



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

RSKe
665.774
Yus
0-1

2010

TUGAS AKHIR - MO 091336

**OPTIMASI DESAIN ELBOW PIPE PADA JARINGAN PIPA
TRANSPORTASI MIGAS MILIK JOINT OPERATING BODY
PERTAMINA-PETROCHINA EAST JAVA (JOB P-PEJ) TUBAN
DENGAN BERBASIS KEANDALAN**

Septian Muhammad Yusuf
NRP 4305 100 055

Dosen Pembimbing
Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D
Ir. Hasan Ikhwan, M.Sc

JURUSAN TEKNIK KELAUTAN
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2010

PERPUSTAKAAN	
Tgl. Terima	15 - 2 - 2010
Terima Dari	H
No. Agenda Prp.	871



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - MO 091336

*ELBOW PIPE DESIGN OPTIMIZATION OF OIL AND GAS
PIPELINE SYSTEM OWNED BY JOINT OPERATING BODY
PERTAMINA-PETROCHINA EAST JAVA (JOB P-PEJ) TUBAN
BASED ON RELIABILITY*

*Septian Muhammad Yusuf
REG 4305 100 055*

Supervisors

Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D

Ir. Hasan Ikhwani, M.Sc.

*DEPARTMENT OF OCEAN ENGINEERING
Faculty of Marine Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2010*

PERSEMBAHAN

Teruntuk Ayahku, Ibuku dan Keluargaku tercinta..... serta Si Kecil Junior.....

Janganlah mengikuti apa-apa yang kamu tidak tahu ilmunya. Sesungguhnya
penglihatan, pendengaran dan hati semuanya akan dimintai
pertanggungjawaban.....

Menuntut ilmu itu sejak dari buaian hingga ke liang lahat.....

Menuntut ilmu adalah wajib bagi tiap-tiap muslim.....

**OPTIMASI DESAIN *ELBOW PIPE* PADA JARINGAN PIPA
TRANSPORTASI MIGAS MILIK JOINT OPERATING BODY
PERTAMINA-PETROCHINA EAST JAVA (JOB P-PEJ)
TUBAN DENGAN BERBASIS KEANDALAN**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Kelautan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Septian Muhammad Yusuf

NRP 4305 100 055

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:

1. Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D (Pembimbing I)

2. Ir. Hasan Ikhwani, M.Sc (Pembimbing II)

SURABAYA, FEBRUARI 2010

ABSTRAK

OPTIMASI DESAIN *ELBOW PIPE* PADA JARINGAN PIPA TRANSPORTASI MIGAS MILIK JOINT OPERATING BODY PERTAMINA-PETROCHINA EAST JAVA (JOB P-PEJ) TUBAN DENGAN BERBASIS KEANDALAN

Nama Mahasiswa : Septian Muhammad Yusuf
NRP : 4305 100 055
Jurusan : Teknik Kelautan FTK – ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D
Ir. Hasan Ikhwani, M.Sc

Korosi yang terjadi pada *pipeline* akan berpengaruh terhadap keandalan jaringan pipa. Salah satu jenis korosi yaitu korosi internal mengakibatkan degradasi struktur yang cukup signifikan pada *elbow pipe*. Degradasi struktur lebih lanjut akan mengakibatkan kegagalan struktur. Optimasi desain dilakukan agar diperoleh dimensi (tebal dinding) *elbow pipe* (t) sedemikian rupa sehingga sistem mencapai keandalan tertentu yang telah ditentukan dengan biaya instalasi minimum tanpa melanggar batasan. Optimasi desain dilakukan pada jaringan pipa transportasi migas milik *Joint Operating Body Pertamina-Petrochina East Java* Tuban. Tebal dinding *elbow pipe* dibuat bervariasi agar diperoleh desain yang optimum. Perhitungan keandalan dilakukan untuk mengetahui tingkat keandalan *elbow pipe* yang merupakan salah satu batasan dalam melakukan optimasi desain. Perhitungan keandalan *elbow pipe* dilakukan dengan menggunakan simulasi *Monte Carlo*. Dari simulasi diperoleh hasil berupa keandalan *elbow pipe* masing-masing yaitu *EP #1* 100 %, *EP #2* 100 %, *EP #3* 100 % dan *EP #4* 100 %. Karena hasil perhitungan keandalan sistem menunjukkan nilai yang maksimum, maka untuk optimasi desain dilakukan dengan menggunakan indeks keandalan (β) = 2, 3 dan 4. Optimasi desain dilakukan dengan bantuan *software SOLVER*. Tebal *elbow pipe* hasil optimasi adalah sebesar 0,25 inch dari tebal semula 0,593 inch dengan pengurangan ketebalan sebesar 57,84 %. Biaya instalasi setelah optimasi adalah 175,39 \$ dari yang semula 462,5 \$ dan besarnya penghematan yang terjadi adalah 62,08 %.

Kata Kunci: Optimasi Desain, *Elbow Pipe*, Ketebalan, *Monte Carlo*, Biaya Instalasi.

ABSTRACT

ELBOW PIPE DESIGN OPTIMIZATION OF OIL AND GAS PIPELINE SYSTEM OWNED BY JOINT OPERATING BODY PERTAMINA- PETROCHINA EAST JAVA (JOB P-PEJ) TUBAN BASED ON RELIABILITY

Name of Student : Septian Muhammad Yusuf
REG : 4305 100 055
Departement : Departement of Ocean Engineering, Marine Technology
Faculty, ITS
Supervisors : Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D
Ir. Hasan Ikhwani, M.Sc

Corrosion that occurs on the pipeline will influence the reliability of the pipeline. A type of corrosion is internal corrosion which causes the significant degradation of the structure to the elbow pipe. Structural degradation will lead to further structural failure. Design optimization is conducted to obtain the dimensions (wall thickness) of elbow pipe (t) such that the system reach a certain reliability level which have been determined with minimum installation cost without violating constraints. Design optimization is conducted on the oil and gas pipeline transportation system owned by Joint Operating Body Pertamina-Petrochina East Java Tuban. Elbow pipe wall thickness is varied in order to obtain the optimum design. Reliability calculation is performed to determine the reliability level of the elbow pipe which become a constrain in conducting the design optimization. The reliability calculation of elbow pipe using Monte Carlo Simulation. The simulation produced the reliability of each elbow pipe such as: EP #1 100 %, EP #2 100 %, EP #3 100 % and EP #4 100 %. Since the reliability calculation shows the maximum value, then the optimization design is conducted by using the reliability index (β) = 2, 3 and 4. Design optimization performed with the help of software SOLVER. Thickness of elbow pipe resulted from the optimization process is 0.25 inch from the original thickness 0.593 inch; with thickness reduction of 57.84 %. Installation costs after optimization process is \$ 175.39 from the initial costs \$ 462.5 and the amount of savings that happened is 62.08 %.

Keywords: Design Optimization, Elbow Pipe, Wall Thickness, Monte Carlo, Installation Costs.



KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullohi Wabarakatuh.

Alhamdulillahirabbil'alamin. Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Alloh SWT atas segala limpahan rahmat, hidayah dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik dan lancar. Sholawat serta salam juga penulis haturkan kepada junjungan umat manusia Rasulullah Muhammad SAW.

Tugas Akhir ini berjudul **“Optimasi Desain *Elbow Pipe* pada Jaringan Pipa Transportasi Migas Milik Joint Operating Body Pertamina-Petrochina East Java (JOB P-PEJ) Tuban dengan Berbasis Keandalan”**. Tugas Akhir ini disusun guna memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan Studi Kesarjanaan (S1) di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Dalam Tugas Akhir ini dilakukan optimasi desain *elbow pipe* berbasis keandalan.

Penulis menyadari bahwa dalam pengerjaan dan penulisan penelitian ini masih jauh dari kesempurnaan sehingga penulis sangat mengharapkan kritik dan saran dari pihak lain. Akhir kata penulis hanya dapat berharap penelitian ini bermanfaat bagi kemajuan dunia pendidikan khususnya Bidang Perancangan dan Produksi Bangunan Laut.

Wassalamu'alaikum Warahmatullohi Wabarakatuh.

Surabaya, Februari 2010

Septian Muhammad Yusuf

UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillah rabbil'alamin, segala puji selalu dipanjatkan kehadirat Alloh SWT, yang jiwaku berada dalam genggamannya. Shalawat dan salam semoga selalu tercurah kepada Nabi Muhammad SAW. Berkat ridlo dan pertolongan Alloh SWT serta bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, maka Saya bisa menyelesaikan Tugas Akhir ini. Oleh karena itu, pada kesempatan ini Saya ingin mengucapkan terima kasih atas bimbingan, bantuan dan dukungan moril-materiil maupun doa, kepada:

1. Kedua orang tuaku Bapak Musdihatno dan Ibu Nasokah Sulistyowati yang telah membiayai seluruh pendidikanku. Hanya ilmu yang bisa beliau berdua wariskan kepadaku bukan harta (begitulah nasehat beliau berdua yang selalu kuingat). Serta kakak-kakakku Mas Praba-Mbak Intan dan Mas Imo yang telah memberikan dukungan dan doa kepadaku untuk segera menyelesaikan studi ini. Tak lupa si kecil Nio yang selalu membuatku kangen;
2. Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D selaku dosen pembimbing I dan Ir. Hasan Ikhwani, MSc selaku dosen pembimbing II sekaligus juga sebagai dosen wali Saya;
3. Ir. Murdjito, MSc, Eng dan Dr. Drs M. Mustain, MSc selaku Ketua dan Sekretaris Jurusan Teknik Kelautan;
4. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Kelautan yang telah membantu Saya dalam menjalani kehidupan perkuliahan di Surabaya ini;
5. Karyawan Joint Operating Body Pertamina-Petrochina East Java Tuban, khususnya Mas Andy Suhendro, ST yang telah memberikan banyak ilmu dan data untuk pengerjaan Tugas Akhir ini; Ibu Juwairiah di HRD yang selalu sabar dengan permintaan Kami, Bapak Andari dan pihak-pihak lain yang telah banyak membantu dalam pengambilan data Tugas Akhir ini;

Serta semua pihak yang telah membantu penyelesaian Tugas Akhir ini namun tidak bisa Saya sebutkan satu-persatu.

DAFTAR ISI

JUDUL	i
PERSEMBAHAN	v
LEMBAR PENGESAHAN	vii
ABSTRAK	ix
<i>ABSTRACT</i>	xi
KATA PENGANTAR	xiii
UCAPAN TERIMA KASIH	xv
DAFTAR ISI	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
DAFTAR NOTASI	xxiii
DAFTAR SIMBOL	xxv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Perumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Manfaat Penelitian	5
1.5 Batasan Masalah Penelitian	5
1.6 Sistematika Penulisan	6
BAB II DASAR TEORI	9
2.1 Umum	9
2.2 Penjelasan Umum Mengenai <i>Pipeline</i>	12
2.3 Konsep Korosi dalam Perancangan	13
2.3.1 Definisi Korosi	13
2.3.2 Prinsip-prinsip Terjadinya Korosi	16
2.3.3 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Korosi	19
2.4 Konsep Analisis Keandalan dalam Perancangan	22
2.4.1 Jenis Metode Analisis Keandalan	24
2.4.2 Keandalan pada Sistem Rekayasa	25

2.4.3	<i>Safety Margin</i> (Margin Keamanan).....	27
2.4.4	Indeks Keandalan	28
2.5	Konsep Simulasi <i>Monte Carlo</i>	29
2.6	Dasar Teori Optimasi.....	31
2.6.1	<i>Statement</i> Persoalan Optimasi	32
2.6.2	Optimasi Persoalan Non Linear.....	32
BAB III METODOLOGI		41
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN		51
4.1	Data Utama	51
4.2	Perhitungan Keandalan <i>Elbow Pipe</i>	52
4.2.1	Penentuan Moda Kegagalan	52
4.2.2	Penentuan Variabel Acak dan Parameter Statistiknya	53
4.2.3	Simulasi <i>Monte Carlo</i>	61
4.3	Optimasi Desain <i>Elbow Pipe</i>	69
4.3.1	Penentuan Fungsi Obyektif	69
4.3.2	Pemodelan Batasan-Batasan.....	70
4.3.3	Hasil Optimasi	71
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		77
5.1	Kesimpulan	77
5.2	Saran	77
DAFTAR PUSTAKA.....		79
LAMPIRAN A		
LAMPIRAN B		
LAMPIRAN C		
LAMPIRAN D		
BIODATA PENULIS		

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 <i>Elbow pipe</i> tipe 90°	3
Gambar 1.2 <i>Elbow pipe</i> tipe 45°	3
Gambar 1.3 <i>Elbow pipe</i> tipe 90°	4
Gambar 2.1 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Ketahanan Korosi	16
Gambar 2.2 Grafik Hubungan antara Temperatur dan <i>Corrosion rate</i>	19
Gambar 2.3 Pengaruh Aliran Terhadap Laju Korosi	21
Gambar 2.4 Korosi Erosi pada Belokan Pipa.....	22
Gambar 2.5 Fungsi Kerapatan Peluang (f _{kp}) dari Kapasitas X dan Tuntutan Y..	26
Gambar 2.6 Fungsi Distribusi Kumulatif dan Fungsi Kerapatan Peluang pada Angka Keamanan $Z = X/Y$	27
Gambar 2.7 Hubungan antara Bilangan Acak yang Mengikuti Distribusi <i>Uniform</i> dengan Peubah Acak X yang Memiliki Fungsi Distribusi Kumulatif $F_x(x)$	31
Gambar 2.8 Skenario Umum Penyelesaian Langsung secara <i>Iterative</i>	34
Gambar 2.9 Algoritma Metode Hukum Interior	38
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.	41
Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian (lanjutan).....	42
Gambar 3.3 Diagram Alir <i>Monte Carlo Simulation</i>	47
Gambar 3.4 Diagram Alir <i>Monte Carlo Simulation</i> (lanjutan).....	48
Gambar 3.5 Diagram Alir Optimasi Desain.....	49
Gambar 4.1 Grafik <i>Depth of Corrosion Defect of Elbow Pipe 45°</i> (2007).....	55
Gambar 4.2 Grafik <i>Depth of Corrosion Defect of Elbow Pipe 45°</i> (2009).....	55
Gambar 4.3 Grafik <i>Depth of Corrosion Defect of Elbow Pipe 90°</i> (2007-2009)..	56
Gambar 4.4 Grafik <i>Length of Corrosion Defect of Elbow Pipe 45°</i> (2007).....	58
Gambar 4.5 Grafik <i>Length of Corrosion Defect of Elbow Pipe 45°</i> (2009).....	58
Gambar 4.6 Grafik <i>Length of Corrosion Defect of Elbow Pipe 90°</i> (2007-2009). 59	
Gambar 4.7 Grafik Keandalan <i>Elbow Pipe 45°</i> untuk Tahun 2007 pada <i>Elbow Pipe</i> 1 s/d 4.....	63
Gambar 4.8 Grafik Keandalan <i>Elbow Pipe 45°</i> untuk Tahun 2009 pada <i>Elbow Pipe</i> 1 s/d 4.....	65

Gambar 4.9 Grafik Keandalan <i>Elbow Pipe</i> 90^0 untuk Tahun 2007 pada <i>Elbow Pipe</i> 1 dan 2.....	66
Gambar 4.10 Grafik Keandalan <i>Elbow Pipe</i> 90^0 untuk Tahun 2009 pada <i>Elbow Pipe</i> 1 dan 2.....	68
Gambar 4.11 Regresi Polynomial untuk Menentukan Fungsi Obyektif.	70
Gambar 4.12 Grafik Hubungan Antara Indeks Keandalan dengan Ketebalan Dinding <i>Elbow Pipe</i> Hasil Optimasi.	73

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Data <i>pipeline</i> milik JOB P-PEJ.....	2
Tabel 2.1 Konsentrasi CO ₂ Penyebab Korosi.....	20
Tabel 4.1 Data Utama <i>Elbow Pipe</i>	51
Tabel 4.2 <i>Operating Pressure</i> bulan November 2008 s/d bulan Oktober 2009....	51
Tabel 4.3 Data Inspeksi <i>Elbow Pipe</i> 90°.....	52
Tabel 4.4 Data Inspeksi <i>Elbow Pipe</i> 45°.....	52
Tabel 4.5 Data Kedalaman Korosi <i>Elbow Pipe</i> 45°.....	54
Tabel 4.6 Data Kedalaman Korosi <i>Elbow Pipe</i> 90°.....	56
Tabel 4.7 Data Panjang Korosi <i>Elbow Pipe</i> 45°.....	57
Tabel 4.8 Data Panjang Korosi <i>Elbow Pipe</i> 90°.....	59
Tabel 4.9 Parameter Statistik Kedalaman Korosi (<i>d</i>), Panjang Korosi (<i>l</i>) dan Tekanan Operasi (<i>P_o</i>) yang Terjadi pada <i>Elbow Pipe</i> 45° Tahun 2007.....	60
Tabel 4.10 Parameter Statistik Kedalaman Korosi (<i>d</i>), Panjang Korosi (<i>l</i>) dan Tekanan Operasi (<i>P_o</i>) yang Terjadi pada <i>Elbow Pipe</i> 45° Tahun 2009.....	60
Tabel 4.11 Parameter Statistik Kedalaman Korosi (<i>d</i>), Panjang Korosi (<i>l</i>) dan Tekanan Operasi (<i>P_o</i>) yang Terjadi pada <i>Elbow Pipe</i> 90° Tahun 2007.....	61
Tabel 4. 12 Parameter Statistik Kedalaman Korosi (<i>d</i>), Panjang Korosi (<i>l</i>) dan Tekanan Operasi (<i>P_o</i>) yang Terjadi pada <i>Elbow Pipe</i> 90° Tahun 2009.....	61
Tabel 4.13 Hasil Simulasi <i>Monte Carlo Elbow Pipe</i> 45° untuk Data Tahun 2007.....	62
Tabel 4.14 Hasil Simulasi <i>Monte Carlo Elbow Pipe</i> 45° untuk Data Tahun 2007 (lanjutan).....	63
Tabel 4.15 Hasil Simulasi <i>Monte Carlo Elbow Pipe</i> 45° untuk Data Tahun 2009.....	64
Tabel 4.16 Hasil Simulasi <i>Monte Carlo Elbow Pipe</i> 90° untuk Data Tahun 2007.....	66
Tabel 4.17 Hasil Simulasi <i>Monte Carlo Elbow Pipe</i> 90° untuk Data Tahun 2009.....	67
Tabel 4.18 Biaya Instalasi <i>Elbow Pipe</i> Berdasarkan Ketebalan Pipa.....	69

Tabel 4.19 Perubahan Variabel *Elbow Pipe* Setelah Optimasi Desain. 72

DAFTAR NOTASI

- t : pipe wall thickness (inch)
- P_f : probability of failure
- P_b : bursting pressure (ksi)
- P_o : operating pressure (ksi)
- E : weld joint factor
= 1; ASTM 106 Gr. B
= 1; API 5L X52
- $SMYS$: specified minimum yield stress
- D : pipe outside diameter (inch)
- d : depth of corrosion defect (inch)
- l : length of corrosion defect (inch)
- Z : angka keamanan
- K : keandalan
- X : variabel acak peubah dasar
- Y : variabel acak peubah dasar
- S : safety margin
- V_s : variasi margin keselamatan
- P_g : peluang kegagalan
- N : jumlah simulasi
- n_g : jumlah data yang gagal
- u : random number generated
= cumulative distribution function
- $f(x)$: fungsi obyektif
- $G_j(X)$: inequality constraint
- $L_j(X)$: equality constraint
- $P(X)$: parameter hukuman
- r_p : pengali yang menentukan besarnya hukuman
- p : indeks transformasi ke-p
- r'_p : parameter penalti
- R : radius of elbow pipe

DAFTAR SIMBOL

θ	: scale parameter of exponential distribution
λ	: treshold parameter of weibull distribution
β	: shape parameter of weibull distribution
α	: scale parameter of weibull distribution
σ	: scale of data (standart deviasi data)
μ	: location of data (mean of the data)
ρ_{xy}	: koefisien korelasi antara kapasitas dan beban
μ_s	: margin keamanan
σ	: standart deviasi data
μ	: rata-rata data
β	: indeks keandalan
σ_y	: yield stress (ksi) = $0.72xExSMYS$



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Kebutuhan minyak di dunia terus meningkat dari tahun ke tahun. Lebih dari 38 juta rumah dan industri serta berbagai pelayanan penting lainnya, yang dilayani oleh 800.000 mil jaringan transmisi pipa, tergantung pada minyak dan gas bumi sebagai sumber energi (Rothfarb, 1969). Hal ini disebabkan oleh sumber energi yang berasal dari minyak bumi yang relatif lebih murah dibandingkan dengan sumber energi lain seperti *solar energy*, maupun dari angin, batu bara atau nuklir sekalipun.

Untuk memenuhi banyaknya permintaan minyak tersebut, terutama di Indonesia, sekarang ini di Jawa Timur telah dan sedang dibangun jaringan pipa migas milik Joint Operating Body Pertamina-Petrochina East Java (JOB P-PEJ) dari Bojonegoro (Ladang Minyak Sukowati) dan Tuban (Ladang Minyak Mudi) ke Lepas Pantai Tuban (*FSO "Cinta Natomas"*). Saat ini JOB P-PEJ sedang mengerjakan proyek baru berupa pemasangan jaringan pipa (*pipeline*) dari Ladang Minyak Sukowati menuju *Central processing Area*.

Kandungan H_2S yang terdapat pada sumur JOB P-PEJ merupakan kandungan H_2S yang tertinggi di Indonesia, sekitar 22.000 ppm (2 %), yang mana kandungan normal pada minyak adalah 10 ppm. Sehingga *pipeline* milik JOB P-PEJ memiliki resiko korosi yang tinggi. Permasalahan yang kemudian timbul adalah bagaimana membangun jaringan pipa migas yang optimum dengan kondisi fluida yang korosif tersebut, sehingga biaya yang dikeluarkan minimum namun tetap memenuhi persyaratan yang ditentukan. Studi mengenai hal ini telah dilakukan pada Jaringan Pipa Transmisi Gas Sumatera Selatan – Jawa Barat (Siregar, 2003).

Penelitian yang telah dilakukan Siregar (2003) memberikan hasil bahwa diperoleh diameter optimum yang relatif berbeda untuk tiap segmen pipa. Hasil perhitungan

yang diperoleh pada makalah tersebut merupakan hasil optimasi yang memberikan biaya minimum walaupun mungkin kenyataannya tidak praktis. Penelitian yang hampir sama juga pernah dilakukan oleh Semedi (2005). Penelitian ini menitikberatkan pada optimasi desain tebal pipa akibat pengaruh gaya luar yang bekerja pada pipa. Penelitian tersebut dilakukan untuk jaringan pipa secara menyeluruh. Karena itu penelitian ini akan dilakukan untuk lebih spesifik pada *elbow pipe*. Selain itu, penelitian ini akan dilakukan berdasarkan data dari jaringan transportasi pipa migas milik Joint Operating Body Pertamina-Petrochina East Java (JOB P-PEJ) Tuban.

Berikut adalah data *pipeline* milik Joint Operating Body Pertamina-Petrochina East Java (JOB P-PEJ).

Tabel 1.1 Data *pipeline* milik JOB P-PEJ.

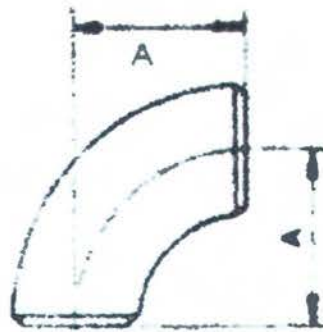
<i>Sukowati-CPA Pipeline</i>	
Material	<i>ASTM A106 Gr.B Sch 80</i>
<i>Outside Diameter (inch)</i>	<i>10.75</i>
<i>Wall Thickness (inch)</i>	<i>0.593</i>
<i>Length of Pipeline (m)</i>	<i>9600</i>
<i>SMYS (psi)</i>	<i>35000</i>
Jumlah <i>Elbow</i>	<i>8 Elbow 10" 90 deg</i> <i>16 Elbow 10" 45 deg</i>

(Sumber: JOB P-PEJ, 2004)

Elbow pipe adalah jenis *fitting* yang dipasangkan pada pipa pada saat pipa akan berubah arah perjalanannya. Misalnya pipa yang sedang menuju ke arah barat, selanjutnya akan berbelok menuju arah selatan. Maka diantara kedua pipa tersebut, yang sedang menuju arah barat dan pipa yang akan menuju ke selatan, dipasangkan *elbow pipe* sebagai penyambungannya.

Perubahan arah tersebut bisa dalam bentuk sudut 45° atau 90° . *Elbow pipe* tersedia dalam dua tipe yaitu *Short Radius*, yakni tipe dimana jarak dari pusat *elbow pipe*

ke ujungnya (B) sama dengan *NPS*-nya, dan *Long Radius*, dimana jaraknya (A) adalah 1.5 kali *NPS*.



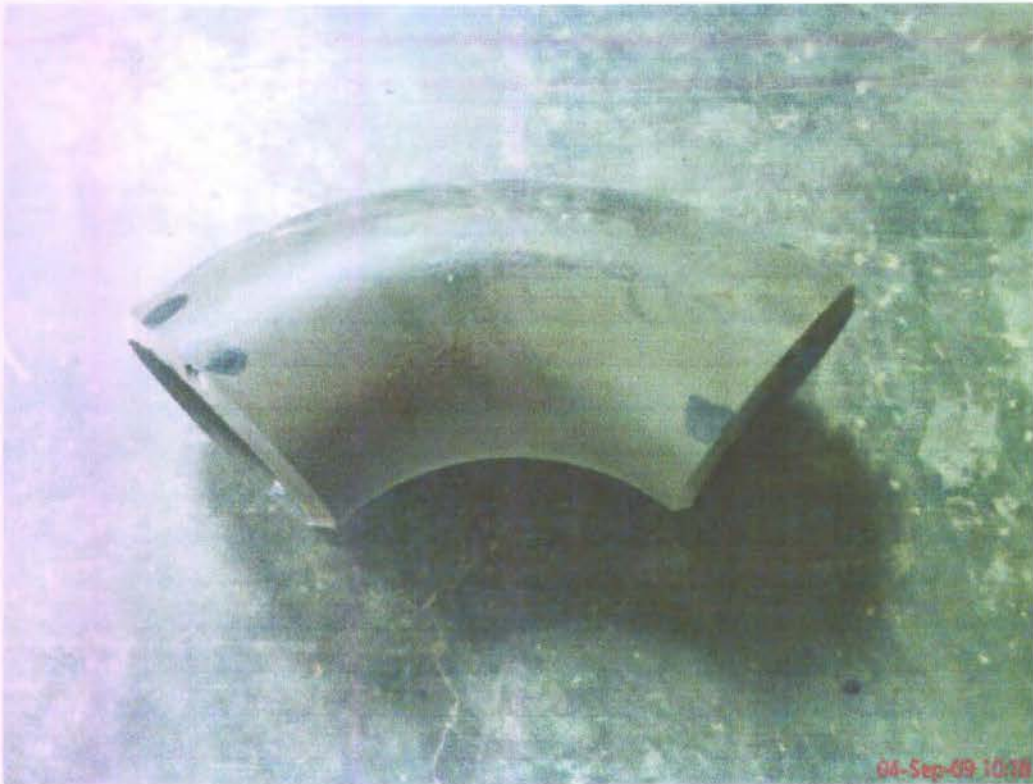
90° ELBOW

Gambar 1.1 *Elbow pipe* tipe 90° (ANSI B 16.9, 1987).



45° ELBOW

Gambar 1.2 *Elbow pipe* tipe 45° (ANSI B 16.9, 1987).



Gambar 1.3 *Elbow pipe* tipe 90°.

Korosi dapat menyebabkan menurunnya kekuatan struktur dan kerusakan pada pipa (Teixeira, 2006). Sebagian besar kecelakaan pada pipa penyalur minyak dan gas diakibatkan oleh adanya korosi internal dan eksternal (USDT, 2004). Padahal enam puluh persen dari konstruksi pipa diseluruh dunia didesain untuk beroperasi selama lebih dari 20 tahun (Liu, 2005).

Dalam jangka waktu yang cukup lama, ilmuwan telah memberikan perhatian yang lebih terhadap korosi internal. Beberapa tahun belakangan ini, penelitian mengenai proses korosi internal pada jaringan pipa menjadi topik yang sangat penting. Hal tersebut dikarenakan dampak ekonomis dan teknis yang ditimbulkannya (Huang and Ji, 2008).

Terutama pada *elbow pipe*, korosi internal akan berpengaruh cukup besar pada pengurangan dimensi pipa (ketebalan dinding pipa/*pipe wall thickness*). Oleh karena itu perlu dilakukan optimasi desain pada pipa (*elbow pipe*) agar ketebalan

pipa dapat bertahan terhadap laju korosi yang terjadi. Optimasi desain *elbow pipe* ini akan dilakukan dengan berbasis keandalan pipa (*elbow pipe*) terhadap *internal corrosion*.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan data *pipeline* pada Tabel 1.1 dan Gambar 2.1, Gambar 2.2 dan Gambar 2.3, maka permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Berapa tebal dinding *elbow pipe* (t) sedemikian rupa sehingga sistem mencapai keandalan tertentu yang telah ditentukan dengan biaya instalasi minimum tanpa melanggar konstrain?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai melalui penelitian ini adalah untuk mengetahui tebal dinding *elbow pipe* (t) sedemikian rupa sehingga sistem mencapai keandalan tertentu yang telah ditentukan dengan biaya instalasi minimum tanpa melanggar konstrain.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang akan diperoleh dari penelitian ini adalah mendapatkan tebal dinding *elbow pipe* (t) sedemikian rupa sehingga sistem mencapai keandalan tertentu yang telah ditentukan dengan biaya instalasi minimum tanpa melanggar konstrain. Selanjutnya penelitian ini dapat digunakan oleh perusahaan terkait sebagai dasar pertimbangan desain jaringan pipa selanjutnya.

1.5 Batasan Masalah Penelitian

Ada beberapa hal yang membatasi ruang lingkup Tugas Akhir ini. Adapun batasan masalah pada Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Jenis struktur yang akan dilakukan analisis ini adalah *elbow pipe* pada jaringan pipa milik Joint Operating Body Pertamina-Petrochina East Java (JOB P-PEJ);
2. Analisis keandalan *elbow pipe* yang terkorosi menggunakan mode kegagalan berbasis *pressure*;
3. Perhitungan keandalan *elbow pipe* yang terkorosi menggunakan *Monte Carlo Simulation*;
4. *Code* yang digunakan adalah ASME B31-G dan ASME B31-4;
5. Tidak mempertimbangkan korosi *external*;

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan Tugas Akhir ini dimulai dengan pendahuluan pada bab satu yang menjelaskan tentang latar belakang penelitian yang dilakukan, perumusan masalah, tujuan yang ingin dicapai dari penulisan Tugas Akhir ini, manfaat yang dapat diperoleh, batasan masalah untuk membatasi analisis yang dilakukan dan sistematika penulisan laporan Tugas Akhir ini.

Dasar teori yang menjadi sumber referensi dalam Tugas Akhir ini dijelaskan pada bab dua. Referensi yang digunakan dalam Tugas Akhir ini berasal dari berbagai penelitian mengenai pengaruh *internal corrosion* terhadap keandalan sistem *pipeline*. Juga berbagai penelitian dan referensi mengenai optimasi desain pada *pipeline*.

Langkah-langkah pengerjaan Tugas Akhir ini dan metodologi yang digunakan untuk digunakan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini dijelaskan pada bab tiga. Dalam bab ini dijelaskan mengenai langkah-langkah yang dilakukan untuk perhitungan, analisis dan penyelesaian dari Tugas Akhir ini, yang meliputi studi literatur, perhitungan kasus, pemodelan optimasi, analisis hasil pemodelan, serta penarikan kesimpulan dari analisis hasil.

Bab empat berisi analisis data dan pengerjaan serta pembahasannya. Bab ini berisi langkah-langkah pengerjaan meliputi data-data utama *elbow pipe*, langkah-langkah mencari keandalan sistem dan juga proses optimasi desain yang dilakukan terhadap *elbow pipe*. Kemudian dilakukan analisis terhadap hasil yang berasal dari proses optimasi yang dilakukan.

Bab lima adalah kesimpulan dan saran. Bab ini berisi kesimpulan dari hasil-hasil analisis yang dilakukan dan saran-saran yang bermanfaat untuk lebih menyempurnakan dan mengembangkan analisis yang telah dilakukan.

Bagian terakhir dari laporan ini adalah Daftar Pustaka. Bagian ini menampilkan seluruh informasi dan dokumen tertulis yang dijadikan landasan dan pengembangan penelitian. Penulisan daftar pustaka ini mengikuti *Harvard system*.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Umum

Penelitian mengenai optimasi *pipeline* telah dilakukan oleh beberapa orang sebelumnya. Semedi (2005) telah melakukan penelitian mengenai optimasi tebal dinding pipa bawah laut pada Lapangan Produksi Gas Tunu Kalimantan Timur. Optimasi tebal dinding pipa dihitung berdasarkan stabilitas pipa berupa stabilitas lateral dan stabilitas vertikal. Penelitian yang hampir sama telah dilakukan Siregar (2003). Penelitian ini memberikan hasil bahwa diperoleh diameter optimum yang relatif berbeda untuk tiap segmen pipa. Hasil perhitungan yang diperoleh pada makalah tersebut merupakan hasil optimasi yang memberikan biaya minimum walaupun mungkin kenyataannya tidak praktis.

Lebih lanjut Thohiroh (2005) telah melakukan perancangan pipa bawah laut PGN (Perusahaan Gas Negara) di perairan *South Sumatra-West Java*, tepatnya Labuhan Maringgai-Muara Bekasi. Perancangan bertujuan untuk mendapatkan dimensi pipa, ketebalan lapisan beton dan densitas beton, jarak tumpuan maksimum, jumlah dan berat *cathodic protection* yang diperlukan. Analisis dilakukan untuk mengetahui terjadi tidaknya *buckling* pada pipa. Seluruh zona memerlukan sistem proteksi, *anchoring system* dan *pre-cast* direkomendasikan untuk proteksinya.

Srikanth (2004) juga telah melakukan penelitian mengenai perlindungan terhadap korosi pada jaringan pipa. Penelitian ini telah memperhitungkan tekanan yang dialami pipa selama periode operasi. Semua penelitian tersebut dilakukan terhadap jaringan pipa secara global (pipa lurus) tanpa memperhatikan adanya belokan pipa (*elbow pipe*) pada jaringan pipa tersebut. Padahal kondisi yang sebenarnya di lapangan menunjukkan bahwa keberadaan *elbow pipe* dalam jaringan pipa tidak boleh diabaikan. *Elbow pipe* adalah jenis *fitting* yang dipasangkan pada pipa pada saat pipa akan berubah arah perjalanannya. Misalnya pipa yang sedang menuju ke arah barat, selanjutnya akan berbelok menuju arah

selatan. Maka diantara kedua pipa tersebut, yang sedang menuju arah barat dan pipa yang akan menuju ke selatan, dipasangkan *elbow pipe* sebagai penyambungannya.

Perhitungan keandalan pipa juga perlu memperhatikan adanya dampak korosi. Sebagian besar kecelakaan pada pipa penyalur minyak dan gas diakibatkan oleh adanya korosi internal dan eksternal (USDT, 2004). *Internal corrosion* yang terjadi pada *elbow pipe* mengakibatkan dampak yang cukup signifikan terhadap pengurangan ketebalan dinding pipa (*pipe wall thickness*).

Kegagalan pada jaringan pipa biasanya diawali oleh terdegradasinya struktur akibat adanya korosi. Pada *elbow pipe*, *internal corrosion* mempunyai dampak yang cukup signifikan dalam mempercepat terjadinya kegagalan struktur. Adanya degradasi dimensi pipa, utamanya *pipe wall thickness*, mengakibatkan tekanan operasional (*operational pressure*) dengan mudah melampaui tekanan ledakan (*burst pressure*). Dengan terlampauinya tekanan ledakan (*burst pressure*) ini, maka struktur akan mengalami kegagalan. Peluang kegagalan dapat dinyatakan sebagai peluang (P) dari kemampuan *operational pressure pipeline (Demand)* yang melebihi kapasitas *burst pressure (Capacity)* (Bea, 2003).

$$P_f = P[D \geq C] \dots\dots\dots (1)$$

Dalam penelitian ini, *elbow pipe* dinyatakan gagal jika *operational pressure* yang terjadi pada *elbow pipe* melampaui *burst pressure*. Persamaan moda kegagalan (MK) yang menggambarkan hubungan antara *internal operating pressure* dan tekanan ledakan (*burst pressure*) adalah sebagai berikut (Teixeira, 2006):

$$g(X) = P_b - P_o \dots\dots\dots (2)$$

dengan, P_b = tekanan ledakan (*burst pressure*) pipa yang terkorosi (ksi);

$$= \left(\frac{1.1\sigma_y z t}{D} \right) \left[1 - 0.9435 \left(\frac{d}{t} \right)^{1.6} \left(\frac{l}{D} \right)^{0.4} \right] \text{ (ASME B31.4)}$$

P_o = *operating pressure* (ksi)

Sehingga, persamaan moda kegagalan (MK) menjadi,

$$g(X) = \left(\frac{1.1\sigma_y 2t}{D} \right) \left[1 - 0.9435 \left(\frac{d}{t} \right)^{1.6} \left(\frac{l}{D} \right)^{0.4} \right] - P_o \dots\dots\dots(3)$$

- dengan,
- t = wall thickness of pipe (inch)
 - D = outside diameter of pipe (inch)
 - σ_y = yield stress (ksi)
 - = 0.72xExSMYS
 - E = weld joint factor
 - = 1; ASTM 106 Gr. B
 - = 1; API 5L X52
 - l = length of corrosion defect (inch)
 - d = depth of corrosion defect (inch)

Sistem dinyatakan gagal jika $g(X) < 0$, dinyatakan berhasil jika $g(X) > 0$ dan bila $g(X) = 0$, maka sistem dinyatakan mengalami *failure surface*. Variabel acak dasar terdiri dari variabel fisik yang menggambarkan ketidakpastian dalam beberapa variabel seperti kedalaman korosi, panjang korosi dan tekanan operasi.

Optimasi pada *elbow pipe* perlu dilakukan untuk mengetahui berapa tebal dinding *elbow pipe* (t) sedemikian rupa sehingga sistem mencapai keandalan tertentu yang telah ditentukan dengan biaya instalasi minimum tanpa melanggar konstrain. Metode optimasi digunakan karena dalam pengambilan keputusan digunakan pendekatan yang terencana yaitu dengan pendekatan saintifik (Rosyid, 1999). Keunggulan metode optimasi adalah perancang dapat mengidentifikasi variabel desain, fungsi yang akan dioptimalkan dan optimasi sendiri didefinisikan

sebagai proses untuk menemukan kondisi yang memberi nilai maksimal atau minimal dari suatu fungsi (Rao, 1984).

2.2 Penjelasan Umum Mengenai *Pipeline*

Jaringan pipa digunakan sebagai alat transportasi fluida (*liquid* atau *gas*), *mixed of liquid, solid* dan *fluid-solid mixture*. Segmen pipa yang panjang biasanya terhubung dengan pompa, *valve*, alat control dan peralatan yang lain selama beroperasi. Beberapa Negara maju telah menggunakan *pipeline* sebagai sarana transportasi untuk berbagai pengangkutan diantaranya sebagai berikut (Liu, 2005).

1. Menyalurkan air dari *treatment plant* menuju perumahan atau bangunan-bangunan lain.
2. Menyalurkan kotoran dari rumah dan tempat industri menuju tempat pengolahan limbah.
3. Menyalurkan *natural gas* ke daerah-daerah yang jaraknya ribuan mil.
4. Menyalurkan *crude oil* dari sumur menuju kilang minyak.
5. Menyalurkan hasil proses *crude oil* (bensin, solar, oli dll) dari kilang minyak ke beberapa kota dengan jarak ratusan mil.

Tujuan dari perancangan perpipaan secara umum bisa diklasifikasikan sebagai berikut (Teddy, 2004):

- Material seperti apa yang sesuai dengan kondisi kerja (tekanan eksternal/internal, suhu, korosi dsb) yang diminta dari sistem perpipaan. Pemilihan material sangat krusial karena menentukan keandalan keseluruhan sistem, faktor biaya, *safety* dan umur pakai.
- *Standard Code* mana yang sesuai untuk diaplikasikan pada sistem perpipaan yang akan dirancang. Pemilihan *Standard Code* yang benar akan menentukan

arah perancangan secara keseluruhan, baik dari segi biaya, keandalan, *safety design* dan *stress analysis*.

- Perhitungan dan pemilihan ketebalan pipa tidak bisa dilakukan secara sembarangan atau hanya berdasarkan intuisi. Pemilihan ketebalan pipa (*schedule number*) sebaiknya memenuhi kriteria cukup, aman dan ketersediaan stok di pasaran.
- Dengan cara bagaimana sistem perpipaan akan dikoneksikan satu sama lain, jenis sambungan dan material sambungan seperti apa yang sesuai.
- Bagaimana *planning* dan *routing* dari sistem perpipaan akan dilakukan. *General arrangement* dan *routing* sebaiknya dilakukan dengan memperhatikan aspek *inherent safety design*, konsumsi pipa seminimum mungkin tanpa mengorbankan fleksibilitas serta aspek estetis atau mengganggu dan mengurangi kemampuan, fungsi dan operasional dari peralatan yang terkoneksi.

2.3 Konsep Korosi dalam Perancangan

2.3.1 Definisi Korosi

Korosi didefinisikan sebagai kumpulan dari keseluruhan proses dengan jalan dimana metal atau *alloy* yang digunakan untuk material struktur berubah bentuk dari bersifat metal menjadi beberapa kombinasi dari kondisi yang disebabkan oleh interaksi dengan lingkungannya (Supomo, 2003). Dengan demikian korosi diartikan juga sebagai kerusakan atau keausan dari material akibat terjadinya reaksi lingkungan yang didukung oleh faktor-faktor tertentu.

Korosi pada logam dapat dibagi menjadi dua kelas, yaitu basah dan kering. Pada korosi kering, korosi terjadi pada gas/logam penghubung (*metal interface*) dan air tidak banyak mempengaruhi reaksi yang terjadi. Pada korosi basah penghubungnya adalah *metal/solution*.

Korosi pada logam berdasarkan bentuknya terbagi dalam 2 grup, yaitu korosi *general* (umum) dan *localized* (terpusat). Belakangan ini kebanyakan jenis dari korosi bersifat merusak dan lebih sering dijumpai pada kondisi basah jika dibandingkan dengan kondisi kering.

Secara garis besar faktor-faktor yang mempengaruhi cepat atau lambatnya suatu proses korosi adalah (Supomo, 2003)

- Material konstruksi

Material yang dipakai untuk membuat benda konstruksi sangat berpengaruh terhadap laju korosi.

- Kondisi lingkungan atau media

Lingkungan dimana benda konstruksi akan dibuat dan digunakan juga merupakan salah satu faktor dalam proses dan kecepatan korosi. Material di lingkungan air laut akan berbeda dengan lingkungan air tawar. Korosi yang timbul akan dipengaruhi oleh media korosif yang terkandung pada lingkungan tersebut.

- Bentuk konstruksi

Bentuk konstruksi yang oleh sebagian orang diabaikan efeknya terhadap proses korosi, sebenarnya tidak sedikit dampak negatifnya. Karena bentuk ini juga sedikit banyak juga akan berpengaruh terhadap kecepatan korosi.

- Fungsi konstruksi

Konstruksi baja yang digunakan untuk operasi suhu panas akan berlainan jika dengan operasi suhu rendah. Dengan demikian dapat diambil kesimpulan jika konstruksi tersebut akan dibuat harus dipertimbangkan untuk apa alat tersebut dibuat atau untuk operasi yang bagaimana konstruksi tersebut dipakai.

Faktor ketahanan korosi sangat dipengaruhi oleh beberapa hal, antara lain:

- *Electro-chemical*

Sifat yang dimiliki material meliputi sifat kimia listrik, artinya bagaimanakah karakteristik material dalam hal muatan listrik dan kecenderungan untuk berionisasi. Dengan daya hantar aliran listrik dan ionisasi yang mudah maka sebuah material akan menurun ketahanan korosinya.

- *Physical chemically*

Sifat kimia listrik berarti kecenderungan material mengalami reaksi kimia akibat adanya pengaruh fisika. Sebagai contoh karena pengaruh beban (sebagai contoh benturan) sebuah material akan mengalami perubahan metalurgi. Dengan demikian material akan mudah tereduksi menjadi karat. Hal inilah perlu diwaspadai dalam pemilihan sebuah material. Dengan demikian untuk melakukan peningkatan ketahanan korosi harus dipilih sifat kimia fisika yang sesuai.

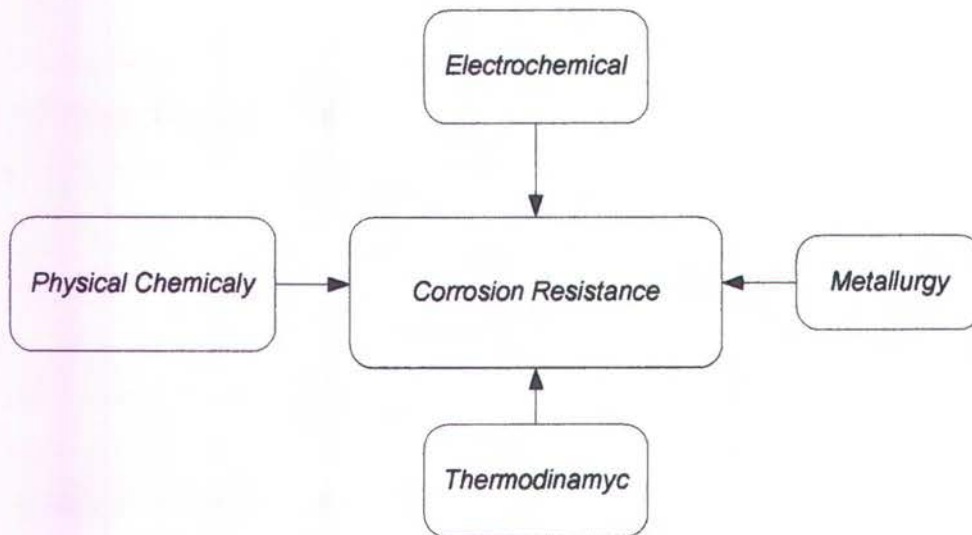
- *Thermodynamic*

Karakteristik material dalam hal penghantaran panas juga mempengaruhi ketahanan korosi. Material dengan perubahan panas dan ketahanan panas yang rendah mempunyai kecenderungan lemah terhadap korosi. Dengan demikian faktor sifat termodinamik tidak boleh diabaikan dalam menentukan bahan yang tahan korosi.

- *Metallurgy*

Ditinjau dari susunanya sebuah material konstruksi akan terdiri dari berbagai unsur pembentuk. Persentase komposisi unsur dalam material akan sangat mempengaruhi sifat ketahanan suatu bahan. Jika unsur dalam bahan tersebut bersifat tahan korosi dan secara kesatuan/senyawa tidak saling merugikan,

maka material yang terbentuk akan mempunyai ketahanan korosi yang tinggi. Hal ini berlaku juga jika terjadi sebaliknya.



Gambar 2.1 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Ketahanan Korosi (Supomo, 2003).

2.3.2 Prinsip-prinsip Terjadinya Korosi

2.3.2.1 Energi Dalam Korosi

Lingkungan alam suatu benda merupakan media yang cenderung untuk berinteraksi dengan benda tersebut dalam hal pertukaran energi. Energi ini diturunkan dari energi tersimpan akibat ikatan kimia dari zat-zat pembentuk benda tersebut, biasa disebut *internal energy*. Pertukaran energi akan terjadi antara internal energi dengan energi yang tersedia di sekeliling benda yang biasa disebut *free energy* atau *eksternal energy*. Sebagai contoh:

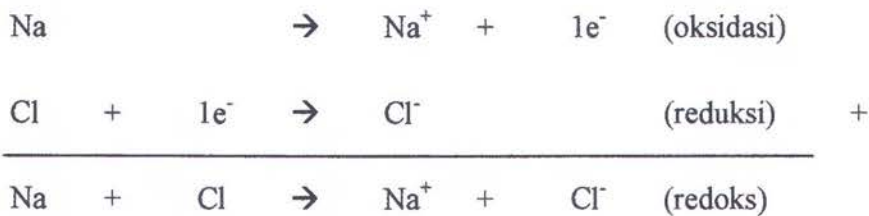


Unsur A dan B bereaksi membutuhkan atau mengeluarkan energi sebesar ΔG untuk membentuk unsur C dan D. Besarnya ΔG ini sangat ditentukan oleh jenis material dan lingkungan dimana material tersebut berada. Pada proses pembuatan

metal baja, aluminium, emas dan lain-lain dibutuhkan sejumlah energi untuk mengubah biji logam menjadi logam sesuai dengan karakteristik benda konstruksi. Energi ini sebagian tersimpan dalam metal tersebut terjadi proses korosi maka akan menimbulkan pertukaran energi dengan lingkungannya (*free energy*). Besarnya energi yang mengalir dari kedua unsur ini sangat bervariasi. Hal ini sangat ditentukan oleh perbedaan antar energi dalam dan energi luar.

2.3.2.2 Dasar Teori Kimia

Berdasarkan teori kimia, korosi terjadi akibat adanya reaksi oksidasi dan reduksi antara material dengan lingkungannya. Reaksi oksidasi diartikan sebagai reaksi yang menghasilkan elektron dan reduksi adalah reaksi antara dua unsur yang menggunakan atau mengikat elektron. Sebagai contoh :



Pada proses korosi, salah satu hasil reaksi tersebut di atas akan bereaksi dengan logam lain. Kemudian hasil reaksinya tersebut akan bereaksi lagi dengan logam dan mengakibatkan pengikisan unsur logam tersebut. Proses ini biasa disebut korosi dan diawali dulu dengan berubahnya logam menjadi ion logam.

Media larutan utama korosi adalah air dengan segala komposisinya, untuk itu berikut ini akan dibahas sedikit tentang beberapa karakteristik air. Air adalah bersifat *reversibel*. *Reversibel* artinya bahwa kedua jenis atom yang terkandung di dalam molekul air sewaktu-waktu akan dapat berubah kembali menjadi semula.

Atom hasil uraian air ini dapat menjadi sumber penyebab korosi.



Dalam istilah kimia salah satu indikasi karakteristik air dalam kaitannya dengan korosi adalah pH. pH ini merupakan faktor yang sangat menentukan besar kecilnya kecepatan korosi baik terhadap logam ataupun terhadap *life time* dari sistem proteksi korosi. pH berdasarkan teori kimia merupakan besar kecilnya konsentrasi ion hidroksil (OH^-) atau sering disebut juga derajat keasaman.

Semakin tinggi konsentrasi ion hidroksil berarti semakin asam atau dengan kata lain pH 1 s/d 7 diartikan sebagai ancaman terhadap korosi (kecepatan korosi cepat). Hal ini dapat diterima secara mendasar karena pada batas pH tersebut diatas, air bersifat asam. Demikian halnya jika pH air berkisar 7 s/d 14 maka air bersifat basa atau meningkatnya ion OH^- .

Ion ini tidak mengkhawatirkan terhadap korosi, karena bersifat anodik atau tidak membutuhkan elektron. Ion yang berbahaya adalah ion yang membutuhkan elektron untuk menjadi stabil.

Dengan kebutuhan elektron ini berarti kecenderungan mencari elektron untuk mencari elektron akan semakin tinggi. Hasil dari kebutuhan ini akan menjadikan logam terdegradasi atau terionisasi. Dengan terjadinya ionisasi ini berarti logam mengalami korosi.

2.3.2.3 Dasar Teori Listrik

Pada teori listrik umum disebutkan bahwa setiap benda mempunyai muatan listrik statis yang besarnya sangat bervariasi. Apabila diantara dua benda yang berbeda dihubungkan secara listrik maka akan terjadi aliran listrik dan aliran elektron. Hubungan listrik yang dimaksud adalah kedua benda dicelupkan ke dalam larutan elektrolit dan dihubungkan dengan konduktor.

Dalam sistem *battery* umum kutub positif disebut anoda sedangkan kutub negatif disebut katoda. Hal ini berlainan dengan sistem sel korosi, dimana kutub sel positif disebut katoda sedangkan kutub negatif disebut anoda.

2.3.3 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Korosi

2.3.3.1 Pengaruh Lingkungan

Dalam proses industri, material khususnya logam mengalami perubahan sifat dikarenakan proses produksi. Selain itu juga dipengaruhi oleh lingkungan benda tersebut dibuat.

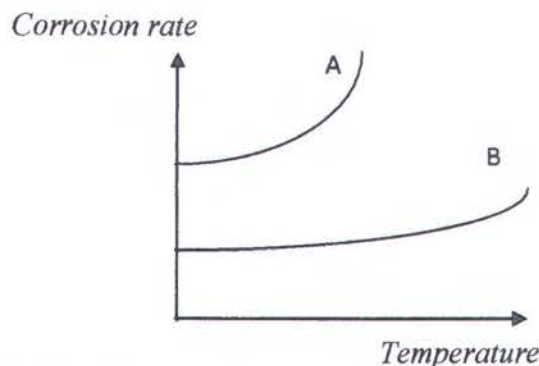
Yang perlu diperhatikan bahwa ketahanan metal terhadap korosi tergantung pada bagaimana dan dimana penggunaan dari logam tersebut dan bagaimana komposisi dari logam tersebut. Korosi bukan hal yang mendasar dari sebuah logam seperti kekuatan tarik.

2.3.3.2 Pengaruh dari Kecepatan Media

Pengaruh dari kecepatan media terhadap *corrosion rate* adalah seperti yang terjadi pada penambahan *oxidizer* dan sangat bergantung pada karakteristik logam dan lingkungan dimana benda tersebut berada.

2.3.3.3 Pengaruh Temperatur

Dengan bertambahnya temperatur berarti akan menambah semakin cepatnya reaksi kimia.



Gambar 2.2 Grafik Hubungan antara Temperatur dan *Corrosion rate* (Supomo, 2003).

Kurva A menggambarkan bahwa dengan bertambahnya suhu, kecepatan korosi secara langsung berubah menjadi lebih tinggi.

Kurva B merupakan sifat-sifat metal dimana penambahan temperatur berpengaruh terhadap kecepatan korosi hanya pada suhu yang sangat tinggi. Dengan demikian kondisi ini dapat dikatakan bahwa temperatur tidak berpengaruh secara signifikan terhadap kecepatan korosi.

2.3.3.4 Fluida Dalam Pipa

Korosi internal adalah salah satu jenis korosi yang terjadi akibat aliran fluida dalam pipa. Beberapa jenis korosi internal antara lain adalah:

1. Korosi CO₂

CO₂ yang larut dalam air yang terdapat pada Migas yang keluar dari sumur minyak dapat menaikkan keasaman fluida (pH turun menjadi 4,5). Hal ini akan menyebabkan korosi internal pada pipa transmisi, terutama pada tempat-tempat yang rendah. Semakin rendah suhu maka jumlah CO₂ yang larut akan semakin besar. Konsentrasi CO₂ yang dapat menyebabkan korosi adalah:

Tabel 2.1 Konsentrasi CO₂ Penyebab Korosi.

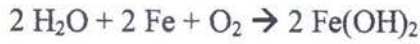
Tekanan CO ₂	Tingkat korosi
> 30 Psi	Korosi
3-30 Psi	Kemungkinan korosi
< 30 Psi	Korosi dapat diabaikan

(Sumber: JOB P-PEJ, 2007)

Korosi CO₂ (*Sweet Corrosion*) berupa korosi yang merata pada area yang dangkal dari korosi yang terlokalisir.

2. Korosi O₂

Reaksi antara O₂, air dan logam (Fe) akan menghasilkan hidroksida besi yang korosif. Korosi akibat O₂ ini berupa korosi lubang yang ekstrim.



3. Korosi H₂S

H₂S yang terdapat pada fluida dari sumur minyak tidak saja beracun tetapi juga menimbulkan reaksi korosi asam:



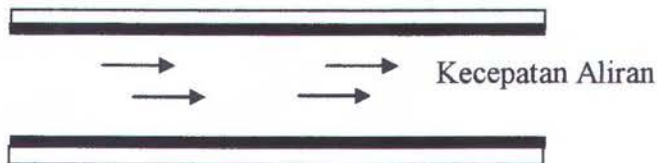
FeS berupa lapisan tipis pada logam yang apabila rusak akan menyebabkan korosi yang sangat merusak pada bagian dalam dinding pipa. Korosi H₂S (*Sour Corrosion*) ini berupa korosi lubang dan retak yang terjadi secara cepat dan menyebabkan hilang logam yang cukup banyak dalam waktu singkat.

4. Korosi Erosi

Korosi erosi disebabkan oleh kecepatan fluida yang mengalir dalam pipa lebih besar daripada erotional velocity.

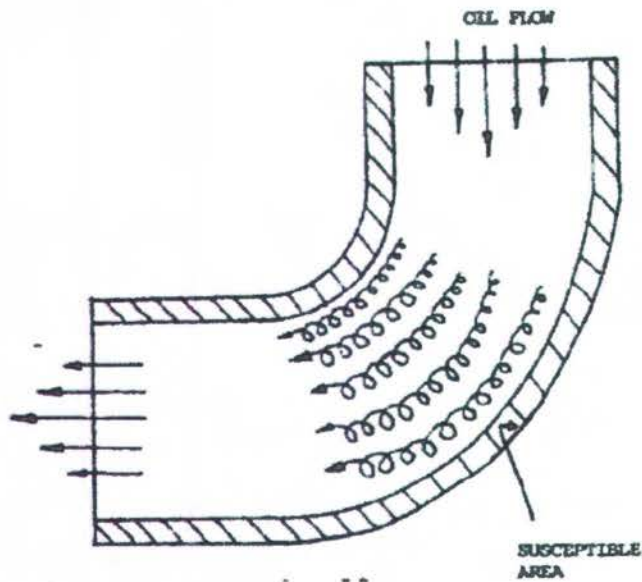
2.3.3.5 Pengaruh Kecepatan Aliran

Untuk sistem perpipaan, apabila kecepatan aliran meningkat maka akan mempercepat laju korosi.



Gambar 2.3 Pengaruh Aliran Terhadap Laju Korosi (Supomo, 2003).

Dalam sistem perpipaan terdapat lapisan pelindung, seperti pada Gambar 2.3. Bila kecepatan aliran meningkat maka lapisan pelindung akan cepat hilang yang kemudian akan menyebabkan korosi (*internal corrosion*).



Gambar 2.4 Korosi Erosi pada Belokan Pipa (Porter, 1994).

2.4 Konsep Analisis Keandalan dalam Perancangan

Keandalan sebuah komponen atau sistem adalah peluang komponen atau sistem tersebut untuk memenuhi tugas yang telah ditetapkan tanpa mengalami kegagalan selama kurun waktu tertentu apabila dioperasikan dengan benar dalam lingkungan tertentu (Rosyid dan Mukhtasor, 2007). Dalam konsep keandalan, suatu masalah akan didefinisikan dalam hubungan permintaan dan penyediaan, yang keduanya merupakan variabel-variabel acak. Peluang terjadinya kegagalan suatu rancangan, dimana penyediaan (ketahanan atau kekuatan sistem) tidak dapat memenuhi permintaan (beban yang bekerja pada sistem) (Ang dan Tang 1985).

Pemakaian konsep analisis keandalan yang didasarkan pada metode probabilistik telah berkembang dan semakin penting peranannya terutama untuk memecahkan masalah-masalah dalam perancangan praktis (Baker dan Wyatt 1979). Kecenderungan ini salah satunya dikarenakan adanya kerusakan yang terjadi pada

sistem rekayasa yang disebabkan oleh interaksi panas, beban statis maupun beban dinamis dapat dijelaskan secara lebih baik dengan konsep ini.

Dalam konsep ini perancang dapat menggambarkan suatu sistem dengan segala hal yang mempengaruhi atau mengakibatkan kerusakan pada sistem tersebut misalnya kondisi pembebanan, ketahanan struktur, kondisi lingkungan yang lebih mendekati keadaan yang sebenarnya karena melibatkan aspek ketidakpastian dalam analisisnya. Dalam analisis keandalan sistem struktural maka perlu untuk mendefinisikan ketidakpastian yang diterima oleh struktur. Cristenson dan Murotshu (1985) membagi ketidakpastian dalam 3 kelompok yaitu:

- 1) Ketidakpastian fisik, adalah ketidakpastian yang berhubungan dengan keragaman (*variability*) fisik seperti: beban, sifat material dan ukuran material. Keragaman fisik ini hanya bisa dinyatakan dalam data sampel, dengan pertimbangan praktis dan ekonomis.
- 2) Ketidakpastian statistikal, adalah ketidakpastian yang berhubungan dengan data yang dibuat untuk membuat model secara probabilistik dari berbagai macam keragaman fisik di atas.
- 3) Ketidakpastian model, yaitu ketidakpastian yang berhubungan dengan tanggapan dari jenis struktur yang dimodelkan secara matematis dalam bentuk deterministik atau probabilistik. Ketidakpastian yang terjadi disini merupakan hasil dari penyederhanaan dengan memakai bermacam-macam asumsi, kondisi batas yang tidak diketahui dan sebagai hasil dari pengaruh interaksi ketidakpastian yang tidak tercakup dalam model.

Dalam perancangan struktur bangunan lepas pantai akan banyak dijumpai ketidakpastian yang mempengaruhi sistem bangunan diantaranya:

- 1) Ketidakpastian pada beban yang disebabkan gelombang laut yang selalu berubah-ubah.

- 2) Ketidakpastian pada sifat material seperti tegangan luluh (*yield strenght*). Kekuatan lelah (*fatigue strengh*), kekasaran takik (*notch toughness*) dan tingkat korosi (*corrosion rate*).
- 3) Ketidakpastian dalam menganalisis bangunan yaitu dalam analisis respon atau analisis keadaan batas. Dalam analisis tersebut pasti akan melibatkan beberapa asumsi, pendekatan ataupun idealisasi model matematis dari lingkungan fisik dan tanggapan bangunan terhadap lingkungan tersebut.

Adanya beberapa keragaman pada kualitas bangunan yang berhubungan dengan pengawasan pekerjaan di lapangan seperti operasi pengangkatan pipa, penggantian pipa dan sebagainya yang disebabkan oleh kesalahan manusia. Faktor ini mempunyai pengaruh yang sangat penting pada kekuatan bangunan.

2.4.1 Jenis Metode Analisis Keandalan

1. Metode Analisis Keandalan Level – 0

Dalam metode ini tingkat keandalan struktur dinyatakan berdasarkan pada struktur elemen dasar dengan menggunakan faktor keamanan parsial atau koefisien parsial, yang berhubungan dengan karakteristik awal dari perubahan beban dan struktur utama. Metode level – 0 ini pada dasarnya bukan merupakan metode analisis keandalan, tetapi metode untuk perancangan atau pemeriksaan keamanan struktur.

2. Metode Analisis Keandalan Level – 2

Metode ini menggunakan prosedur pendekatan iterasi untuk memperkirakan probabilitas kegagalan dari suatu struktur atau sub-struktur. Biasanya memerlukan idealisasi jenis keruntuhan dan dilakukan dengan menyederhanakan peubah-peubah distribusi probabilitas gabungan.

Metode ini memiliki sebuah titik tunggal sebagai pengecekan pada bidang kegagalan (*failure surface*). Bidang kegagalan adalah sekumpulan

peubah dasar $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ yang bisa didefinisikan dan dinyatakan dalam peubah dasar n dimensi ω (*n-dimensional basic variabel space ω*).

Bidang kegagalan adalah bidang yang membagi ruang peubah acak menjadi 2 daerah yaitu sebuah daerah kegagalan (*failure region ω_f*) dan sebuah daerah aman (*safe region ω_s*). Bidang kegagalan secara matematis bisa dinyatakan dengan persamaan bentuk:

$$f(X) = f(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0 \dots\dots\dots(4)$$

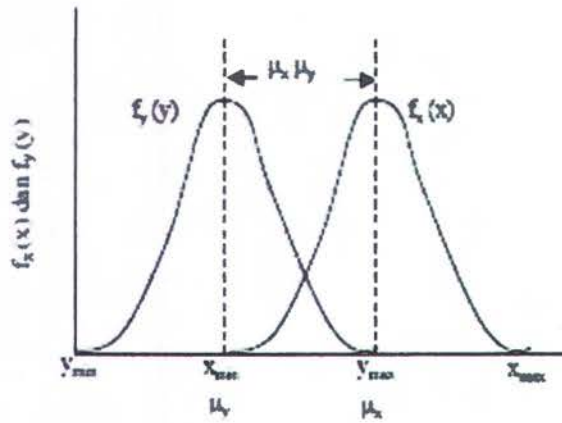
Harga positif dari persamaan di atas menunjukkan sejumlah peubah dasar yang aman (daerah aman) dan harga yang tidak positif menunjukkan himpunan peubah pada daerah yang tidak aman (daerah kegagalan).

2.4.2 Keandalan pada Sistem Rekayasa

Sistem dari keandalan pada dasarnya dapat ditunjukkan sebagai problematika antara *Demand* (tuntutan atau beban) dan *Capacity* (kapasitas atau kekuatan). Secara tradisional didasarkan atas *safety factor* (angka keamanan) yang diperkenankan. Ukuran konvensional untuk angka keamanan adalah perbandingan antara asumsi nilai nominal kapasitas, X^* dan beban, Y^* , yang dirumuskan sebagai berikut:

$$Z^* = \frac{X^*}{Y^*} \dots\dots\dots(5)$$

Mengingat nilai nominal dari kapasitas, X^* dan beban, Y^* tidak dapat ditentukan dengan pasti, fungsi-fungsi kapasitas dan beban perlu dinyatakan sebagai peluang sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.5. Dengan demikian, angka keamanan dinyatakan dengan perbandingan $Z = X/Y$ dari dua variabel acak X dan Y .



Gambar 2.5 Fungsi Kerapatan Peluang (fkp) dari Kapasitas X dan Tuntutan Y (Rosyid, 2007).

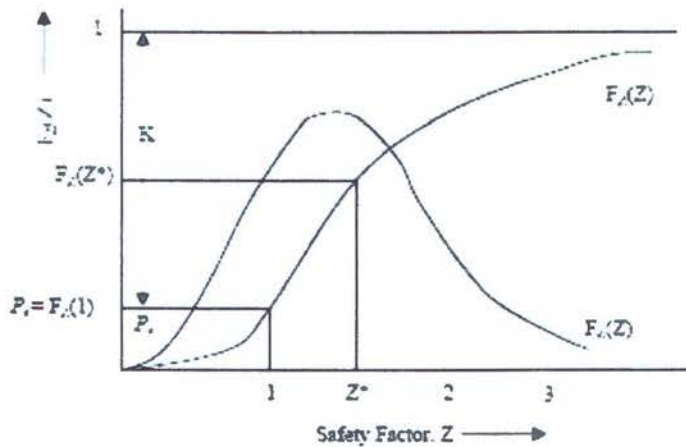
Ketidakmampuan suatu sistem untuk memenuhi tuntutan dan tugasnya, yang diukur dengan peluang kegagalan, dapat dihubungkan dengan bagian dari distribusi angka keamanan yang nilainya kurang dari satu, yaitu porsi dalam dimana $Z = X/Y \leq 1$ (lihat Gambar 2.6). Peluang kegagalan sistem, P_f diberikan dengan persamaan:

$$P_f = P[Z \leq 1] = F_Z(1) \dots \dots \dots (6)$$

Dimana F_Z adalah fungsi distribusi kumulatif dari Z . Dengan pernyataan lain, peluang sistem untuk tidak gagal (keandalan) adalah:

$$K = 1 - P_f[Z > 1] = 1 - F_Z(1) \dots \dots \dots (7)$$

Ketika distribusi peluang bersama (*joint probability distribution*) X dan Y diketahui, keandalan sebuah sistem dapat dihitung berdasarkan fungsi distribusi kumulatif dari X/Y . Peluang kegagalan nol (0) dan keandalan 100 ($K=1$) hanya terjadi ketika tuntutan maksimum Y_{max} tidak melewati kapasitas minimum X_{min} , sehingga kedua distribusi tidak saling *overlap*.



Gambar 2.6 Fungsi Distribusi Kumulatif dan Fungsi Kerapatan Peluang pada Angka Keamanan $Z = X/Y$ (Rosyid, 2007).

2.4.3 Safety Margin (Margin Keamanan)

Jika *demand* maksimum Y_{max} melampaui kapasitas maksimum X_{min} , distribusi kedua-duanya akan mengalami *overlap* dan probabilitas kegagalan tidak lagi bernilai nol. Untuk menilai probabilitas, dapat diambil perbedaan diantara kapasitas dan beban, yang biasanya disebut dengan margin keamanan atau *safety margin*, S :

$$S = X - Y \dots\dots\dots(8)$$

Oleh karena nilai X dan Y adalah acak, margin keamanan juga merupakan peubah acak. Ketidakmampuan suatu sistem untuk memenuhi tuntutannya, yang diukur dengan peluang kegagalan P_f , dapat diperkirakan menggunakan fungsi kerapatan peluang dari margin keselamatan, yaitu pada bagian dimana S bernilai negatif, atau $S = X - Y \leq 0$. Sehingga dapat dituliskan:

$$P_f = P[(X - Y) \leq 0] = P[S \leq 0] \dots\dots\dots(9)$$

Dan sebaliknya, keandalannya adalah

$$K = 1 - P_f = P[(X - Y) > 0] = P[S > 0] \dots\dots\dots(10)$$

2.4.4 Indeks Keandalan

Cara untuk mengukur keandalan adalah dengan cara menggunakan indeks keandalan β , yang didefinisikan sebagai perbandingan antara nilai rata-rata dan nilai simpangan baku dari margin keselamatan, S , yaitu:

$$\beta = \frac{\mu_s}{\sigma_s} \dots\dots\dots (11)$$

Jika menggunakan nilai kritis margin keselamatan, $S = 0$, dan jaraknya dengan nilai rata-rata margin keamanan μ_s , maka indeks keandalan ini dapat diinterpretasikan sebagai jumlah kelipatan simpangan baku σ_s pada jarak ini. Artinya, jarak antara $S = 0$ dengan μ_s ini dapat dibagi menjadi beberapa simpangan baku. Semakin panjangnya, relatif terhadap simpangan baku, maka semakin besar indeks keandalannya. Selanjutnya, indeks keandalan juga berbanding terbalik dengan koefisien variasi margin keselamatan atau dapat dituliskan $\beta = 1/V_s$.

Untuk menghasilkan ekspresi yang lebih umum atas indeks keandalan, dapat digunakan persamaan yang secara sepintas dibahas pada bagian sebelumnya. Mengingat $\mu_s = \mu_x - \mu_r$, dan $\sigma^2_s = \sigma^2_x - 2\rho_{xy}\sigma_x\sigma_y + \sigma^2_y$, maka:

$$\beta = \frac{\mu_x - \mu_y}{\sqrt{\sigma^2_x - 2\rho_{xy}\sigma_x\sigma_y + \sigma^2_y}} \dots\dots\dots (12)$$

Dimana ρ_{xy} adalah koefisien korelasi diantara kapasitas dan beban. Oleh karena itu, indeks keandalan adalah maksimum jika $\rho_{xy} = +1$ dan minimum jika $\rho_{xy} = -1$. Untuk X dan Y terdistribusi normal, maka peluang kegagalan adalah:

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \dots\dots\dots (13)$$

dan

$$K = \Phi(\beta) \dots\dots\dots (14)$$

Persamaan di atas juga dapat digunakan untuk menghitung peluang kegagalan jika diantara X dan Y atau keduanya mengikuti distribusi non-normal. Misalnya, jika kapasitas dan tuntutan atau beban mengikuti distribusi lognormal, maka $\ln(X)$ dan $\ln(Y)$ adalah terdistribusi normal, Persamaan indeks keandalan dalam kasus ini menjadi:

$$\beta = \frac{\ln(m_x/m_y)}{\sqrt{\ln(1+V^2_x)+\ln(1+V^2_y)-2\rho_{xy}\sqrt{\ln(1+V^2_x)\ln(1+V^2_y)}} \dots\dots\dots(15)$$

2.5 Konsep Simulasi *Monte Carlo*

Ketika suatu sistem yang sedang dipelajari mengandung variabel atau parameter yang memiliki nilai random atau mengandung peubah acak maka metode Simulasi *Monte Carlo* dapat digunakan untuk memecahkan persoalan ini, suatu set nilai dari tiap-tiap variabel (satu nilai untuk setiap variabel) dari suatu sistem disimulasikan berdasarkan distribusi peluangnya, misalnya berdasarkan fungsi kerapatan peluang tiap-tiap variabel tersebut. Untuk setiap set ini, respon atau kinerja sistem dihitung berdasarkan fungsi kinerja dari sistem tersebut. Perhitungan respon atau kinerja sistem dihitung berdasarkan fungsi deterministik untuk suatu set nilai dari respon atau kinerja sistem tersebut, sehingga pada akhir simulasi akan diperoleh sekumpulan data respon atau kinerja sistem. Sekumpulan data ini dapat dianggap sebagai sampel data, dengan analisis statistik dapat dilakukan untuk menentukan nilai rata-rata, simpangan baku bahkan distribusi dari respon atau kinerja sistem tersebut.

Unsur pokok yang diperlukan di dalam Simulasi *Monte Carlo* adalah sebuah *random number generated (RNG)*. Hal ini karena, secara teknis, prinsip dasar metode Simulasi *Monte Carlo* sebenarnya adalah sampling numerik dengan bantuan *RNG*, dimana simulasi dilakukan dengan mengambil beberapa sampel dari peubah acak berdasarkan distribusi peluang peubah acak tersebut. Ini berarti, Simulasi *Monte Carlo* mensyaratkan bahwa distribusi peluang dari peubah acak yang terlibat di dalam sistem yang sedang dipelajari telah diketahui atau dapat

diasumsikan. Sampel yang telah diambil tersebut dipakai sebagai masukan ke dalam persamaan fungsi kinerja $FK(x)$, dan harga $FK(x)$ kemudian dihitung. Untuk suatu fungsi kinerja tertentu, misalnya setiap kali $FK(x) < 0$ maka sistem/komponen yang ditinjau dianggap gagal. Jika jumlah sampel tersebut adalah N (atau replikasi sejumlah N) maka dapat dicatat kejadian $FK(x) < 0$ sejumlah n kali. Dengan demikian, peluang kegagalan (P_g) sistem/komponen yang sedang ditinjau adalah rasio antara jumlah kejadian gagal dengan sampel atau replikasi, $P_g = n/N$.

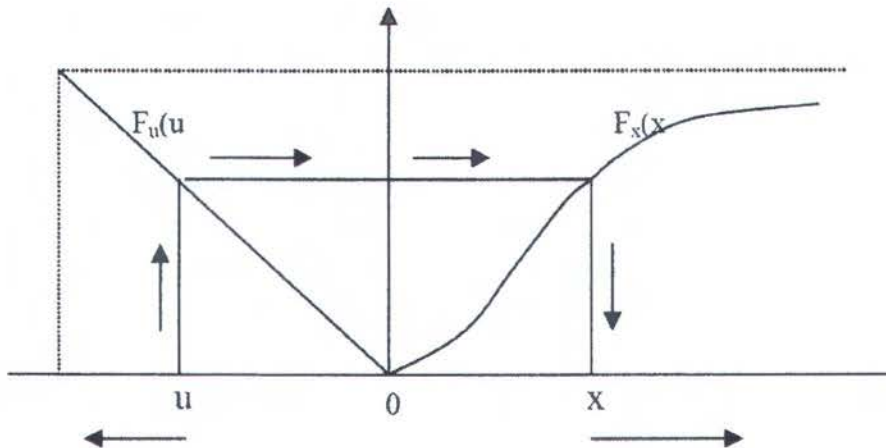
Persoalan utama dalam Simulasi *Monte Carlo* adalah bagaimana mentransformasikan angka acak yang dikeluarkan oleh *random number generated (RNG)* menjadi besaran fisik yang sesuai dengan fungsi kerapatan peluang (f_{kp})-nya. Ini disebabkan karena angka acak yang dikeluarkan oleh *RNG* memiliki f_{kp} *uniform*, sedangkan peubah dasar dalam $FK(x)$ seringkali tidak demikian (misal terdistribusi secara normal, lognormal dan sebagainya). *RNG* biasanya ada dalam *CPU* komputer sebagai *built-in computer program* dalam bagian *ROM*-nya. *RNG* yang disediakan ini hampir selalu berbentuk *linear congruential generator* yang mengeluarkan suatu deretan bilangan cacah (integer) I_1, I_2, I_3 .

Tranformasi bilangan acak menjadi nilai peubah acak juga dapat dilakukan secara numerik dengan prosedur intuitif berikut:

1. Untuk X_P dengan fungsi kerapatan peluang yang diketahui f_{kp} , bagilah rentang X_P menjadi I interval yang sama sepanjang dx .
2. Hitung luas tiap pias (ini akan menghasilkan peluang X_P memiliki harga dalam interval i , yaitu sebesar P_i) dengan mengalikan interval dx dengan tinggi f_{kp} pada X_i . Untuk setiap a_p , yang keluar dari *RNG* maka a_p diperbandingkan dengan batas interval yang sesuai. Apabila $P_i < a_p < P_{i+1}$ maka a_p "dipahami" (ditransformasikan) sebagai X_i .

Disamping itu, transformasi dari bilangan acak ke nilai peubah acak dapat dilakukan secara analitik berdasarkan fungsi distribusi kumulatif peubah acak

tersebut. Oleh karena fungsi distribusi kumulatif (fdk) dari suatu peubah acak X merupakan fungsi kontinu dan monotonik dari X maka nilai $F_X(x)$ dapat dipakai sebagai alat transformasi dari nilai bilangan acak u menjadi nilai peubah acak x , sebagaimana digambarkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Hubungan antara Bilangan Acak yang Mengikuti Distribusi *Uniform* dengan Peubah Acak X yang Memiliki Fungsi Distribusi Kumulatif $F_X(x)$ (Rosyid, 2007).

Sebagaimana ditunjukkan pada gambar di atas, oleh karena $u = g(x) = F_X(x)$ merupakan fungsi yang tidak memiliki elemen yang menurun (*non-decreasing function*) maka untuk sembarang nilai u diantara 0 dan 1, fungsi invers $x = \xi(u)$ dapat didefinisikan sebagai nilai x terkecil yang memenuhi persamaan $F_X(x) \geq u$ (berdasarkan definisi kuantil dalam fungsi distribusi kumulatif). Sehingga dapat didefinisikan bahwa nilai bilangan acak diambil sebagai nilai dari kuantil, $u = F_X(x)$, sedemikian sehingga nilai peubah acak dapat ditentukan (setelah fungsi distribusi kumulatifnya dimiliki).

2.6 Dasar Teori Optimasi

Optimasi adalah sesuatu yang dilakukan untuk mendapatkan hasil yang terbaik untuk kondisi yang tersedia dalam desain, konstruksi (pemeliharaan untuk semua *engineering*). Ada beberapa tahap yang harus dilakukan sebelum mengambil

keputusan. Tujuan dari optimasi adalah untuk memperoleh hasil yang maksimal ataupun minimal dimana hal tersebut dapat dikatakan optimum (Rao, 1984).

2.6.1 Statement Persoalan Optimasi

Persoalan matematis atau optimasi dapat dinyatakan sebagai berikut (Rao, 1984):

$$\text{Dapatkan } X = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{pmatrix} \text{ untuk meminimalkan } f(x)$$

dengan kendala:

$$G_j \leq 0, j = 1, 2, \dots, m \text{ dan}$$

$$L_j(x) = 0, j = 1, 2, \dots, p$$

Dengan X adalah suatu n dimensi dari vektor yang dinamakan vektor desain, $f(X)$ disebut fungsi obyektif, dan $G_j(X)$ dan $L_j(X)$ adalah *inequality* dan *equality constraint*.

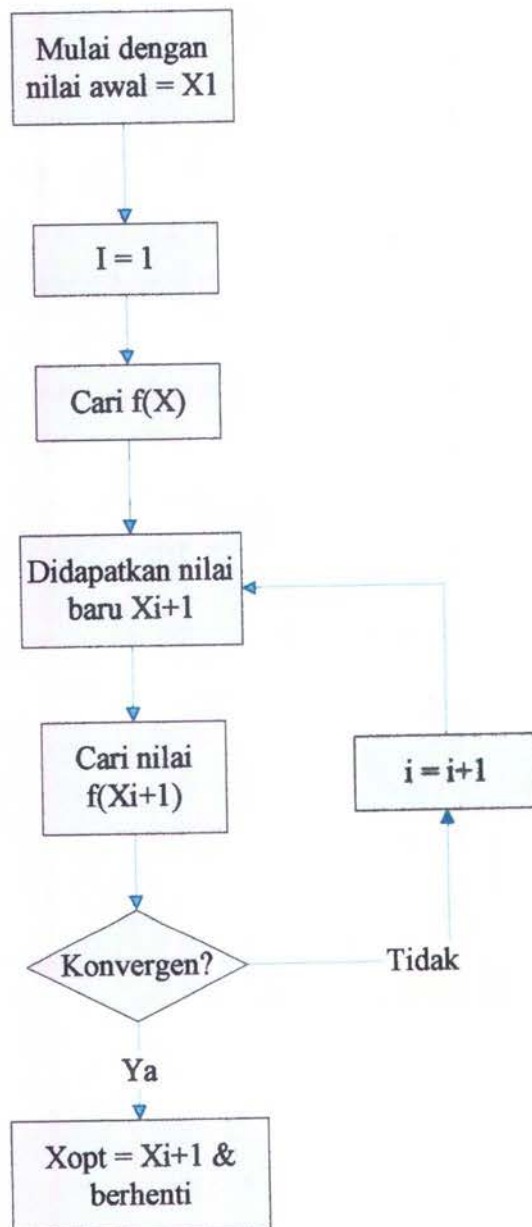
2.6.2 Optimasi Persoalan Non Linear

Persoalan nyata sehari-hari yang praktis umumnya adalah persoalan non-linear berdimensi n (jumlah variabel keputusannya adalah n , yaitu X_1, X_2, \dots, X_n). Persoalan seperti ini dapat diselesaikan dengan dua skenario penyelesaian: skenario penyelesaian langsung dan tidak langsung.

Dalam penyelesaian langsung, pada awal proses optimasi pengambil keputusan perlu menentukan variabel keputusan X sembarang, untuk kemudian X secara bertahap secara *iterative* diubah hingga mendekati X yang optimum, yaitu pada saat kriteria *konvergen* tercapai. Perubahan variabel keputusan secara bertahap ini dilakukan melalui persamaan *rekurens* (sering disebut *driving function*) berikut ini:

$$X_{(i+1)} = X_i + \alpha = D_i \dots \dots \dots (16)$$

Dengan i adalah iterasi ke- i ; α adalah sebuah skalar yang merupakan panjang langkah dan D adalah vektor arah perubahan. Dalam skenario ini, persoalan optimasinya dapat dibagi menjadi dua, yaitu 1) menentukan arah perubahan variabel keputusan X dan 2) menentukan panjang langkah α . Dalam skenario seperti ini, begitu D dapat dihitung, persoalan optimasi berdimensi n diubah menjadi persoalan optimasi berdimensi tunggal dalam α . Untuk itu perlu dibahas juga secara ringkas metode optimasi berdimensi tunggal. Penentuan D akan ditentukan oleh ada tidaknya kendala yang harus dipenuhi. Algoritma dasar skenario penyelesaian langsung ini dapat dilihat dalam diagram:



Gambar 2.8 Skenario Umum Penyelesaian Langsung secara *Iterative* (Semedi, 2005).

Iterasi dihentikan apabila konvergensi telah dicapai, yaitu kondisi dimana:

$$|X_{(i+1)} - X_i| \leq \varepsilon \dots\dots\dots (17)$$

$$\left| \frac{f(x_{(i+1)}) - f(x_i)}{f(x_i)} \right| \leq \delta \dots\dots\dots (18)$$

Dengan ϵ dan δ adalah bilangan yang sangat kecil, katakan 10^{-2} .

Dalam skenario langsung ini, dari segi ada dan tidaknya kendala dalam persoalan optimasi yang ditinjau, tersedia dua kategori prosedur optimasi, yaitu:

1. Prosedur Pelacakan Langsung (*direct search*) dan
2. Prosedur Transformasi, dimana persoalan optimasi berkendala diubah menjadi serangkaian persoalan optimasi tanpa kendala (*Sequential Unconstrained Optimizations*). Untuk itu perlu dibahas pula teknik-teknik optimasi tanpa kendala.

Dalam skenario penyelesaian tak langsung, disusun kriteria optimal yang berlaku pada persoalan optimasi yang ditinjau. Kriteria optimal adalah satu set persamaan yang bila dipenuhi, penyelesaian atas sistem persamaan ini merupakan persoalan optimum yang dicari.

2.6.2.1 *Sequential Unconstrained Minimization Technique (SUMT)*

Tujuan yang utama dari metode optimasi *SUMT* adalah untuk meminimalkan fungsi obyektif pada persoalan optimasi berkendala menjadi persoalan optimasi tanpa kendala yang mana memberikan beberapa *penalty* untuk membatasi pelanggaran terhadap kendala (Vanderplaats, 1984). Pada tahap terakhir disekitar titik optimum, penyelesaian subpersoalan tanpa kendala mendekati penyelesaian aslinya.

Tranformasi dari persoalan optimasi berkendala menjadi persoalan optimasi tanpa kendala dilakukan dengan membentuk suatu kriteria optimasi baru, yang disebut *pseudo criteria*, yang diperoleh dengan bentuk sebagai berikut :

$$\Phi(X, r) = f(x) + r_p P(x) \dots\dots\dots(19)$$

$P(X)$ adalah parameter hukuman yang bentuknya dapat dipilih dari beberapa alternatif. Skalar r_p adalah sebuah pengali yang menentukan besarnya hukuman,

dan r dipertahankan tetap selama keseluruhan proses optimasi tanpa kendala; p adalah indek transformasi ke- p .

2.6.2.2 Interior Penalty Function Method

Metode ini memberikan serangkaian rancangan yang *feasibel*, namun persoalan optimasinya lebih rumit. Perbedaannya dengan metode eksterior adalah pada bentuk $P(X)$ yang dipergunakan, serta parameter skalar s_p justru diperkecil, bukan diperbesar.

Bentuk $P(X)$ yang paling banyak dipakai mungkin adalah sebagai berikut:

$$P(X) = \sum_{j=1}^m \frac{-1}{g_j(X)} \dots\dots\dots (20)$$

Persamaan *Sequential Unconstrained Minimization Technique* untuk mendapatkan *pseudo funtion objektif* yang memiliki *inequality constrain* adalah:

$$\Phi(X, r_p) = F(X) + r_p \sum_{j=1}^m \frac{-1}{g_j(X)} \dots\dots\dots (21)$$

Dan dengan menambah *equality constrain* didapat *pseudo funtion objektif* sebagai berikut :

$$\Phi(X, r_p) = F(X) + r'_p \sum_{j=1}^m \frac{-1}{g_j(X)} + r_p \sum_{k=1}^l [hk(X)]^2 \dots\dots\dots (22)$$

Dimana kita akan membawa hk menuju ke nol (0).

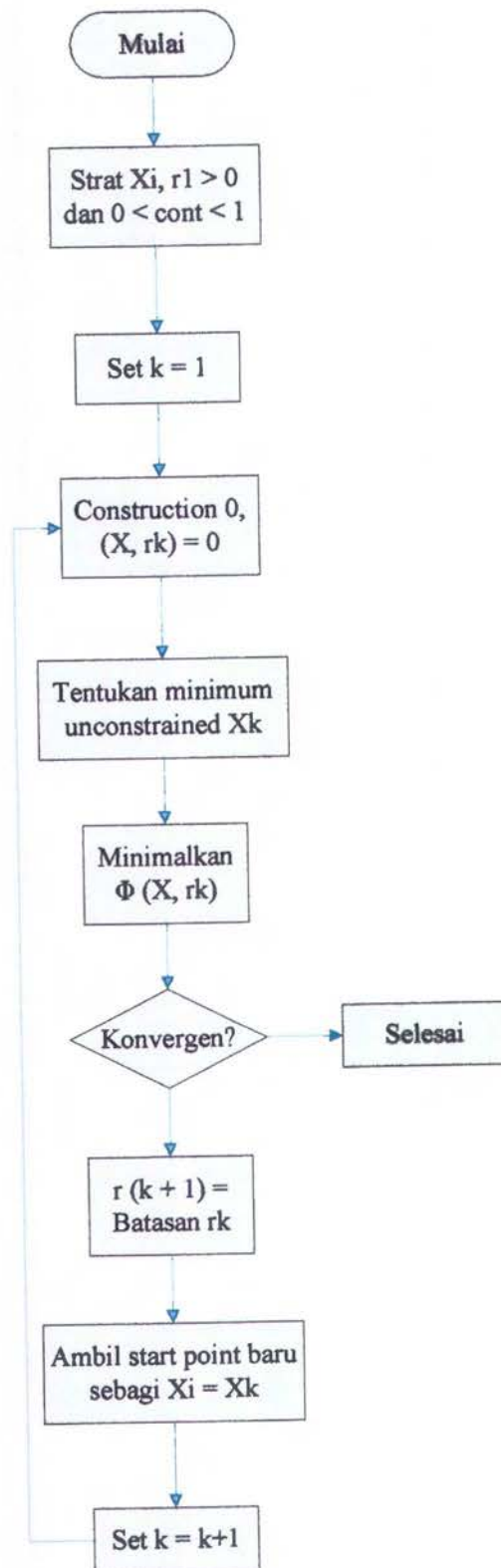
Bentuk alternatif yang lain adalah:

$$P(X) = \sum_{j=1}^m -\log[-g_j(X)] \dots\dots\dots (23)$$

Persamaan tersebut lebih sering baik untuk persoalan yang numeris.

Bentuk yang kedua pada sisi kanan adalah yang membedakan apakah fungsi tersebut interior atau eksterior. Untuk mendapatkan daerah yang *feasible* maka $g_j(X)$ harus non positif, harga $-1/g_j(X)$ akan positif mendekati tak terhingga

sebagaimana $g_j(X) \rightarrow 0$. Parameter penalti r'_p digunakan untuk membedakan dengan r_p , dimana r_p dengan harga yang relatif kecil (positif) dan kemudian membesar. Sedangkan harga r'_p relatif besar untuk awalnya dan kemudian menurun (mengecil). Disini harga r'_p dikalikan dengan γ' sehingga *multiplier*. Setiap selesai *Unconstrained Minimization* dimana harga γ' kurang dari 1 misalnya $\gamma' = 0,3$. Kendala yang optimum didekati dari sisi dalam daerah yang *feasible* sebagaimana $r'_p \rightarrow 0$. fungsi akan *discontinuous* pada batasan dimana $g_j(X) = 0$. Oleh karena itu *extrem caution* harus digunakan untuk mengembangkan *one dimensional search algoritma* untuk menyakinkan bahwa daerah *feasible* yang minimum ditemukan. Kali ini biasanya mudah dilakukan dengan metode *golden section*. Tapi lebih *ingenuity* jika *polynomial interpolation* digunakan.



Gambar 2.9 Algoritma Metode Hukum Interior (Semedi, 2005).

2.6.2.3 *Scaling of The Constrain*

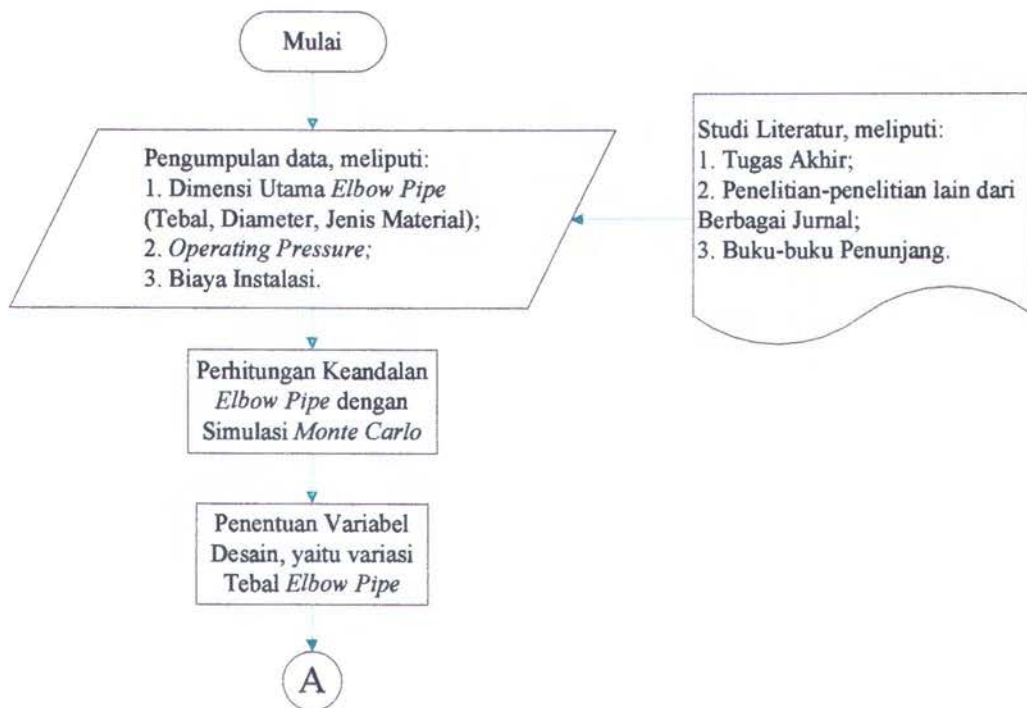
Bentuk umum dari persamaan (*SUMT*) tersebut hanya memiliki satu parameter tunggal sebagai faktor pengali. Hal ini sering menimbulkan kesulitan numeris yang terjadi karena satu fungsi kendalanya memiliki harga yang berbeda atau berubah lebih cepat dari yang lain dan karena itulah fungsi kendala tersebut menjadi dominan dalam mempengaruhi proses optimasi. Terlepas dari yang didiskusikan, kita menormalkan kendala-kendala yang ada. Oleh sebab itu *order* dari $G_j(X)$ adalah *unity*. Hal ini meningkatkan pengkondisian persoalan optimasi dan selalu harus lebih dahulu dilakukan ketika memformulasi persoalan sebagai alternatif proses. Normalisasi dapat dilakukan didalam optimasi dengan menggunakan parameter penalti yang berbeda untuk tiap kendala. Hal ini lebih sulit karena kita tidak membuat hal yang sama dalam program optimasi yang digunakan dalam memformulasikan persoalan. Normalisasi juga bukan optimasi keseluruhan. Hal ini muncul ketika laju perubahan kendala lebih merupakan hal yang kritis, dimana hal ini lebih berhubungan dengan normalisasi, bagaimanapun juga detail matematikanya berubah. Lebih dari itu, *additional scaling* lebih memuaskan jika diselesaikan dalam program optimasi itu sendiri.

Untuk menskala setiap kendala disini sehingga *gradient* dari kendala berharga sama dengan *gradient* dari fungsi obyektif. Hal ini menyediakan dua pilihan. Pertama, hal ini dapat menjamin bahwa kurva dari fungsi *pseudo obyektif* tidak didominasi oleh satu kendala.

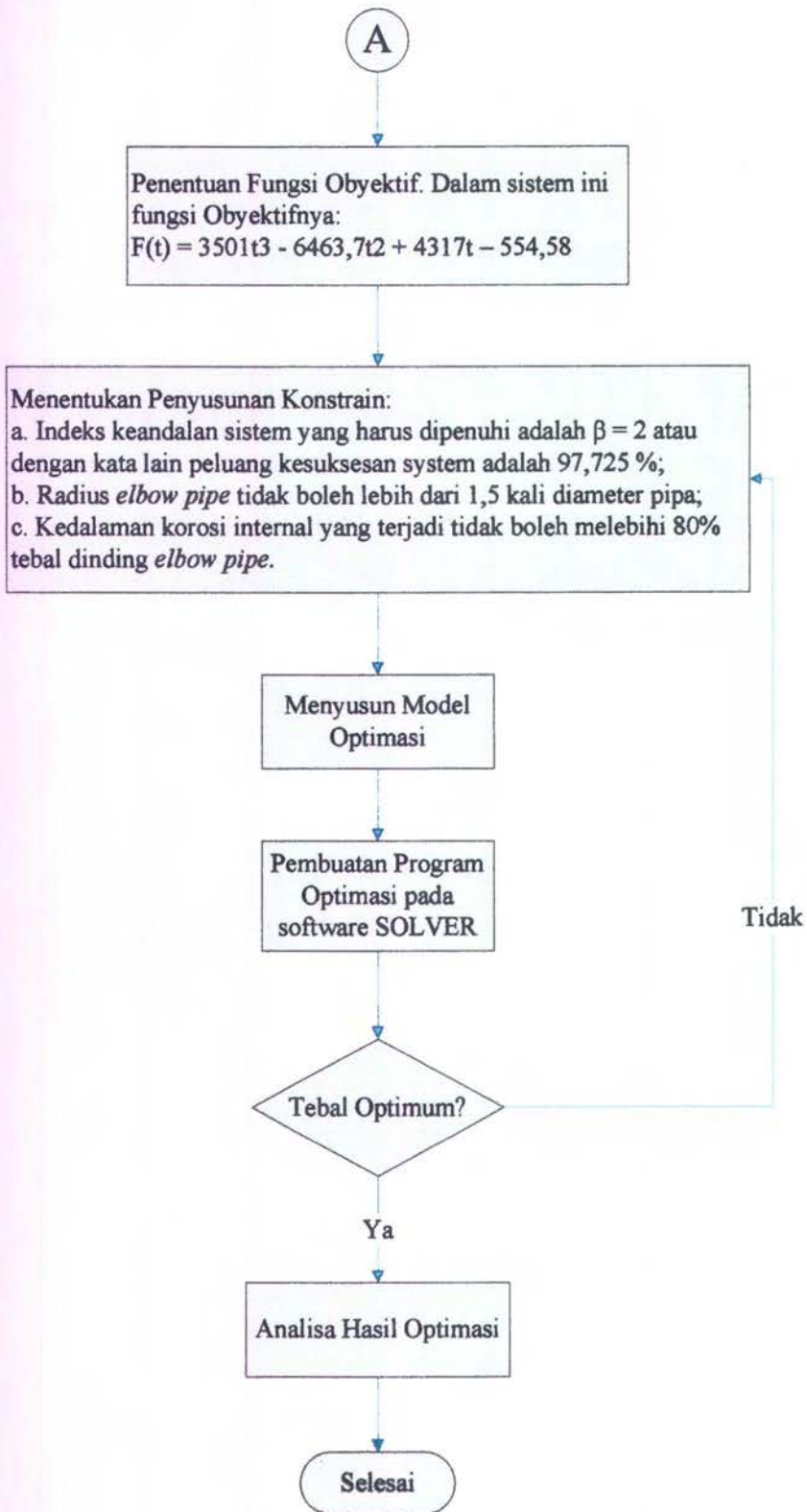
BAB III

METODOLOGI

Metode optimasi digunakan untuk mencari tebal *elbow pipe* yang optimum dengan fungsi obyektif adalah biaya instalasi yang minimal. Agar hasil rancangan memenuhi kelayakan terdapat beberapa kendala. Kendala tersebut antara lain harus mampu menahan tekanan dari dalam pipa, radius *elbow pipe* tidak boleh lebih dari 1,5 kali diameter pipa dan kedalaman korosi internal yang terjadi tidak boleh melebihi 80% tebal dinding *elbow pipe*. Kemudian persoalan optimasi diselesaikan dengan menggunakan *Software* optimasi *SOLVER*. Dan apabila tidak didapatkan konvergensi maka perlu dilakukan pengecekan terhadap model optimasinya dan kalau perlu model optimasinya diubah. Diagram alir pengerjaan Tugas Akhir ini dapat dilihat pada gambar berikut ini:



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian (lanjutan).

Keterangan mengenai pengerjaan/metodologi Optimasi Desain *Elbow Pipe* dapat dilihat pada penjelasan berikut ini:

1. Tahap pertama pengerjaan dimulai dengan pengumpulan data yang meliputi data dimensi utama *elbow pipe* yaitu: tebal dinding pipa, diameter pipa, *grade material* pipa, tekanan operasi dan juga biaya instalasi *elbow pipe*. Data yang digunakan dalam Tugas Akhir ini adalah data jaringan pipa milik JOB P-PEJ Tuban. Pengambilan data *operating pressure* dilakukan dengan *pressure gauge* yang dipasang pada tiap-tiap *block valve*. Pencatatan dilakukan tiap dua jam sekali selama 24 jam. Data yang ditampilkan dalam Tugas Akhir ini adalah rangkuman data yang diambil nilai maksimumnya untuk tiap bulan. Selain data-data di atas juga terdapat data-data yang lainnya yaitu data inspeksi terhadap *elbow pipe* yang dilakukan tiap 2 tahun sekali. Data inspeksi berupa data kedalaman korosi dan panjang korosi untuk tahun 2007 dan 2009. Bersamaan dengan itu juga dilakukan studi literatur yang berasal dari Tugas Akhir yang sebelumnya, penelitian-penelitian lain yang berasal dari berbagai jurnal serta studi literatur dari berbagai buku yang berkaitan dengan optimasi, keandalan, *elbow pipe* dan berbagai *codes* yang mendukungnya (ASME B31.4 dan ASME B31.G).
2. Langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan keandalan *elbow pipe* dengan Simulasi *Monte Carlo*. Sebenarnya ada beberapa metode yang bisa digunakan dalam perhitungan keandalan. Akan tetapi dalam Tugas Akhir ini dipilih menggunakan metode Simulasi *Monte Carlo*. Hal ini dilakukan karena metode Simulasi *Monte Carlo* lebih menggambarkan kondisi/keadaan riil yang terjadi di lapangan. Maksudnya adalah bahwa dalam metode ini, simulasi dilakukan dengan data acak yang berasal dari *Random Number Generated (RNG)* atau angka acak yang sesuai dengan data sebenarnya yang acak.

3. Langkah pertama pengerjaan Simulasi *Monte Carlo* dimulai dengan penentuan Moda Kegagalan sistem. Dalam hal ini Moda Kegagalan sistem adalah:

$$g(X) = P_b - P_o$$

dengan,

P_b = tekanan ledakan (*burst pressure*) pada pipa yang terkorosi (*ksi*);

$$= \left(\frac{1.1\sigma_y 2t}{D} \right) \left[1 - 0.9435 \left(\frac{d}{t} \right)^{1.6} \left(\frac{l}{D} \right)^{0.4} \right] \text{ (ASME B31.4)}$$

P_o = *Operating Pressure* (*ksi*).

Sehingga, persamaan Moda Kegagalan (MK) menjadi,

$$g(X) = \left(\frac{1.1\sigma_y 2t}{D} \right) \left[1 - 0.9435 \left(\frac{d}{t} \right)^{1.6} \left(\frac{l}{D} \right)^{0.4} \right] - P_o$$

dengan,

t = *wall thickness of pipe* (*inch*)

D = *outside diameter of pipe* (*inch*)

σ_y = *yield stress* (*ksi*)

$$= 0.72 \times E \times S_{MYS}$$

E = *weld joint factor*

$$= 1; \text{ ASTM 106 Gr. B}$$

$$= 1; \text{ API 5L X52}$$

l = *length of corrosion defect* (*inch*)

d = *depth of corrosion defect* (*inch*)

4. Langkah selanjutnya adalah menentukan variabel acak dari moda kegagalan yang telah ditentukan sebelumnya. Dalam hal ini variabel acaknya adalah kedalaman korosi (d), panjang korosi (l) dan juga tekanan operasi (P_o). Dari masing-masing variabel acak kemudian dicari parameter statistiknya.
5. Setelah diketahui parameter statistik masing-masing variabel acak. Langkah selanjutnya adalah membuat *random number generated (RNG)* dari masing-masing variabel acak dengan jumlah *RNG* masing-masing sejumlah 10000 data. Selanjutnya *RNG* ditransformasikan menjadi *random variables* dengan menggunakan *Cumulative Distribution Function (CDF)* masing-masing variabel acak. Pengerjaan langkah pada point 4 dan 5 ini seluruhnya dikerjakan dengan bantuan *software Minitab 14*.
6. Selanjutnya Simulasi *Monte Carlo* dilakukan dengan memasukkan masing-masing *random variables* pada Moda Kegagalan untuk kemudian dihitung jumlah berhasil dan gagalnya. Keandalan sistem dinyatakan dengan persentase jumlah berhasil dalam simulasi yang dilakukan.
7. Setelah mengetahui peluang kesuksesan sistem langkah selanjutnya adalah melakukan optimasi desain *elbow pipe*. Tahap pengerjaan optimasi desain dimulai dengan menentukan variabel desain optimasi yang dalam penelitian ini berupa variasi tebal dinding pipa yang besarnya berbanding lurus dengan biaya instalasi.
8. Selanjutnya adalah penentuan fungsi obyektif yang diperoleh berdasarkan data biaya instalasi pipa untuk tiap tebal dinding pipa. Dari data biaya instalasi yang ada kemudian dibuat persamaan agar dapat digunakan sebagai fungsi obyektif dalam pemodelan optimasi. Berdasarkan data yang tersedia, dengan menggunakan *Interpolasi Newton* persamaan fungsi obyektif dari sistem ini adalah sebagai berikut:

$$F(t) = 3501t^3 - 6463,7t^2 + 4317t - 554,58$$

9. Selanjutnya adalah penentuan kendala-kendala dalam optimasi desain yang meliputi:

a. Indeks keandalan sistem yang harus dipenuhi adalah $\beta = 2$ atau dengan kata lain peluang kesuksesan system adalah 97,725 %;

$$G(1) = \left(\frac{1.1\sigma_y 2t}{D} \right) \left[1 - 0.9435 \left(\frac{d}{t} \right)^{1.6} \left(\frac{l}{D} \right)^{0.4} \right] - P_o \geq 0,97725$$

b. Radius *elbow pipe* tidak boleh lebih dari 1,5 kali diameter pipa;

$$G(2) = R - 1,5D \leq 0$$

c. Kedalaman korosi internal yang terjadi tidak boleh melebihi 80% tebal dinding *elbow pipe*.

$$G(3) = d - 0,8t \leq 0$$

10. Berikutnya adalah penyusunan model optimasi yaitu:

minimumkan:

$$F(t) = 3501t^3 - 6463,7t^2 + 4317t - 554,58$$

dengan kendala-kendala:

$$G(1) = \left(\frac{1.1\sigma_y 2t}{D} \right) \left[1 - 0.9435 \left(\frac{d}{t} \right)^{1.6} \left(\frac{l}{D} \right)^{0.4} \right] - P_o \geq 0,97725$$

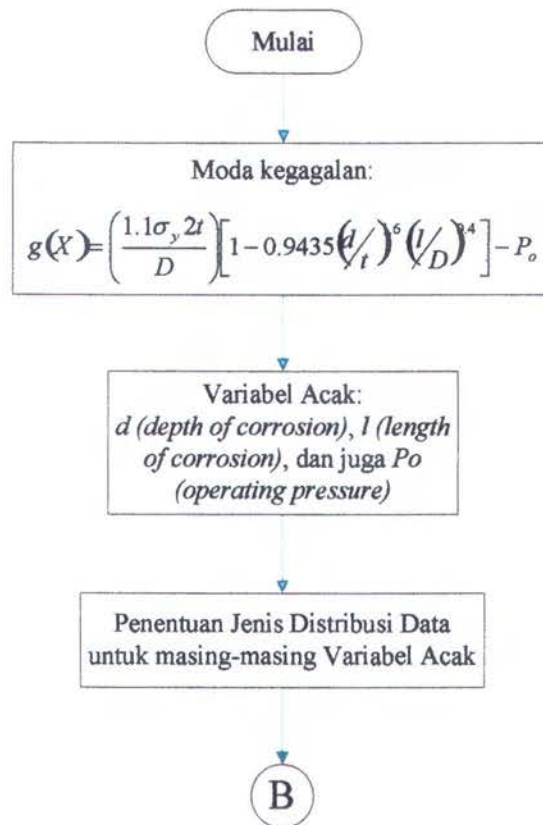
$$G(2) = R - 1,5D \leq 0$$

$$G(3) = d - 0,8t \leq 0$$

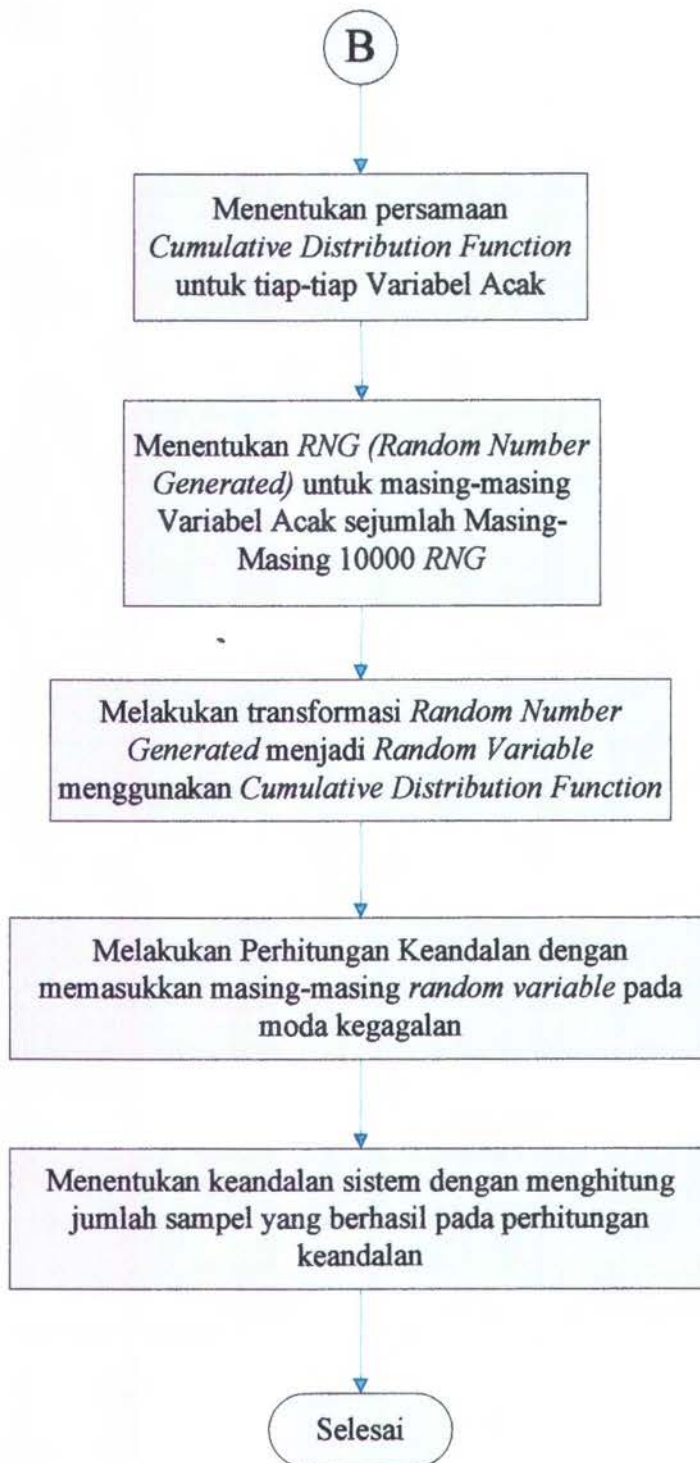
11. Untuk membantu penyelesaian pengerjaan Tugas Akhir ini digunakan suatu program optimasi non linear yang terdapat pada *Microsoft EXCELL* yaitu *SOLVER*.

12. Berikutnya adalah melakukan analisis hasil optimasi yang telah dilakukan pada langkah sebelumnya. Hasil akhir dari proses optimasi ini adalah tebal dinding *elbow pipe* (t) sedemikian rupa sehingga sistem mencapai keandalan tertentu yang telah ditentukan dengan biaya instalasi minimum tanpa melanggar konstrain.

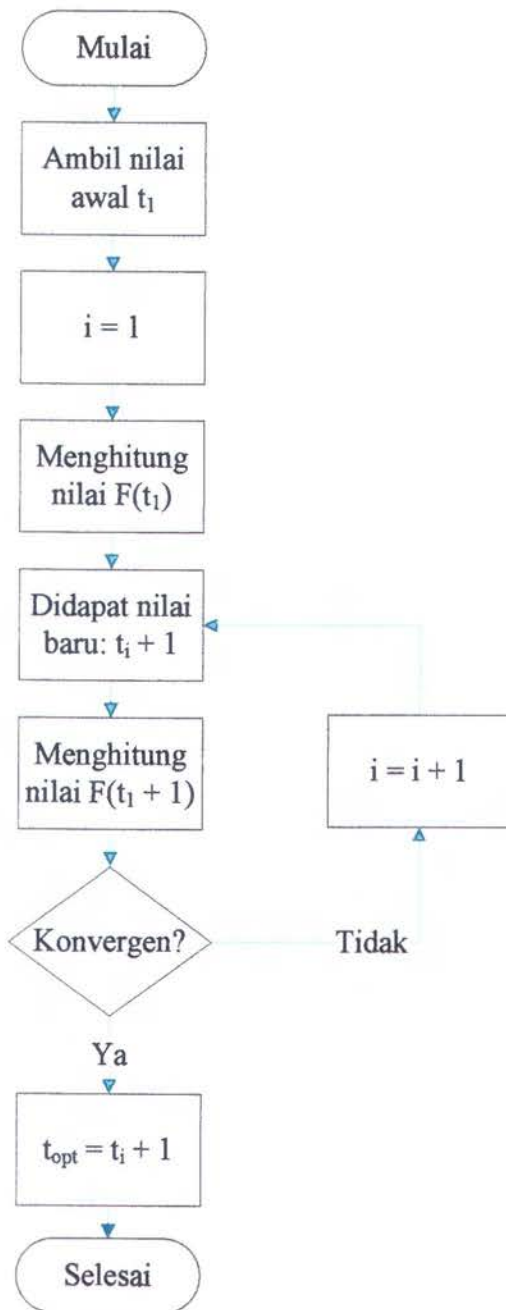
Pengerjaan *Monte Carlo Simulation* lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 3.3 dan Gambar 3.4. Selanjutnya diagram alir pengerjaan optimasi dapat dilihat pada Gambar 3.5 dan Gambar 3.4



Gambar 3.3 Diagram Alir *Monte Carlo Simulation*.



Gambar 3.4 Diagram Alir *Monte Carlo Simulation* (lanjutan).



Gambar 3.5 Diagram Alir Optimasi Desain.

BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Utama

Data dimensi utama *elbow pipe* yang ditinjau pada Tugas Akhir ini dapat dilihat pada tabel berikut ini:

Tabel 4.1 Data Utama *Elbow Pipe*.

<i>Sukowati-CPA Pipeline</i>	
<i>Material</i>	<i>ASTM A106 Gr.B Sch 80</i>
<i>Outside Diameter (inch)</i>	<i>10.75</i>
<i>Wall Thickness (inch)</i>	<i>0.593</i>
<i>Length of Pipeline (m)</i>	<i>9600</i>
<i>SMYS (psi)</i>	<i>35000</i>
<i>Jumlah Elbow</i>	<i>8 Elbow 10" 90 deg (satu yang ditinjau)</i> <i>16 Elbow 10" 45 deg (satu yang ditinjau)</i>

(Sumber: JOB P-PEJ, 2004)

Data *operating pressure* selama bulan November 2008 hingga bulan Oktober 2009:

Tabel 4.2 *Operating Pressure* bulan November 2008 s/d bulan Oktober 2009.

<i>TIME</i>	<i>Nov '08</i>	<i>Dec '08</i>	<i>Jan '09</i>	<i>Feb '09</i>	<i>Mar '09</i>	<i>Apr '09</i>	<i>May '09</i>	<i>Jun '09</i>	<i>Jul '09</i>	<i>Aug '09</i>	<i>Sep '09</i>	<i>Oct '09</i>
<i>Block Valve 1</i>	725	725	725	725	725	730	730	725	725	680	678	678
<i>Block Valve 2</i>	710	709	710	710	710	710	710	708	708	662	662	660
<i>Block Valve 3</i>	625	627	627	629	629	630	630	625	625	590	590	590
<i>Block Valve 4</i>	480	480	480	485	488	490	488	482	480	452	455	450

(Sumber: JOB P-PEJ, 2009)

Pengambilan data *operating pressure* dilakukan dengan *pressure gauge* yang dipasang pada tiap-tiap *block valve*. Pencatatan dilakukan tiap dua jam sekali selama 24 jam. Data di atas adalah rangkuman data yang diambil nilai maksimumnya untuk tiap bulan.

Selain data-data di atas juga terdapat data-data yang lainnya yaitu data inspeksi terhadap *elbow pipe* yang dilakukan tiap 2 tahun sekali. Data inspeksi berupa data tebal dinding pipa, kedalaman korosi dan panjang korosi untuk tahun 2007 dan 2009. Berikut ini adalah data inspeksi 2 tahunan yang dilakukan terhadap *elbow pipe*. Data berupa tebal pipa setelah mengalami *internal corrosion*.

Tabel 4.3 Data Inspeksi *Elbow Pipe* 90°.

Dapat Dilihat pada LAMPIRAN B (Sumber: JOB P-PEJ, 2009)

Tabel 4.4 Data Inspeksi *Elbow Pipe* 45°.

Dapat Dilihat pada LAMPIRAN B (Sumber: JOB P-PEJ, 2009)

4.2 Perhitungan Keandalan *Elbow Pipe*

4.2.1 Penentuan Moda Kegagalan

Moda kegagalan yang digunakan dalam analisis ini adalah sebagai berikut:

$$g(X) = P_b - P_o$$

dengan,

P_b = tekanan ledakan (*burst pressure*) pada pipa yang terkorosi (*ksi*);

$$= \left(\frac{1.1\sigma_y 2t}{D} \right) \left[1 - 0.9435 \left(\frac{d}{t} \right)^{1.6} \left(\frac{l}{D} \right)^{0.4} \right] \text{ (ASME B31.4)}$$

P_o = *Operating Pressure* (*ksi*).

Sehingga, persamaan moda kegagalan (MK) menjadi,

$$g(X) = \left(\frac{1.1\sigma_y 2t}{D} \right) \left[1 - 0.9435 \left(\frac{d}{t} \right)^{1.6} \left(\frac{l}{D} \right)^{0.4} \right] - P_o$$

dengan,

t = wall thickness of pipe (inch)

D = outside diameter of pipe (inch)

σ_y = yield stress (ksi)

$$= 0.72 \times E \times S_{MYS}$$

E = weld joint factor

= 1; ASTM 106 Gr. B

= 1; API 5L X52

l = length of corrosion defect (inch)

d = depth of corrosion defect (inch)

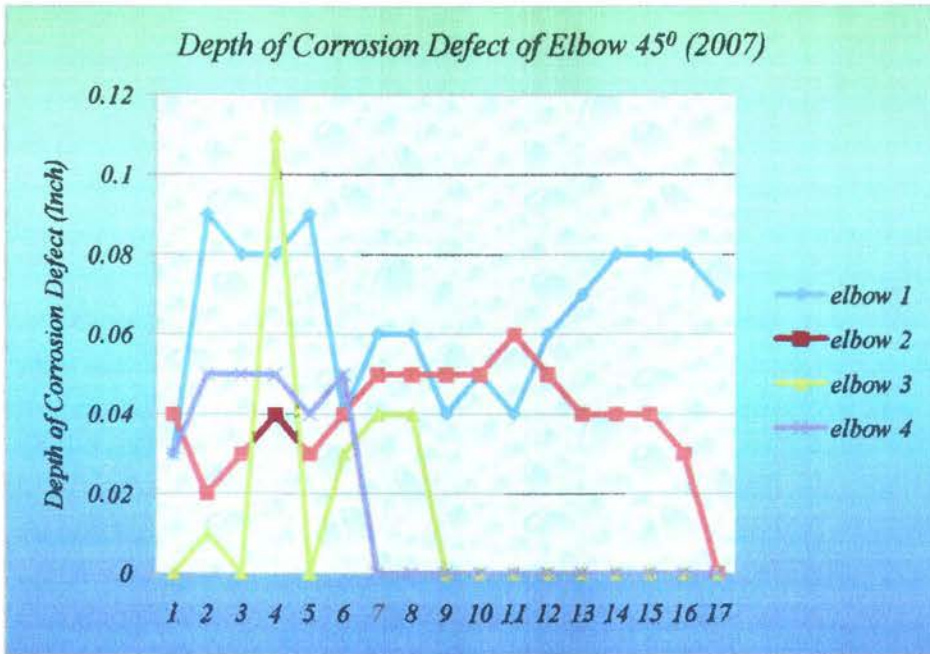
4.2.2 Penentuan Variabel Acak dan Parameter Statistiknya

Dari moda kegagalan seperti yang tersebut di atas dapat dicari variabel acaknya. Variabel acak dalam sistem ini adalah kedalaman korosi (d), panjang korosi (l) dan tekanan operasi (P_o). Data kedalaman korosi (d) diperoleh dari hasil inspeksi 2 tahunan yang dilakukan terhadap *elbow pipe* di JOB P-PEJ Tuban. Berikut ini adalah data kedalaman korosi (d) pada *elbow pipe* 45⁰ dan 90⁰:

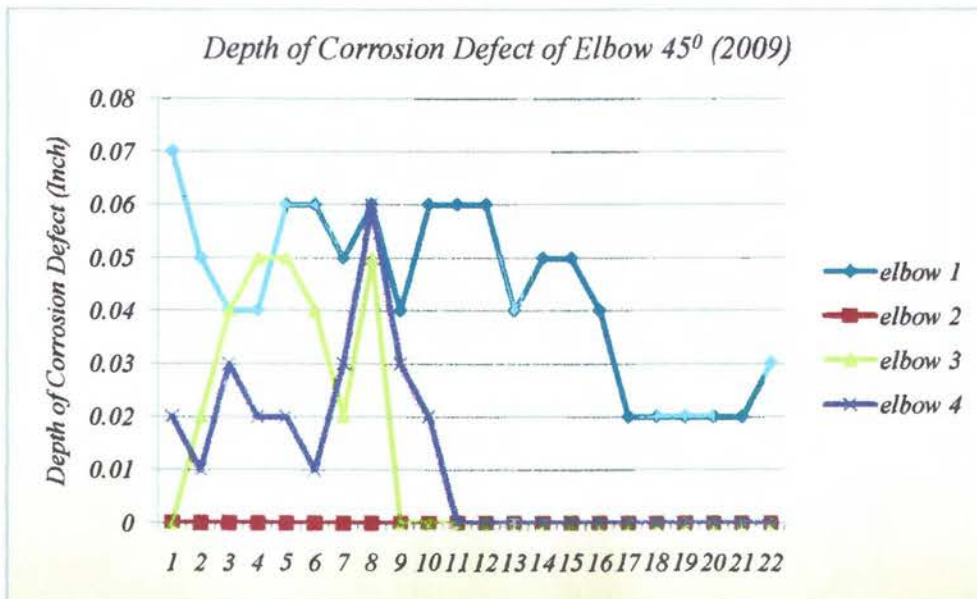
Tabel 4.5 Data Kedalaman Korosi *Elbow Pipe* 45°.

Depth of Corrosion Defect of Elbow 45° yr. 2007 (inch)				Depth of Corrosion Defect of Elbow 45° yr. 2009 (inch)			
<i>Elb. 1</i>	<i>Elb. 2</i>	<i>Elb. 3</i>	<i>Elb. 4</i>	<i>Elb. 1</i>	<i>Elb. 2</i>	<i>Elb. 3</i>	<i>Elb. 4</i>
0.03	0.04	0.00	0.03	0.07	0.00	0.00	0.02
0.09	0.02	0.01	0.05	0.05	0.00	0.02	0.01
0.08	0.03	0.00	0.05	0.04	0.00	0.04	0.03
0.08	0.04	0.11	0.05	0.04	0.00	0.05	0.02
0.09	0.03	0.00	0.04	0.06	0.00	0.05	0.02
0.04	0.04	0.03	0.05	0.06	0.00	0.04	0.01
0.06	0.05	0.04	0.00	0.05	0.00	0.02	0.03
0.06	0.05	0.04	0.00	0.06	0.00	0.05	0.06
0.04	0.05	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.03
0.05	0.05	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.02
0.04	0.06	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00
0.06	0.05	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00
0.07	0.04	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00
0.08	0.04	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00
0.08	0.04	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00
0.08	0.03	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00
0.07	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
				0.02	0.00	0.00	0.00
				0.02	0.00	0.00	0.00
				0.02	0.00	0.00	0.00
				0.02	0.00	0.00	0.00
				0.02	0.00	0.00	0.00
				0.03	0.00	0.00	0.00

Ket:
• *Elb* = *Elbow Pipe*



Gambar 4.1 Grafik *Depth of Corrosion Defect of Elbow Pipe 45°* (2007).



Gambar 4.2 Grafik *Depth of Corrosion Defect of Elbow Pipe 45°* (2009).

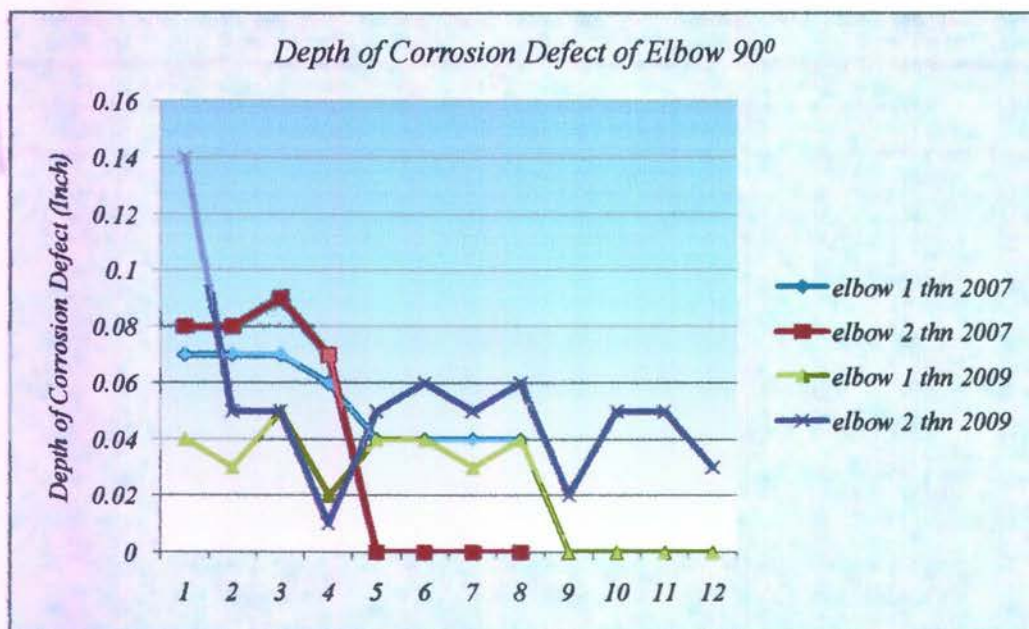
Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 menunjukkan grafik *depth of corrosion defect of elbow pipe 45°* untuk tahun 2007 dan tahun 2009. Masing-masing gambar



menunjukkan sebaran data inspeksi yang berupa data kedalaman korosi yang terjadi pada *elbow pipe* 45°.

Tabel 4.6 Data Kedalaman Korosi *Elbow Pipe* 90°.

Depth of Corrosion Defect of Elbow 90° yr. 2007 (inch)		Depth of Corrosion Defect of Elbow 90° yr. 2009 (inch)	
Elb. 1	Elb. 2	Elb. 1	Elb. 2
0.07	0.08	0.04	0.14
0.07	0.08	0.03	0.05
0.07	0.09	0.05	0.05
0.06	0.07	0.02	0.01
0.04	0.00	0.04	0.05
0.04	0.00	0.04	0.06
0.04	0.00	0.03	0.05
0.04	0.00	0.04	0.06
Ket:		0.00	0.02
• Elb = Elbow Pipe		0.00	0.05
		0.00	0.05
		0.00	0.03



Gambar 4.3 Grafik *Depth of Corrosion Defect of Elbow Pipe* 90° (2007-2009).

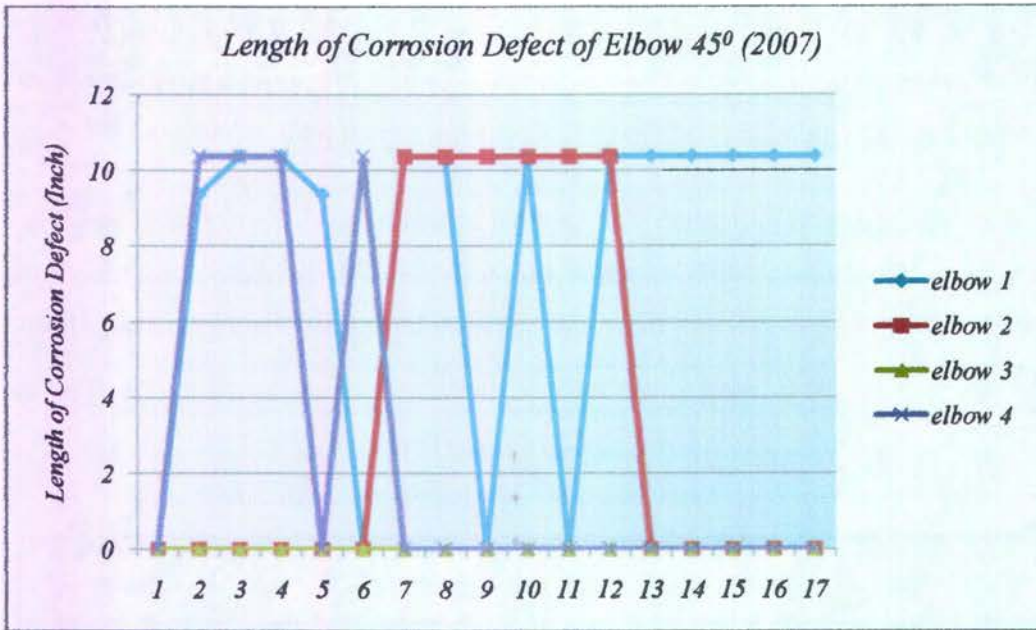
Gambar 4.3 menunjukkan grafik *depth of corrosion defect of elbow pipe 90⁰* untuk tahun 2007 dan tahun 2009. Gambar tersebut menunjukkan sebaran data inspeksi yang berupa data kedalaman korosi yang terjadi pada *elbow pipe 90⁰*.

Data panjang korosi diperoleh dari pembacaan Tabel 3-3 *Values of L for Pipe Sizes \geq NPS 10 and $<$ NPS 16* pada *ASME B31G-1991* berdasarkan kedalaman korosi (*d*) yang diperoleh dari hasil pencatatan di lapangan. Dan berikut ini adalah data panjang korosi (*l*) pada elbow pipe 45⁰ dan 90⁰:

Tabel 4.7 Data Panjang Korosi *Elbow Pipe 45⁰*.

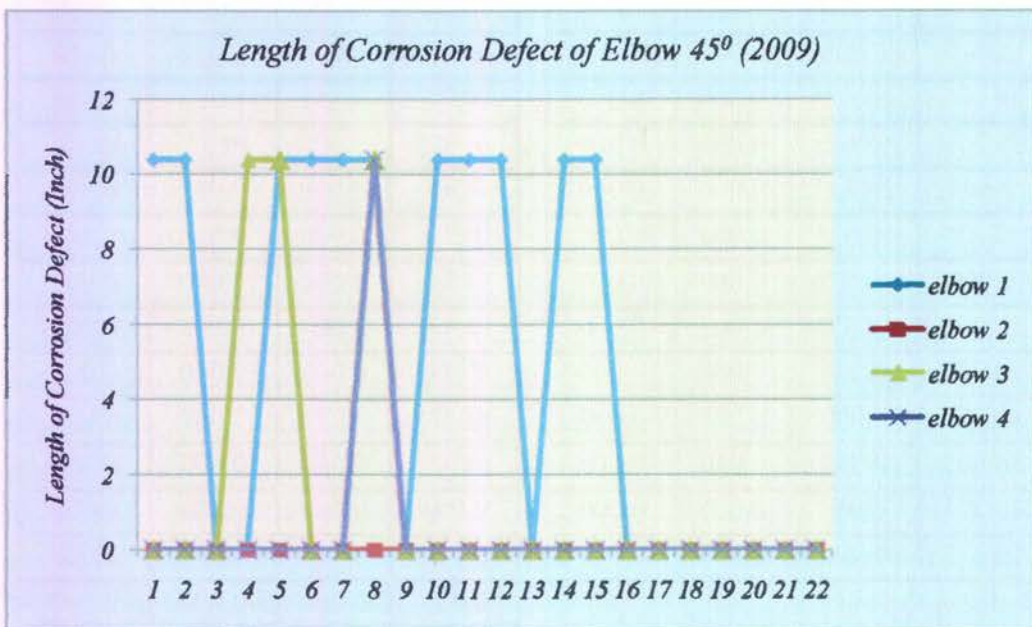
Length of Corrosion Defect of Elbow 45 ⁰ yr. 2007 (inch)				Length of Corrosion Defect of Elbow 45 ⁰ yr. 2009 (inch)			
Elb. 1	Elb. 2	Elb. 3	Elb. 4	Elb. 1	Elb. 2	Elb. 3	Elb. 4
0.000	0.000	0.000	0.000	10.375	0.000	0.000	0.000
9.375	0.000	0.000	10.375	10.375	0.000	0.000	0.000
10.375	0.000	0.000	10.375	0.000	0.000	0.000	0.000
10.375	0.000	0.000	10.375	0.000	0.000	10.375	0.000
9.375	0.000	0.000	0.000	10.375	0.000	10.375	0.000
0.000	0.000	0.000	10.375	10.375	0.000	0.000	0.000
10.375	10.375	0.000	0.000	10.375	0.000	0.000	0.000
10.375	10.375	0.000	0.000	10.375	0.000	10.375	10.375
0.000	10.375	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10.375	10.375	0.000	0.000	10.375	0.000	0.000	0.000
0.000	10.375	0.000	0.000	10.375	0.000	0.000	0.000
10.375	10.375	0.000	0.000	10.375	0.000	0.000	0.000
10.375	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10.375	0.000	0.000	0.000	10.375	0.000	0.000	0.000
10.375	0.000	0.000	0.000	10.375	0.000	0.000	0.000
10.375	0.000	0.000	0.000	10.375	0.000	0.000	0.000
10.375	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10.375	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10.375	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10.375	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10.375	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10.375	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10.375	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10.375	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10.375	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10.375	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10.375	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10.375	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10.375	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10.375	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10.375	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10.375	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10.375	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10.375	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10.375	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10.375	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10.375	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Ket:
 • *Elb* = *Elbow Pipe*



Gambar 4.4 Grafik Length of Corrosion Defect of Elbow Pipe 45° (2007).

Tabel 3-3 Values of L for Pipe Sizes \geq NPS 10 and $<$ NPS 16 pada ASME B31G-1991 dapat dilihat pada LAMPIRAN C.



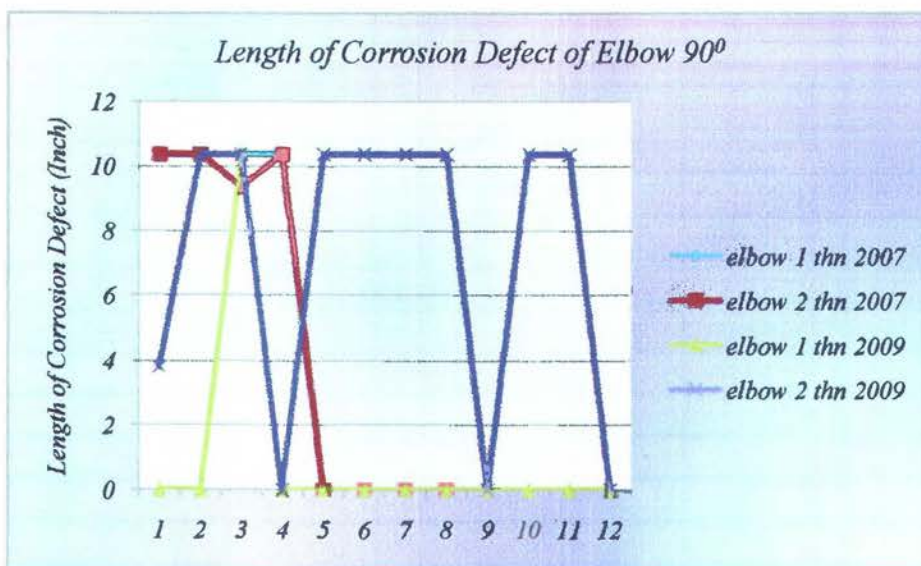
Gambar 4.5 Grafik Length of Corrosion Defect of Elbow Pipe 45° (2009).

Gambar 4.4 dan Gambar 4.5 menunjukkan sebaran data *length of corrosion defect of elbow pipe 45°* untuk tahun 2007 dan 2009. Data tersebut berasal dari inspeksi yang dilakukan terhadap *elbow pipe* tiap dua tahun yaitu tahun 2007 dan 2009.

Tabel 4.8 Data Panjang Korosi *Elbow Pipe 90°*.

Length of Corrosion Defect of Elbow 90° yr. 2007 (inch)		Length of Corrosion Defect of Elbow 90° yr. 2009 (inch)	
Elb. 1	Elb. 2	Elb. 1	Elb. 2
10.375	10.375	0.000	3.813
10.375	10.38	0.000	10.375
10.375	9.375	10.375	10.375
10.375	10.375	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	10.375
0.000	0.000	0.000	10.375
0.000	0.000	0.000	10.375
0.000	0.000	0.000	10.375
0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	10.375
0.000	0.000	0.000	10.375
0.000	0.000	0.000	10.375
0.000	0.000	0.000	0.000

Ket:
 • *Elb = Elbow Pipe*



Gambar 4.6 Grafik *Length of Corrosion Defect of Elbow Pipe 90°* (2007-2009).

Berikutnya dilakukan pencari parameter statistik untuk masing-masing variabel acak yang ada, meliputi: kedalaman korosi (d), panjang korosi (l) dan tekanan operasi (P_o). Pencarian parameter statistik dilakukan dengan bantuan *software Minitab 14*. Rangkuman hasil pencarian parameter statistik dapat dilihat seperti pada Tabel 4.9 s/d Tabel 4.11 berikut ini:

Tabel 4.9 Parameter Statistik Kedalaman Korosi (d), Panjang Korosi (l) dan Tekanan Operasi (P_o) yang Terjadi pada *Elbow Pipe 45^o* Tahun 2007.

Parameter Statistik	Distribusi Data	μ	σ	α	β	λ
d1	3-Parameter Weibull	-	-	32.06	2121	-31.98
d2	3-Parameter Weibull	-	-	32.06	3075	-32.02
d3	Logistic	0.007	0.012	-	-	-
d4	Smallest Extreme Value	0.028	0.022	-	-	-
l1	Largest Extreme Value	5.419	4.889	-	-	-
l2	Logistic	3.007	3.058	-	-	-
l4	Smallest Extreme Value	4.871	4.961	-	-	-
P1	Largest Extreme Value	703	22.75	-	-	-
P2	Largest Extreme Value	686	23.06	-	-	-
P3	Logistic	621.5	8.972	-	-	-
P4	Smallest Extreme Value	482	9.201	-	-	-

Tabel 4.10 Parameter Statistik Kedalaman Korosi (d), Panjang Korosi (l) dan Tekanan Operasi (P_o) yang Terjadi pada *Elbow Pipe 45^o* Tahun 2009.

Parameter Statistik	Distribusi Data	μ	σ	λ	θ
d1	Smallest Extreme Value	0.051	0.013	-	-
d3	2-Parameter Exponential	-	-	-0.010	0.022
d4	Logistic	0.009	0.008	-	-
l1	Logistic	5.188	3.361	-	-
l3	Smallest Extreme Value	3.495	4.7	-	-
l4	Smallest Extreme Value	1.882	3.838	-	-
P1	Largest Extreme Value	703	22.75	-	-
P2	Largest Extreme Value	686	23.06	-	-
P3	Logistic	621.5	8.972	-	-
P4	Smallest Extreme Value	482	9.201	-	-

Tabel 4.11 Parameter Statistik Kedalaman Korosi (d), Panjang Korosi (l) dan Tekanan Operasi (P_o) yang Terjadi pada *Elbow Pipe* 90⁰ Tahun 2007.

Parameter Statistik	Distribusi Data	μ	σ
d1	<i>Normal</i>	0.054	0.015
d2	<i>Normal</i>	0.04	0.043
l1	<i>Logistic</i>	5.188	3.361
l2	<i>Logistic</i>	5.053	3.283
P1	<i>Largest Extreme Value</i>	703	22.75
P2	<i>Largest Extreme Value</i>	686	23.06

Tabel 4. 12 Parameter Statistik Kedalaman Korosi (d), Panjang Korosi (l) dan Tekanan Operasi (P_o) yang Terjadi pada *Elbow Pipe* 90⁰ Tahun 2009.

Parameter Statistik	Distribusi Data	μ	σ	λ
d1	<i>Smallest Extreme Value</i>	0.033	0.015	-
d2	<i>3-Parameter Loglogistic</i>	-2.554	0.172	-0.031
l1	<i>Smallest Extreme Value</i>	2.623	4.325	-
l2	<i>Largest Extreme Value</i>	4.806	4.718	-
P1	<i>Largest Extreme Value</i>	703	22.75	-
P2	<i>Largest Extreme Value</i>	686	23.06	-

Setelah diketahui parameter statistik dari masing-masing variabel acak, maka langkah yang selanjutnya dilakukan adalah men-*generate* masing-masing variabel acak menjadi masing-masing 10000 *random number generated (RNG)*. Masing-masing *RNG* dari variabel acak kemudian ditransformasi menjadi *random variables* dengan menggunakan *Cumulative Distribution Function (CDF)* variabel acak. Kemudian Simulasi *Monte Carlo* dilakukan dengan memasukkan tiap-tiap 10000 *RNG* untuk tiap-tiap variabel acak ke dalam persamaan Moda Kegagalan.

4.2.3 Simulasi Monte Carlo

Langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan keandalan *elbow pipe* dengan Simulasi *Monte Carlo*. Sebenarnya ada beberapa metode yang bisa digunakan

dalam perhitungan keandalan. Akan tetapi dalam Tugas Akhir ini dipilih menggunakan metode Simulasi *Monte Carlo*. Hal ini dilakukan karena metode Simulasi *Monte Carlo* lebih menggambarkan kondisi/keadaan riil yang terjadi di lapangan. Maksudnya adalah bahwa dalam metode ini, simulasi dilakukan dengan data acak yang berasal dari *Random Number Generated (RNG)* atau angka acak yang sesuai dengan data sebenarnya yang acak.

Simulasi *Monte Carlo* dilakukan dengan masing-masing variabel acak di-generate menjadi 10000 *Random Number Generated (RNG)* yang berbeda satu sama lain. Kemudian hasilnya dimasukkan ke dalam persamaan Moda Kegagalan untuk disimulasikan. Dari hasil simulasi kemudian dihitung peluang suksesnya dengan menghitung jumlah sukses dari simulasi sejumlah 10000 data. Hasilnya dicatat peluang sukses untuk tiap-tiap 1000 simulasi agar diketahui kapan simulasi mulai mencapai peluang kesuksesan yang stabil. Hasil simulasi ditampilkan dalam bentuk tabel untuk memudahkan pencatatan seperti yang terlihat dalam Tabel 4.13 s/d Tabel 4.17.

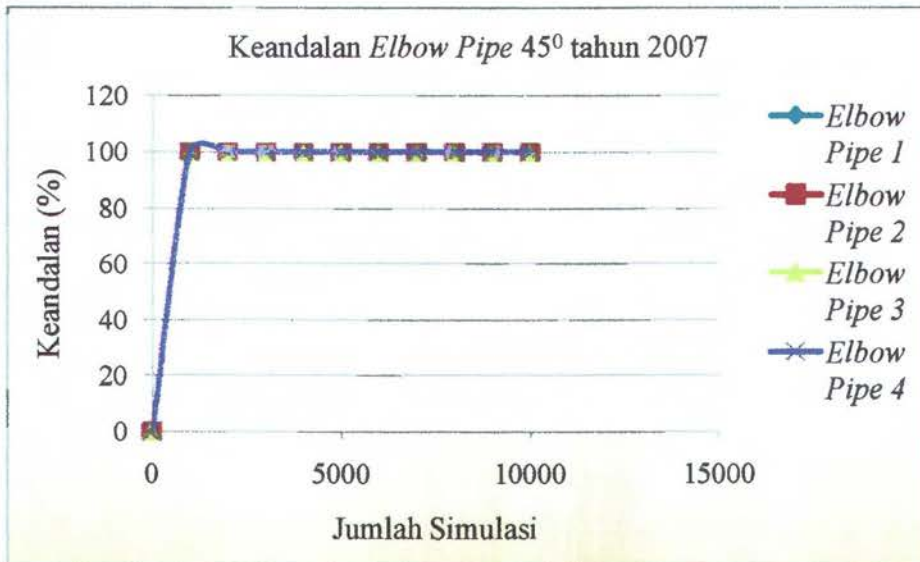
Tabel 4.13 Hasil Simulasi *Monte Carlo Elbow Pipe 45°* untuk Data Tahun 2007.

Elbow 1			Elbow 2		
Jumlah Simulasi	Keandalan (%)	Jumlah Gagal	Jumlah Simulasi	Keandalan (%)	Jumlah Gagal
1000	100	0	1000	100	0
2000	100	0	2000	100	0
3000	100	0	3000	100	0
4000	100	0	4000	100	0
5000	100	0	5000	100	0
6000	100	0	6000	100	0
7000	100	0	7000	100	0
8000	100	0	8000	100	0
9000	100	0	9000	100	0
10000	100	0	10000	100	0

Tabel 4.14 Hasil Simulasi *Monte Carlo Elbow Pipe 45⁰* untuk Data Tahun 2007
(lanjutan).

Elbow 3			Elbow 4		
Jumlah Simulasi	Keandalan (%)	Jumlah Gagal	Jumlah Simulasi	Keandalan (%)	Jumlah Gagal
1000	100	0	1000	100	0
2000	100	0	2000	100	0
3000	100	0	3000	100	0
4000	100	0	4000	100	0
5000	100	0	5000	100	0
6000	100	0	6000	100	0
7000	100	0	7000	100	0
8000	100	0	8000	100	0
9000	100	0	9000	100	0
10000	100	0	10000	100	0

Kemudian hasil simulasi tersebut dibuat dalam bentuk grafik agar memudahkan pembacaan hasil. Grafik-grafik berikut ini menggambarkan hasil simulasi dan kapan simulasi mencapai kestabilan nilai peluang kesuksesan. Semuanya dapat dilihat dalam Gambar 4.7 s/d Gambar 4.10.



Gambar 4.7 Grafik Keandalan *Elbow Pipe 45⁰* untuk Tahun 2007 pada *Elbow Pipe 1 s/d 4*.

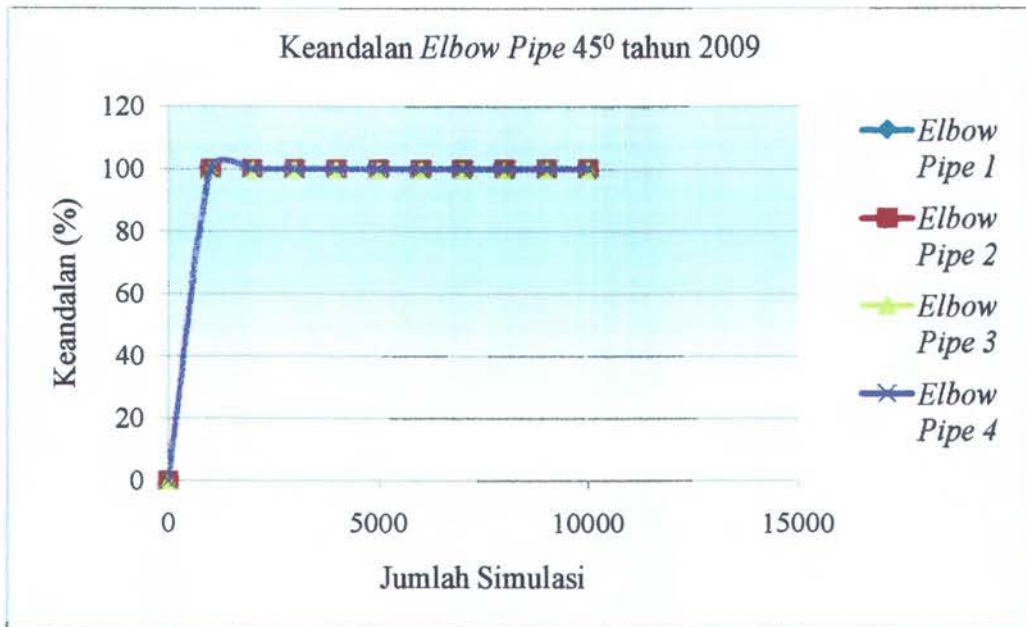
Dari grafik di atas dapat diketahui bahwa pada tahun 2007 *elbow pipe* 45° semuanya (*elbow pipe* 1 s/d 4) mengalami keandalan 100 %. Hal ini berarti bahwa pada tahun 2007 *elbow pipe* 45° belum mengalami degradasi struktur yang cukup untuk menimbulkan kegagalan sistem.

Berikutnya adalah hasil Simulasi *Monte Carlo Elbow Pipe* 45° untuk Data Tahun 2009:

Tabel 4.15 Hasil Simulasi *Monte Carlo Elbow Pipe* 45° untuk Data Tahun 2009.

Elbow 1			Elbow 2		
Jumlah Simulasi	Keandalan (%)	Jumlah Gagal	Jumlah Simulasi	Keandalan (%)	Jumlah Gagal
1000	100	0	1000	100	0
2000	100	0	2000	100	0
3000	100	0	3000	100	0
4000	100	0	4000	100	0
5000	100	0	5000	100	0
6000	100	0	6000	100	0
7000	100	0	7000	100	0
8000	100	0	8000	100	0
9000	100	0	9000	100	0
10000	100	0	10000	100	0
Elbow 3			Elbow 4		
Jumlah Simulasi	Keandalan (%)	Jumlah Gagal	Jumlah Simulasi	Keandalan (%)	Jumlah Gagal
1000	100	0	1000	100	0
2000	100	0	2000	100	0
3000	100	0	3000	100	0
4000	100	0	4000	100	0
5000	100	0	5000	100	0
6000	100	0	6000	100	0
7000	100	0	7000	100	0
8000	100	0	8000	100	0
9000	100	0	9000	100	0
10000	100	0	10000	100	0

Hasil simulasi dalam bentuk grafik ditampilkan pada Gambar 4.8 berikut:



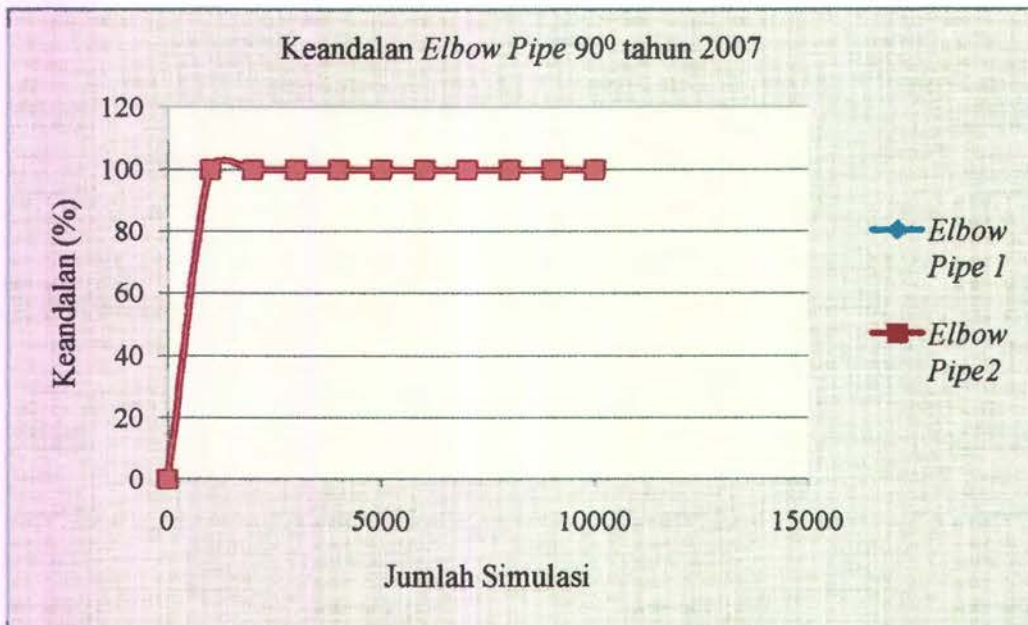
Gambar 4.8 Grafik Keandalan *Elbow Pipe 45°* untuk Tahun 2009 pada *Elbow Pipe 1 s/d 4*.

Sama seperti pada hasil simulasi pada tahun 2007, ternyata hasil simulasi pada tahun 2009 masih menunjukkan “ketangguhan” *elbow pipe 45°* terhadap *internal corrosion*.

Selanjutnya dilakukan simulasi yang sama untuk *elbow pipe 90°* yang hasilnya terlihat pada Tabel 4.16.

Tabel 4.16 Hasil Simulasi *Monte Carlo Elbow Pipe 90⁰* untuk Data Tahun 2007.

Elbow 1			Elbow 2		
Jumlah Simulasi	Keandalan (%)	Jumlah Gagal	Jumlah Simulasi	Keandalan (%)	Jumlah Gagal
1000	100	0	1000	100	0
2000	100	0	2000	100	0
3000	100	0	3000	100	0
4000	100	0	4000	100	0
5000	100	0	5000	100	0
6000	100	0	6000	100	0
7000	100	0	7000	100	0
8000	100	0	8000	100	0
9000	100	0	9000	100	0
10000	100	0	10000	100	0



Gambar 4.9 Grafik Keandalan *Elbow Pipe 90⁰* untuk Tahun 2007 pada *Elbow Pipe 1 dan 2*.

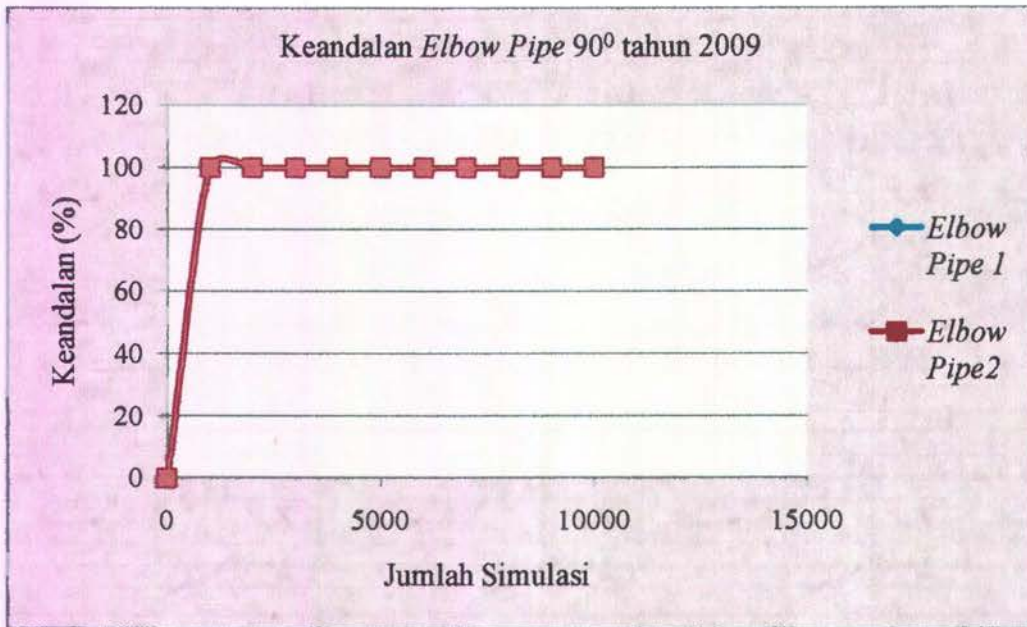
Masih sama seperti pada semua *elbow pipe* 45⁰ pada tahun 2007 dan 2009, *elbow pipe* 90⁰ pada tahun 2007 juga mengalami keandalan 100 %. Ini berarti bahwa *elbow pipe* 90⁰ sama sekali belum mengalami kegagalan sampai tahun 2007.

Berikut tabel hasil Simulasi *Monte Carlo* Untuk *elbow pipe* 90⁰ 1 dan 2 untuk tahun 2009:

Tabel 4.17 Hasil Simulasi *Monte Carlo Elbow Pipe* 90⁰ untuk Data Tahun 2009.

Elbow 1				Elbow 2		
Jumlah Simulasi	Keandalan (%)	Jumlah Gagal		Jumlah Simulasi	Keandalan (%)	Jumlah Gagal
1000	100	0		1000	100	0
2000	100	0		2000	100	0
3000	100	0		3000	100	0
4000	100	0		4000	100	0
5000	100	0		5000	100	0
6000	100	0		6000	100	0
7000	100	0		7000	100	0
8000	100	0		8000	100	0
9000	100	0		9000	100	0
10000	100	0		10000	100	0

Dan hasil Simulasi *Monte Carlo elbow pipe* 90⁰ dapat dilihat lebih jelas pada Gambar 4.10 berikut ini:



Gambar 4.10 Grafik Keandalan *Elbow Pipe* 90° untuk Tahun 2009 pada *Elbow Pipe* 1 dan 2.

Dari semua hasil perhitungan keandalan di atas, dapat diketahui bahwa ternyata semua *elbow pipe* mengalami keandalan sebesar 100 % baik pada tahun 2007 maupun pada tahun 2009. Ini berarti bahwa semua *elbow pipe* pada jaringan pipa transportasi Migas milik JOB P-PEJ mengalami *over design*. Untuk itu perlu dilakukan optimasi desain *elbow pipe* agar dapat diperoleh tebal dinding *elbow pipe* (t) sedemikian rupa sehingga sistem mencapai keandalan tertentu yang telah ditentukan dengan biaya instalasi minimum tanpa melanggar konstrain.

Perhitungan optimasi dilakukan dengan menentukan indeks keandalan (β) yang baru sebesar 2, 3 dan 4. Dengan indeks keandalan sebesar 2 tersebut maka peluang kesuksesan baru yang diharapkan adalah sebesar 0,97725 atau 97,725 %. Dan dengan indeks keandalan sebesar 3 dan 4 tersebut maka peluang kesuksesan baru yang diharapkan adalah sebesar 0,99865 dan 0,99997 atau 99,865 % dan 99,97 %. Dengan turunnya peluang kesuksesan, maka diharapkan akan terjadi penurunan ketebalan dan terjadi penghematan pada biaya instalasi. Proses desain optimasi dapat dilihat pada *point* berikutnya.

4.3 Optimasi Desain *Elbow Pipe*

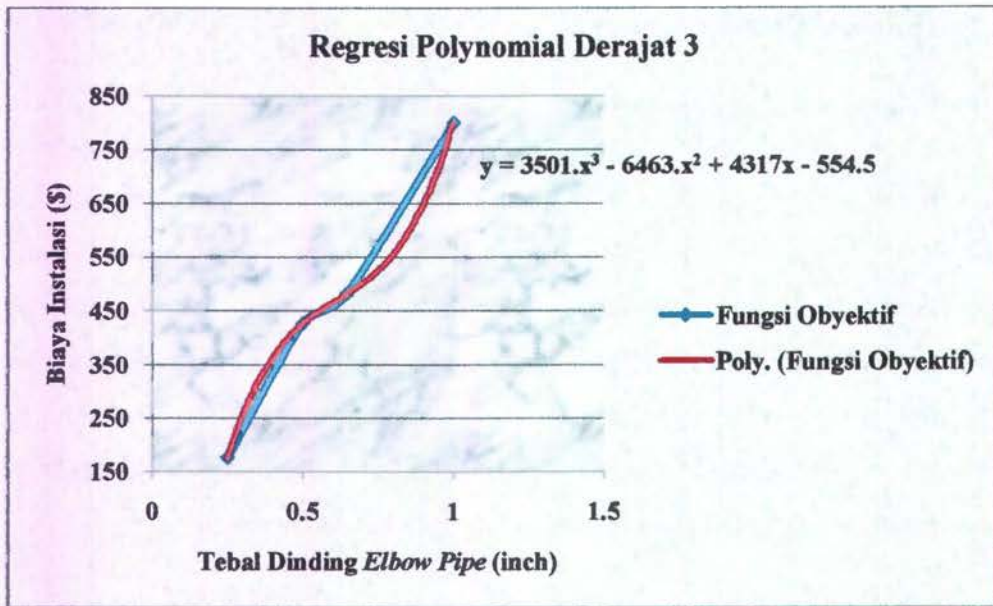
4.3.1 Penentuan Fungsi Obyektif

Langkah pertama yang harus dilakukan pada proses optimasi desain adalah menentukan fungsi obyektif. Dalam pemodelan optimasi, fungsi obyektif yang dimodelkan adalah biaya instalasi *elbow pipe* yang minimal yang besarnya sebanding dengan besarnya tebal dinding *elbow pipe*. Data yang digunakan adalah data untuk *elbow pipe* dengan diameter luar 10,75 inchi. Faktor ketebalan dinding *elbow pipe* mengakibatkan perubahan harga dalam biaya pemasangan. Berikut ini adalah data biaya instalasi *elbow pipe* berdasarkan ketebalan dinding pipa:

Tabel 4.18 Biaya Instalasi *Elbow Pipe* Berdasarkan Ketebalan Pipa.

Tebal Pipa (Inchi)	Harga (\$)
0.25	175.4
0.5	425.66
0.644	480
1	800

Dari data yang berbentuk tabel seperti pada Tabel 4.18 tersebut di atas kemudian dibuat persamaan agar dapat digunakan sebagai fungsi obyektif dalam pemodelan optimasi.



Gambar 4.11 Regresi Polynomial untuk Menentukan Fungsi Obyektif.

Dengan menggunakan *Interpolasi Newton* persamaan fungsi obyektif adalah sebagai berikut:

$$F(t) = 3501t^3 - 6463,7t^2 + 4317t - 554,58$$

Persamaan inilah yang digunakan dalam optimasi desain *elbow pipe*. Dari data-data yang tersebut di atas kemudian dilakukan proses optimasi desain dengan menggunakan bantuan software SOLVER. Persamaan fungsi obyektif dalam proses optimasi desain yang dilakukan dibatasi oleh beberapa batasan/konstrain.

4.3.2 Pemodelan Batasan-Batasan

Terdapat beberapa batasan yang berlaku pada sistem optimasi desain *elbow pipe*. Beberapa konstrain yang berlaku pada sistem ini dibuat berdasarkan pada *codes* yang ada, yakni *ASME B31.4 Pipeline Transportation System for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids*. Beberapa keandalan yang berlaku pada sistem ini diantaranya adalah sebagai berikut:

- a. Indeks keandalan sistem yang harus dipenuhi adalah lebih dari 2, 3 dan 4 ($\beta > 2$, $\beta > 3$ dan $\beta > 4$). Ini berarti bahwa peluang kesuksesan sistem adalah

97,725 %; 99,865 % dan 99,97 % atau sebesar 0,97725; 0,99865 dan 0,99997. Dengan persamaan Moda Kegagalan awal seperti berikut ini:

$$g(X) = \left(\frac{1.1\sigma_y 2t}{D} \right) \left[1 - 0.9435 \left(\frac{d}{t} \right)^{1.6} \left(\frac{l}{D} \right)^{0.4} \right] - P_o$$

Maka persamaan keandalan baru berdasarkan indeks keandalan (β) yang baru yaitu:

$$G(1) = \left(\frac{1.1\sigma_y 2t}{D} \right) \left[1 - 0.9435 \left(\frac{d}{t} \right)^{1.6} \left(\frac{l}{D} \right)^{0.4} \right] - P_o \geq 0,97725$$

$$G(1) = \left(\frac{1.1\sigma_y 2t}{D} \right) \left[1 - 0.9435 \left(\frac{d}{t} \right)^{1.6} \left(\frac{l}{D} \right)^{0.4} \right] - P_o \geq 0,99865$$

$$G(1) = \left(\frac{1.1\sigma_y 2t}{D} \right) \left[1 - 0.9435 \left(\frac{d}{t} \right)^{1.6} \left(\frac{l}{D} \right)^{0.4} \right] - P_o \geq 0,99997$$

- b. Radius *elbow pipe* tidak boleh lebih dari 1,5 kali diameter pipa. Persyaratan ini sebagaimana disebutkan dalam *ASME B31.4 Pipeline Transportation System for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids Part 3 Design Applications of Piping Components Selection and Limitations*.

$$G(2) = R - 1,5D \leq 0$$

- c. Kedalaman korosi internal yang terjadi tidak boleh melebihi 80% tebal dinding *elbow pipe*. Syarat ini disebutkan dalam *ASME B31.G: Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines*.

$$G(3) = d - 0,8t \leq 0$$

4.3.3 Hasil Optimasi

Proses optimasi dilakukan dengan bantuan *software SOLVER*. Hasil optimasi yang dilakukan terhadap *elbow pipe* dengan menggunakan *software SOLVER* pada *MICROSOFT EXCELL* dapat dilihat pada Tabel 4.19. Hasil yang diperoleh dari

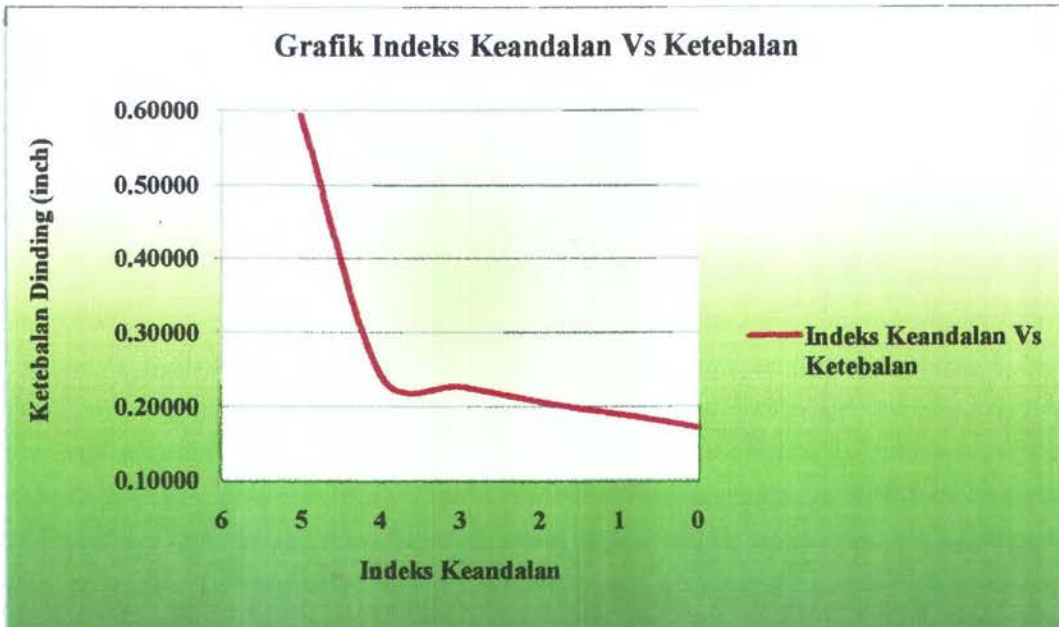
optimasi desain berupa nilai ketebalan dinding *elbow pipe* yang baru dan juga biaya instalasi yang baru sebagai hasil dari ketebalan dinding yang baru.

Semua nilai baru yang diperoleh dari hasil optimasi tersebut kemudian dibandingkan dengan nilai awal ketebalan dinding dan biaya instalasi. Dari hasil perbandingan nilai awal dan akhir ketebalan dinding dan biaya instalasi kemudian dapat dilakukan analisis terhadap hasilnya.

Tabel 4.19 Perubahan Variabel *Elbow Pipe* Setelah Optimasi Desain.

Variabel	Nilai Awal	$\beta = 4$	$\beta = 3$	$\beta = 2$	$\beta = 1$	$\beta = 0$
Tebal (Inchi)	0,593	0,242	0,228	0,207	0,189	0,172
Biaya (\$)	462,503	161,413	134,969	92,542	55,160	14,909

Dari Tabel 4.19 dapat dilihat bahwa terjadi penurunan nilai variabel ketebalan dinding dan biaya instalasi *elbow pipe* sebanding dengan penurunan indeks keandalan yang terjadi. Penurunan nilai variabel ketebalan dinding dan biaya instalasi *elbow pipe* lebih jelas terlihat pada Gambar 4.11.



Gambar 4.12 Grafik Hubungan Antara Indeks Keandalan dengan Ketebalan Dinding *Elbow Pipe* Hasil Optimasi.

Dari grafik di atas semakin jelas terlihat bahwa penurunan indeks keandalan berakibat pada menurunnya ketebalan dinding *elbow pipe*. Penurunan akan terus terjadi hingga ditemukan ketebalan dinding yang optimum sesuai batasan-batasan yang ada. Untuk $\beta = 2$ dapat diketahui bahwa ketebalan dinding yang optimum berdasarkan perhitungan adalah 0,207 inch. Akan tetapi ketebalan dinding yang seperti itu jelas tidak tersedia di lapangan. Oleh karena itu tebal dinding yang paling mendekati nilai tebal hasil optimasi dan tersedia di lapangan adalah 0,25 inch (ANSI B16.9, 1987). Dengan tebal dinding yang sebesar 0,25 inch maka biaya instalasi yang dibutuhkan adalah 175,39 \$. Penurunan ketebalan dinding yang terjadi adalah sebesar:

$$\text{Pengurangan Tebal } Elbow \text{ Pipe} = \frac{0.593 - 0.25}{0.593} \times 100 \% = 57,84 \%$$

Penurunan variabel tebal sebesar 57,84 % tersebut mengakibatkan penurunan secara langsung terhadap biaya pemasangan *elbow pipe*. Penurunan biaya pemasangan *elbow pipe* adalah sebesar:

$$\text{Penurunan biaya pemasangan} = \frac{462.50 - 175.39}{462.50} \times 100 \% = 62,08 \%$$

Berkurangnya variabel ketebalan dinding *elbow pipe* mengakibatkan perubahan dimensi utama pada konfigurasi pipa yang lainnya. Hal ini terjadi karena *elbow pipe* menjadi dasar pijakan penentuan dimensi utama pipa, terutama dalam hal penentuan ketebalan dinding pipa. *Internal corrosion* yang terjadi pada *elbow pipe* adalah yang terbesar terjadi pada jaringan pipa migas JOB P-PEJ dibandingkan pada jenis *fitting* maupun jenis konfigurasi pipa yang lainnya. Oleh karena itu ketebalan dinding untuk pipa lurus juga harus mengikuti ketebalan dinding *elbow pipe* setelah proses optimasi dilakukan.

Setelah proses optimasi dilakukan, variabel ketebalan dinding *elbow pipe* dan biaya instalasi *elbow pipe* mengalami penurunan yang cukup signifikan. Berkurangnya ketebalan dinding dan penghematan biaya instalasi *elbow pipe* ini cukup banyak. Hal ini disebabkan oleh karena dalam penelitian ini hanya ditinjau optimasi desain *elbow pipe* akibat *internal corrosion*. Penelitian tidak mempertimbangkan akibat *external corrosion* dan juga kekuatan pipa akibat beban lingkungan yang lain semisal beban tanah. Salah satu hal yang juga penting untuk dimasukkan sebagai batasan/konstrain optimasi adalah adanya pengaruh *buckling* pada pipa hasil optimasi. Padahal pada kenyataannya di lapangan, beberapa hal tersebut juga dapat mempengaruhi keandalan sistem *pipeline* yang pada akhirnya juga berpengaruh pada proses optimasi desain *elbow pipe* itu sendiri.

Keandalan sistem merupakan salah satu hal yang menjadi konstrain yang membatasi fungsi obyektif yang digunakan dalam proses optimasi desain *elbow pipe*. Moda kegagalan dalam perhitungan keandalan sistem didasarkan pada beban yang berpengaruh pada struktur itu sendiri, dalam hal ini adalah *operating pressure* yang terjadi pada *elbow pipe* setelah *elbow pipe* mengalami *internal corrosion*. Apabila beban-beban lain yang berpengaruh pada struktur

dipertimbangkan, kemungkinan akan diperoleh hasil optimasi yang lebih optimum.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang dapat ditarik setelah melalui proses pengerjaan optimasi desain *elbow pipe* pada bab-bab sebelumnya adalah sebagai berikut:

1. Ketebalan dinding *elbow pipe* setelah melalui proses optimasi adalah 0,25 inch dengan indeks keandalan (β) = 2 dan biaya instalasi akhir setelah optimasi adalah 175,39 \$.
2. Berkurangnya ketebalan setelah mengalami proses optimasi adalah sebesar 57,84 % dan penghematan biaya instalasi akibat optimasi adalah sebesar 62,08 %.

5.2 Saran

Beberapa saran yang dapat diajukan sehubungan dengan penelitian ini diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Perlunya dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh korosi eksternal yang terjadi terhadap keandalan sistem.
2. Metode yang digunakan dalam mencari keandalan sistem dapat divariasikan dengan menggunakan metode lain.
3. Perlu juga dilihat pengaruh kekuatan pipa terhadap beban lingkungan yang mungkin terjadi pada pipa untuk mengetahui tingkat keandalannya.
4. Perlu dipertimbangkan kekuatan pipa setelah optimasi terhadap *buckling*.

DAFTAR PUSTAKA

- American National Standards Institute. 1987. **ANSI B 16.9: Carbon Steel Pipe Fittings**. New York
- American Society of Mechanical Engineers. 2002. **ASME B31.4: Pipeline Transportation System for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids**. New York.
- American Society of Mechanical Engineers. 1991. **ASME B31.G: Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines**. New York.
- Ang, H. S. dan Tang, W. H. 1985. **Probability Concepts In Engineering Planning And Design**. New York : John Wiley.
- Baker M.J. dan Wyatt,T.A, 1979. "Methods of Reliability Analysis for Jacket Platform". **Journal of Behaviour of Offshore Structures**. London.
- Bea, R. 2003. "Reliability Based Fitness-for-Service Assesment of Corrosion Defects Using Different Burst Pressure Predictors and Different Inspection Techniques". **Proceedings of OMAE03 22nd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering**. Cancun, Mexico, OMAE2003-37487.
- Huang, Y. dan Ji, D. 2008. "Experimental Study on Seawater-Pipeline Internal Corrosion Monitoring System". **Journal of Sensors and Actuators B: Chemical**. Vol. 135 : 375-380.
- Joint Operating Body Pertamina-Petrochina East Java. 2004. **Sukowati-Mudi Pipeline Project**. Tuban
- Joint Operating Body Pertamina-Petrochina East Java. 2009. **Sukowati-Mudi Pipeline Project**. Tuban

- Krstajic, N. dan Jovic, V. 1992. "Impressed Current Cathodic Protection". **International Progress Journal**. Vol. 39, No.419 : 279-285.
- Liu, H. 2005. **Pipeline Engineering**. Boca Raton: Lewis Publishers CRC Press Company.
- Porter, L.K. 1994. **A Handbook for Underwater Inspector**. Aberdeen: ORCA Ltd.
- Rao, S.S. 1984. **Optimization Theory and Application**. Willey Eastern Limited, 2nd New Delhi, India.
- Rosyid, D.M. 2007. **Pengantar Rekayasa Keandalan**; Airlangga University Press; Surabaya.
- Rothfarb, B. Frank, H. Rosenbaum, D.M. Steiglitz, K. dan Kleitman, D.J. 1969. "Optimal Design of Offshore Natural-Gas Pipeline Systems". **Journal of Operations Research**. Vol. 18, No. 6 : pp. 992-1020.
- Semedi, D.W. 2005. "Optimasi Pipa Bawah Laut pada Lapangan Produksi Gas Tunu Kalimantan Timur". **Tugas Akhir**. Jurusan Teknik Kelautan-FTK, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Siregar, S. Arsegianto. Soewono, E. Surjadi. Widiastri, I.S. dan Ariani, N. 2003. "Optimisasi Desain Pipa Transmisi Gas:Kasus Jaringan Sumatera Selatan – Jawa Barat". **IATMI Journal**. Vol.- : 57.
- Srikanth, S. Sankaranarayanan, T.S.N. Gopalakrishna, K. Narasimhan, B.R.V. Das, T.V.K. dan Das, S. K. 2004. "Corrosion in a Buried Pressurised Water Pipeline". **Engineering Failure Analysis Journal**. Vol.12 : 634-651.
- Supomo, H. 2003. **Buku Ajar Korosi**. Surabaya: Jurusan Teknik Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

- Teddy. 2004. Piping, Valves and Fittings. **Journal of the Indonesian Oil and Gas Community**. Komunitas Migas Indonesia. Jakarta.
- Teixeira, A.P. Soares, C.G. Netto, T.A dan Estefen, S.F. 2006. "Reliability of Pipelines with Corrosion Defects". **Journal of Pressure Vessel and Piping**. Vol. 85 : 228-237.
- Thoft-Chirstensen, P. dan Murotsu, Y. 1986. **Application of Structural Reliability Theory**. Springer – Verlag. Berlin.
- Thohiroh, L.H. 2005. "Perancangan Pipa Bawah Laut South Sumatra-West Java (SSWJ) Phase II". **Tugas Akhir**. Jurusan Teknik Kelautan-FTK, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- United States Departement of Transportation. 2004. "Pipeline Statistics". **Office of Pipeline Safety**. <http://ops.dot.gov/stats.htm>

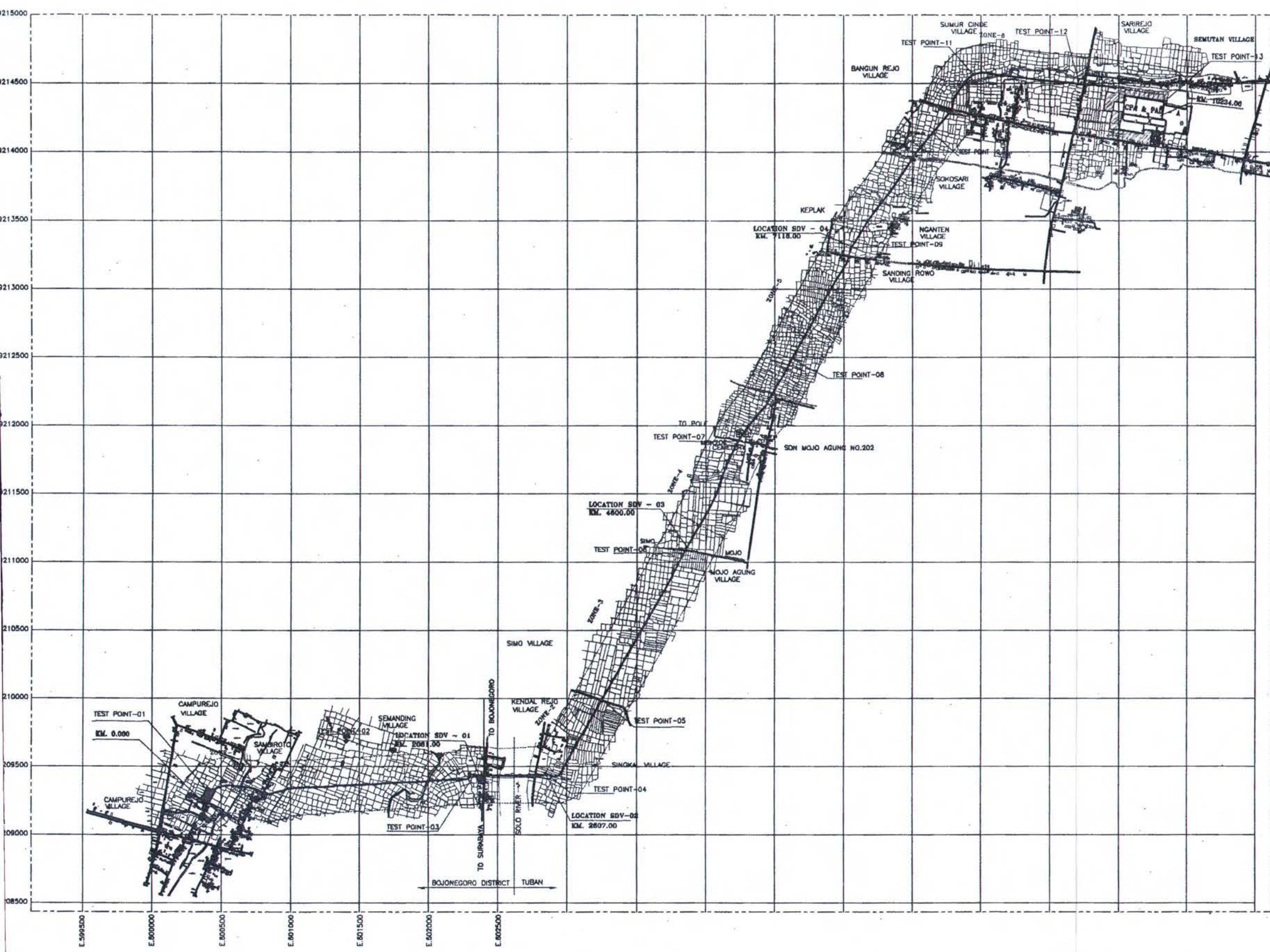


ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

LAMPIRAN A

Piping and Instrumentation Diagram of Sukowati-CPA

Pipeline System



LEGEND

- : PIPELINE ZONE LIMITS
- - - : CORRIDOR 200 M
- : PIPELINE
- == : CORRIDOR 5 M
- == : ROAD
- == : COUNTRY ROAD
- ⌒ : BRIDGE
- ~ : RIVER FLOW
- : IRRIGATION CANAL
- : BOUNDARY VILLAGE
- : PROPERTY LIMITS BLOCK STATION VALVE
- ▨ : RICE FIELD
- : HOUSE
- ⊙ : THERMAL EXPANSION STRESS ANALYSIS 0 - 8 M
- ⊙ : THERMAL EXPANSION STRESS ANALYSIS 0 - 3 M
- : SIGN BOARD
- : TEST POINT
- ⊕ : BM (MSK)

pipeng-eng. tuban
@Job ppej - pps.com



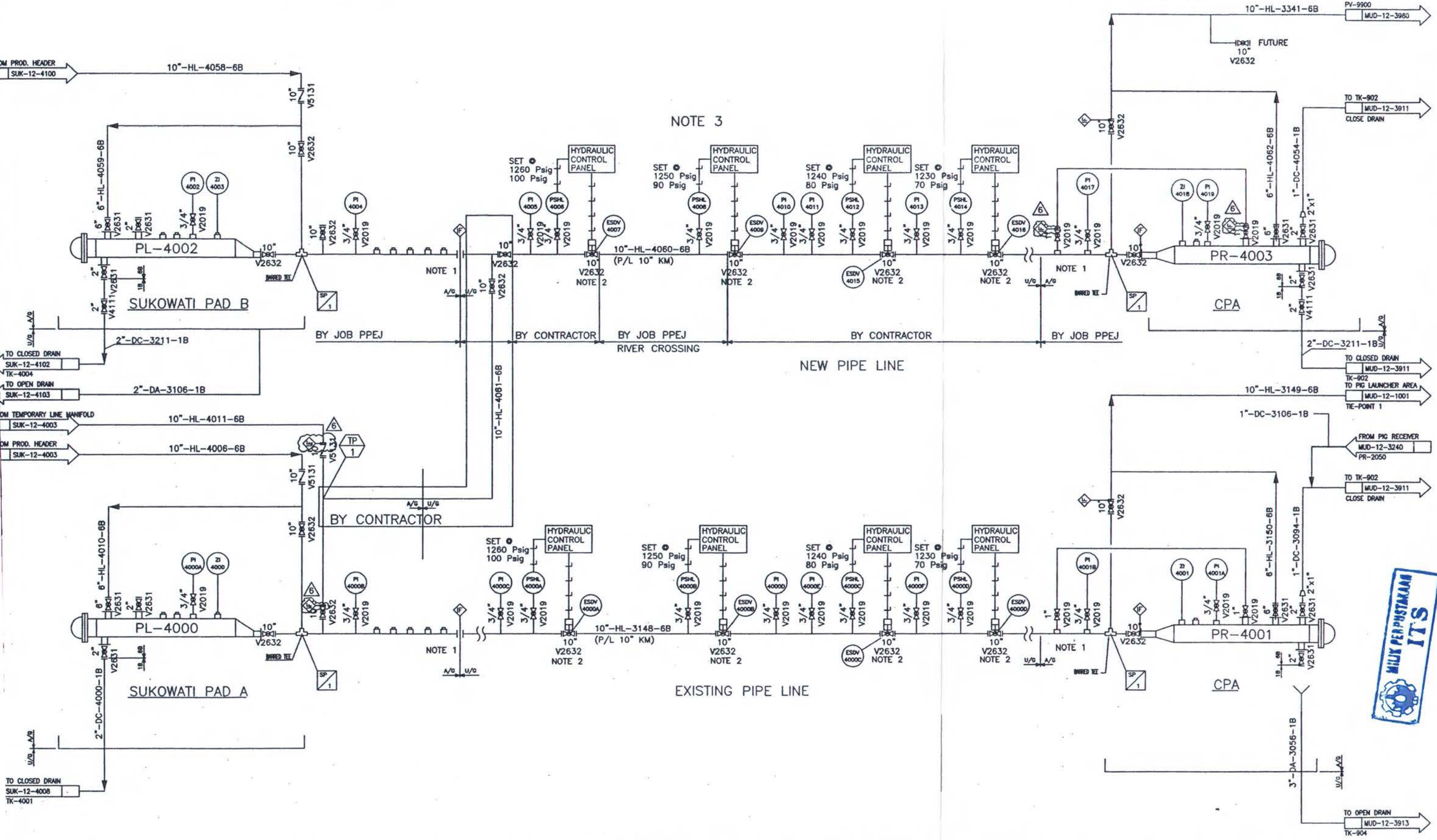
EXPLOITATION AND PRODUCTION DEPARTMENT						
TUBAN						
CLIENT APPROVAL		SCALE	By Dwg	CHECKED	SR	
PROD. DEPT. APPROVAL		SIZE	A.1	DATE		
EPD APPROVAL		DRAWN	MDH	ENG	SR	
		DATE	25/07/06	DATE		

JOINT OPERATING BODY
 PERTAMINA-PETROCHINA EAST JAVA
 MUDI FIELD

SUKOWATI - CPA PIPELINE ROUTE
CORRIDOR 200 M

PL-4000/4002
 PIG LAUNCHER
 DESIGN P/T : 1300 PSIG @ 250 °F
 SIZE : 12" OD. x 12'-0" L.

PR-4001/4003
 PIG RECEIVER
 DESIGN P/T : 1300 PSIG @ 250 °F
 SIZE : 12" OD x 21'-0" L.



NOTE 3

NOTE 1

NOTE 2

NOTE 1

NOTE 2

NEW PIPE LINE

EXISTING PIPE LINE



4	05-05-08	ISSUED FOR REVIEW	AM	MBR	MBR
3	09-04-08	AS BUILT	AGS	MBR	MBR
2	12-01-07	AS-BUILT	TR	MBR	MBR
1	26-11-04	AS-BUILT	SNT	DT	DT
0	01-06-04	IFC & HAZOP COMMENTS	SNT	DT	DT
C	26-03-04	RE-ISSUED FOR APPROVAL	SNT	DT	DT
6	19-09-08	ISSUED FOR APPROVAL	AM	MBR	MBR
5	05-06-08	ISSUED FOR APPROVAL	AGS	MBR	MBR

TUBAN PROJECT ENGINEERING			
JAKARTA			
PROJ. MGR.	ML	SCALE	NTS
PROJ. ENG.	SR	SIZE	A1
APPROVAL	BY	DATE	DATE
		26-11-04	26-11-04
		DATE	DATE
		26-11-04	26-11-04

JOINT OPERATING BODY
 PERTAMINA-PETROCHINA EAST JAVA
 SUKOWATI FIELD

P & I DIAGRAM
 SUKOWATI - MUDI PIPE LINE
 PL-4000/4002 & PR-4001/4003

INSULATION FLANGE.
 VE STATION AT SEMANDING, KENDAL, MOJOAGUNG, NGANTEN.
 D 3



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

LAMPIRAN B

**Tabel Data Inspeksi *Sukowati-CPA Pipeline* Tahun 2007
dan Tahun 2009**

TABEL DATA INSPEKSI SUKOWATI-CPA PIPELINE TAHUN 2009 (mm)

LOCATION	DATE	AVERAGE NPS WT	DIRECTION	POINT												LEAST
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
BV#2 KENDAL REJO	17/09/2009	15.09	3	15.01	14.46	14.54	15.84	16.39	16.5	14.4	14.55	15.45	16.33	16.53	15.58	14.4
		15.09	6	15.7	15.09	14.95	15.42	15.46	15.09	15.21	14.06	15.35	15.42	15.47	15.04	14.06
		15.09	9	15.5	16.03	15.87	15.66	14.49	14.29	15.9	16	15.25	14.46	14.49	14.93	14.29
		15.09	12	12.2	14.95	15.15	15.36	14.7	14.76	14.9	15.09	15.46	14.78	14.58	15.86	12.2
BV#3 MOJO AGUNG																
ELBOW A	22/09/2009	15.09	3	16.34	16.48	15.66	15.45									15.45
		15.09	6	18.68	17.82	17.33	17.67									17.33
		15.09	9	16.99	16.44	16.57	15.87									15.87
		15.09	12	15.83	15.19	14.81	14.55									14.55
ELBOW B	22/09/2009	15.09	3	16.34	16.47	16.28	16.24									16.24
		15.09	6	17.6	17.66	17.64	17.48									17.48
		15.09	9	15.05	16.29	15.11	15.51									15.05
		15.09	12	14.47	14.7	15.33	14.45									14.45
POSITION	22/09/2009	15.09	3	14.93	15.44											14.93
		15.09	6	14.99	15.45											14.99
		15.09	9	15.7	15.49											15.49
		15.09	12	14.8	14.9											14.8
BV# 4 SOKOSARI	10/9/2009	15.09	3		16.33	16.39	16.63	15.3	16.58	16.79	14.23	15.96				14.23
		15.09	6					15.48								15.48
		15.09	9		16.55	15.44	16.47	15.6	15.77	16.15	16.5	15.5				15.44
		15.09	12	15.15	15.35	14.92	15.12	15.25	15.52	14.92	14.37	15.06	15.22			14.37

TABEL DATA INSPEKSI SUKOWATI-CPA PIPELINE TAHUN 2007 (mm)

LOCATION	DATE	AVERAGE NPS WT	N DIRE CTIO	POINT																		LEAST	
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
ELBOW C	11/3/2007	15.06	3	14.77																	14.77		
		15.06	6	16.45																			16.45
		15.06	9	15.33																			15.33
		15.06	12	13.92																			13.92
ELBOW D	11/3/2007	15.06	3	14.87																		14.87	
		15.06	6	16.58																			16.58
		15.06	9	15.24																			15.24
		15.06	12	13.83																			13.83
MANIFOLD SUKOWATI	3/3/2007	15.06	3	15.44	15.19	15.29	15.44															15.19	
		15.06	6																				
		15.06	9	15.09	15.08	14.99	15.24																14.99
		15.06	12	13.76	14.03	14.56	14.71																13.76
MANIFOLD SUKOWATI	21/3/2008	15.06	3	15.08	15.23	15.26	15.24	15.12	15.34	14.79	14.03	14.3	15.56	16.25	15.14	15.47	15.25	15.8	11.79	11.66	11.41	11.41	
		15.06	6	17	16.85	17.12	16.83	15.3	15.89	15.04	15.37	15.17	15.24	14.88	15.29	15.25	15.61	15.34	12.77	12.35	11.07	11.07	
		15.06	9	15.85	15.84	16.97	16.13	15.07	15.51	15.08	14.71	15.02	15.72	15.83	15	15.32	15.17	15.57	11.95	11.75	11.86	11.75	
		15.06	12	14.16	14.21	14.29	14.32	15.14	15.13	15.06	15.34	15.59	15.43	15.56	15.3	15.66	15	15.66	11.51	11.43	11.13	11.13	



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

LAMPIRAN C

Tabel 3-3 *ASME B31G-1991*



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

LAMPIRAN D

Lembar Asistensi



NAMA: Septian Muh. Yusuf

NRP: 4305 100 055

JUDUL TUGAS AKHIR: Optimasi Desain Elbow Pipe pada Jaringan Pipa Transportasi Migas Milik Joint Operating Body Pertamina-Petrochina East Java (JOB P-PEJ) Tuban dengan Berbasis Keandalan

LEMBAR ASISTENSI TUGAS AKHIR

No	Tanggal	Penjelasan Pembimbing	Tanda Tangan
	4/11/2009	- Data bahan - jenis elbow dan peredam	
	8/11/09	Hitung momen dan 2 gaya pd elbow	
	12/11/09	→ kecepatan fluida masuk dan keluar elbow velocity → Analis Data Konsultasi M.T	
	14/11/09	OK, t	
	3/12/09	- Persepsi akan perilaku p. lobby	
	11/1/10	→ $\beta = 2$ → Cari t agar $C_e \geq 1$ minimum	
	12/1/10	Work	
	18/1/10	→ Kesimpulan	

BIODATA PENULIS



Septian Muhammad Yusuf lahir di RS PKU Muhammadiyah Delanggu pada hari Jumat Wage, tanggal 28 Oktober 1988 tepat pada saat umat Islam merayakan hari raya mereka yakni Sholat Jumat. Putra bungsu dari tiga bersaudara yang kesemuanya laki-laki pasangan Bapak Musdihatno dan Ibu Nasokah Sulistyowati. Menempuh pendidikan formal dimulai dari jenjang taman kanak-kanak di TK Pertiwi Sribit II, Delanggu selama 1 tahun.

Selanjutnya melanjutkan ke jenjang sekolah dasar di SDN Sribit I, Delanggu selama 6 tahun. Kemudian dilanjutkan ke SLTPN I Delanggu selama 3 tahun dan kemudian selama 2 tahun melanjutkan sekolah ke SMUN I Klaten. Tahun 2005 mengikuti SPMB dan diterima masuk kuliah di perguruan tinggi tercinta Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya di Jurusan Teknik, Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan. Terdaftar dengan Nrp 4305 100 055, di jurusan ini Saya mengambil Bidang Keahlian Perancangan dan Produksi Bangunan Lepas Pantai.

Selama menjalani masa perkuliahan di kampus tercinta, Saya tidak hanya aktif berkuliah saja, namun juga aktif di beberapa kegiatan seminar maupun pelatihan. Beberapa kegiatan seminar dan pelatihan yang diikuti diantaranya adalah Latihan Keterampilan Manajemen Mahasiswa Pra Tingkat Dasar (LKMM Pra-TD) 2005, Latihan Keterampilan Manajemen Mahasiswa Tingkat Dasar (LKMM TD) 2006, Seminar Peran Riset Kelautan dalam Pemanfaatan Potensi Sumber Daya Kelautan di Indonesia 2008, *Workshop Offshore Technology* 2008, *Outbound Training Plus FTK ITS* 2008, peserta Gerak Jalan Perjuangan Mojokerto-Surabaya 2008, *First Aid Training by Medical Crew PTG Grenyang* 2009, *Document Control Training by PTG Grenyang* 2009, *Quality Awareness Training by PTG Grenyang* 2009.

Selain beberapa kegiatan seminar dan pelatihan Saya juga pernah aktif dalam beberapa organisasi yaitu: sebagai Staff Departemen Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa (PSDM) Himatekla 2007/2008, kemudian sebagai Staff

Departemen Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa (PSDM) Himatekla
2008/2009. Juga pernah aktif dalam kegiatan ekstra kampus di Kesatuan Aksi
Mahasiswa Muslim Indonesia (KAMMI) Komisariat Sepuluh Nopember.

email:

joseph@oe.its.ac.id

phone:

+628112632983