kebakaran, 4) Memiliki tata letak sedemikian rupa, sehingga dapat melayani pasokan air kepada konsumen selama perbaikan, 5) Semua pipa distribusi ditempatkan minimal satu meter di atas garis saluran pembuangan, serta 6) Pipa distribusi harus kedap, untuk meminimalkan kerugian akibat kebocoran (Adeosun, 2014:2).

Sistem distribusi air minum, memiliki peran penting terhadap kehidupan sosial, kualitas hidup masyarakat dan ekonomi bangsa (Hou *et.al*, 2016:1), oleh karena itu sistem distribusi air minum merupakan hal penting dalam memberikan akses masyarakat terhadap air minum. Peningkatan akses masyarakat terhadap air minum dan sanitasi yang sehat dan layak (20 liter per hari per orang) di berbagai negara, memiliki konsekuensi terhadap peningkatan kuantitas dan kualitas jaringan pipa distribusi air untuk dapat mensuplai air minum dan atau air bersih dari sumber air ke masyarakat secara baik dan berkelanjutan (Fogden, 2009:7; WHO dan UNICEF, 2014:41).

Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) memperkirakan bahwa lebih dari satu miliar orang di seluruh dunia, minum air yang tidak aman (Yongsi, 2010:425). Hal tersebut diperkuat dengan pernyataan UNICEF pada tanggal 12 Juli 2017, yang menyatakan bahwa 2,1 miliar orang kekurangan air minum yang layak di rumah. Selanjutnya pada tanggal 20 Juni, 2019, Perserikatan Bangsa-Bangsa (*United Nations*) merilis bahwa sekitar 2,2 miliar orang di

seluruh dunia tidak memiliki air minum yang dikelola dengan aman. Informasi yang dinyatakan WHO, UNICEF dan *United Nations* tersebut memperlihatkan bahwa seiring dengan berjalannya waktu, jumlah orang yang tidak mendapat air minum yang layak semakin bertambah.

Jaringan pipa distribusi yang merupakan bagian dari sistem distribusi air minum. Pada umumnya pipa jaringan distribusi air minum direncanakan dapat menyalurkan pasokan air minum dengan baik dalam waktu 100 tahun (EPA, 2010:4.44). Oleh karena itu, material pipa yang digunakan pada umumnya terbuat dari besi tuang dan baja yang dilapisi dengan seng (Robles dan Coles, 2012:1; Maslak *et.al*, 2015:982). Meskipun demikian, sampai saat ini kehilangan air yang terjadi pada jaringan pipa distribusi air minum masih merupakan kendala dalam memenuhi pencapaian akses masyarakat terhadap air minum yang layak.

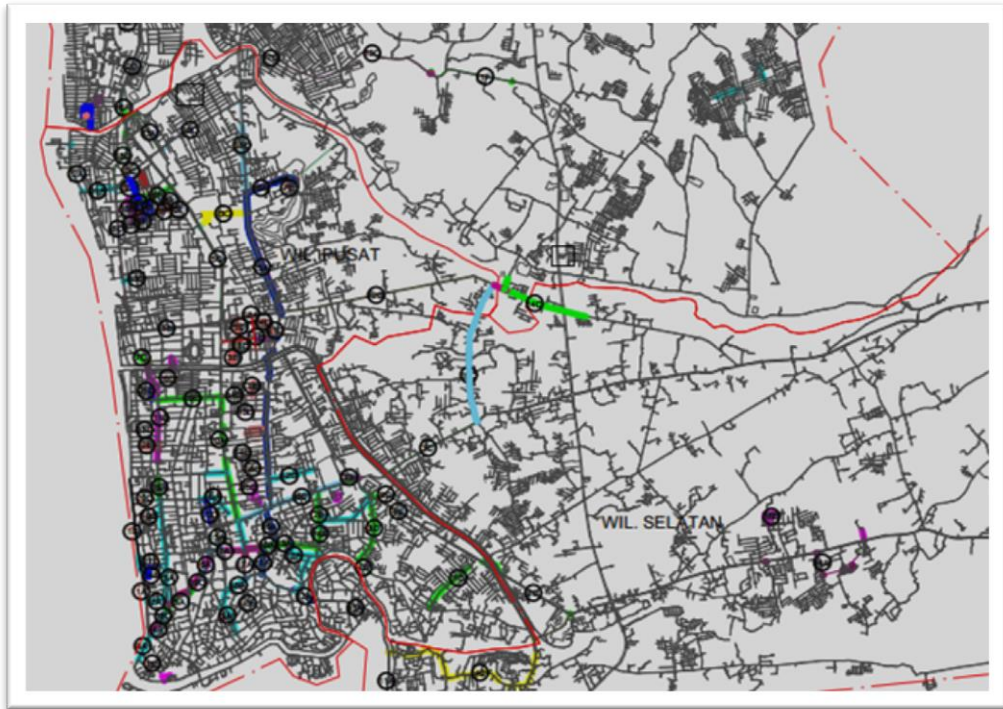
Studi yang dilakukan di Eropa memperlihatkan bahwa kebocoran yang terjadi pada pipa distribusi menyebabkan sekitar 30% air minum yang disalurkan tidak sampai kepada masyarakat konsumen (Schmitt *et.al*, 2009:36). Di Bulgaria kebocoran berkisar 30-40% (Klein, 2011:23), Inggris 20,6% (Ananda, 2019:5), bahkan di Italia, kehilangan air minum rata-rata 40% (Giugni *et.al*, 2009:1). Di Turki, kebocoran air minum mencapai 43,6% (Muhammetoğlu *et.al*, 2018:60), India berkisar antara 30-40% (Singh, 2014:1), Iran 30% (Yousefi *et.al*, 2016:75), Nepal 40% (Adhikari, 2014:1) dan kota Seoul, Korea Selatan kebocoran pada jaringan pipa distribusi menyebabkan kehilangan air minum sebanyak 62% (Choi *et.al*, 2014:1585). Pada beberapa negara, kebocoran air minum pada sistem distribusi relatif rendah, seperti: Singapore 5% (Cheong, 2017:6), Denmark 7%, Australia 9,7% dan Selandia Baru 18,8% (Ananda, 2019:5). Di Amerika Serikat, kehilangan air minum rata-rata 16%. Persentase kebocoran tersebut masih diatas ambang batas yang ditetapkan, yaitu 10-15% (EPA, 2010:1.9).

Pada beberapa negara berkembang, kehilangan air akibat kebocoran infrastruktur mencapai 45 juta meter kubik per hari. Jumlah tersebut cukup untuk melayani hampir 200 juta orang. Masalah tersebut akan menjadi lebih

buruk jika infrastruktur air tidak dikelola dengan baik (Guppy dan Anderson, 2017:6).

Di Indonesia, kehilangan air pada jaringan pipa distribusi berkisar antara 30-40%. Hasil kajian Unicef pada tahun 2012 menyimpulkan bahwa satu dari sepuluh rumah tangga mengalami kekurangan persediaan air bersih, terutama pada musim kemarau (Unicef Indonesia, 2012:6). Bahkan sampai dengan tiga tahun terakhir, persentase kehilangan air pada jaringan pipa distribusi tidak mengalami penurunan yang berarti. Laporan kinerja Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) pada tahun 2015, 2016 dan 2017 memperlihatkan bahwa rata-rata kehilangan air pada jaringan pipa distribusi masing-masing 29,38% pada tahun 2015 (BPPSPAM, 2015:28), 32,10% pada tahun 2016 (BPPSPAM, 2016:21) dan 32,80% pada tahun 2017 (BPPSPAM, 2017:10). Kasus kehilangan air yang terjadi pada berbagai Perusahaan Daerah Air Minum di Indonesia, memperlihatkan betapa tingginya tingkat kebocoran air yang terjadi. Padahal Pemerintah Republik Indonesia telah menetapkan batas toleransi kehilangan air untuk Perusahaan Air Minum sebesar 20% (BPPSPAM, 2016:21). Penetapan batas toleransi ini ditetapkan melalui Keputusan Menteri Dalam Negeri Republik Indonesia Nomor 47 Tahun 1999 tanggal 31 Mei 1999, tentang Pedoman Penilaian Kinerja Perusahaan Daerah Air Minum.

Berdasarkan wawancara yang dilakukan dengan Kepala Bagian Distribusi Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) Kota Padang, diketahui bahwa PDAM Kota Padang menyalurkan air lebih kurang 1.700 m³/jam kepada masyarakat melalui jaringan distribusi, yang sebagian masih terbuat dari pipa besi tuang ulet (*ductile cast iron pipe*) dan pipa baja (*steel pipe*) berdiameter 700 mm, serta pipa baja galvanis (*galvanized iron pipe*) berdiameter 400 dan 500 mm. Peta pipa jaringan distribusi air minum Kota Padang, diperlihatkan pada Gambar 1.1. Melalui jaringan pipa distribusi yang telah digunakan selama puluhan tahun tersebut, PDAM kota Padang mengalami kebocoran air sekitar 27%.



Gambar 1.1. Jaringan Pipa Distribusi Air Minum Kota Padang

Sumber: PDAM Kota Padang (2018)

Tingkat kehilangan air minum yang tinggi pada jaringan distribusi tersebut menyebabkan berkurangnya kapasitas dan tekanan air yang mengalir ke sambungan rumah masyarakat pelanggan, sehingga berdampak terhadap kerugian finansial Perusahaan Daerah Air Minum (BPPSPAM, 2016:21).

Di Amerika Serikat, setiap tahun terjadi 237.600 kebocoran pada pipa distribusi air minum yang menyebabkan kehilangan pendapatan sekitar USD 2,8 Milyar (EPA, 2010:1.1). Selain itu, konsekuensi dari kebocoran pipa sistem transmisi dan distribusi adalah diperlukannya biaya perbaikan sebesar USD 200 Milyar, dalam rentang 20 tahun ke depan (EPA, 2013:1). Bahkan pada tahun 2015, Divisi Perlindungan Air Minum Amerika Serikat menyatakan bahwa sarana air minum Amerika Serikat membutuhkan investasi infrastruktur sebesar USD 472,6 Miliar, selama 20 tahun ke depan (EPA, 2018:9). Total biaya yang disebabkan oleh kehilangan air minum akibat kerugian fisik dan komersial di seluruh dunia secara konservatif diperkirakan mencapai USD 141 Milyar per tahun.

Kekurangan pasokan dan buruknya kualitas air minum yang disuplai kepada masyarakat, saat ini termasuk dalam kategori berbahaya. Situasi berbahaya pada jaringan pipa distribusi air minum difokuskan pada kondisi pipa yang tidak dapat diandalkan (Boryczko dan Tchórzewska-Cieślak, 2014:80). Klasifikasi risiko kegagalan pipa jaringan distribusi air minum diperlihatkan pada Tabel.1.1.

Tabel 1.1. Kriteria Risiko Jaringan Pipa Distribusi Air Minum

Risiko Kegagalan	Deskripsi Kegagalan
Besar	a. Penurunan produksi air harian <30% dari produksi air nominal, penurunan tekanan air pada jaringan pipa air b. Kegagalan pasokan air utama, gangguan dalam pasokan air >24 jam untuk perumahan, distrik, atau seluruh kota c. Kerugian finansial dan sosial yang cukup besar d. Jumlah penduduk yang terancam > 2000 orang
Sedang	a. Penurunan produksi air harian <30–70)% dari produksi air nominal atau gangguan pasokan air hingga 2–12 jam untuk konsumen individu b. Penurunan tekanan air pada jaringan pipa air c. Kerugian finansial d. Jumlah penduduk yang terancam 500–2000 orang
Kecil	a. Penurunan produksi air harian hingga 70% dari produksi air nominal atau gangguan pasokan air hingga 2 jam b. Keluhan konsumen yang terisolasi c. Jumlah penduduk yang terancam $\leq$500 orang

Sumber: Boryczko dan Tchórzewska-Cieślak 2014:80.

Kehilangan air pada jaringan pipa distribusi yang terjadi pada hampir semua perusahaan air minum di dunia, disebabkan oleh: kebocoran pada pipa dan sambungan (Feeney *et.al*, 2009:3:17), adanya sambungan liar (BPPSPAM, 2017:11). Kebocoran air minum pada pipa jaringan distribusi, pada umumnya disebabkan karena pipa tersebut mengalami korosi (Schmitt *et.al*, 2009:36; Shams *et.al*, 2012:1484; Zhang *et.al*, 2014:1; Yousefi *et.al*, 2016:75; Fontana dan Morais, 2016:689; Atanov, *et al*, 2018:1).

Pipa jaringan distribusi air minum yang mengalami korosi menyebabkan berbagai masalah yang bervariasi, tetapi saling terkait. Pertama, terjadinya pengurangan massa pipa akibat oksidasi, yang menyebabkan berkurangnya ketebalan pipa dan/atau pembentukan endapan atau lapisan oksida di permukaan pipa (Chawla *et.al*, 2012:480; Alamineh, 2018:2). Selain itu, korosi yang terjadi menyebabkan pipa mengalami kerusakan fisik, sehingga menurunkan kekuatan pipa (Ossai, 2017:1) menahan beban eksternal, berupa beban kejut hidrolik, beban mekanik yang terjadi karena adanya perbaikan jalan atau pergerakan tanah disekitar pipa (Thomson dan Wang, 2009:6).

Kedua, produk korosi, berupa oksida logam yang terbentuk pada permukaan dinding bagian dalam pipa, dapat terakumulasi dan membentuk tuberkulosa. Hal ini menyebabkan penurunan tekanan dan menghambat laju aliran air, sehingga meningkatkan kerugian tekan (*head losses*) dan menurunkan kapasitas aliran (Chawla *et.al*, 2012:480; Alamineh, 2018:2). Pada pipa yang terbuat dari besi, lapisan tuberkulosa yang terbentuk tidak memiliki ikatan yang kuat terhadap dinding pipa, sehingga mudah mengalami kerusakan. Kerusakan lapisan tuberkulosa yang tidak diikuti dengan pembentukan lapisan berikutnya, menyebabkan terjadinya percepatan korosi internal (Thomson dan Wang, 2009:12).

Ketiga, partikel oksida besi yang terlepas dari permukaan dinding bagian dalam pipa, akan terlarut kedalam aliran air, sehingga menurunkan kualitas air (Liu *et.al*, 2017:135; Slavičková *et.al*, 2013:61). Hal tersebut seringkali menjadi keluhan masyarakat yang dikenal dengan istilah *red water* yang keluar dari keran (Zhang *et.al*, 2014:427). Selain itu, partikel oksida besi yang berada di aliran air dengan kecepatan yang tinggi dapat menggerus dinding pipa bagian selanjutnya.

Keempat, pipa distribusi air minum yang ditempatkan di dalam tanah sangat rentan terhadap serangan korosi (Sirvole dan Vipulanandan, 2008:2) dan apabila mengalami kebocoran dapat menyebabkan infiltrasi, atau masuknya berbagai partikel yang terdapat pada tanah disekitarnya ke dalam pipa. Infiltrasi akan terjadi pada saat tekanan didalam pipa lebih rendah dari tekanan

di lingkungan pipa yang mengalami kerusakan. Partikel yang terbawa aliran air tersebut berpotensi menularkan wabah penyakit, sehingga menimbulkan resiko terhadap kesehatan masyarakat (Chawla *et.al*, 2012:480).

Antisipasi terhadap korosi yang akan terjadi pada pipa jaringan distribusi air minum, telah dilakukan dengan berbagai cara, seperti: melapisi pipa yang terbuat dari baja dan besi karbon dengan seng atau dikenal dengan istilah galvanis (Andrianov dan Spitsov, 2017:1). Pengendalian korosi pada pipa juga dilakukan dengan metode proteksi katodik (Alamineh, 2018:6) dan pemberian inhibitor pada air yang mengalir didalam pipa (EPA, 2016:12; Gologan, 2016:99). Meskipun demikian, kenyataannya sampai saat ini masih banyak pipa jaringan distribusi air minum yang mengalami korosi. Hal ini memperlihatkan bahwa korosi yang terjadi pada pipa jaringan distribusi merupakan masalah yang kompleks (Alamineh, 2018:1), serta relatif sulit untuk dikelola (Royse *et.al*, 2009:1). Dengan demikian korosi yang terjadi pada sistem pemipaan merupakan suatu tantangan dan menjadi masalah paling penting untuk diatasi (Ebenuwa *et.al*, 2016:82).

Alternatif pengendalian korosi pada pipa jaringan distribusi air minum, agar tidak mengalami kegagalan secara tiba-tiba, dapat dilakukan melalui pengelolaan korosi. Pengelolaan korosi dilakukan dengan terlebih dahulu mengetahui data dan informasi kondisi aktual pipa dan lingkungan dimana pipa jaringan distribusi air minum tersebut ditempatkan. Data dan informasi aktual pipa jaringan distribusi tersebut diperoleh melalui identifikasi parameter yang mempengaruhi terjadinya degradasi struktur pipa. Parameter inspeksi yang mempengaruhi terjadinya korosi pada pipa terdiri dari parameter lingkungan internal pipa, seperti: unsur-unsur yang terdapat di dalam air, tingkat keasaman atau pH air, kecepatan aliran air dalam pipa. Parameter lingkungan eksternal pipa, terdiri dari: kadar air dalam tanah, tahanan tanah, pH tanah dan adanya aliran arus liar disekitar pipa. Sedangkan parameter yang mempengaruhi kekuatan mekanik dari material pipa, adalah: ketebalan dinding pipa, adanya cacat atau kerusakan pada dinding pipa (Ratliff, 2010: 3).

Parameter yang diperoleh melalui inspeksi tersebut akan memberikan informasi dan data yang diperlukan untuk pelaksanaan evaluasi dan penilaian kondisi pipa yang mengalami korosi, berkaitan dengan kemampuan pipa jaringan distribusi untuk dapat berfungsi secara memuaskan dalam menyalurkan air pada tekanan dan laju aliran yang dibutuhkan (Thomson dan Wang, 2009:40; Restrepo *et.al*, 2009:545). Berdasarkan hasil evaluasi dan penilaian kondisi pipa tersebut, memungkinkan pengelola jaringan pipa distribusi air minum untuk mengidentifikasi jumlah, lokasi dan jenis kerusakan yang terjadi, sehingga dapat dijadikan sebagai acuan dalam pengambilan keputusan, apakah suatu pipa akan direhabilitasi atau diganti (Eweda, *et.al*, 2010:1387; Syachrani *et.al*, 2013:633).

Berdasarkan hasil wawancara dengan pengelola air minum pada beberapa Kabupaten dan Kota di Provinsi Sumatera Barat, diketahui bahwa saat ini belum ada tenaga teknis yang melaksanakan inspeksi korosi pipa jaringan distribusi. Hal tersebut sesuai dengan data yang terdapat pada skema unit kompetensi Menentukan Metode Pengendalian Kehilangan Air Berdasarkan Neraca Air (F45.225.52.14.IV.05.08), sebagaimana tertuang dalam Keputusan Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi Republik Indonesia Nomor Kep. 325/Men/IX/2009, tanggal 30 September 2009, tentang Penetapan Standar Kompetensi Kerja Nasional Indonesia Sektor Konstruksi Bidang Tata Lingkungan Sub Bidang Pengelolaan Limbah dan Air Bersih Jabatan Ahli Penanggulangan Kehilangan Air SPAM.

Berdasarkan uraian di atas, dapat dinyatakan bahwa inspeksi dan penilaian korosi pada pipa jaringan distribusi air minum, sangat diperlukan sebagai dasar dalam pelaksanaan pemeliharaan pencegahan (*preventive maintenance*). Dengan demikian, pipa distribusi air minum akan selalu dalam kondisi yang baik untuk mensuplai air minum kepada masyarakat pelanggan. Selain itu berdasarkan data hasil inspeksi dan penilaian korosi yang diperoleh, dapat direncanakan program pemeliharaan atau penggantian pipa untuk rentang waktu beberapa tahun kedepan. Hal ini akan meningkatkan kemampuan

perusahaan air minum dalam melakukan pengelolaan jaringan pipa distribusi air minum dengan lebih baik.

Untuk dapat melaksanakan inspeksi dan penilaian kondisi pipa jaringan distribusi air minum yang mengalami korosi secara komprehensif, perlu disusun rangkaian pelaksanaan inspeksi yang terstruktur dalam bentuk suatu model. Beberapa model inspeksi dan penilaian kondisi (*condition assessment*) pipa terkorosi, dikembangkan untuk pipa distribusi air minum berdiameter besar atau pipa distribusi minyak dan gas. Model inspeksi dan penilaian kondisi pipa tersebut dapat dikelompokkan berdasarkan pendekatan fungsional pipa, yaitu: *Integrity Based Assessment* atau penilaian berbasis integritas pipa (Noor *et.al*, 2011:1904) dan *Risk Based Assessment* atau penilaian berbasis resiko, yang terjadi apabila pipa mengalami kegagalan (Bertuccio, 2012:553). Model *integrity based assessment* dan *risk based assessment*, didasarkan pada kemampuan dinding pipa menahan beban dan tekanan operasional yang terjadi pada pipa. Pendekatan ini pada umumnya dilakukan terhadap pipa yang berdiameter relatif besar, karena diperkirakan biaya inspeksi yang cukup besar tidak lebih mahal dari pada biaya penggantian pipa. *External Corrosion Direct Assessment* (ECDA), merupakan salah satu model penilaian berbasis resiko. Model ini dianggap praktis dan layak mengevaluasi dampak korosi eksternal pipa untuk meningkatkan keselamatan, integritas, dan keandalan infrastruktur pipa. Akan tetapi ECDA pada umumnya diterapkan untuk pipa yang berada di dalam tanah (NACE 2010:1).

Secara umum inspeksi dan penilaian korosi pipa yang diaplikasikan pada berbagai bidang, membutuhkan data atau informasi awal, serta menggunakan perangkat teknologi inspeksi yang relatif tinggi. Oleh karena itu pelaksanaan inspeksi harus dilakukan oleh seseorang yang memiliki keterampilan khusus dan di bawah arahan seseorang yang memiliki keahlian dalam melakukan analisis data hasil inspeksi. Keterampilan dan keahlian dalam pelaksanaan inspeksi pipa diperoleh melalui pendidikan dan pengalaman praktis, sehingga memenuhi syarat untuk terlibat dalam praktik pengendalian korosi dan penilaian risiko pada sistem pemipaan (NACE,2010:2). Akan tetapi

keterbatasan informasi, perangkat teknologi dan sumberdaya manusia yang terdapat pada perusahaan pengelola air minum untuk melakukan inspeksi pipa, menyebabkan inspeksi dan penilaian korosi menjadi sulit dilakukan (Ebenuwa *et.al*, 2016:82). Hal ini terlihat dari sistem pasokan air minum yang tidak terawat (Khatri dan Vairavamoorthy, 2007:11).

Selain itu terbatasnya sumber daya keuangan yang tersedia untuk biaya operasional, lemahnya sisten perekrutan dan kurangnya pelatihan teknisi untuk meningkatkan kompetensi dan mendapatkan sertifikasi, menjadi kendala dalam pelaksanaan inspeksi pipa. Seiring dengan itu, minimnya sarana dan prasarana penunjang, serta belum tersedianya prosedur operasi standar, berakibat pada kondisi infrastruktur yang buruk dan pemeliharaannya yang tidak memadai (Pond dan Pedley, 2011:56). Praktik konstruksi yang buruk, tidak ada pemeliharaan dan perbaikan karena keterbatasan sumber daya keuangan, operasional dengan kapasitas yang melebihi desain, teknologi yang tidak tepat, serta tenaga teknis yang tidak cukup terampil, menyebabkan kerusakan pada pipa jaringan distribusi air minum menjadi lebih parah pada negara berkembang (Omotayo, 2014:1).

B. Identifikasi Masalah

Berdasarkan uraian sebagaimana dipaparkan pada latar belakang, dapat diidentifikasi beberapa masalah sebagai berikut:

1. Sistem distribusi air minum dirancang, dibangun, dioperasikan dan dipelihara untuk dapat menyediakan pasokan air yang cukup dan layak kepada masyarakat dengan cara aman, efektif, efisien dan handal (EPA, 2010:2). Akan tetapi sebagian besar perusahaan air minum belum mampu memberikan akses air minum yang layak kepada masyarakat, baik dari aspek kualitas maupun kuantitas.
2. Kualitas air minum yang diperoleh masyarakat relatif rendah, karena air minum masih memiliki kandungan partikel diatas ambang batas yang ditetapkan. Sebagian dari partikel yang terdapat dalam air minum tersebut berasal dari pelepasan oksida logam dari dinding pipa jaringan distribusi

(Chawla *et.al*, 2012:480). Sedangkan rendahnya kuantitas layanan terlihat dari tidak terpenuhinya pasokan air minum yang dibutuhkan masyarakat (De Paola dan Giugni, 2012:59).

3. Rendahnya kualitas dan kuantitas layanan penyediaan air minum kepada masyarakat, disebabkan oleh terjadinya kebocoran pada jaringan pipa distribusi akibat korosi (Ratliff, 2010:3; Shams *et.al*, 2010:267; Shams *et.al*, 2012:1484; Yousefi *et.al*, 2016:75).
4. Berbagai upaya pengendalian korosi pada pipa distribusi telah menjadi perhatian para peneliti, hal ini terlihat dari berbagai penelitian yang dilakukan berkaitan dengan korosi pada jaringan pipa distribusi air minum. Akan tetapi kompleksnya persoalan korosi dan terbatasnya data-data yang tersedia pada pengelola distribusi air minum (Alamineh, 2018:1), menjadi kendala dalam menerapkan manajemen korosi dengan baik (Wood dan Lence, 2009:111).
5. Pada umumnya penggunaan jaringan pipa distribusi air minum dilakukan dalam rentang waktu yang lama, sehingga rentan terhadap korosi. Korosi yang terjadi pada dinding bagian dalam pipa distribusi air minum berupa tuberkulosa, mengakibatkan terjadinya penurunan kapasitas aliran (Chawla *et.al*, 2012:480; Yousefi *et.al*, 2016:75) dan penurunan kekuatan pipa. Hal ini menyebabkan pipa menjadi pecah, akibat tekanan didalam pipa dan menyebabkan terjadinya kebocoran air (Slavičková *et.al*, 2013:61).
6. Evaluasi dan penilaian kondisi pipa untuk analisis struktur jaringan pipa, tidak dilakukan secara berkelanjutan sebagai bagian dari proses pengambilan keputusan (Ebenuwa *et.al*, 2016:82), sehingga penurunan kemampuan atau kerusakan yang terjadi pada pipa jaringan distribusi tidak dapat diatasi mengikuti pola sebagaimana yang direncanakan.
7. Meskipun terdapat beberapa model inspeksi dan penilaian kondisi pipa yang mengalami korosi, akan tetapi dalam penerapannya membutuhkan teknologi yang relatif tinggi, biaya yang mahal dan sumberdaya manusia yang memiliki kompetensi inspeksi korosi (NACE, 2010:2).

8. Relatif rendahnya kemampuan manajemen dalam pengelolaan infrastruktur air minum, karena tidak tersedia tenaga inspeksi korosi pipa dan keterbatasan kemampuan pengelola air minum untuk memberikan dukungan teknis dan pelatihan terhadap teknisi, berdampak terhadap kondisi infrastruktur yang buruk dan pemeliharaan yang tidak memadai (Pond dan Pedley, 2011:56).

C. Rumusan Masalah

Korosi yang terjadi pada jaringan pipa distribusi air minum selama bertahun-tahun, merupakan masalah global yang telah menyebabkan kebocoran aliran air minum yang disuplai kepada masyarakat pelanggan (Schmitt *et.al*, 2009:36; Giugni *et.al*, 2009:1; EPA, 2010:1.9; Adhikari, 2014:1; Choi *et.al* 2014:1585; Yousefi *et.al*, 2016:75; BPPSPAM, 2017:10; Cheong, 2017:6). Hal tersebut berdampak terhadap biaya pemeliharaan aset dan kerugian finansial perusahaan air minum (EPA, 2013:1; BPPSPAM, 2016:21). Korosi yang terjadi pada jaringan pipa distribusi air minum merupakan masalah yang kompleks (Alamineh, 2018:1), sulit untuk dikelola (Royse *et.al*, 2009:1) dan berdampak terhadap kerugian ekonomi yang relatif besar. Dengan demikian korosi yang terjadi pada sistem pemipaan merupakan suatu tantangan dan menjadi salah satu masalah paling penting untuk diatasi (Ebenuwa *et.al*, 2016:82).

Pengendalian korosi yang terjadi pada pipa jaringan distribusi air minum akan dapat dilakukan, apabila tersedia data dan informasi kondisi aktual pipa. Data kondisi aktual pipa, diperoleh melalui inspeksi korosi pipa secara reguler dan berkelanjutan, baik yang dilakukan secara langsung atau tidak langsung. Selain keterbatasan data dan informasi kondisi jaringan pipa distribusi air minum yang mengalami korosi (Alamineh, 2018:1; Wood dan Lence, 2009:111), belum adanya prosedur yang standar (Pond dan Pedley, 2011:56), bervariasinya lingkungan dimana pipa jaringan distribusi air minum ditempatkan (Hou *et.al*, 2016:1), serta terbatasnya kemampuan tenaga teknis

pada perusahaan air minum (Pond dan Pedley, 2011:56), menjadi kendala dalam melaksanakan penilaian korosi pipa dan penerapan manajemen korosi.

Padahal, inspeksi korosi yang disertai dengan analisis hasil inspeksi akan menghasilkan data dan informasi laju korosi pipa, tingkat korosi pipa, sisa umur operasional pipa dan berbagai kemungkinan kerusakan yang terjadi di sepanjang jaringan pipa (Thomson dan Wang, 2009:40; Restrepo *et.al*, 2009:545). Berdasarkan data dan informasi tersebut akan diketahui gambaran tentang keadaan struktur dan kemampuan pipa untuk menyalurkan air pada tekanan, kecepatan alir dan kualitas air yang diperlukan, sehingga dapat menjadi dasar pertimbangan untuk menentukan tingkat pemeliharaan preventif pipa jaringan distribusi air minum (Eweda *et.al*, 2010:1394).

Beberapa model inspeksi dan penilaian kondisi pipa terkorosi yang ada saat ini, baik model dengan pendekatan fungsional maupun model dengan pendekatan lingkungan, membutuhkan teknologi dan biaya yang relatif tinggi, serta sumberdaya manusia yang memiliki kompetensi khusus dalam penerapannya (NACE, 2010:2). Selain itu, keterbatasan sumberdaya manusia perusahaan air minum membutuhkan *re-training* atau *upgrading* dalam bidang inspeksi korosi pipa jaringan distribusi air minum, sehingga tersedia tenaga pelaksana teknis untuk melakukan inspeksi korosi pipa di lapangan. Berdasarkan uraian diatas, perlu dilakukan penelitian pengembangan model inspeksi korosi pipa jaringan distribusi air minum. Dengan demikian, dapat dirumuskan masalah yang akan diteliti pada penelitian ini, sebagai berikut:

1. Bagaimana pengembangan model inspeksi korosi pipa jaringan distribusi air minum ?
2. Bagaimana validitas model inspeksi korosi pada jaringan pipa distribusi air minum yang dikembangkan ?
3. Bagaimanakah praktikalitas dan efektivitas prosedur inspeksi korosi pipa jaringan distribusi air minum yang dikembangkan ?
4. Bagaimana unit kompetensi pelaksanaan inspeksi korosi pipa jaringan distribusi air minum ?

D. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah, maka ditetapkan tujuan utama dari penelitian ini adalah mengembangkan model inspeksi korosi pipa jaringan distribusi air minum. Model inspeksi korosi tersebut diharapkan dapat memprediksi kemampuan pipa menahan tekanan operasionalnya, laju korosi pipa dan masa penggunaan pipa selanjutnya, sehingga dapat menjadi bahan pertimbangan bagi manajemen perusahaan air minum dalam menentukan tindakan pemeliharaan pipa. Untuk mencapai tujuan tersebut, beberapa tujuan khusus yang terkait dengan tujuan utama dari penelitian ini secara berurutan adalah:

1. Mengembangkan model inspeksi korosi pipa jaringan distribusi air minum.
2. Menghasilkan model inspeksi korosi pipa jaringan distribusi air minum yang valid.
3. Menghasilkan prosedur inspeksi korosi pipa jaringan distribusi air minum yang praktis dan efektif.
4. Menghasilkan unit kompetensi inspeksi korosi pipa jaringan distribusi air minum.

E. Manfaat Penelitian

Penelitian ini pada dasarnya merupakan bagian dari manajemen aset terkait dengan pengelolaan korosi pipa jaringan distribusi air minum, melalui pengembangan model inspeksi korosi pipa yang mengalami korosi. Oleh karena itu, penelitian ini memberikan manfaat kepada berbagai pihak terkait, seperti: perusahaan air minum, masyarakat konsumen perusahaan air minum, serta lembaga pendidikan dan pelatihan.

Manfaat penelitian ini terhadap perusahaan air minum adalah: Pertama, pengembangan model inspeksi korosi pipa jaringan distribusi air minum memberikan alternatif solusi dalam pengelolaan pipa yang telah digunakan dalam jangka waktu yang lama (*aging*). Kedua, model inspeksi korosi pipa jaringan distribusi air minum yang dikembangkan, dapat membangun pemahaman yang jelas bagi personil yang berada dalam manajemen

perusahaan tentang proses kerusakan pipa akibat korosi. Dengan demikian, memungkinkan untuk menerapkan langkah-langkah mitigasi secara cepat dan tepat. Ketiga, penerapan model inspeksi korosi pipa jaringan air minum yang dikembangkan pada penelitian ini, dapat menghasilkan data dan informasi kondisi aktual pipa dan lingkungan pipa, sehingga dapat dijadikan pertimbangan dalam pelaksanaan pemeliharaan proaktif, serta pedoman dalam pengembangan jaringan pipa distribusi. Sebagai dampak dari ketiga manfaat tersebut, manajemen perusahaan air minum akan dapat menjaga jaringan pipa tetap berada dalam kondisi yang baik, sehingga mampu memberikan pasokan air minum yang memadai kepada masyarakat secara efektif dan berkelanjutan.

Manfaat yang diperoleh oleh konsumen perusahaan air minum dengan diimplementasikannya model inspeksi korosi pipa jaringan distribusi air minum ini adalah: Pertama, terjadinya peningkatan kuantitas dan kualitas air minum yang sampai ke rumah-rumah masyarakat. Dengan demikian akan meningkatkan kesehatan dan kehidupan sosial masyarakat. Kedua, penerapan model inspeksi korosi pipa jaringan distribusi air minum ini, akan membuka lapangan kerja baru, sehingga memberi manfaat bagi lembaga pendidikan dan pelatihan untuk membuka bidang kajian inspeksi korosi pipa.

F. Spesifikasi Produk yang Diharapkan

Pengembangan model inspeksi korosi pipa jaringan distribusi air minum ini direncanakan menghasilkan beberapa produk penelitian, sebagai berikut:

1. Model baru inspeksi korosi pipa jaringan distribusi air minum yang valid, dengan prosedur yang praktis dan efektif untuk diterapkan.
2. Buku model inspeksi korosi pipa jaringan distribusi air minum

Buku model inspeksi korosi pipa jaringan distribusi air minum yang memuat kerangka konseptual pengembangan model dan tahapan pelaksanaan inspeksi dan analisis hasil inspeksi korosi pipa jaringan distribusi air minum.

3. Buku prosedur inspeksi korosi pipa jaringan distribusi air minum

Buku prosedur inspeksi korosi pipa jaringan distribusi air minum yang menjabarkan metode inspeksi korosi pipa, yang terdiri dari: tujuan, peralatan dan bahan yang digunakan, prosedur kerja, serta data hasil inspeksi.

4. Program aplikasi pengolahan data hasil inspeksi

Program aplikasi pengolahan data hasil inspeksi korosi pipa jaringan distribusi air minum, yang terdiri dari perhitungan korosifitas tanah, perhitungan korosifitas air, perhitungan kekuatan pipa menahan tekanan air, dan perhitungan laju korosi pipa.

5. Unit kompetensi inspeksi korosi pipa jaringan distribusi air minum

Unit kompetensi inspeksi korosi pipa jaringan distribusi air minum yang dikembangkan berdasarkan prosedur inspeksi. Unit kompetensi ini dilengkapi dengan elemen kompetensi dan kriteria unjuk kerja.

G. Asumsi dan Keterbatasan Pengembangan

Pengembangan model inspeksi korosi pipa jaringan distribusi air minum ini berdasarkan pada asumsi, sebagai berikut:

1. Jaringan distribusi air minum terdiri dari beberapa komponen, seperti pipa, sambungan pipa (*elbow, tee, knee*) dan katup. Akan tetapi, pipa memiliki persentase terbesar dari jaringan distribusi air minum, sehingga pipa menjadi komponen utama jaringan distribusi air minum tersebut. Dengan pertimbangan tersebut, maka pada penelitian ini inspeksi korosi dilakukan untuk mendapatkan data dan informasi yang memberikan gambaran keadaan struktur pipa, laju korosi pipa dan kemampuan pipa untuk menyalurkan air pada tekanan operasionalnya (Eweda *et.al*, 2010:1394).
2. Meskipun pada dasarnya pipa jaringan distribusi air minum terbuat dari bahan logam dan non logam, akan tetapi sebagian besar bahan pipa distribusi air minum yang digunakan dari tangki air minum pada perusahaan air minum ke sambungan rumah masyarakat saat ini masih terbuat dari bahan logam, khususnya besi tuang dan baja (Chawla *et.al*,

2012:480; Hou *et.al*, 2016:1). Oleh karena itu penelitian ini difokuskan pada inspeksi korosi pipa jaringan distribusi air minum yang terbuat dari logam dengan bahan utama baja.

3. Korosi yang terjadi pada jaringan pipa distribusi air minum merupakan masalah yang terjadi di berbagai negara di dunia, termasuk Indonesia. Dengan pertimbangan bahwa pada dasarnya proses dan mekanisme korosi yang terjadi pada pipa jaringan distribusi air minum relatif sama, maka penelitian yang dilakukan ini merupakan representasi dari penyelesaian masalah global.
4. Kebocoran air minum yang terjadi pada pipa jaringan distribusi, sebagian disebabkan karena pipa mengalami korosi. Oleh karena itu, penerapan pengembangan model inspeksi korosi pipa jaringan distribusi air minum ini, akan mereduksi korosi yang terjadi pada pipa, sehingga dapat menurunkan persentase kebocoran air minum tersebut.

Sementara itu keterbatasan pengembangan model inspeksi korosi pipa jaringan distribusi air minum ini adalah sebagai berikut:

1. Pada umumnya kerusakan yang terjadi pada pipa distribusi air minum disebabkan oleh kualitas material pipa, durasi pemakaian pipa, tekanan aliran di dalam pipa, serta tingkat korosi internal dan korosi eksternal pada pipa yang dipengaruhi oleh kondisi lingkungan (Maslak *et.al*, 2015:980). Pada penelitian ini pengembangan model inspeksi korosi pipa yang dilakukan dibatasi hanya untuk inspeksi korosifitas lingkungan eksternal (tanah yang berada di sekitar pipa), korosifitas lingkungan internal (air yang mengalir di dalam pipa), kerusakan (cacat korosi) yang terjadi pada permukaan pipa, serta kekuatan pipa terkorosi menahan tekanan air pada kondisi operasionalnya.
2. Belum adanya prosedur yang standar (Pond dand Pedley, 2011:56) dan bervariasinya lingkungan dimana pipa jaringan distribusi air minum tersebut ditempatkan (Hou *et.al*, 2016:1), maka penelitian ini dilakukan pada Perusahaan Daerah Air Minum Kota Padang.

3. Teknologi inspeksi dan metode analisis yang bervariasi dan terbatasnya kemampuan tenaga teknis pada perusahaan air minum (Pond dan Pedley, 2011:56), menjadi tantangan dalam pelaksanaan penilaian korosi. Oleh karena itu, pada penelitian ini teknologi inspeksi dan metode analisis yang digunakan diselaraskan dengan kemampuan tenaga teknis yang tersedia.
4. Pandemi *corona virus disease* (COVID-19) yang melanda dunia saat ini menyebabkan peneliti memiliki keterbatasan dalam melakukan implementasi pengembangan model di lapangan. Oleh karena itu pengujian praktikalitas dan efektivitas prosedur inspeksi korosi pipa jaringan distribusi air minum dilakukan secara terbatas, dan berdasarkan hasil kuesioner survei terhadap tenaga teknis perusahaan air minum dan sarjana *fresh graduate* Program Studi Teknik Mesin yang memiliki pengetahuan dalam bidang inspeksi dan pengendalian korosi.

H. Definisi Operasional

Guna memberikan persepsi yang sama terhadap istilah yang terdapat pada penelitian pengembangan model inspeksi korosi pipa jaringan distribusi air minum ini, maka dinyatakan beberapa definisi operasional, sebagai berikut:

1. Model inspeksi korosi pipa adalah suatu kerangka konseptual yang merepresentasikan proses terstruktur dan sistematis inspeksi korosi pipa jaringan distribusi air minum.
2. Inspeksi korosi pipa adalah proses pengukuran yang dilakukan dengan teknik tertentu, disertai dengan analisis hasil inspeksi untuk mendapatkan data dan informasi terhadap kondisi aktual pipa yang mengalami korosi.
3. Analisis hasil inspeksi adalah evaluasi dan penilaian kondisi pipa yang dilakukan melalui perhitungan sesuai dengan standar yang berlaku atau standar internasional.
4. Korosi adalah proses yang terjadi sebagai reaksi alamiah antara struktur pipa dengan lingkungan (air, tanah dan udara) disekitarnya, sehingga pipa mengalami degradasi atau kerusakan fisik.

5. Pipa adalah tabung silinder dengan panjang tertentu dengan spesifikasi material berlaku yang digunakan untuk menyalurkan fluida bertekanan. Pipa diproduksi dalam berbagai ukuran dan ketebalan yang dinyatakan dalam diameter nominal. Diameter nominal adalah perkiraan diameter internal pipa dengan ketebalan sesuai standar *schedule*.
6. Pipa jaringan distribusi air minum adalah pipa yang terbuat dari material dasar baja, yang digunakan untuk menyalurkan air dari tangki penyimpanan air pengelola air minum ke sambungan pipa air minum rumah masyarakat pelanggan.
7. Kondisi operasional pipa adalah kondisi dimana pipa mengalirkan air sesuai dengan tekanan dan temperatur yang direncanakan.
8. Sisa waktu penggunaan pipa adalah perkiraan lamanya waktu penggunaan pipa menyalurkan air dengan kapasitas dan tekanan yang sesuai dengan kondisi operasionalnya, setelah pelaksanaan inspeksi.
9. Teknik inspeksi adalah berbagai metode terstruktur yang dilakukan untuk mengukur parameter struktur pipa, cacat korosi pada permukaan pipa, aliran air dalam pipa, serta kondisi lingkungan yang berpotensi mempengaruhi kondisi fisik pipa.
10. Korosivitas lingkungan adalah kondisi lingkungan disekitar pipa yang mempengaruhi terjadinya korosi pada pipa. Pada penelitian ini lingkungan yang dipertimbangkan adalah lingkungan internal, yaitu lingkungan yang terdapat di sisi bagian dalam pipa, dan lingkungan eksternal, yaitu lingkungan yang terdapat pada sisi bagian luar pipa.
11. Parameter penilaian korosi pipa adalah besaran-besaran tertentu yang digunakan untuk menentukan laju korosi pipa dan kemampuan pipa menahan tekanan air pada kondisi operasionalnya.
12. Validitas adalah suatu standar ukuran yang menunjukkan ketepatan dan kesahihan suatu instrumen yang dikembangkan, melalui pemenuhan unsur dan elemen ilmiah, serta mengukur apa yang hendak diukur.

13. Praktikalitas berupa tingkat kemudahan dan kepraktisan prosedur yang dikembangkan dalam pelaksanaan inspeksi korosi pipa jaringan distribusi air minum.
14. Efektivitas adalah ukuran daya guna dari pengembangan model dan prosedur inspeksi korosi pipa untuk diterapkan pada pipa jaringan distribusi air minum, sehingga memenuhi taraf kesesuaian dan ketercapaian hasil yang diharapkan.
15. Unit kompetensi adalah hasil identifikasi kebutuhan/persyaratan di tempat kerja berupa: sikap, pengetahuan dan kemampuan, untuk melaksanakan inspeksi korosi pipa jaringan distribusi air minum.