



UNIVERSITAS INDONESIA

**PREDIKSI LAJU KOROSI DAN ESTIMASI UMUR
PIPA PENYALUR PANAS BUMI DENGAN TEKNIK
REGRESI NONLINIER**

TESIS

**ULUL AZMI
08 06 42 28 26**

**FAKULTAS TEKNIK
PASCASARJANA TEKNIK INDUSTRI
DEPOK
DESEMBER 2010**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PREDIKSI LAJU KOROSI DAN SISA UMUR
PIPA PENYALUR PANAS BUMI DENGAN TEKNIK
REGRESI NONLINIER**

TESIS

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Magister Teknik**

**ULUL AZMI
08 06 42 28 26**

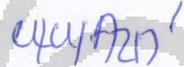
**FAKULTAS TEKNIK
PASCASARJANA TEKNIK INDUSTRI
DEPOK
DESEMBER 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Ulul Azmi

NPM : 0806422826

Tanda Tangan : 

Tanggal : 22 Desember 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh

Nama : Ulul Azmi
NPM : 0806422826
Program Studi : Pascasarjana Teknik Industri
Judul Skripsi : Prediksi Laju Korosi dan Estimasi Sisa Umur
Pipa Penyalur Panas Bumi dengan Teknik Regresi
Nonlinier

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Pascasarjana Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Ir. Sri Bintang Pamungkas, MSISE., Ph.D

Pembimbing II : Arian Dhini, ST, MT

Penguji : Ir. Erlinda Muslim, MEE.

Penguji : Ir. Amar Rachman, MEIM.

Penguji : Ir. M. Dachyar, M.Sc

Penguji : Ir. Dendi P. Isaac, MSIE

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 30 Desember 2010

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Rabbul ‘Alamin. Segala puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat rahmat Allah SWT, saya dapat menyelesaikan tesis ini. Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik Departemen Teknik Industri pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya sangat menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan tesis ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan tesis ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan rasa terima kasih yang tulus ikhlas dan mendalam kepada :

- (1) Ir. Sri Bintang Pamungkas MSISE, Ph. D dan Arian Dhini, ST, MT, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan tesis ini;
- (2) Ir. Fauzia Dianawati, M.Si. baik sebagai sekretaris Departement Teknik Industri Universitas Indonesia maupun sebagai pembimbing yang telah menyediakan waktu untuk memberikan pengarahan thesis maupun pendidikan secara umum.
- (3) Bapak Ibu Dosen dan Staf Departemen TI-UI yang di Salemba dan Depok, atas bantuan dan kerjasamanya dalam menempuh studi selama dua tahun ini;
- (4) Sahabat Widodo Slamet MT dan keluarga yang telah memberikan bantuan moral maupun material selama penulis mengerjakan tesis;
- (5) Sahabat Wayan Andrianata yang telah memberikan masukan-masukan, informasi journal dan dukungan moral selama penulis mengerjakan tesis ini ;
- (6) Seluruh keluarga yang telah memberikan dukungan yang luar biasa baik dalam bentuk moral, fasilitas dan doa selama penulis menempuh pendidikan di Program Pasca Sarjana Teknik Industri Universitas Indonesia;
- (7) Seluruh teman-teman S2 TI-UI Angkatan 2008 untuk Salemba dan Depok, yang selalu bersama-sama di saat suka dan duka selama dua tahun;
- (8) Bapak Hasanudin, yang telah memberikan dukungan moral sehingga penulis membuat keputusan untuk mengambil pendidikan Pasca Sarjana di Departemen Teknik Industri Universitas Indonesia;

- (9) Seluruh sahabat, kerabat dan teman-teman yang tidak bisa disebutkan satu persatu atas dukungan, bantuan dan kerjasamanya yang telah diberikan.

Akhir kata, saya berharap semoga Allah SWT, Tuhan Yang Maha Pengasih dan Maha Penyayang berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah berpartisipasi dan memberikan bantuan baik itu yang berupa moril dan materil. Dimohon adanya masukan, kritik, saran demi tindak lanjut pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi serta dalam rangka menuju kebenaran yang hakiki. Semoga tesis ini bisa membawa manfaat bagi pengembangan ilmu, dan yang lebih penting lagi adalah bisa bermanfaat terhadap kehidupan antar sesama.

Terimakasih dan Salam.
Wallahu a'lam bissawab.

Depok, 22 Desember 2010

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ulul Azmi
NPM : 0806422826
Program Studi : Pascasarjana
Departemen : Teknik Industri
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Tesis

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

Prediksi Laju Korosi dan Estimasi Sisa Umur Pipa Penyalur Panas Bumi dengan Teknik Regresi Nonlinier.

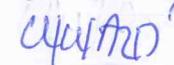
Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini, Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 22 Desember 2010

Yang menyatakan


(Ulul Azmi)

ABSTRAK

Nama : Ulul Azmi
Program Studi : Pascasarjana Teknik Industri
Judul : Prediksi Laju Korosi dan Estimasi Sisa Umur Pipa Penyalur Panas Bumi dengan Teknik *Regresi Nonlinier*

Pipa penyalur panas bumi mengalami korosi yang disebabkan oleh ion atau senyawa yang terlarut dalam uap dan kondensat yang menjadi servisnya. Ion atau senyawa tersebut antara lain adalah karbondioksida, oksigen, amoniak, pH, dan klorida. Prediksi pertumbuhan laju korosi pada pipa penyalur panas bumi perlu dilakukan untuk memberikan reliabilitas dan keamanan yang lebih baik. Untuk memperoleh prediksinya, dalam tesis ini dilakukan analisa *multivariate* menggunakan *teknik regresi Nonlinier*. Pengurangan ketebalan pipa diambil sebagai variabel tak bebas dan konsentrasi ion atau senyawa penyebab korosi sebagai variabel bebas. Model yang dipakai untuk analisisnya adalah $\Delta y = \kappa t^v$ dimana Δy adalah kehilangan ketebalan, “ t ” waktu paparan, dan κ, v berturut-turut merupakan parameter korosi yang berkontribusi secara linier dan parameter korosi yang berkontribusi secara ekponensial. Data *case study* didapatkan dari rekaman operasi dan maintenance pipa penyalur panas bumi. Hasil analisa menunjukkan pipa penyalur mengalami pengurangan ketebalan yang signifikan yang disebabkan oleh klorida dan pH. Klorida dan pH merupakan parameter-parameter korosi yang berkontribusi linier.

Kata kunci : pipa penyalur, panas bumi, *Regresi Nonlinier*, prediksi, korosi, pH, klorida

ABSTRACT

Name : Ulul Azmi
Study Program : Postgraduate Industrial Engineering
Title : Corrosion Rate Prediction and remaining life estimation of Geothermal Pipeline using Nonlinear Regression

Geothermal pipeline undergoes corrosion caused by ions or compounds dissolved in its service, steam and condensate. Ion or compound dissolved in the steam meanwhile carbon dioxide, oxygen, ammonia, pH, and chloride. Corrosion rate analysis is necessary to be conducted to provide corrosion rate prediction for reliable and safe operation reference. To obtain the predictions, in this thesis, multivariate analysis was conducted using nonlinear regression techniques. Loss of thickness was taken as the dependent variable and the concentration of ions or compounds cause corrosion was taken as independent variables. The model used for analysis is $\Delta y = \kappa t^v$ where Δy is the loss of thickness, "t" time exposure, κ and v are the corrosion proportionality and exponent parameters respectively. Case study was conducted on geothermal plant and the data was obtained from its operation and maintenance records. Results of analysis show that the pipeline have a positive impact in thickness loss caused by the chloride and pH. Chloride and pH are parameters that contribute linearly and exponentially.

Keywords: pipeline, geothermal, Nonlinear Regression, predictive, corrosion, pH and chloride.

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	i
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
KATA PENGANTAR	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	vii
ABSTRAK	viii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Diagram Keterkaitan	3
1.3 Rumusan Permasalahan	4
1.4 Tujuan Penelitian, Hasil dan Manfaat	4
1.5 Ruang Lingkup Penelitian	5
1.6 Langkah-langkah dan Metodologi Penelitian	6
1.6.1 Langkah-langkah Penelitian	6
1.6.2 Metodologi Penelitian	7
1.7 Sistematika Penulisan	9
2. KERANGKA TEORITIS DAN MODEL	11
2.1 Pengaruh Korosi terhadap Umur Pipa Penyalur	11
2.2 Hipotesa	12
2.3 Metodologi	13
2.3.1 Telaah Literatur Mengenai Korosi dan Pemodelannya	13
2.3.1.1 Korosi pada Peralatan yang Terbuat dari Logam	13
2.3.1.2 Metode Romanoff	14
2.3.1.3 Metode Katano	15
2.3.1.4 Metode F. Caley	16

2.3.2	Teori Statistik untuk Pengolahan Data	17
2.3.2.1	Regresi	17
2.3.2.2	Multiple Linear Regression	19
2.3.2.3	Regresi Nonlinier	20
2.3.3	Estimasi Parameter Regresi Nonlinier	21
2.3.3.1	Kuadrat Terkecil Dalam Kasus Nonlinier	21
2.3.3.2	Algoritma Gauss Newton, Marquadt Compromise dan Levenberg-Marquadt	23
2.3.4	Pengujian Regresi dan Parameter Statistik Dalam Multiple Regression	24
2.3.5	Model Matematis untuk Prediksi Korosi Pipa Penyalur Panas Bumi	26
2.3.5.1	Material Pipa Penyalur	29
2.3.5.2	Pengukuran Ketebalan Pipa Penyalur	29
2.3.5.3	Pengukuran Variabel Servis Pipa Penyalur	29
2.3.5.4	Rata-rata Data Variabel Servis Pipa Penyalur sebagai input Regresi	31
2.3.5.5	Rata-rata Kehilangan Ketebalan Sebagai Variabel Input Variabel Tak Bebas dan Batas-batas Segmen Pipa penyalur	31
3.	DATA DAN PERHITUNGAN LAJU KOROSI	33
3.1	Profil Perusahaan <i>Case Study</i>	33
3.2	Data Ketebalan Pipa Penyalur	35
3.3	Data Ion dan Senyawa-senyawa Karbondioksida, Sulfida, Amoniak, dan pH	41
3.4	Batasan Segmen Pipa Penyalur dan Karakter Sumur	43
3.5	Pengolahan Data	43
3.5.1	Uji Normalitas Variabel Servis Pipa Penyalur	44
3.5.2	Transformasi <i>Z-score</i>	45
3.5.3	Uji Multikolinieritas dan Uji Autokorelasi	46
3.5.4	Korelasi Variabel Tak Bebas Dengan Variabel Bebas	47
3.5.5	Estimasi Parameter dan Persamaan Regresi Penelitian	47

3.5.6 Perubahan Laju Penipisan Dinding Pipa Penyalur Terhadap Waktu dan Perubahan Konsentrasi Cl dan pH	49
4. ANALISA HASIL DAN VALIDASI	50
4.1 Korelasi Bivariate	50
4.2 Uji Normalitas	50
4.3 Uji Multikolinieritas dan Autokorelasi	50
4.4 Distorsi	51
4.5 Pengujian Kombinasi Variabel-variabel sebagai Variabel Linier dan Eksponensial	51
4.6 Interpretasi Parameter	51
4.7 Validasi Parameter dan Daerah Kerja	53
4.8 Laju Korosi	53
4.9 Perkiraan Umur Pipa Penyalur	54
4.10 Sifat Asam atau Garam Servis Pipa Penyalur Panas Bumi	58
4.11 Pedoman Pengembangan Sistem Safety dan Integrity Perusahaan <i>Case Study</i>	58
5. KESIMPULAN DAN SARAN	60
5.1 Kesimpulan	60
5.2 Saran	61
DAFTAR REFERENSI	62

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Tabel Durbin Watson	26
Tabel 2.2	Parameter yang Diinvestigasi, Definisi dan Metode Analisisnya	30
Tabel 3.1	Data Ketebalan Pipa Penyalur Sumur 28, April 2009	35
Tabel 3.2	Data Ketebalan Pipa Penyalur Sumur 7, April 2009	35
Tabel 3.3	Data Ketebalan Pipa Penyalur Sumur 9, April 2009	36
Tabel 3.4	Data Ketebalan Pipa Penyalur Sumur 28, Mei 2008	36
Tabel 3.5	Data Ketebalan Pipa Penyalur Sumur 9, Mei 2008	37
Tabel 3.6	Data Ketebalan Pipa Penyalur Sumur 7, Mei 2008	37
Tabel 3.7	Data Ketebalan Pipa Penyalur Sumur 9, November 2008	38
Tabel 3.8	Data Ketebalan Pipa Penyalur Sumur 28, November 2008	38
Tabel 3.9	Data Ketebalan Pipa Penyalur Sumur 7, November 2008	39
Tabel 3.10	Data Rata-rata Pengurangan Ketebalan Pipa, Rata-rata Konsentrasi Senyawa Penyebab Korosi, dan Umur Pipa Penyalur Saat Pengukuran	40
Tabel 3.11	Data Konsentrasi Cl, H ₂ S dan pH di Pipa Penyalur Sumur 7	41
Tabel 3.12	Data Konsentrasi Cl, H ₂ S dan pH di Pipa Penyalur Sumur 28	41
Tabel 3.13	Data Konsentrasi Cl, H ₂ S dan pH di Pipa Penyalur Sumur 9	41
Tabel 3.14	Data dan Statistiknya	43
Tabel 3.15	Data Hasil Uji Normalitas	44
Tabel 3.16	Z-Score Data Variabel Servis Pipa Penyalur	44
Tabel 3.17	Hasil Uji Korelasi Variabel-variabel HCl, H ₂ S dan pH	45
Tabel 3.18	Hasil Uji Autokorelasi Variabel-variabel Bebas	46
Tabel 3.19	Korelasi Bivariate Variabel	46
Tabel 3.20	Estimasi Parameter	48
Tabel 4.1	Perkiraan Sisa Ketebalan yang Diizinkan untuk Operasi	55
Tabel 4.2	Perkiraan Umur Pipa Penyalur Case Study	55

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Diagram Keterkaitan	3
Gambar 1.2	Diagram Alir Metoda Penelitian	8
Gambar 2.1	Gambar Potongan Pipa Penyalur	28
Gambar 2.2	Gambar Penampang Melintang Pipa Penyalur	28
Gambar 3.1	Tipikal Sebuah Siklus Geothermal	33
Gambar 3.2	Siklus Produksi Uap Kilang Case Study	34
Gambar 3.3	Grafik Pengurangan Ketebalan Pipa terhadap Waktu	49
Gambar 4.1	Grafik Pengurangan Ketebalan Dinding Pipa Penyalur Sumur-9 Terhadap Waktu Berdasarkan Plot Persamaan 3.1	52
Gambar 4.2	Grafik Pengurangan Ketebalan Dinding Pipa Penyalur Sumur-7 Terhadap Waktu Berdasarkan Plot Persamaan 3.1	53
Gambar 4.3	Prediksi Pengurangan Ketebalan Pipa Penyalur Sumur-7	56
Gambar 4.4	Prediksi Pengurangan Ketebalan Pipa Penyalur Summur-9	56
Gambar 4.5	Prediksi Sisa Umur Pipa Penyalur Sumur-7 Terhadap Waktu (Tahun)	57
Gambar 4.6	Prediksi Sisa Umur Pipa Penyalur Sumur-9 Terhadap Waktu (Tahun)	57

1. PENDAHULUAN

Umur operasi pipa penyalur panas bumi sering berbeda dengan spesifikasi tekniknya disebabkan oleh korosi walaupun di setiap perancangan pipa penyalur selalu disediakan *Corrosion Allowance (CA)* untuk dipertimbangkan dalam perhitungan desain umur pipa penyalur.

Dihipotesakan, *Corrosion Allowance* tidak diperhitungkan dengan rinci karena penyebab korosinya sendiri, senyawa-senyawa dan ion-ion asam dan garam yang hadir bersama uap panas bumi, tidak dihitung dengan cermat.

Tesis ini melakukan penelitian tentang kontribusi setiap variabel penyebab korosi terhadap penipisan dinding pipa penyalur panas bumi. Diharapkan laju korosi dapat diprediksi dengan mengetahui konsentrasi variabel-variabel penyebab korosi. Selanjutnya prediksi umur pipa penyalur panas bumi yang lebih akurat dapat diperoleh.

1.1. Latar Belakang

Usia pipa penyalur panas bumi sering tidak sesuai dengan spesifikasi tekniknya disebabkan karena tidak adanya perhitungan yang rinci mengenai laju korosinya dalam perencanaan desain umurnya. Oleh sebab itu diperlukan prediksi laju korosi yang baik untuk mengestimasi umur pipa penyalur tersebut. Dengan prediksi yang baik ini akan diperoleh kepastian *integrity* pipa penyalur untuk beroperasi pada tingkat kepercayaan dan keselamatan yang diharapkan. Dengan demikian akan memberikan manfaat maksimal secara ekonomis maupun dari segi keamanannya berupa tercapainya tujuan investasi dan terhindarnya kecelakaan kerja akibat penipisan pipa penyalur.

Laju korosi pada pipa penyalur panas bumi ditentukan oleh konsentrasi ion-ion dan senyawa-senyawa tertentu yang terlarut dalam servis pipa penyalur panas bumi. Ion-ion dan senyawa-senyawa dimaksud adalah oksigen, karbondioksida, amoniak, klorida, sulfida dan pH.

Diperlukan perhitungan kontribusi faktor-faktor penyebab korosi di atas secara kuantitatif dan terukur terhadap penipisan dinding pipa penyalur. Dengan perhitungan tersebut diperoleh laju korosi yang pada gilirannya dapat diketahui ketebalan dinding pipa sebagai fungsi waktu. Banyak cara yang bisa dilakukan

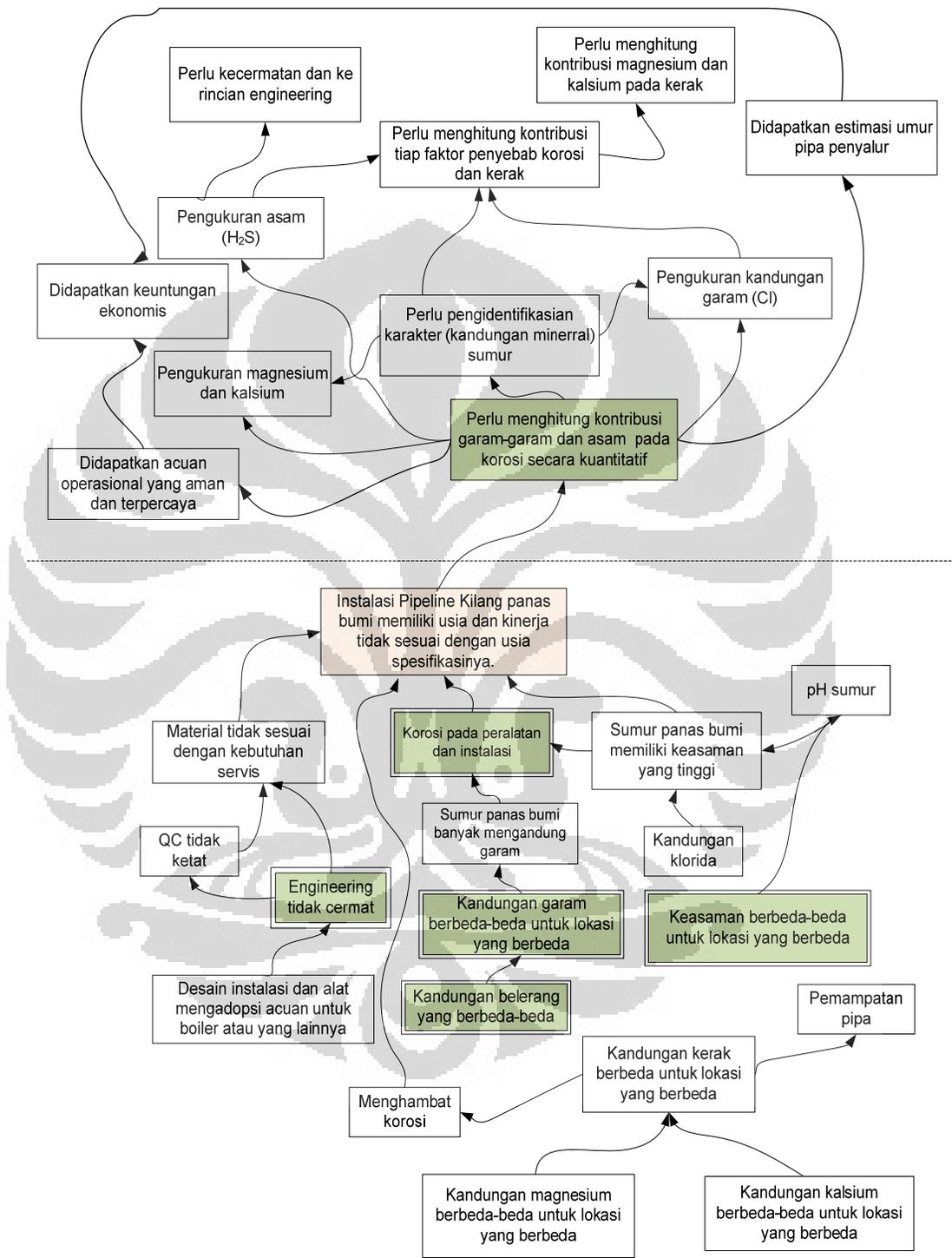
untuk menghitung laju korosi salah satunya adalah teknik regresi nonlinier yang menjadi pokok bahasan tesis ini.

1.2. Diagram Keterkaitan

Pusat permasalahan yang diangkat pada tesis ini adalah usia dan kinerja instalasi pipa penyalur (*pipeline*) kilang panas bumi yang tidak sesuai dengan usia dan kinerja spesifikasinya. Keterkaitan *backward* dapat dijelaskan melalui dua faktor kunci yang menjadi penyebabnya yaitu korosi dan kerak pada pipa penyalur tersebut. Kedua hal ini ditengarai dengan tidak diperhitungkannya dengan cermat pengaruhnya pada saat tahapan rekayasanya. Masalah lain yang cukup besar pengaruhnya adalah standar yang diacu dalam rekayasa ini, yaitu *ASME/ANSI B31.1 Power Piping* yang merupakan standar-standar yang umumnya dipakai dalam rekayasa sistem perpipaan untuk boiler. Kondisi servis perpipaan boiler berbeda dengan servis pipa penyalur panas bumi.

Tingkat korosi dipengaruhi secara langsung oleh tingkat kandungan senyawa atau ion yang terlarut dalam uap dan kondensat panas bumi, antara lain belerang, oksigen, karbondioksida, khlorida, dan pH. Disisi lain, dalam uap dan kondensat, yang disebut sebagai servis pipa penyalur (*pipeline*), hadir unsur-unsur magnesium dan kalsium. Kalsium dan magnesium menjadi penghambat korosi di satu sisi dan di sisi lain menjadi kerak yang menghambat transmisi uap dan kondensat tadi. Faktor-faktor penyebab korosi dan kerak tadi berbeda-beda besarnya pada lokasi atau sumur yang berbeda. Kedua hal di atas tidak secara rinci digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam desain umur dan kinerja dari *pipeline* (pipa penyalur) panas bumi.

Keterkaitan ke depan, perlunya kecermatan engineering dalam memperhitungkan kontribusi faktor-faktor yang telah dijelaskan dalam keterkaitan *backward*. Oleh sebab itu diperlukan pengukuran konsentrasi faktor-faktor yang menyebabkan korosi yaitu senyawa-senyawa belerang, khlorida, oksigen, karbondioksida dan pH, demikian juga faktor-faktor yang menghambat korosi dan penyebab kerak yang berupa unsur-unsur magnesium dan kalsium. Pengukuran dalam waktu yang panjang dengan perioda tertentu akan memperlihatkan karakter sumur panas bumi terkait dengan konsentrasi senyawa-senyawa dan unsur-unsur



Gambar 1-1. Diagram keterkaitan permasalahan

tadi. Keterkaitan semua faktor penyebab maupun penghambat korosi dapat ditunjukkan melalui sebuah diagram sehingga dengan mudah untuk dipahami. Diagram keterkaitan faktor-faktor tersebut diperlihatkan oleh gambar 1.1.

Dari konsentrasi senyawa dan atau ion penyebab korosi yang menjadi karakter ini dilakukan perhitungan koefisien kontribusinya dengan mengaitkannya dengan kehilangan ketebalan dinding *pipeline* (pipa penyalur) seiring berjalannya waktu operasionalnya. Evaluasi perhitungan dilakukan dengan teknik Regresi Nonlinier dengan ketebalan dinding *pipeline* sebagai *dependent variabel (DV)*, dan konsentrasi ion dan senyawa penyebab korosi sebagai *independent variable (IV)*.

1.3. Rumusan Permasalahan

Paparan yang disampaikan di bab 1.1 Latar Belakang di atas, mendorong permasalahan ini diangkat menjadi permasalahan tesis ini yang dapat diungkapkan dalam batasan-batasan berikut:

- a. Usia pipa penyalur tidak sesuai dengan spesifikasinya karena adanya faktor-faktor penyebab degradasi *integrity*-nya yang tidak diperhitungkan dengan cermat dalam mendesain umur *pipeline* (pipa penyalur), salah satunya adalah faktor korosi.
- b. Korosi pada *pipeline* (pipa penyalur) disebabkan oleh ion-ion dan senyawa-senyawa tertentu yang hadir bersama dengan uap panas bumi yaitu sulfida, klorida, amoniak, karbondioksida, oksigen dan pH.
- c. Senyawa-senyawa penyebab dan penghambat korosi memiliki kontribusi yang berbeda-beda sehingga memerlukan perumusan tertentu.

1.4. Tujuan Penelitian, Hasil dan Manfaat

Sebuah alat proses kilang atau instalasi yang terbuat dari logam atau paduan logam akan mengalami korosi akibat bersentuhan dengan senyawa-senyawa kimia tertentu. Berbagai jenis logam dan paduannya memiliki kecepatan atau laju korosi yang berbeda-beda, tergantung pada jenis logamnya maupun senyawa penyebabnya.

Pipa penyalur panas bumi (*pipeline*) yang terbuat dari baja karbon akan

mengalami korosi akibat bersentuhan dengan senyawa-senyawa kimia yang terkandung di dalam servis (uap dan kondensatnya) yang melaluinya.

Tesis ini dilakukan untuk mendapatkan prediksi pertumbuhan karat (korosi) pada *pipeline* (pipa penyalur) yang disebabkan oleh ion-ion dan senyawa-senyawa penyebab korosi yang hadir bersama uap panas bumi

Dengan prediksi ini dapat diperoleh laju pengurangan ketebalan pipa sebagai fungsi dari variabel-variabel penyebab korosi yang pada gilirannya dapat digunakan untuk memperkirakan sisa umur pipa yang merupakan komponen penting kilang panas bumi.

Manfaat langsung yang akan didapatkan adalah adanya sebuah acuan untuk rekayasa perencanaan pipa penyalur dan operasinya yang terpercaya dan aman. Hubungannya akan berkelanjutan kepada kontribusi ekonomisnya.

1.5. Ruang Lingkup Penelitian

Banyak hal yang menyebabkan umur pipeline tidak sesuai dengan spesifikasinya, misalnya kontrol kualitas yang buruk, standar yang diacu tidak spesifik untuk panas bumi, dan engineering yang tidak rinci dan cermat. Penelitian ini dibatasi hanya pada lingkup korosi yang terjadi pada pipa penyalur.

Untuk memperoleh prediksi laju korosi pada pipa penyalur maka dilakukan hal-hal berikut:

- a) Penghitungan kontribusi faktor-faktor penyebab korosi dilakukan dengan Teknik *Nonlinear Regression*.
- b) Melakukan pengukuran dan penghitungan secara kuantitatif kontribusi laju korosi setiap faktor penyebabnya.

Dalam melakukan pengukuran dan perhitungan di atas, tesis ini dibatasi oleh keadaan-keadaan di bawah ini.

1. Bahan pipa penyalur adalah *carbon steel API 5L Grade B atau A-53 Grade B* yang umum dipakai dalam pipa penyalur panas bumi di Indonesia.
2. Degradasi integrity pipeline (pipa penyalur) dibatasi hanya pada degradasi yang disebabkan korosi

3. Faktor penyebab korosi yang dihitung kontribusinya pada pertumbuhan karat (korosi) hanya ion-ion dan senyawa yang datanya tersedia dari hasil pengukuran perusahaan konsultan dalam rangka RKL/RPL dan UKL/UPL di perusahaan case study.
4. Akseptabilitas (*acceptability*) dari hasil ini hanya berdasarkan pada standard yang dicacu dalam rekayasa dan operasi pipa penyalur ini tanpa mempertimbangkan faktor keamanan (*safety factor*) yang dibuat oleh organisasi profesi yang berwenang membuat standard (*ASME/ANSI B31.1*).

Case study dilakukan di sebuah perusahaan kilang panas bumi. Kilang ini berumur sekitar 13 tahun dengan karakter laju korosi yang tinggi pada pipa penyalurnya.

1.6. Langkah-langkah dan Metodologi Penelitian

1.6.1. Langkah-langkah Penelitian

Langkah-langkah penelitian diawali dengan melakukan studi pustaka mengenai korosi dan statistik yang berhubungan dengan pokok permasalahan. Data diperoleh melalui pengukuran. Ada dua jenis pengukuran yaitu pengukuran ketebalan pipa, yang dilakukan secara berkala, dan pengukuran konsentrasi ion dan senyawa-senyawa penyebab korosi. Data yang diperoleh ini divalidasi melalui telaah prosedur pengukuran, dan kalibrasi alat ukur yang digunakan. Validasi juga dilakukan pada kualitas personal dengan melihat sertifikat kompetensi yang dimilikinya.

Korelasi antara pengurangan ketebalan pipa penyalur dengan faktor-faktor penyebab korosi diperleh dengan membuat model matematikanya. Model yang digunakan berupa model regresi nonlinier oleh F. Caley et.al. yang sebelumnya diaplikasikan pada kasus pipa penyalur minyak dan gas bumi.

Dari model matematis yang berupa regresi nonlinier ini diperoleh parameter-parameter berupa kontribusi faktor-faktor penyebab korosi pada pipa penyalur panas bumi. Solusi matematis diperoleh melalui bantuan perangkat lunak *SPSS versi 16.0*.

Secara garis besar, langkah-langkah ini dapat dirinci sebagai berikut:

- a) Melakukan studi pustaka untuk mendapatkan metoda statistik yang sesuai untuk penghitungan prediksi kontribusi banyak variabel pada pipa penyalur. Dari studi pustaka didapatkan teknik *Nonlinear Regression*
- b) Melakukan pengukuran ketebalan pipa pada perioda bulan yang memperlihatkan perubahan ketebalan yg terukur.
- c) Melakukan pengukuran data kandungan mineral penyebab korosi secara berkala
- d) Melakukan validasi data dengan menelaah prosedur pengukuran, pelakasna pengukuran dan kalibrasi alat ukur
- e) Pengolahan data dan penghitungan paramameter dilakukan dengan software SPSS versi 16.0

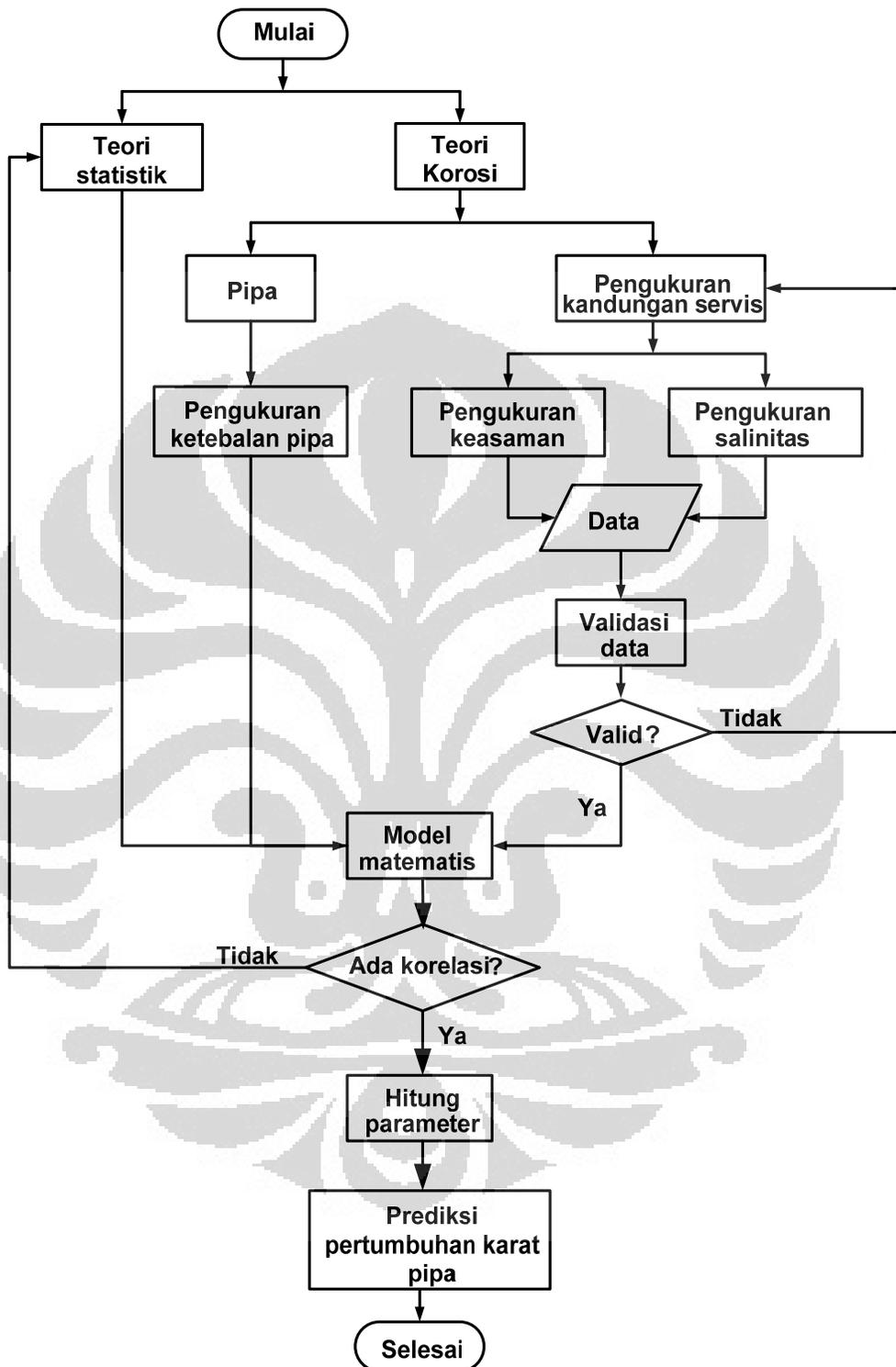
Urutan atau langkah-langkah metoda di atas dapat dilihat melalui diagram alir gambar 1.2. yang diletakkan pada halaman 8.

1.6.2. Metodologi Penelitian

Teknik yang dipergunakan dalam pemodelan masalah dan penghitungan kontribusi variabel penyebab korosi adalah teknik regresi nonlinier. Model ini merumuskan hubungan penipisan dinding pipa penyalur panas bumi sebagai variabel tak bebas dengan faktor-faktor penyebab korosi sebagai variabel bebas.

Teknik regresi nonlinier dipilih dengan pertimbangan faktor-faktor penyebab korosi bisa jadi berkontribusi linier dan mungkin pula berkontribusi eksponensial. Dengan memasukkan variabel-variabel faktor penyebab korosi yang berkontribusi linier dan eksponensial pada model regresi dalam suatu aturan kombinasi, dan melihat koefisien determinan R^2 terbesar, akan didapatkan sebuah model regresi yang sesuai atau *goodness of fit*. Koefisien determinasi R^2 adalah koefisien determinasi yang menunjukkan seberapa cocok garis regresi yang ditaksir.

Pengukuran variabel tak bebas, dan pengurangan ketebalan dinding pipa penyalur, dilakukan setiap enam bulan dengan menggunakan alat pengukur ketebalan ultrasonic. Pada rentang tersebut biasanya dinding pipa penyalur berkurang hingga satu millimeter. Alat ultrasonik yang digunakan mempunyai ketelitian



Gambar 1-2. Diagram alir metoda penelitian

hingga 0,1 milimeter. Selanjutnya, variabel bebas yaitu faktor-faktor penyebab korosi diukur setiap 4 bulan dengan mengukur konsentrasinya dalam air limbah (air terproduksi) sebelum diinjeksikan dalam sumur injeksi.

Data pengukuran variabel bebas dan tak bebas diregresikan dalam model regresi sehingga didapatkan persamaan regresi dan parameter-parameternya. Persamaan ini adalah persamaan yang umum yang dapat digunakan untuk menentukan penipisan dinding pipa penyalur dalam perioda tertentu dengan mengukur konsentrasi faktor penyebab korosi. Pada akhirnya, dapat diperoleh estimasi umur sebuah pipa penyalur panas bumi.

1.7. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan diawali dengan abstrak, diikuti dengan pendahuluan dan diakhiri dengan kesimpulan. Susunan selengkapnya adalah sebagai berikut:

- a) Pada bagian pertama dari sistematika penulisan akan ditempatkan abstrak dari tesis yang berisi ringkasan tentang penelitian dan hasilnya.
- b) Bab satu adalah pendahuluan berisikan latar belakang penulisan tesis, perumusan masalah, diagram keterkaitan masalah, tujuan penelitian, metodologi penelitian dan sistematika penelitian.
- c) Bab dua berisikan teori yang melandasi penyebab-penyebab korosi pada alat-alat pipeline (pipa penyalur) kilang panas bumi. Pada bab ini juga dibahas tentang teori-teori statistik khususnya *Multiple Regression* yang dipilih untuk pengolahan data penelitian ini. Selanjutnya profil perusahaan *case study* dipaparkan terkait dengan kondisi-kondisi korosi yang terjadi pada pipeline (pipa penyalur) perusahaan ini
- d) Bab tiga berisi tentang pengukuran dan pengumpulan data serta validasi data. Data yang telah divalidasi diolah menggunakan software SPSS versi 16.0. Dari sini akan didapatkan data korelasi antara pengurangan ketebalan pipeline (pipa penyalur) sebagai variabel tak bebas (*Dependent Variable/DV*) dan faktor faktor-faktor penyebab korosi sebagai variabel bebas (*Independent Variable/IV*). Korelasi ini adalah hasil setengah jadi untuk mendapatkan hasil akhirnya parameter dari persamaan keterkaitan

variabel tak bebas (*Dependent Variable/DV*) dan variabel bebas (*Independent Variable/IV*).

- e) Bab empat memuat pengolahan data dan analisa yang memberikan penjelasan tentang hasil yang telah didapatkan dari bab tiga
- f) Bab lima yang merupakan bab terakhir, berisi kesimpulan tesis dan rekomendasi berupa saran-saran untuk pihak yang berminat melanjutkan penelitian ini guna mendapatkan hasil yang lebih baik dari segi ketepatannya maupun keluasan cakupannya.



2. KERANGKA TEORITIS DAN PEMODELAN

Di dalam bab 2 ini, akan disampaikan terlebih dahulu teori-teori tentang korosi secara singkat ditinjau dari sisi kimiawinya. Setelah itu diuraikan pula model-model matematis, khususnya regresi, yang pernah digunakan peneliti-peneliti terdahulu dalam analisa korosi.

Teori statistik mengenai regresi disampaikan pada subbab berikutnya. Bagian ini terdiri dari teori mengenai Regresi, *Multiple Regression* dan Regresi Nonlinier. Di sini juga dijelaskan mengenai uji *goodness fit* suatu formula regresi, masalah-masalah pada regresi dan jalan keluarnya.

Model yang penulis gunakan untuk prediksi laju korosi dan estimasi umur pipa penyalur panas bumi dibahas pada bagian akhir dari bab ini, subbab 2.3.5. Model ini, yang penulis sebut *Metode F. Caley*, mengambil nama koordinator sekelompok peneliti yang merumuskannya, sebelumnya pernah diaplikasikan pada pipa penyalur minyak dan gas bumi dengan hasil yang sangat baik. Model ini penulis coba aplikasikan pada kasus pipa penyalur panas bumi yang mempunyai perbedaan-perbedaan pada penyebab korosi dan sumber korosinya yang berasal dari internalnya, servis pipa penyalur itu sendiri uap dan kondensat.

2.1. Pengaruh Korosi terhadap Umur Pipa Penyalur

Sering kali terjadi penyimpangan umur pipa penyalur panas bumi dari spesifikasi tekniknya. Penyimpangan yang dimaksud dapat bermakna umur operasi pipa penyalur lebih lama dari yang direncanakan atau dapat juga umur pipa penyalur lebih pendek dari yang direncanakan sebagaimana dinyatakan oleh spesifikasi tekniknya. Umur pipa penyalur yang lebih lama dari perencanaan berarti pemborosan penggunaan material sementara umur operasi pipa penyalur yang lebih pendek dari spesifikasinya, disamping bermakna pemborosan karena harus mengganti pipa penyalur tadi sebelum waktunya, juga memberikan resiko pada aspek keselamatan.

Usia pipa penyalur panas bumi mempunyai tingkat penyimpangan yang tinggi dari desainnya bila dinilai dari standar acuan yang umumnya dipakai, yaitu *ANSI B.31.1*. Standard ini secara khusus dibuat untuk sistem perpipaan boiler

yang walaupun servisnya uap juga, tetapi mempunyai karakter yang berbeda dengan uap panas bumi yang menjadi servis pipa penyalur panas bumi

Mineral-mineral yang terkandung di dalam air bersih, sebagai masukan dari boiler, dapat dikontrol dengan ketat sehingga usia dan kinerjanya juga dapat diestimasi dengan rinci. Tidak seperti halnya sistem perpipaan boiler, uap yang menjadi servis pipa penyalur panas bumi mengandung bermacam-macam ion dan senyawa-senyawa yang dapat menyebabkan korosi secara signifikan, dan senyawa ini tidak dapat/mudah dikontrol sebagaimana halnya senyawa pada pipa boiler.

Permasalahan yang ada pada sistem perpipaan panas bumi adalah seberapa cepat senyawa-senyawa penyebab korosi itu menggerus ketebalan pipa. Untuk memperoleh solusi permasalahan tersebut diperlukan sebuah model dan perumusan penghitungan kontribusi-kontribusi ion-ion dan senyawa-senyawa penyebab korosi tersebut secara kuantitatif dan rinci. Dalam membuat rumusan kontribusi faktor-faktor tadi, disamping besar (angka) kuantitatifnya, perlu juga diketahui apakah kontribusi tiap faktor tersebut bersifat linier atau eksponensial.

2.2. Hipotesa

Sistem penghasil panas bumi untuk pembangkit energi mempunyai berbagai komponen. Salah satu komponen yang penting adalah pipa penyalur panas bumi yang berisi uap dan kondensatnya. Pipa penyalur ini akan mengalami korosi sehingga umur pipa tidak sesuai dengan perencanaan yang dibuat.

Korosi pada pipa penyalur disebabkan oleh ion-ion dan senyawa-senyawa penyebab korosi yang terlarut dalam uap dan kondensat panas bumi. Ion-ion dan senyawa-senyawa tersebut adalah oksigen, karbondioksida, amoniak, sulfida, klorida dan pH.

Penipisan pada pipa penyalur akan mengurangi umur pipa penyalur karena ada batas minimum ketebalan pipa untuk menahan tekanan tertentu. Selisih ketebalan dinding pipa penyalur pada saat pertama kali dipasang dengan ketebalan minimum yang diperlukan untuk menahan tekanan uapnya disebut umur pipa penyalur. Umur ini tergantung pada laju korosi yang dialami oleh pipa penyalur tersebut.

Akan ditunjukkan, melalui pengukuran dan perhitungan laju korosi, bahwa umur pipa penyalur panas bumi tidak tepat sesuai dengan apa yang telah dirancang. Hal ini disebabkan oleh ketidakrincian dalam memperhitungkan kontribusi variabel penyebab korosi sebagaimana yang disampaikan di atas. Dan akan dibuatkan juga sebuah formula umum yang dapat menghitung laju korosi dengan memasukkan konsentrasi penyebab korosi pada formula regresi korosi.

2.3. Metodologi

Dari berbagai literatur diperoleh sebuah rumusan yang dapat digunakan untuk menghitung laju korosi yang berlanjut dengan pengurangan ketebalan pipa. Penelitian yang diinformasikan dalam literatur-literatur tersebut dilakukan di laboratorium dan pada pipa penyalur minyak bumi. Thesis ini menggunakan acuan literatur tadi untuk diterapkan pada pipa penyalur panas bumi yang belum pernah dilakukan oleh para peneliti.

Metodologi dilakukan dengan berbagai cara yang saling berhubungan, yaitu

- Teori korosi pada bahan yang terbuat dari logam
- Pendekatan statistik dalam pemodelan pertumbuhan karat
- Teori statistik untuk pengolahan data.
- Pengukuran ketebalan pipa secara berkala.
- Pengukuran servis pipa penyalur secara berkala
- Penghitungan laju korosi pipa panas bumi.
- Prediksi pengurangan ketebalan pipa dan umur pipa penyalur.

2.3.1. Telaah Literatur Mengenai Korosi dan Pemodelannya

Sebelum membahas tentang telaah literatur mengenai pendekatan statistik dalam pemodelan pertumbuhan karat, perlu disampaikan telaah literatur tentang penelitian-penelitian mengenai karat itu sendiri dari sisi kimiawinya pada subbab 2.3.1.1. Di bawah ini dituliskan ekstrak terseleksi mengenai hal tersebut.

2.3.1.1. Korosi pada Peralatan yang Terbuat dari Logam

S.F. Mughabghab dan TM Sullivan (1989) mengatakan korosi pada logam pada tanah disebabkan oleh 4 faktor utama, yaitu:

- a. Faktor *aeration* yaitu pengaruh sejumlah oksigen dan kelembaban yang mencapai pipa.
- b. Faktor elektrolit yaitu faktor yang berkenaan dengan sifat kimia dari air tanah seperti Ph, resistivitas, kehadiran agen (pengantar) yang agresif seperti sulfat, khlorida dan karbonat.
- c. Faktor kelistrikan, menyangkut ukuran, jumlah dan lokasi dari kantong-kantong atau wilayah-wilayah anodic
- d. Yang berkaitan dengan mikrobiologi dan sebagainya.

C. Miranda Herera (2010), mengatakan unsur-unsur dan senyawa-senyawa yang memberikan kontribusi korosi yang signifikan pada instalasi ini adalah oksigen terlarut, karbondioksida terlarut, khlorida terlarut, sulfida terlarut, pH, dan temperatur yang tinggi.

Miranda et.al dalam jurnalnya mengutip bahwa Souleymanoglu melaporkan degradasi baja karbon dalam uap dimana pada level oksigen yang rendah produk korosinya adalah sulfida besi. Dipercaya bahwa oksigen bertindak sebagai dipolarisasi katodik serta mengoksidasi H₂S menjadi sulfur, H₂O, SO₄ dan polysulfide. Penelitian mereka sendiri fokus pada pada H₂S dan mendapatkan korosi yang disebabkannya sangat tinggi, 2,6 mm/tahun.

Kun-hu Wu et al., Corrosion Science 52 (2010), meneliti efek dari ion kerak Ca²⁺ and Mg²⁺ terhadap korosi. Pada awalnya korosi dan kerak terjadi secara bersama-sama pada permukaan pipa yang mengandung Ca²⁺ and Mg²⁺. Generasi awal Zn²⁺ dan OH⁻ awalnya mencegah Ca²⁺ and Mg²⁺ menjadi kerak. Pengamatan pada air geothermal yang tidak mengandung ion Ca²⁺ and Mg²⁺ menambah cepat korosi secara signifikan.

Benjamin Valdes et.al. (2009) menyampaikan bahwa faktor dominan penyebab korosi pada peralatan dan instalasi panas bumi (*geothermal*) adalah keasaman uap panas bumi dan kandungan garamnya yang tinggi serta gas terlarut seperti oksigen, karbondioksida dan amonia dengan kadar yang tinggi juga.

2.3.1.2. Metode Romanoff

Model ini adalah bentuk umum yang paling diterima untuk memodelkan pertumbuhan karat (korosi) dan sangat luas penerimaannya. Kedalaman karat disimbolkan dengan “d_{max}”, paparan terhadap waktu atau umur disimbolkan

dengan “t” dan “κ” serta v melambangkan konstanta linier dan eskponensial, secara matematis model tersebut diungkapkan sebagai berikut:

$$d_{\max} = \kappa t^v \quad (2.1)$$

Nilai v berkaitan dengan tingkat *aeration* tanah sementara κ mencerminkan tingkat korosivitas tanah.

Romanoff membandingkan tingkat korosi pada baja karbon, openhearth carbon, wrought iron, Bessemeter steel, dan openhearth steel yang terpapar selama 14 tahun. Romanoff tidak menemukan perbedaan yang signifikan pada kehilangan berat dan kedalaman karatnya.

S.F. Mughabghab dan T.M. Sullivan meneruskan penelitian dengan berangkat dari model ini dan menemukan κ terkait dengan pH tanah dan v terkait dengan *aeration*, kelembungan tanah (tanah liat) dan kelembaban tanah.

2.3.1.3. Metode Katano

Katano et.al (2003), melakukan analisa regresi multivariate kedalaman karat pipa penyalur pada tanah dimana pipa penyalur tersebut dikubur. Katano mencatat karakter-karakter dari tanah yang dilalui oleh pipa penyalur. Model yang diajukan oleh Katano et.al adalah kedalaman karat diungkapkan dalam *power of time t*: $\eta = \gamma t^\alpha$ (γ dan α adalah konstanta)

$$y = \eta \exp(\varepsilon) \quad \left[\varepsilon \approx N(0, \sigma^2) \right], \quad \eta = t^\alpha \exp \left(\beta_0 + \sum_{j=1}^p \beta_j X_j \right) \quad (2.2)$$

dimana α dan β adalah koefisien regresi.

Model ini didapatkan dari pengamatan terhadap bentuk fungsi distribusi dari kedalaman karat yang didapatkan bentuk fungsi distribusi lognormal. Fungsi distribusi normal ini dimanipulasi kedalam bentuk fungsi distribusi gamma sebagaimana di atas. *Fitness* statistik dari model ini oleh Katano et.al diuji dengan

nilai fungsi *maximum likelihood* dan *Aikake Information Criterion (AIC)*. Bilangan AIC sama dengan *maximum likelihood* termasuk derajat kebebasannya.

2.3.1.4. Metode F. Caley

F. Caley et.al mengajukan model pertumbuhan (kedalaman) karat maksimum (d_m) pada pipa penyalur minyak dan gas bumi yang terkubur sebagaimana di bawah ini:

$$d_m = \left(k_0 + \sum_{i=1}^n k_i x_i \right) [t - t_0]^{(n_0 + \sum_{j=1}^m n_j x_j)} \quad (2.3)$$

dimana x_i x_j representasi dari variable independen ke i dan j sementara k_i dan n_j merepresentasikan koefisien regresinya.

Tim ini mengambil 10 variabel yang dianggap berpengaruh secara signifikan terhadap korosi pipa penyalur panas bumi. Variabel-variabel tersebut adalah kedalaman karat sebagai variabel tak bebas dan variabel-variabel bebas waktu paparan (dalam tahun), *radox potential*, *pH*, *pipe-to-soil potential*, *soil resisitivity*, *water content*, *soil bulk densit*, *chloride content*, *sulfate content*, *bicarbonate content* dan *coating type*. Mereka melakukan 1.024 kemungkinan regresi sehingga didapatkan goodness fit-nya dengan :

$$k = k_0 + k_1rp + k_2pH + k_3re + k_4cc + k_5bc + k_6sc \quad (2.4)$$

$$v = n_0 + n_1pp + n_2wc + n_3bd + n_4ct \quad (2.5)$$

dimana : $rp = \text{radox potential}$

$pH = ph$

$pp = \text{pipe to soil potential}$

$re = \text{soil resistivity}$

$wc = \text{water content}$

$bd = \text{soil bulk density}$

$cc = \text{chloride content}$

$bc = \text{bicarbonate content}$

sc = sulfate content

ct = coating type

2.3.2. Teori Statistik untuk Pengolahan Data

Teori-teori statistik yang dijelaskan di sini adalah teori-teori yang berkenaan langsung dengan pengolahan data penelitian ini. Teori-teori tersebut sebagaimana dijelaskan di bawah ini. Teori-teori lain yang tidak berkaitan langsung atau sudah umum tidak dijelaskan lagi dalam subbab ini.

2.3.2.1. Regresi

Salah satu pengertian regresi dapat dijumpai dalam buku Damodar N. Gujarati (2006) yang diterjemahkan ke dalam Bahasa Indonesia pada tahun 2007. Oleh Gujarati regresi dikatakan “hubungan antara satu variabel yang disebut variabel tak bebas (*Dependent Variable/DV*) dan satu atau lebih variabel bebas (*Independent Variable/IV*).

Hubungan variabel tak bebas dan bebas tadi ditandai dengan koefisien regresi yang dihitung dengan tujuan meminimumkan penyimpangan (Sum of Square, SSE) antara nilai aktual dan nilai estimasi dan optimasi korelasi antara nilai estimasi dan nilai aktual dari variabel tak bebas suatu kumpulan data (Tabachnick, 2007).

Berikut penulisan matematis dari regresi

$$y = b_0 + b_1x + b_2x^2 + \dots + b_nx^n + \varepsilon \quad (2.6)$$

Dimana: y adalah variabel dependen
 x adalah variabel independen
 b adalah koefisien parameter variabel
 ε adalah random error

Rumus di atas berasal dari regresi sederhana :

$$y = a + bx \quad (2.7)$$

Konstanta a dan b ditentukan dari data mentah berdasarkan kriteria kuadrat terkecil (least-square criterion), dimana data mentah diwakili dengan (y_i, x_i) , dimana y_i adalah permintaan aktual di saat x_i , dengan $i = 1, 2, \dots, n$.

Definisi berikut:

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2 \quad (2.8)$$

Sebagai jumlah kuadrat deviasi antara nilai permintaan yang diamati dan yang diestimasi. Nilai a dan b ditentukan dengan memecahkan kondisi yang diperlukan untuk meminimasi S , yaitu:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i x_i - n\bar{y}\bar{x}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2} \quad (2.9)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (2.10)$$

Yang mana

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.11)$$

dan

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (2.12)$$

Prosedur ini mengharuskan kita untuk mengestimasi b terlebih dahulu, baru a . Estimasi a dan b adalah absah untyuk setiap distribusi probabilistik y . Namun dalam asumsi tertentu (asumsi terpenting adalah bahwa y_i adalah normal dengan deviasi estándar konstan), internal keyakinan ditentukan untuk a dan b dan juga dapat dikembangkan untuk y .

Kita dapat menguji seberapa liniernya $y = a + bx$ sesuai dengan data mentah dengan menghitung koefisien korelasi r dengan rumus:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n y_i x_i - n\bar{y}\bar{x}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2 \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 - n\bar{y}^2 \right)}} \quad (2.13)$$

Dimana $-1 \leq r \leq 1$. Kesesuaian yang sempurna terjadi ketika $r = \pm 1$. Secara umum semakin dekat nilai $|r|$ dengan 1 maka semakin baik kesesuaian liniernya. Sebaliknya jika $|r| = 0$ maka menunjukkan terdapat kemungkinan nilai y dan x tidak berkaitan. Ada hal penting untuk dicatat bahwa nilai $r = 0$ adalah kondisi yang diperlukan tetapi tidak memadai.

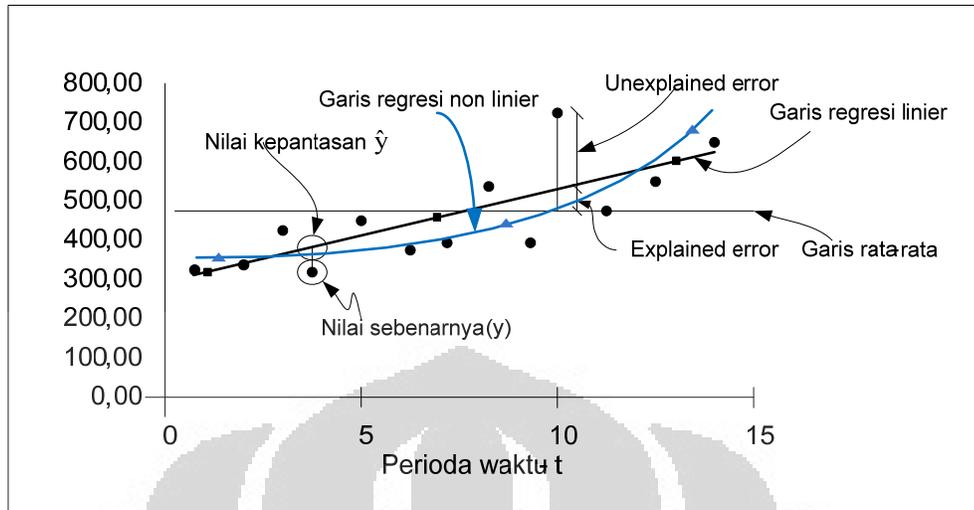
2.3.2.2. Multiple Linier Regresion

Multiple Linear Regression bila regresi melibatkan lebih dari satu variabel bebas. Bila koefisiennya linier maka dinamakan *Multiple Linear Regression*. Contoh di bawah adalah contoh sederhana untuk menggambarkan *Multiple Linear Regression*. Hal ini perlu ditegaskan di sini untuk memudahkan pembahasan Regresi Nonlinier pada subbab berikutnya.

Tujuan *multiple linear regresion* untuk mencari suatu persamaan matematis yang menghubungkan antara variabel independen dan variabel dependen yang menggunakan *historical data*. Persamaan linier menggambarkan bagaimana variabel independen (x_1, x_2, x_3, \dots) bersatu untuk mendefinisikan satu variabel dependen (y). Berbagai regresi linier mencari koefisien seperti yang ada pada persamaan di bawah ini.

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots + \varepsilon \quad (2.14)$$

di mana b_0, b_1, b_2, b_3 , adalah koefisien [dari] variabel independen; b_0 adalah y -menginterupsi, dan ε adalah *error*. Gambar 2.1 menjelaskan bagaimana secara grafis persamaan linier diperoleh dari data-data yang diberikan



Sumber: Rahmat Zamzami (2009), telah diolah kembali

Gambar 2.1. Grafik regresi linier dan nonlinier yang diperoleh dari data-data yang diberikan

2.3.2.3. Regresi Nonlinier

Regresi nonlinier adalah regresi yang memuat parameter nonlinier, yang berarti jika parameter tersebut diturunkan terhadap dirinya sendiri maka turunannya masih mengandung parameter itu sendiri. Gujarati (2004) masih menambahkan tambahan pada definisi di atas dengan: parameter dalam regresi tersebut tidak bisa ditransformasikan menjadi regresi linier. Dengan tambahan oleh Gujarati di atas, maka regresi logistik (*logistic distribution function*) tidak termasuk regresi nonlinier tetapi adalah regresi linier karena dengan manipulasi matematis, regresi ini dapat dilinierkan.

Salah satu regresi nonlinier yang populer adalah regresi eksponensial yang berbentuk persamaan :

$$y = ae^{bx} + \varepsilon \quad (2.15)$$

dimana a dan b adalah koefisien dari variabel dan ε adalah *error*. Dalam gambar 2.1 juga digambarkan bentuk grafik persamaan ini dengan a adalah titik potong grafik dengan sumbu y pada harga $x = 0$.

Untuk mendapatkan parameter persamaan regresi nonlinier dapat dilakukan dengan metoda kuadrat terkecil (nonlinier) dimana secara konseptual sama dengan metode kuadrat terkecil pada model regresi linier. Ada beberapa metoda lain yang memberikan kesesuaian yang lebih baik yang akan dijelaskan pada subbab di bawah.

2.3.3. Estimasi Parameter Regresi Nonlinier

2.3.3.1. Kuadrat Terkecil dalam Kasus Nonlinier

Metoda kuadrat terkecil atau sering disebut dengan metode *OLS* (*Ordinary Least Square*) diperkenalkan oleh Carl Friedrich Gauss, seorang matematikawan Jerman. Penaksir-penaksir yang dihasilkan berdasarkan metoda kuadrat terkecil bersifat tak bias dan konsisten. Didalam kenyataannya, salah satu penaksir tak bias linier memiliki varians yang minimum, sehingga disebut penaksir tak bias linier terbaik (*Best Linear Unbiased Estimator/BLUE*).

Berdasarkan sejumlah asumsi tertentu pendugaan berdasarkan metode kuadrat terkecil akan menghasilkan penduga tak bias terbaik (*Best Linear Unbiased Estimator/BLUE*), dengan koefisien regresi memiliki varians yang minimum. Namun demikian berbeda dengan kuadrat terkecil dalam model linier, penaksiran parameter pada kuadrat terkecil dalam model nonlinier ditentukan dengan melakukan suatu prosedur atau algoritma yang dapat menjamin bahwa penaksir tersebut secara nyata memenuhi kriteria dari fungsi tujuan yaitu memberikan nilai maksimum pada fungsi likelihood. Notasi Baku yang digunakan untuk kuadrat terkecil nonlinier berbeda dengan yang digunakan untuk kasus kuadrat terkecil linier. Misalkan model yang diberikan berbentuk sebagai berikut:

$$Y = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k; \theta_1, \theta_2, \theta_p) + \varepsilon$$

Dilambangkan dengan :

$$\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k)$$

$$\theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_p)$$

Maka persamaannya dapat ditulis:

$$Y = f(\xi; \theta) + \varepsilon$$

Atau

$$E(Y) = f(\xi; \theta)$$

Bila data amatannya berbentuk:

$$Y_u, \xi_{1u}, \xi_{2u}, \dots, \xi_{ku}$$

Untuk $u = 1, 2, 3, \dots, n$ maka dapat ditulis modelnya dalam bentuk :

$$Y_u = f(\xi_{1u}, \xi_{2u}, \dots, \xi_{ku}, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p) + e_u$$

Dan dapat diperingkas bentuknya menjadi :

$$Y_u = f(\xi, \theta) + e_u$$

Jumlah kuadrat sisa untuk persamaan nonlinier ditulis sebagai berikut:

$$S(\theta) = \sum_{u=1}^n \{Y_u - f(x)\}^2$$

Karena Y_u dan ξ_2 merupakan amatan dan bersifat tetap, maka jumlah kuadrat tersebut merupakan fungsi dari θ . Nilai taksiran kuadrat terkecil bagi θ dilambangkan dengan $\hat{\theta}$. Nilai taksiran ini ini tidak lain adalah nilai yang meminimumkan $S(\theta)$. Untuk menemukan nilai taksiran kuadrat terkecil $\hat{\theta}$, terlebih dahulu persamaan jumlah kuadrat galat dideferensiasikan terhadap θ . Ini akan menghasilkan persamaan normal, yang harus diselesaikan untuk memperoleh $\hat{\theta}$. Persamaan normal tersebut berbentuk:

$$\frac{\partial S(\theta)}{\partial \theta_i} \{Y_u - f(\xi, \theta)\} \left[\frac{\partial (\xi_u, \theta)}{\partial \theta_i} \right]_{\theta=\hat{\theta}}$$

Untuk $i=1, 2, 3, 4, \dots, p$ sedangkan besaran dalam kurung adalah turunan dari $f(\xi_u, \theta)$ terhadap $\hat{\theta}$ dengan semua θ_i diganti dengan $\hat{\theta}$ yang bersubskrip sama, jika $f(\xi_u, \theta)$ merupakan fungsi linier, maka nilai dugaan $f(\xi_u, \theta)$ tersebut merupakan fungsi dari ξ_u saja dan tidak mengandung $\hat{\theta}$ sama sekali. Misalnya jika

$$f(\xi_u, \theta) = \theta_1 \xi_u + \theta_u \xi_{2u} + \theta_{pm}$$

maka

$$\frac{\partial f}{\partial \theta_i} = \xi_{iu} \quad i = 1, 2, \dots, p$$

dan tidak bergantung pada θ . Ini mengakibatkan persamaan normalnya terdiri terdiri atas persamaan-persamaan linier dalam $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p$. Bila modelnya tidak linier dalam θ , maka sama halnya dengan persamaan normalnya. Sekarang akan diilustrasikan dengan satu contoh sederhana berupa penaksiran suatu parameter θ didalam sebuah model linier. Misalnya akan diperoleh persamaan normal untuk mendapatkan nilai taksiran kuadrat tekecil $\hat{\theta}$ bagi parameter θ dalam model $Y = f(\theta, t) + \varepsilon$ dengan $f(\theta, t) = e^{-\theta t}$. Misalkan n pasangan amatan yang tersedia adalah $(Y_1, t_1), (Y_2, t_2), \dots, (Y_n, t_n)$. Melalui pendiferensialan parsial terhadap θ diperoleh:

$$\frac{\partial f}{\partial \theta} = -te^{-\theta t}$$

yang menghasilkan persamaan normal tunggal. Selanjutnya persamaan normal tunggal dapat ditulis sebagai berikut:

$$\left[Y_n - \theta e^{-\theta t} \right] \left[-t_u e^{-\theta t} \right] = 0$$

atau

$$\sum_{u=1}^n Y_u t_u e^{-\theta t_u} - \sum_{u=1}^n t_u e^{-2\theta t_u} = 0$$

2.3.3.2. Algoritma Gauss Newton, Marquadt Compromise dan Levenberg-Marquadt

Ada banyak algoritma yang digunakan dalam memperoleh parameter regresi nonlinier. Sebagai informasi tambahan, software SPSS menggunakan algoritma Levenberg-Marquadt sebagai *default*-nya. Di bawah ini disampaikan beberapa algoritma saja untuk memberi tambahan pengertian mengenai parameter regresi nonlinier melengkapi metoda kuadrat terkecil di atas

Mohammad Ehsanul Karim menggambarkan Metoda Gauss Newton sebagai suatu algoritma untuk meminimumkan selisih kuadrat terkecil untuk menaksir parameter. Misalkan modelnya berbentuk :

$$Y_u = f(\xi, \theta) + \varepsilon_u$$

dan

$$\theta_{10}, \theta_{20}, \dots, \theta_p$$

Adalah nilai awal bagi parameter-parameter $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p$

Nilai-nilai awal itu merupakan dugaan kasar atau dugaan awal berdasarkan informasi yang tersedia. Nilai-nilai awal itu diharapkan akan diperbaiki dalam proses iterasi.

Metode Marquardt Compromise digambarkan oleh Sanjoyo, 2006, merupakan metode iterasi sebagaimana halnya Metode Gauss Newton bertujuan menghasilkan jumlah kuadrat selisih yang paling minimum.

2.3.4. Pengujian Regresi dan Parameter Statistik dalam Multiple Regression

1. R^2 adalah koefisien determinasi yang menunjukkan prosentase variabilitas dari variabel dependen yang menjelaskan persamaan regresi yang dibentuk. Sebagai contoh, suatu nilai $R^2 = 0,36$ menunjukkan bahwa persamaan regresi untuk variabilitas 36% dari variabel dependen. Formula untuk R^2 adalah:

$$R^2 = \frac{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (2.16)$$

2. *Adjusted R^2* menunjukkan koefisien determinasi R^2 setelah koefisien nondeterminasi dikoreksi oleh derajat kebebasan (degree of freedom). Formula untuk *Adjusted R^2* adalah:

$$\text{Adjusted } R^2 = 1 - \left(1 - R^2\right) \frac{n-1}{n-k-1} \quad (2.17)$$

Di mana: R^2 = koefisien determinasi

n = jumlah data; k = jumlah variabel dependen.

3. SSE digunakan untuk menaksir regresi minimum pada statistik, yang mengukur *error* yang tidak masuk dalam garis regresi. Untuk banyak garis tergambar dalam *scatter* plot data, terdapat angka yang berbeda antara garis

data terbaik. Salah satu metoda yang digunakan untuk membandingkan garis lurus adalah mengkalkulasi SSE (*Sum of the Square Error*) untuk masing-masing garis. SSE yang paling rendah merupakan garis terbaik untuk data. Formula SSE adalah:

$$SSE = \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (2.18)$$

4. *F-Statistik* adalah suatu metoda yang digunakan untuk mengukur signifikan relasi antara dependen variabel dengan independen variabel. Penyusunan hipotesis dibutuhkan untuk mengetahui sejauh mana penolakan terhadap relasi antar variabel. Formula untuk *F* adalah:

$$F = \frac{\sum (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 / (m-1)}{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2 / (n-m)} \quad (2.19)$$

dimana Y_i adalah nilai aktual dalam perioda waktu.

\bar{Y} adalah mean dari data.

\bar{Y} adalah total data kepantasan (fitted).

\hat{Y}_i adalah nilai forecast dalam periode i

m adalah koefisien dalam regresi.

n adalah jumlah data

5. *t-test* (*t-statistik*) digunakan untuk menjelaskan signifikansi relasi antara koefisien variabel dependen dengan variabel dependen di dalam model secara individual, termasuk juga karena keberadaan variabel independen lainnya

$$t = \frac{b_p}{se(b_p)} \quad (2.20)$$

Di mana: b_p adalah koefisien untuk pengecekan.

$se(b_p)$ adalah koefisien standar *error*.

6. p menunjukkan probabilitas [dari] perhitungan F atau t statistik. Sebuah nilai p adalah baik dan F statistik tidak *coincidental*, oleh karena itu, sangat signifikan. Nilai F yang signifikan berarti bahwa hubungan antara variabel dependen dan kombinasi variabel independen adalah signifikan. Secara umum, nilai p yang diharapkan adalah kurang dari 0,05.
7. *Durbin-Watson* untuk menguji *autocorellation* pada lag 1. *Durbin-Watson* sendiri mempunyai batasan statistik untuk *autocorellation*. Nilai yang digunakan dalam *Durbin-Watson* antara 0 – 4 dengan batasan seperti berikut:

Tabel 2.1 Tabel *Durbin-Watson*

Durbin-Watson Statistic	Bermakna:
Kurang dari 1	Menunjukkan berkorelasi positif. Kenaikan pada satu perioda mengikuti kenaikan pada perioda sebelumnya
2	Tidak terjadi autokorelasi.
Lebih dari 3	Berkorelasi negatif. Kenaikan pada satu perioda diikuti penurunan perioda sebelumnya

8. Formula *Durbin-Watson*:

$$\frac{\sum_{t=2}^n (e_t - e_{t-1})}{\sum_{t=1}^n e_t^2} \quad (2.21)$$

2.3.5. Model Matematis untuk Prediksi Korosi Pipa Penyalur Panas Bumi

Model F. Caley pada subbab 2.3.1.4 di atas akan diaplikasikan pada kasus pipa penyalur panas bumi. Dengan kondisi yang berbeda, akan dilakukan dilakukan penyesuaian-penyesuaian. Salah satu faktor penyesuaian yang

diperlukan karena korosi yang terjadi disebabkan oleh lingkungan internal yaitu variabel servis Rumusannya dituliskan dalam persamaan di bawah ini:

$$\Delta y = \left(k_0 + \sum_{i=1}^n k_i x_i \right) [t - t_0]^{(n_0 + \sum_{j=1}^m n_j x_j)} \quad (2.22)$$

Dimana Δy adalah pengurangan ketebalan yang disebabkan x_i yang berkontribusi linier dan x_j adalah faktor faktor-faktor penyebab dan penghambat korosi pada pipa penyalur panas bumi yaitu: oksigen, karbondioksida, amoniak, sulfida, pH, klorida, magnesium dan kalsium. Sementara k_0 , k_i , n_0 , n_j adalah parameter persamaan yang menentukan hubungan kesetimbangan antara variable bebas dan variabel tidak bebas. Sementara t_0 adalah parameter yang diestimasi juga untuk menentukan waktu pertaman kali pipa penyalur mulai mengalami korosi.

Variabel-variabel ketebalan pipa dan servis pipa penyalur akan menjadi masukan dari formula ini. Masukan-masukan ini akan diolah dengan formula regresi dengan sistem coba-coba dalam aturan kombinasi untuk menentukan apakah variabel tersebut berpengaruh secara linier atau ekponensial. Hasil kombinasi terbaik ditentukan oleh bilangan koefisien determinan regresi R^2 yang terbesar.

Variable-variable yang diukur dan dihitung dalam penelitian ini didefinisikan sebagai berikut:

Δy = *pengurangan ketebalan pipa*

x_1 = *klorida*

x_2 = *pH*

x_3 = *sulfida*

x_4 = *oksigen*

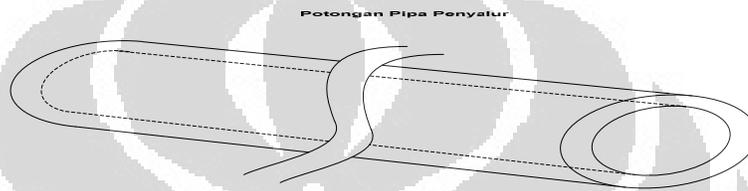
x_5 = *karbondioksida*

x_6 = *amoniak*

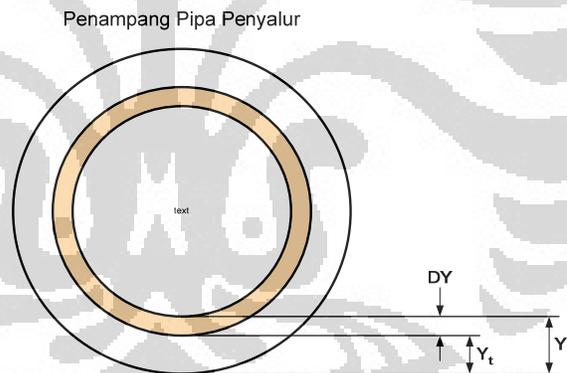
x_7 = *magnesium*

x_8 = *kalsium*

Untuk memahamai Δy lebih jauh, perhatikan gambar penampang melintang pipa gambar 2.2. Pengurangan ketebalan pada tahun ke-1, 2, 3 ..dan seterusnya ke-t, adalah ketebalan awal dikurangi ketebalan saat pengukuran ke-1 ke-1, 2, 3 ..dan seterusnya ke-t. Data-data inilah yang akan diregresikan dengan data-data konsentrasi servis pipa penyalur penyebab korosi. Lebih jauh dengan konsentrasi servis pipa penyalur dapat dibaca pada subbab 2.3.5.3.



Gambar 2.1 Potongan Pipa Penyalur



Y_0 : Ketebalan pipa awal (mula-mula)
 DY : Pengurangan ketebalan pipa
 Y_t : Sisa ketebalan pipa

Gambar 2.2 Penampang Melintang Pipa Penyalur

Variabel-variabel ini dicoba-coba dalam kombinasi linier dan eksponensial untuk menentukan apakah variabel tersebut berpengaruh secara linier atau ekponensial dalam aturan kombinasi:

$${}_n C_k = n!/k!(n-k)! \quad (2-23)$$

Hasil kombinasi terbaik ditentukan oleh koefisien determinan regresi R^2 yang terbesar.

Bila kedelapan variabel penelitian ada, absah dan lulus uji validasi data statistik seperti normalitas, uji multikolinieritas dan uji autokorelasi maka jumlah kombinasi regresi yang harus dilakukan adalah 242 kali. Dari ke 242 kali regresi tersebut dipilih salah satu yang terbesar koefisien determinan R^2 -nya. Bilangan koefisien parameter-parameter ini disimpulkan sebagai formula kontribusi variabel-variabel pada laju korosi.

2.3.5.1. Material Pipa Penyalur

Material pipa penyalur yang menjadi obyek penelitian adalah carbon steel tepatnya *ASTM Grade B* dan *API 5L Grade B*. Material ini sangat umum dipakai dalam industri panas bumi karena pertimbangan-pertimbangan mampu las yang baik, high strength dan mudah difabrikasi (mesinisasi) dan berbiaya murah dibandingkan dengan material lain seperti *stainless steel* dan plastik.

2.3.5.2. Pengukuran Ketebalan Pipa

Perubahan ketebalan atau kehilangan ketebalan pipa penyalur dari waktu ke waktu diperoleh dengan cara pengukuran ketebalan pipa setiap enam bulan. Data ketebalan setiap pengukuran tersebut dibandingkan dengan ketebalan awal pada saat pertama kali dipasang.

Pada saat pipa penyalur yang dikonstruksi di lapangan, idealnya, ketebalan pipa penyalur terpasang diukur juga. Bila tidak, ketebalan pipa rata-rata dapat dianggap ketebalan *pipeline* sebagaimana yang diatur dalam *ASME/ANSI 2 D, Boiler & Pressure Vessel Code*. Standar ini menyatakan bahwa ketebalan pipa (*line pipe*) memenuhi ukuran ketebalan *schedule*-nya bila dipabrikasi pada toleransi +15% dan -17.5 % ketebalan yang ditentukan.

2.3.5.3. Pengukuran Variable Servis Pipa Penyalur

Sebelum membangun sebuah kilang, perusahaan pengoperasi kilang panas bumi yang seterusnya disingkat perusahaan saja, harus melakukan studi AMDAL pada lokasi yang direncanakan. Setelah itu, perusahaan harus membuat suatu

program pemantauan dan pengelolaan lingkungan terkait dengan kemungkinan-kemungkinan perubahan-perubahan parameter-parameter lingkungan yang disebut baku mutu lingkungan selama konstruksi kilang dan operasinya. Tujuannya adalah terpeliharanya baku mutu lingkungan dalam ambang yang diperbolehkan dengan kata lain, aman untuk kehidupan. Program ini disebut Rencana Pemantauan Lingkungan (RPL) atau Rencana Kelola Lingkungan (RKL) dan Usaha Pemantauan Lingkungan (UPL) atau Usaha Kelola Lingkungan (UKL). Atas dasar regulasi dan program inilah data-data lingkungan diambil secara berkala, termasuk variabel servis pipeline.

Tabel 2.2 Parameter yang diinvestigasi dan definisinya serta metoda analisisnya.

No	Variable	Satuan	Simbol	Definisi	Metoda
1	Pengurangan ketebalan	mm	Δy	Pengurangan ketebalan	Uji Ultrasonik
2	pH	-	pH	pH dari air terproduksi yang diekstrak	Potensio metri
3	Karbondio ksida	mg/L	CO ₂	Konsentrasi dari CO ₂ dalam air terproduksi yang diekstraksi	Titrimetri
4	Sulfida	mg/L	H ₂ S	Konsentrasi H ₂ S yang dalam air yang diekstraksi	Titrimetri
5	Khlorida	mg/L	Cl ⁻	Konsentrasi khlorida yang dalam air yang diekstraksi	Titrimetri
6	Amoniak	mg/m ³	NH ₃	Konsentrasi NH ₃ di dalam wadah/udara	Spectro fotometri

Penelitian dalam tesis ini menggunakan data-data pengukuran yang dilakukan oleh perusahaan melalui perusahaan konsultan bidang lingkungan. Distorsi-distorsi akan sangat besar terjadi terkait dengan kebutuhan penelitian ini sangat berbeda dengan kebutuhan audit lingkungan. Perhatian yang diberikan oleh audit lingkungan adalah lingkungan eksternal pipa penyalur sementara penelitian ini membutuhkan kondisi operasi yang sebenarnya di dalam pipa penyalur (*pipeline*).

Demikian juga jumlah data yang diperlukan oleh penelitian ini sangat besar, terkait dengan variasi dari tahun dan konsentrasi variabel servis pipa

penyalur. Penelitian yang dikhususkan untuk memperoleh parameter yang akurat dari rumusan thesis ini sangat mahal yang tidak dimungkinkan dilakukan secara pribadi. Namun, hasil yang akan didapatkan tidaklah sia-sia sebagai gambaran awal untuk kehati-hatian dalam menjalankan kilang untuk melaksanakan inspeksi-inspeksi yang diperlukan. Tabel 2.1 menunjukkan parameter yang diinvestigasi dan definisinya serta metoda analisisnya.

2.3.5.4. Rata-rata Data Variabel Servis Pipa Penyalur sebagai Input Regresi

Tidak serta merta data sesaat variabel servis pipa penyalur dapat menjadi input regresi walaupun diambil pada waktu yang bersamaan dengan ketebalan pipa sebagai variabel tak bebasnya. Angka konsentrasi ion-ion dan senyawa-senyawa sesaat sampel yang diambil pada aliran pipa penyalur bukanlah penyebab korosi pipa penyalur (pada masa lalu), tapi adalah salah satu angka (komponen) penyumbang korosi di masa yang akan datang terhitung mulai pada saat pengukuran. Bila konsentrasi tadi bilangannya tetap, maka bilangan itu bermakna penyebab korosi pada masa lalu, sekarang dan di masa yang akan datang.

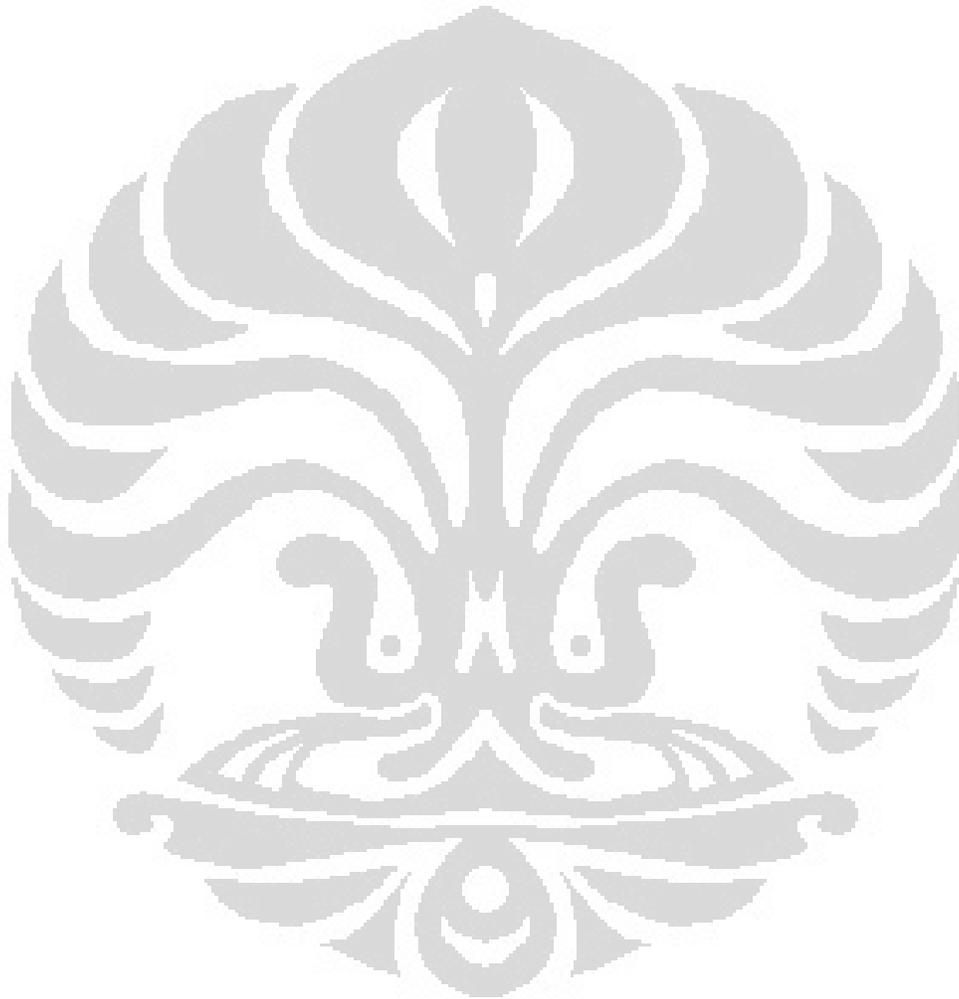
Pada kenyataannya, data konsentrasi ion-ion dan senyawa-senyawa sumur tidaklah tetap dan selalu berubah-ubah. Oleh sebab itu harus dicari satu angka bilangan yang dapat dianggap mewakili angka yang menjadi penyebab kuantitas korosi yang terjadi sampai tahun berjalan. Angka tersebut adalah angka rata-rata dari ion-ion dan senyawa-senyawa yang terdistribusi normal.

2.3.5.5. Rata-rata Kehilangan Ketebalan sebagai Variabel Input Variabel Tak Bebas dan Batas-batas Segmen Pipa Penyalur

Sejumlah data ketebalan yang diambil pada suatu kesempatan pada satu segmen pipa penyalur hanya mewakili satu data input regresi. Sejumlah data tersebut dirata-ratakan untuk mewakili data ketebalan sebagai input variabel tak bebas Δy . Rata-rata ketebalan dijadikan acuan karena kegagalan pipa penyalur tidak disebabkan oleh satu titik karat, tetapi kehilangan ketebalan yang homogen.

Pengambilan data ketebalan pipa dilakukan pada segmen yang terletak antara separator dan titik perpotongnya dengan jalur utama pipa penyalur (lihat gambar 2.2). Pada segmen ini, konsentrasi variabel servis pipa penyalur sama di

semua titik. Jalur utama tidak menjadi segmen penelitian karena konsentrasi variabel servis pipa penyalur pada jalur utama adalah rata-rata penjumlahan dari dua atau lebih pipa penyalur sumur. Jalur utama tidak diambil data variabel servisnya, sehingga tidak dapat dijadikan penelitian dalam thesis ini.

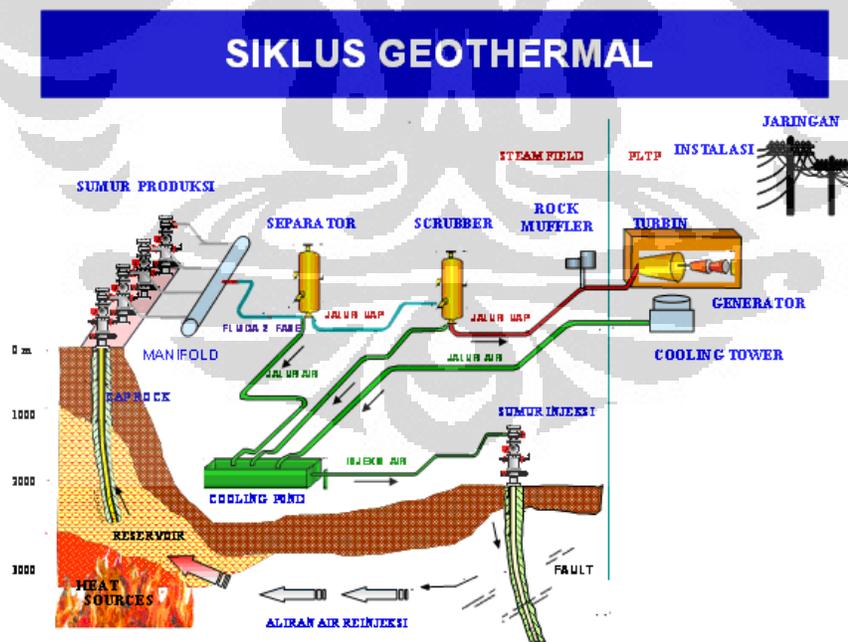


3. DATA DAN PERHITUNGAN LAJU KOROSI

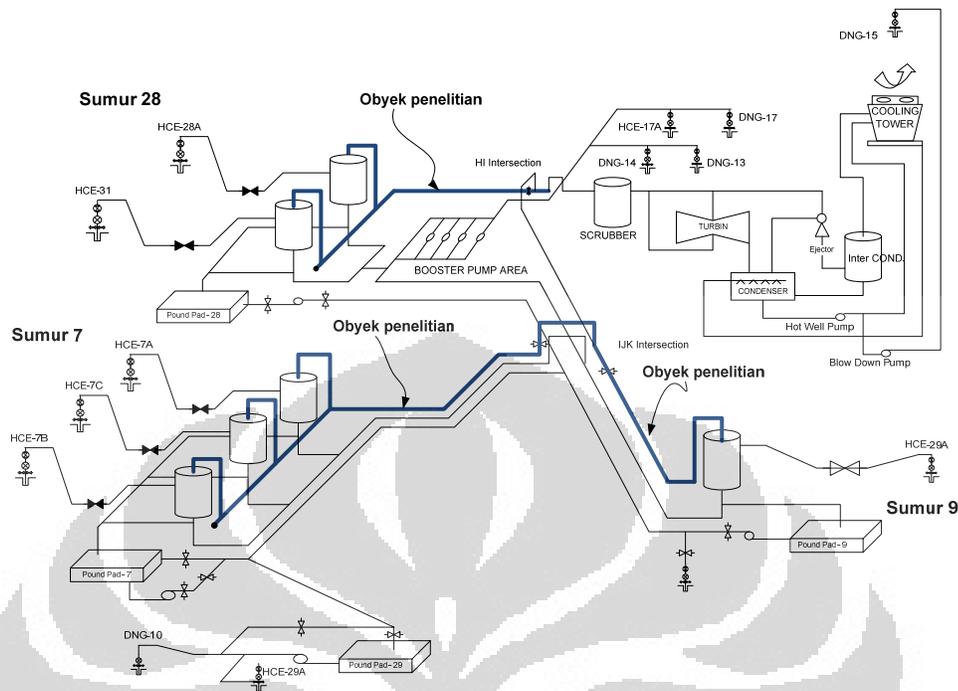
Pada bab ini, pada subbab awal akan disampaikan siklus kerja kilang geothermal dan batas-batas pipa penyalur yang menjadi obyek penelitian. Pengukuran-pengukuran variabel yaitu pengukuran ketebalan dinding pipa dan konsentrasi penyebab korosi dibahas pada subbab berikutnya. Validasi data berupa uji normalitas, uji multikolinearitas, uji autokorelasi serta transformasi *z-score* (variabel satuan standard) dibahas pada urutan berikutnya. Pada bagian terakhir meregresikan data dalam formula sehingga didapatkan parameter regresi dan persamaan regresi.

3.1. Profil Perusahaan *Case Study*

Perusahaan kilang panas bumi yang menjadi *case study* dalam thesis ini dibangun sekitar tahun 1996/1997 dan mulai beroperasi sekitar tahun 1998. Siklus proses produksi uap pada kilang ini dapat dijelaskan secara sederhana yang merupakan tipikal dari kilang panas bumi.



Gambar 3-1 Tipikal sebuah siklus geothermal



Gambar 3.2. Siklus Proses Produksi Kilang Panas Bumi dan Segmen Pipa Penyalur Obyek Penelitian

Uap panas bumi, yang dikeluarkan dari sumur-sumur produksi, disalurkan melalui pipa menuju separator untuk dipisahkan antara fasa uap dan fasa cairnya pada tekanan tertentu. Dari separator selanjutnya uap yang bebas air dialirkan melalui pipa uap menuju *Power Plant*. Sebelum masuk ke turbin, uap disaring di scrubber untuk mendapatkan uap yang bebas dari *moisture* (uap basah).

Dalam perjalanan sebelum mencapai scrubber, dalam rentang tertentu, pada titik-titik rendah dipasang CDP (*Condensate Drop Pots*) untuk melepaskan kondensat yang terjebak di pipa uap. Setiap satu kilometer paling sedikit terdapat 5 CDP. Kondensat yang ada di CDP ini dialirkan ke kolam penampungan terdekat untuk bersama-sama dengan brine disuntikkan ke perut bumi.

Brine hasil pemisahan oleh separator dialirkan ke kolam-kolam penampungan sementara sebelum disuntikkan kembali ke perut bumi melalui sumur injeksi dan kembali masuk ke dalam aliran sumur. Sebelum masuk ke kolam penampungan, brine dilewatkan di *Atmospheric Flash Tank (AFT)* untuk memisahkan uap dan brine-nya. Untuk mengurangi kebisingan pada AFT dipasang *silencer*. Silencer ini sebenarnya juga merupakan separator yang

memisahkan uap dan brine. Fasa uap dilepaskan ke udara dan fase basah dimasukkan ke dalam kolam-kolam penampung.

Di *Power Plant*, uap yang dipakai untuk menggerakkan turbin, setelah melewati turbin, dikondensasikan dengan condenser untuk didinginkan dengan air pendingin dari menara pendingin. Hasil kondensasinya kembali dialirkan ke sumur injeksi untuk disuntikkan ke dalam perut bumi. Gambar 2-1 dan 2-2 memperlihatkan proses dimaksud dan segmen pipa penyalur yang menjadi obyek penelitian.

3.2. Data Ketebalan Pipa Penyalur

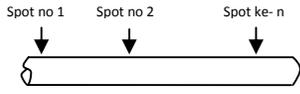
Data ketebalan pipa penyalur adalah data sekunder milik perusahaan kilang panas bumi yang diambil pada tiga perioda pemeriksaan dari tahun 2007 sampai dengan tahun 2010. Ketebalan pipa penyalur diambil menggunakan alat *ultrasonic wall thickness DM3-Krautkramer tipe DA 305/56904*. Alat ini dapat mempunyai ketelitian hingga 0.1 mm. Pengukurannya dilakukan oleh sebuah perusahaan surveyor independen. Datanya dapat dilihat pada tabel 3.1 sampai tabel 3.9

Tabel 3.1 Data ketebalan Pipa Penyalur Sumur 28, April 2009

Spot No. :	Ketebalan Terukur			
	0°	90°	180°	270°
Spot No. 1	11.0	11.1	10.4	10.4
Spot No. 2	10.8	11.0	10.3	11.2
Spot No. 3	10.2	10.5	10.3	10.1



0°
270° 90°
180°



Spot no 1 Spot no 2 Spot ke- n

Tabel 3.2 Data ketebalan Pipa Penyalur Sumur 7, April 2009

Spot No. :	Ketebalan Terukur			
	0°	90°	180°	270°
Spot No. 1	11.3	11.2	11.4	11.3
Spot No. 2	10.7	11.0	11.2	11.4
Spot No. 3	11.2	11.4	11.6	11.5
Spot No. 4	11.6	11.1	11.2	11.6
Spot No. 5	11.2	11.0	11.2	11.3
Spot No. 6	11.2	11.0	11.1	11.0
Spot No. 7	11.6	11.4	11.5	11.3
Spot No. 8	11.2	11.3	11.6	11.5
Spot No. 9	11.4	11.0	11.6	11.4
Spot No. 10	12.0	12.1	11.8	12.0
Spot No. 11	11.4	11.2	11.6	11.4

Tabel 3.3 Data ketebalan Pipa Penyalur Sumur 9, APRIL 21, 2009

Spot No. :	Ketebalan Terukur			
	0°	90°	180°	270°
Spot No. 16	6.6	7.0	7.1	6.6
Spot No. 17	7.1	7.2	7.2	7.1
Spot No. 18	6.8	7.4	7.1	7.3
Spot No. 19	7.2	7.2	7.1	7.1

Spot No. 20	7.9	7.1	6.9	6.9
Spot No. 21	7.2	7.2	7.1	7.3
Spot No. 22	7.9	7.4	7.4	7.8
Spot No. 23	7.4	8.0	7.6	7.7

Tabel 3.4 Data ketebalan Pipa Penyalur Sumur 28, Mei, 2008

Spot No. :	Ketebalan Terukur			
	0°	90°	180°	270°
28A1/1	14.5	12.8	13.5	14.1
28A2/2	15.2	14.6	13.7	13.2
28B1/3	15.2	13.8	14.1	13.6
28B2/3	14.0	13.0	14.2	13.2
28B3/4	13.6	12.9	12.8	13.7

Tabel 3.5 Data ketebalan Pipa Penyalur Sumur 9, 4 Mei 2008

Spot No. :	Ketebalan Terukur			
	0°	90°	180°	270°
Spot No. 1	8.0	7.6	7.6	7.8
Spot No. 2	7.5	7.4	8.1	7.7
Spot No. 3	9.0	9.6	8.9	8.2
Spot No. 4	9.2	8.0	8.4	8.7
Spot No. 5	8.3	9.0	9.1	8.6
Spot No. 6	9.5	9.0	8.3	9.0
Spot No. 7	8.0	8.2	9.4	9.1

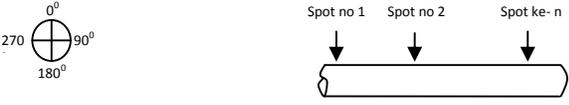
Tabel 3.6 Data ketebaln Pipa Penyalur Sumur 7, 4 Mei, 2008

Spot No. :	Ketebalan Terukur			
	0°	90°	180°	270°
Spot No. 1	13.2	13.4	12.8	12.7
Spot No. 2	12.7	12.8	12.5	13.3
Spot No. 3	10.7	11.3	10.9	10.6

Tabel 3.7 Data ketebalan Pipa Penyalur Sumur 9, Nov 2008

Spot No. :	Ketebalan Terukur			
	0°	90°	180°	270°
Spot No. 1	7.9	7.6	7.6	7.8
Spot No. 2	7.5	7.4	8.0	7.7
Spot No. 3	9.0	9.2	8.9	8.2
Spot No. 4	9.0	7.9	8.4	8.6
Spot No. 5	8.2	8.8	9.0	8.4
Spot No. 6	8.3	8.9	8.9	8.6
Spot No. 7	7.9	8.2	9.2	9.0
				

Tabel 3.8 Data ketebalan Pipa Penyalur Sumur 28, nov 2008

Spot No. :	Ketebalan Terukur			
	0°	90°	180°	270°
Spot No.1	11.3	11.4	10.8	10.8
Spot No.2	11.2	11.5	10.5	11.7
Spot No.3	10.5	10.9	10.6	10.4
				

Gambar 3.9 Data ketebalan Pipa Penyalur Sumur 7, Nov 2009

Spot No. :	Ketebalan Terukur			
	0°	90°	180°	270°
Spot No.1	12.7	12.5	12.8	12.8
Spot No.2	12.2	13.0	13.0	13.2
Spot No.3	13.0	13.0	12.5	13.2
Spot No.4	13.0	12.6	13.2	13.5
Spot No.5	12.8	12.5	12.4	12.3
Spot No.6	13.0	12.2	12.3	13.0
Spot No.7	13.0	13.2	13.2	12.6
Spot No.8	13.0	13.0	13.0	12.9
Spot No.9	12.3	12.5	12.9	12.7
Spot No.10	12.9	12.2	12.8	12.7
Spot No.11	13.2	13.3	12.9	13.2
Spot No.12	13.4	13.2	13.6	13.4

Data di atas adalah data mentah. Data yang akan dimasukkan ke dalam regresi adalah pengurangan ketebalan pipa dalam suatu perioda pengukuran t tahun. Pengurangan ketebalan pipa adalah selisih dari ketebalan pipa pada saat pertama kali dipasang dengan ketebalan pada saat pengukuran. Tabel 3.10 menunjukkan data pengurangan ketebalan pipa pada saat pengukuran t tahun, konsentrasi rata-rata senyawa yang diukur, dan umur saat pengukuran.

Tabel 3.10. Data rata-rata pengurangan ketebalan pipa, rata-rata konsentrasi senyawa penyebab korosi, dan umur pipa penyalur saat pengukuran.

	Δy (mm)	Cl (mg/L)	H ₂ S (mg/L)	Ph (-)	Umur (tahun)
PIPA PENYALUR A	3.633	33194.75	0.2733	5.329	10.25
	4.9	33194.75	0.27329	5.329	10.75
PIPA PENYALUR B (7)	1.05	22293	0.23631	5.339	10.25
	1.99	24969.75	0.23631	5.339	10.75
	3.51	23414.6	0.23631	5.339	11.25
PIPA PENYALUR C (9)	1.16	10417	0.098111	5.576	10.25
	1.18	19462.7	0.098111	5.576	10.75
	2.1	19468.96	0.098111	5.576	11.25

3.3. Data Ion-ion dan Senyawa-senyawa Karbondioksida, Sulfida, Amoniak, Khlorida dan pH

Parameter-parameter di atas diukur bersama dengan parameter-parameter lain untuk tujuan RPL/RKL (Rencana Pantau Lingkungan/Rencana Kelola Lingkungan) dan UPL/UKL (Usaha Pantau Lingkungan/Usaha Kelola Lingkungan) dalam rangka memenuhi peraturan pemerintah terkait dengan izin operasi kilang tersebut. Jadi data ini adalah data sekunder juga sebagaimana data ketebalan pipa di atas. Sampel-sampel diambil pada kolam-kolam penampungan pada setiap sumur dan kemudian dibawa ke laboratorium untuk dianalisa.

Tabel 3.11 sampai dengan 3.13 adalah tabel konsentrasi ion-ion atau senyawa Cl, H₂S dan pH di masing-masing pipa penyalur sumur 7, 9 dan 28 yang diukur dari tahun 2007 sampai dengan 2010. Data konsentrasi ion-ion atau senyawa-senyawa tadi diukur setiap 4 bulan.

Data yang telah disebutkan tadi, diolah sebagaimana yang disampaikan dalam subbab 2.3.5.4 dan 2.3.5.5 sehingga dihasilkan tabel 3.10

Tabel 3.11 Konsentrasi Cl, H₂S dan pH di Pipa Penyalur Sumur 7

Cl (mg/L)	H ₂ S (mg/L)	Ph (-)	Tanggal Pengambilan Contoh
-	0.8240	6.5	21 Agustus 2007
-	0.2550	6.37	November 2007
22293	0.0620	4.24	24 Maret 2008
23975	0.0238	6.2	25 Juni 2008
37588	0.4250	3.49	10 September 2008
19054	0.2950	3.17	12 November 2008
17194	0.2223	5.6	23 Maret 2009
20194	0,676	5,51	16 Juni 2009
17325	0	5.2	5 Oktober 2009
17232	0.001	6.25	22 Juni 2010

Tabel 3.12 Konsentrasi Cl, H₂S dan pH di Pipa Penyalur Sumur 28

Cl (mg/L)	H ₂ S (mg/L)	Ph (-)	Tanggal Pengambilan Contoh
-	0.5860	4	21 Agustus 2007
-	0.334	6.43	November 2007
20934	0.0600	6.31	24 Maret 2008
7490	0	4,5	25 Juni 2008
56842	0.6120	6,06	10 September 2008
28491	0.8220	4,55	12 November 2008
28491	0.3159	4.8	23 Maret 2009
26512	0.0020	5,74	16 Juni 2009
17325	0	5.4	5 Oktober 2009
25974	0,001	5,05	22 Juni 2010

Tabel 3.13 Konsentrasi Cl, H₂S dan pH di Pipa Penyalur Sumur 9

Cl (mg/L)	H ₂ S (mg/L)	Ph (-)	Tanggal Pengambilan Contoh
-	0.2050	7.5	21 Agustus 2007
-	0.002	6.91	November 2007
10417	0.002	6.86	24 Maret 2008
23975	0	4,6	25 Juni 2008
40367	0.192	3,36	10 September 2008
554.8	0.4700	3,78	12 November 2008
19494	0,1559	6.6	23 Maret 2009
26512	0.002	4,11	16 Juni 2009
17325	0	6,6	5 Oktober 2009
15197	0.01	5.5	22 Juni 2010

3.4. Batasan Segmen Pipa Penyalur Obyek Penelitian dan Karakter Sumur

Data konsentrasi ion-ion dan senyawa-senyawa sesaat waktu pengambilan sampel yang diambil pada aliran pipa penyalur bukanlah penyebab korosi pipa penyalur (pada masa lalu), tapi adalah komponen penyumbang korosi di masa yang akan datang terhitung mulai pada saat pengukuran. Bila konsentrasi tadi bilangannya tetap, maka bilangan itu bermakna penyebab korosi pada masa lalu, sekarang dan di masa yang akan datang.

Pada kenyataannya, data konsentrasi ion-ion dan senyawa-senyawa sumur tidaklah tetap dan selalu berubah-ubah. Oleh sebab itu harus dicari satu angka bilangan yang dapat dianggap mewakili angka yang menjadi penyebab kuantitas korosi yang terjadi sampai tahun berjalan. Angka tersebut adalah angka rata-rata dari ion-ion dan senyawa-senyawa yang terdistribusi normal. Setiap bilangan pada tabel variabel di bawah adalah angka rata-rata yang mewakili seperangkat angka pengukuran variabel-variablenya.

Pengambilan data ketebalan pipa dilakukan pada segmen yang terletak antara separator dan titik perpotongnya dengan jalur utama pipa penyalur. Jalur utama dari pipa penyalur adalah gabungan uap dari beberapa sumur yang menjadi satu saluran menuju scrubber sebelum sampai di kilang panas bumi. Jalur utama adalah gabungan uap dari dua atau lebih sumur yang tentu saja konsentrasi mineral yang menjadi pengamatan dalam thesis ini tidak sama dengan konsentrasi mineral pada jalur ini. Data mineral variabel penyebab korosi diambil pada kolam-kolam penampungan di setiap sumur di hulu aliran pipa penyalur case study.

3.5. Pengolahan Data

Validasi data secara kasar dilakukan pada awal pengumpulan data tanpa perlu mengolahnya dalam software statistik, misalnya variabel magnesium dan kalsium. Variabel ini tidak termasuk dalam parameter-parameter baku mutu lingkungan sehingga perusahaan *case study* tidak melakukan pengukuran pada parameter-parameter tersebut. Demikian pula dengan data variabel ketebalan pipa penyalur yang ditemukan lebih besar dari pengukuran sebelumnya. Data seperti ini mengurangi variasi tahun yang sebelumnya diharapkan.

Tabel 3.14 Data dan Statistiknya

	ΔY	Cl	H2S	Ph	Umur
Mean	2.576	2.34E4	.214928	5.39850	10.5000
Median	2.050	2.37E4	.244155	5.34450	10.5000
Std. Deviation	1.6505	2.965E3	.0695846	.104057	1.45444
Variance	2.724	8.793E6	.005	.011	2.115
Skewness	.235	-.238	-1.069	1.181	.000
Std. Error of Skewness	.374	.374	.374	.374	.374
Kurtosis	-1.297	-1.501	-.695	-.608	-1.226
Std. Error of Kurtosis	.733	.733	.733	.733	.733
Minimum	.2	19230	.0981	5.329	8.25
Maximum	5.5	26833	.2733	5.576	12.75

3.5.1. Uji Normalitas Variabel-variabel Servis Pipa Penyalur

Data variabel yang tidak terdistribusi dengan normal dibuang dari variabel penelitian sehingga dengan sendirinya membatasi ruang lingkup penelitian. Data amoniak (NH_3) dan karbondioksida (CO_2) tidak dapat diolah karena tidak memenuhi syarat-syarat normalitas. Tabel 3.15 adalah data yang telah lulus uji normalitas sebagai uji validitas pertama.

Tabel 3.15 Data hasil uji normalitas

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

		ΔY	Cl	H2S	Ph	Umur
Normal Parameters ^a	Mean	2.576	2.34E4	.214928	5.39850	10.5000
	Std. Deviation	1.6505	2.965E3	.0695846	.104057	1.45444
Most Extreme Differences	Absolute	.138	.239	.371	.429	.105
	Positive	.138	.168	.203	.429	.105
	Negative	-.102	-.239	-.371	-.252	-.105
Kolmogorov-Smirnov Z		.875	1.511	2.344	2.716	.664
Asymp. Sig. (2-tailed)		.428	.021	.000	.000	.770

a. Test distribution is Normal.

Demikian juga dengan data oksigen, parameter ini tidak termasuk parameter baku mutu dan tidak diambil oleh perusahaan panas bumi. Dengan

ketidakabsahan dan ketiadaan data tersebut, maka variabel-variabel *karbondioksida*, *amoniak*, dan *oksigen* dikeluarkan dari variable penelitian.

3.5.2. Transformasi Z-score

Dengan kenyataan bahwa rumusan model regresi dari penelitian ini memiliki variabel dengan satuan yang berbeda-beda, maka untuk mendapatkan parameter yang mengeliminir perbedaan-perbedaan tersebut, data yang ada terlebih dulu ditransformasikan ke dalam *z-score*-nya.

Z-score adalah variabel normal satuan atau variabel normal standard dari suatu fungsi distribusi normal yang mempunyai rata-rata nol (0) dan varian sebesar satu (1). Variabel normal semacam itu dapat ditulis sebagai:

$$Z \sim N(0,1) \dots \dots \dots (3.1)$$

Bila variabel-variabel X mempunyai rata-rata μ_x dan varians σ_x^2 maka didapatkan variabel normal standard dari sampel:

$$Z = \frac{X - \mu_x}{\sigma_x} \dots \dots \dots (3.2)$$

Tabel 3.16 adalah tabel data setelah ditransformasikan. Sampai di sini data dapat diolah ke tahap berikutnya yaitu analisa korelasi antar variabel.

Tabel 3.16. *Z-score* data variabel servis pipa penyalur dan ketebalan pipa penyalur

Z-Y	Z-HCL	Z-H2S	Z-pH	Z-Umur
0.8404	1.3170	0.9865	-0.7722	-1.0485
1.7333	1.3170	0.9865	-0.7722	0.1498
-0.9798	-0.1343	0.5280	-0.6921	-1.0485
-0.3174	0.2220	0.5280	-0.6921	0.1498
0.7538	0.0150	0.5280	-0.6921	1.3481
-0.9023	-1.7153	-1.1857	1.2069	-1.0485
-0.8882	-0.5111	-1.1857	1.2069	0.1498
-0.2399	-0.5103	-1.1857	1.2069	1.3481

3.5.3. Uji Multikolinearitas dan Uji Autokorelasi

Untuk mengetahui adanya korelasi antar variabel bebas dilakukan uji multikolinearitas. Hasil uji terhadap variabel-variabel HCl, H₂S dan pH didapatkan adanya korelasi antara pH dan H₂S. Variable yang dikeluarkan dari regresi adalah variable H₂S sebagaimana tampak dalam Tabel 3.17. Sedangkan uji auto korelasi ditunjukkan oleh Tabel 3.18. Dari tabel tersebut dihasilkan variabel yang berautokorelasi yaitu H₂S, sehingga bisa dibuang dari variabel regresi. Korelasi antara pH dengan Cl memiliki koefisien yang cukup tinggi yaitu 80 %, namun masih berada di bawah ambang definisi multikolinieritas sehingga masih dipertahankan dalam regresi.

Tabel 3.17 Hasil uji korelasi variabel-variabel HCl, H₂S dan pH

Coefficient Correlations^a

Model		Zscore(Umur)	Zscore(Ph)	Zscore(Cl)	
1	Correlations	Zscore(Umur)	1.000	.121	.246
		Zscore(Ph)	.121	1.000	.802
		Zscore(Cl)	.246	.802	1.000
Covariances	Zscore(Umur)	.016	.003	.007	
	Zscore(Ph)	.003	.043	.035	
	Zscore(Cl)	.007	.035	.045	

a. Dependent Variable: Zscore(Y)

Tabel 3.18 Hasil uji autokorelasi variabel-variabel bebas

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Durbin-Watson
1	.827 ^a	.684	.557	.944596	2.573

a. Predictors: (Constant), Ph, Cl

b. Dependent Variable: Y

3.5.4. Korelasi Variabel Tak Bebas dengan Variabel Bebas

Perlu dilihat korelasi antara variabel bebas dengan variabel tak bebas untuk memastikan bahwa proses perhitungan yang dilakukan sesuai dengan kondisi riil yang ada. Tabel 3.19 menunjukkan korelasi antar variabel-variabel tersebut.

Tabel 3.19 Korelasi bivariate variabel

		Y	Cl	Ph	Umur
Y	Pearson Correlation	1	.623**	-.493**	.727**
	Sig. (2-tailed)		.000	.001	.000
	Sum of Squares and Cross-products	106.236	1.189E5	-3.304	68.074
	Covariance	2.724	3.048E3	-.085	1.745

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Hasil analisa korelasi pada Tabel 3.19 tersebut memperlihatkan korelasi yang kuat antara variabel bebas dengan variabel tak bebasnya. Variable pH memperlihatkan hubungan negative yang bermakna setiap pengurangan nilai pH, menaikkan angka variable tak bebasnya. Hal ini berbeda dengan variabel-variabel yang lain diatas dan dapat dilihat kesesuaiannya dengan penelitian-penelitian terdahulu atau hukum alam dimana hubungan antara pH dengan kehilangan ketebalan berbanding terbalik. Dengan kata lain semakin kecil nilai pH semakin besar laju kehilangan ketebalan dinding pipa penyalur.

3.5.5. Estimasi Parameter dan Persamaan Regresi Penelitian

Angka koefisien korelasi R^2 adalah 0,847 atau 85 %. Angka ini diperoleh dari Tabel 3.20 yaitu tabel estimasi parameter. Angka ini mempunyai arti bahwa variasi kehilangan ketebalan pipa penyalur dapat dijelaskan oleh variabel bebas Cl dan pH sebanyak 85 %.

Dengan angka-angka parameter dalam Tabel 3.20 didapatkan formula hubungan antara variabel pengurangan ketebalan pipa penyalur panas bumi dengan variabel servisnya sebagai berikut:

$$\Delta y = \left(1,9 \times 10^{-15} + 3,7 \times 10^{-4} * Cl - 9,67 \times 10^{-5} pH \right) (t)^{-4,325} \quad (3.3)$$

Tabel 3.20 Estimasi parameter

Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
k0	1.988E-15	.487	-1.351	1.351
k1	3.71E-4	2611.816	-7251.562	7251.563
k2	-9.671E-5	.000	-9.671E-5	-9.671E-5
n0	-4.329	1.867	-9.514	.855

ANOVA^a

Source	Sum of Squares	df	Mean Squares
Regression	3.893	4	.973
Residual	.627	4	.157
Uncorrected Total	4.520	8	
Corrected Total	4.303	7	

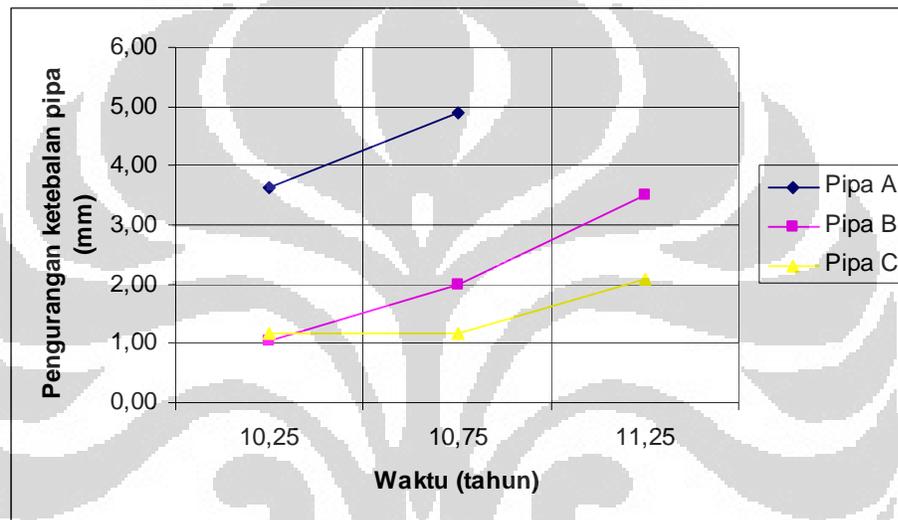
Dependent variable: Zscore(Y)

a. R squared = $1 - (\text{Residual Sum of Squares}) / (\text{Corrected Sum of Squares})$
 = .854.

Persamaan tersebut menyatakan hubungan langsung antara penipisan dinding pipa penyalur (Δy) dengan konsentrasi Cl dan tingkat keasaman pH servis pipa penyalur. Persamaan (3.3) sejara jelas menunjukkan signifikansi pengaruh variabel Cl dan pH

3.5.6. Perubahan Laju Penipisan Dinding Pipa Penyalur Terhadap Waktu dan Perubahan Konsentrasi Cl dan pH

Grafik *plotting* data pengurangan ketebalan pipa penyalur terhadap waktu yang disebabkan oleh perubahan konsentrasi Cl dalam servis dan keasamannya sebagaimana yang terekam dalam Tabel 3.10 menunjukkan ketidaklinieran laju korosi (lihat gambar 3.3).



Gambar 3.3. Grafik pengurangan ketebalan pipa terhadap waktu.

Sebenarnya grafik ini tidak dapat memberi kesimpulan yang baik karena data yang ditampilkan hanyalah representasi kecil dari keadaan pipa penyalur panas bumi, baik representasi waktu maupun representasi distribusi konsentrasi variabel servisnya.

Namun demikian, data ini sudah dapat memberikan angka-angka parameter persamaan regresi nonlinier penelitian. Dari persamaan ini, akan dibuat ulang rekaan grafik yang diharapkan. Analisa lebih jauh grafik rekaan dan grafik 3.3 di atas lebih jauh akan disampaikan pada bab 4.

4. ANALISA HASIL DAN VALIDASI

Pada bab 4 ini dipaparkan hasil analisa mengenai setiap langkah pekerjaan pada bab 3 yaitu : pengumpulan data, validasi data, pengolahan data dan hasil-hasilnya. Pada pengumpulan data antara lain disampaikan kemungkinan distorsinya. Pada langkah validasi dibahas uji normalitas, uji multikolinieritas dan uji autokorelasi. Analisa hasil membahas tentang prediksi korosi dan estimasi umur pipa penyalur. Langkah terakhir, validasi hasil, adalah menerapkan formula regresi yang didapatkan pada pipa penyalur yang ada di perusahaan *case study*.

4.1. Korelasi *Bivariate*

Dari table 3.6 terlihat bahwa korelasi antara variabel tak bebas dengan variabel bebasnya sangat kuat dengan nilai $p < 0,01$. Demikian juga, hubungan yang menyolok terlihat dari korelasi pH dengan penipisan dinding pipa penyalur yang bernilai negatif. Hal ini bermakna bahwa pengurangan ketebalan berlawanan arah dengan pH. Berkurangnya nilai pH akan menaikkan pengurangan ketebalan.

4.2. Uji Normalitas

Normalisasi pada data variabel-variabel karbondioksida (CO_2) dan amoniak (NH_3) menyebabkan variabel-variabel tersebut dikeluarkan dari penelitian karena datanya tidak terdistribusi normal. Perlu dilakukan pengukuran yang lebih banyak lagi untuk mendapatkan data yang lebih banyak agar diperoleh distribusi normalnya.

4.3. Uji Multikolinieritas dan Autokorelasi

Hasil autokorelasi pada variabel-variabel regresi, didapatkan H_2S mempunyai asosiasi yang tinggi (dengan pH). Hal ini dapat dipahami karena H_2S adalah senyawa yang bersifat asan dan penambahan konsentrasi H_2S mengakibatkan penurunan pH secara langsung. Multikolinieritas ini tidak dapat atau tidak perlu diobati karena adalah bagian dari hukum alam. Demikian pula dengan ion khlorida, variable ini mempunyai asosiasi dengan variabel lain namun tidak dikeluarkan dari variabel karena nilai multikolinieritasnya 0,84 masih di bawah ambang multikolinearitas yang 0.90.

4.4. Distorsi

Beberapa hal yang menyebabkan distorsi dalam analisa ini adalah:

1. Pos pengambilan sampel yang tidak merepresentasikan keadaan variabel sebenarnya di dalam pipa penyalur dimana H₂S dan klorida diambil dari kolam penampungan sementara *brine* sebelum diinjeksikan ke sumur injeksi. Temperatur air terproduksi pada kolam ini pada saat pengambilan sampel berkisar sekitar 90 °C sementara temperatur uap di dalam pipa penyalur sekitar 600⁰ C. Distorsi variabel servis senyawa-senyawa dan ion-ion ini, terutama keasamannya (pH), sulit diprediksi.
2. Ketebalan pipa pada saat konstruksi di lapangan tidak diukur sehingga acuan ketebalan awalnya adalah ketebalan pabrikan material yang diatur oleh *ASME II D* yang mempunyai toleransi + 15 % dan - 17,5 %. Dari toleransi ini sudah terlihat distorsinya. Sebab lain, ketiadaan dokumen rekaman pabrikan pipa sehingga tidak diketahui ketebalan rata-ratanya.

4.5. Pengujian Kombinasi Variabel-variabel sebagai Variabel Linier dan Eksponensial

Setelah diuji seluruh kombinasi yang memungkinkan, didapatkan kombinasi terbaik berdasarkan koefisien determinasi R² terbesar sebesar 85 %. Dapat dicatat bahwa kedua variabel tersebut berkontribusi linier terhadap kehilangan ketebalan dinding pipa penyalur.

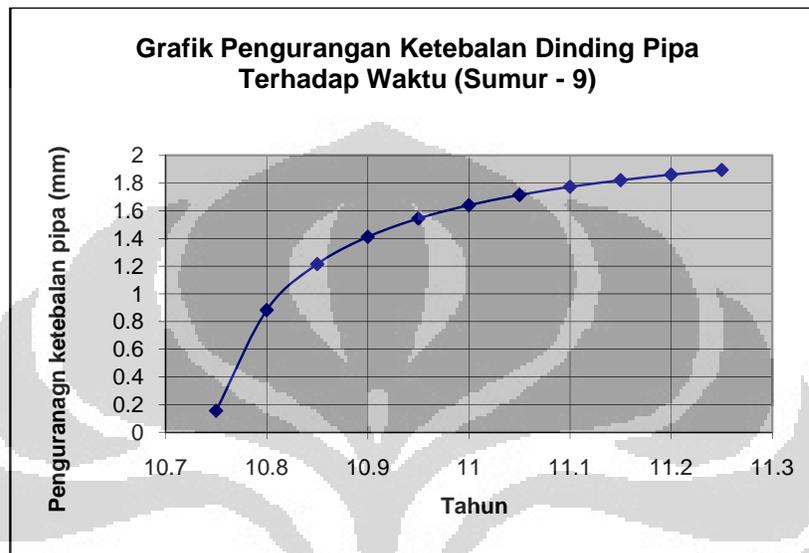
Kontribusi linier untuk pH sebelumnya juga tercatat untuk pipa penyalur minyak dan gas bumi dengan lingkungan tanah yang menjadi penyebab korosinya.

4.6. Analisa Persamaan Regresi Nonlinier Pipa Penyalur Panas Bumi, Interpretasi Parameter dan Model Pertumbuhan Karat

Dari keluaran SPSS yang ditampilkan pada Tabel 3.20 dituliskan persamaan regresi yang sebelumnya telah dituliskan pada bab 3 dengan persamaan 3.3 yang dituliskan lagi di bawah:

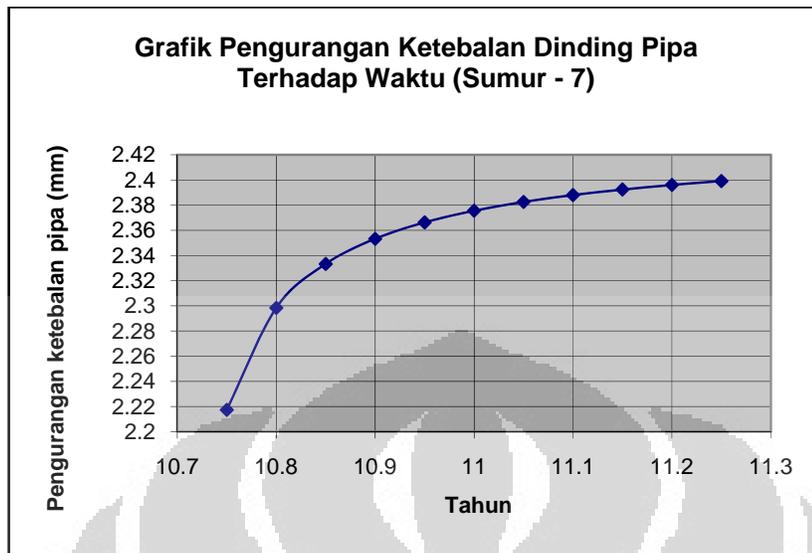
$$\Delta y = \left(1,9 \times 10^{-15} + 3,7 \times 10^{-4} * Cl - 9,67 \times 10^{-5} pH \right) (t)^{-4,325}$$

dengan koefisien determinan $R^2 = 0.847$ sebagaimana yang tertulis di bawah tabel. Koefisien tersebut menunjukkan bahwa variasi kehilangan ketebalan pipa penyalur dapat dijelaskan oleh variabel bebas Cl dan pH sebesar 85 %.



Gambar 4.1 Grafik pengurangan ketebalan dinding pipa penyalur sumur-9 terhadap waktu berdasarkan plot persamaan (3.1).

Persamaan regresi yang telah didapatkan dari proses penelitian dibuatkan grafiknya dengan memasukkan data artifisial dengan resolusi yang lebih tinggi dari data penelitian sebagaimana gambar 4.1 dan 4.2. Dari grafik terlihat bahwa ada kecenderungan makin lama, di penghujung usia pipa penyalur, kecepatan korosi melambat. Pada kasus pipa penyalur panas bumi *case study*, memang kondisinya berada pada penghujung umurnya sebagaimana disampaikan pada penjelasan gambar 4.3 sampai dengan 4.6. Namun, kecenderungan ini belum dapat diabsahkan sebelum penelitian menyeluruh, yang melibatkan data keseluruhan umur pipa penyalur panas bumi dilibatkan. Kecenderungan ini didapatkan dari sifat-sifat korosi pada pipa penyalur gas dan minyak bumi sebagaimana referensi penelitian ini. Bila nanti data pada pipa penyalur panas bumi tidak menunjukkan sifat demikian, persamaan regresi nonlinear ini tidak tepat untuk diaplikasikan pada kasus pipa penyalur panas bumi.



Gambar 4.2 Grafik pengurangan ketebalan dinding pipa penyalur sumur-7 terhadap waktu berdasarkan plot persamaan (3.1).

4.7. Validasi Paramter dan Daerah Kerja

Parameter yang telah didapatkan dari data penelitian perlu divalidasi dengan pipa penyalur lain. Sebelum memvalidasi, hal-hal yang perlu diperhatikan adalah daerah valid/absah dari parameter ini. Daerah kerja parameter ini terbatas karena data penelitian hanya melingkupi varian waktu yang tersedia yaitu pada kisaran 8 tahun sampai 11 tahun. Artinya, parameter dan formula ini hanya dapat divalidasi dengan menggunakan pipa penyalur instalasi kilang panas bumi *case study*.

4.8. Laju Korosi

Dengan memasukkan nilai-nilai pH dan Cl pipa penyalur case study pada persamaan 3.1 dapat diperoleh prediksi laju pengurangan ketebalan pipa yang pada gilirannya dapat digunakan untuk memperkirakan sisa umur pipa yang merupakan komponen penting kilang panas bumi.

Prediksi laju korosi pipa penyalur case study berturut-turut adalah :

- 1.333 mm per tahun untuk pipa penyalur pada sumur 7,
- 0,888 mm per tahun untuk pipa penyalur pada sumur 9

4.9. Perkiraan Umur Pipa Penyalur

Untuk menganalisa umur sisa pipa penyalur digunakan persamaan (4.1) yang diacu dari standar *ANSI/ASME 31.1 Power Piping*. Standar ini menjadi acuan desain dan operasi pipa penyalur panas bumi. Dengan menghitung ketebalan minimum yang dibutuhkan untuk menahan tekanan servis panas bumi *case study* sebesar 12 kg/cm², maka didapatkan data ketebalan minimum yang dibutuhkan dan selisih ketebalan yang masih dapat digunakan yang menjadi sisa umur dari pipa penyalur tersebut.

$$t_m = \frac{P D_o}{2 (SE + Py)} + A \dots\dots\dots (4.1)$$

t_m = *minimum required wall thickness* = ketebalan minimum dinding pipa

P = *Internal Design Pressure* = tekanan desain internal

D_o = *Outside Diameter of Pipe* = Diameter luar pipa

S = *Maximum Allowable Stress in material due to internal pressure*
= Tekanan Maksimum yang diperbolehkan pada Material karena Tekanan internal servis

E = *Joint Efficiency*

y = *Koefisien yang harganya diberikan dalam tabel 104.1.2 (A) ASME 31.1*

A = *Tambahan ketebalan untuk mengkompensasikan Corrosion Allowance, kehilangan ketebalan karena ulir dan lain sebagainya*

Data ketebalan dinding pipa penyalur minimum yang diperlukan (*minimum thickness required*) *case study* yang dihitung menggunakan persamaan 4.1 sebagaimana dalam tabel 4.1 di bawah. Tabel tersebut juga berisi ketebalan pengukuran terakhir pada tahun 2009 (t_{act}) dan selisih ketebalan antara ketebalan terukur dan ketebalan minimum yang dibutuhkan untuk menahan tekanan operasi pipa penyalur panas bumi.

Dari data laju korosi dan data tabel 4.1 didapatkan perkiraan sisa umur pipa penyalur-pipa penyalur *case study* sebagaimana tabel 4.2. Dari tabel tersebut

Tabel 4.1 Perkiraan Sisa Ketebalan yang diizinkan utk Operasi

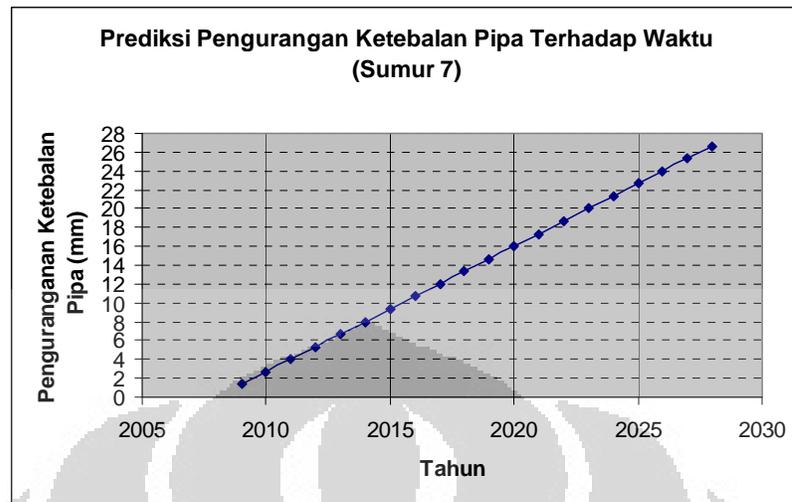
	t_m	t_{act}	Selisih
Pipa Penyalur Sumur-7	5,4 mm	12,87 mm	7,47mm
Pipa Penyalur Sumur-9	4,3 mm	7,27	3 mm

dapat dilihat umur pipa penyalur sumur 9 tinggal satu tahun lagi dan umur pipa penyalur sumur 7 tinggal 5 tahun lagi.

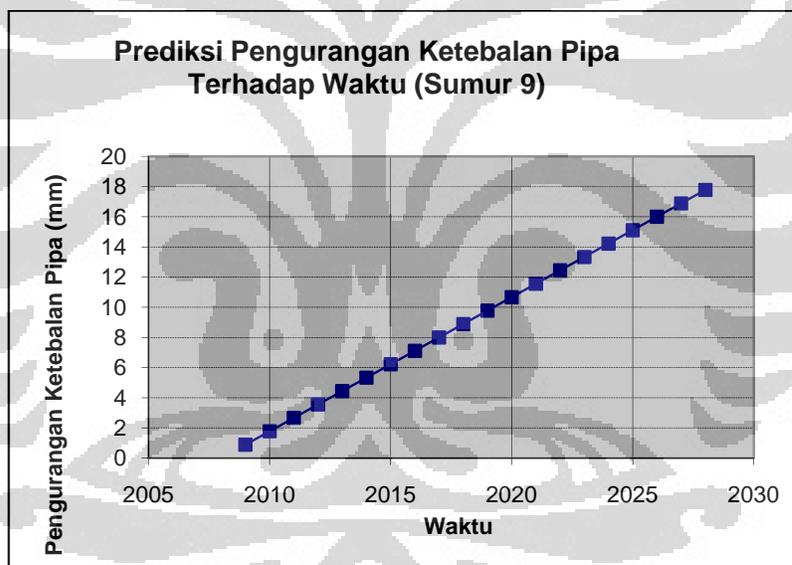
Tabel 4.2 Perkiraan Umur Pipa Penyalur Case Study

Tahun	Sumur 7	Sumur 9
2010	1.333 mm	0.8888 mm
2011	2.666 mm	1.7776 mm
2012	3.999 mm	2.6664 mm
2013	5.332 mm	3.5552 mm
2014	6.665 mm	4.444 mm
2015	7.998 mm	5.3328 mm
2016	9.331 mm	6.2216 mm

Dari sini jelas bahwa umur pipa penyalur tidak sesuai dengan spesifikasi tekniknya dimana pada umumnya pipa penyalur dirancang untuk beroperasi minimal 20 tahun. Kehadiran senyawa-senyawa penyebab korosi menjadi salah satu penyebabnya yang tidak cukup dikompensasikan dalam desainnya yang bila mengacu kepada *ASME B31.1 Power Piping*, bila tidak ada pertimbangan rekayasa tambahan, corrosion allowance hanya diberikan 4,57 mm.

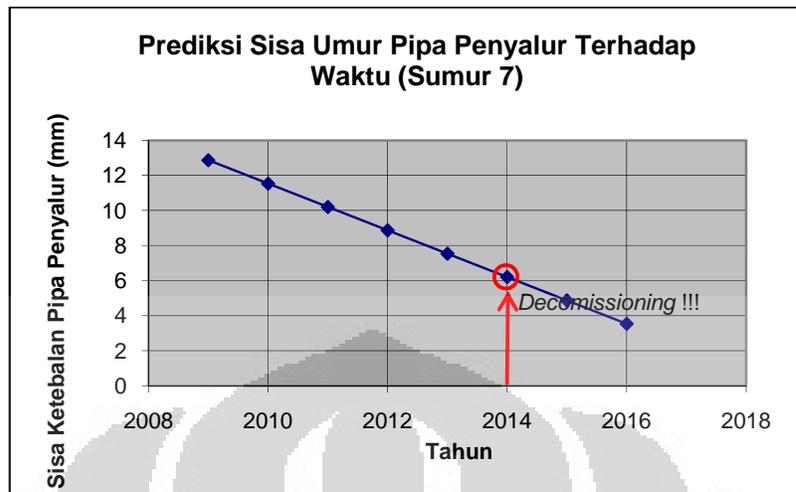


Gambar 4.3 Prediksi Pengurangan Ketebalan Pipa Penyalur Sumur 7



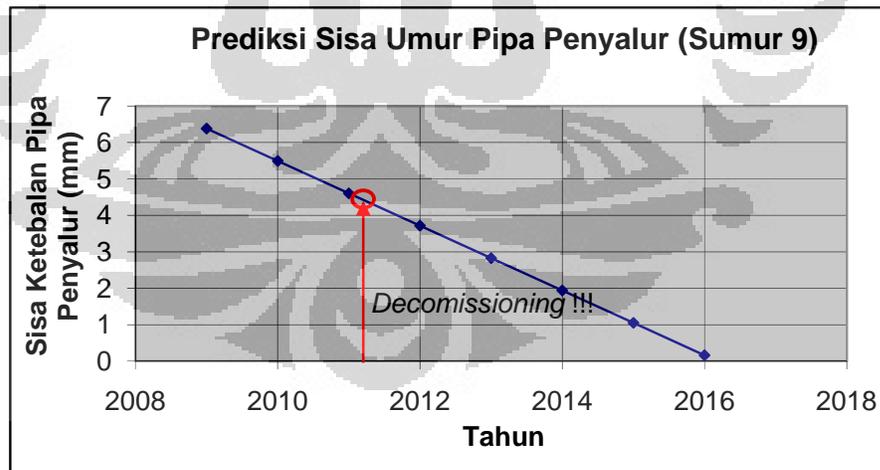
Gambar 4.4 Estimasi Pengurangan Ketebalan Pipa Penyalur Sumur 9 Terhadap Waktu

Untuk lebih lengkapnya, informasi tentang perkiraan umur dan perencanaan yang dapat dibuat menggunakan formula dan parameter ini dapat dilihat pada Tabel 4.2. Warna kuning menunjukkan waktu penggantian karena saat itu ketebalan pipa penyalur segera memasuki saat kritis sementara warna merah, menunjukkan pipa penyalur sudah tidak layak dipkai.



Gambar 4.5 Prediksi Sisa Umur Pipa Penyalur Sumur 7 Terhadap waktu (tahun)

Untuk mempermudah pembacaan estimasi umur sisa dari pipa penyalur juga diberikan dalam bentuk grafik sebagaimana gambar 4.1 dan 4.2. Grafik gambar 4.3 dan gambar 4.4 adalah gambar yang berbeda untuk menjelaskan hal yang sama. Dalam gambar 4.3 dan 4.4 diberikan tanda panah merah untuk menunjukkan saat pipa penyalur harus diganti atau *decomissioning*



Gambar 4.6 Prediksi Sisa umur Pipa Penyalur 9 terhadap waktu (tahun)

Dari grafik-grafik kehilangan ketebalan pipa penyalur terhadap waktu membuktikan kebenaran dari hipotesa bahwa perencanaan umur pipa penyalur

mesti dilakukan dengan rinci dimana salah satu pipa penyalur harus segera diganti, yaitu pipa penyalur sumur 9 (lihat gambar 4-3). Sementara dua sisa pipa penyalur yang lain mempunyai umur yang berbeda masing-masing berumur lebih dari 30 tahun dan yang lainnya harus diganti pada tahun 2018 (lihat gambar 4.1 dan 4.2)

Lebih jauh lagi, dari formula dan parameter dapat dibuat tabel yang menunjukkan konsentrasi variabel-variabel penyebab korosi terhadap umur masing-masing pipa penyalur yang dapat digunakan untuk acuan rencana pemasangan dan perawatan pipa di lokasi penelitian ini. Bila data penelitian ini mencakup waktu yang panjang dan jumlah sumur dan lokasi kilang yang lebih banyak maka tabel tadi bias berlaku secara umum.

4.10. Identifikasi Garam atau Asam

Sebagai kelanjutan dari teori yang dipaparkan di bagian awal pada bab dua, bahwa korosi pada pipa penyalur panas bumi disebabkan dua kelompok besar penyebab, yaitu garam dan asam, ingin dilihat apakah variabel H_2S dan Cl bersifat asam atautkah garam dalam uap dan koondensat panas bumi. Ternyata keduanya adalah asam yang disimpulkan dari:

1. H_2S berasosiasi di atas 90 % dengan pH sehingga dikeluarkan dari variabel uji lanjut pada saat uji multikolinieraritas dan autokorelasi.
2. Cl berasosiasi 80 % dengan pH.

Hal di atas juga menunjukkan bahwa unsur-unsur dari golongan 2 sisitem periodik (Li, Na, K, Rb, Cs, Fr) hadir sangat sedikit atau tidak sama sekali dalam uap dan kondensat panas bumi.

4.11. Pedoman Pengembangan Sistem *Safety* dan *Integrity* Perusahaan *Case Study*

Hasil penelitian ini dapat dijadikan sebagai masukan-masukan untuk pengembangan *safety* dan *integrity* kilang *case study* di masa yang akan datang yang disampaikan dalam butir-butir saran sebagaimana di bawah. Butir-butir masukan dapat diambil secara langsung dan dimasukkan dalam *Standard Operating Procedure (SOP)* UPL/UKL dan *SOP Inspection*.

1. Melakukan pengambilan data yang akurat setiap bulan untuk unsur-unsur dan senyawa-senyawa terlarut oksigen, karbondioksida, amoniak, khlorida, sulfida dan pH sebagai faktor penyebab korosi dan juga ion-ion dan senyawa-senyawa magnesium dan kalsium yang menyebabkan kerak. Pengambilan data setiap bulan ini selaras dengan peraturan pemerintah terakhir untuk pengambilan data UPL/UKL yang memang diharuskan setiap bulan.

Walaupun parameter oksigen, karbondioksida, magnesium dan kalsium tidak termasuk parameter yang menjadi ukuran baku mutu lingkungan, parameter tersebut perlu diambil untuk tujuan di atas. Pengambilan data ini tidak perlu mengeluarkan anggaran biaya dan waktu yang signifikan dengan menumpangkan pada kegiatan UPL dan UKL.

2. Pengukuran ketebalan pipa penyalur dan variabel servis pipa penyalur, khususnya yang terakhir, dilakukan di tempat-tempat yang representatif untuk sifat servis di dalam pipa penyalur, misalnya di *CDP (Condensat Drain Pot)* dan di *silencer* tiap sumur. Khusus untuk variabel pH, bila di tempat-tempat yang disebutkan tadi belum didapatkan pH yang sebenarnya dari servis di dalam pipa penyalur (dengan suhu sekitar 600 °C), lakukan ekstrapolasi data.
3. Perlu dibuatkan semacam *test valve* atau semacam CDP untuk kondensat pada saluran-saluran utama pipa penyalur untuk pengambilan data variabel servisnya yang selama ini tidak diambil. Konsentrasi variabel servis pipa penyalur utama adalah gabungan konsentrasi lebih dari satu saluran sumur yang bermuara di saluran utama.
4. Melanjutkan melakukan pengukuran dan perhitungan kontribusi faktor penyebab korosi yang lain dan penyebab kerak yaitu magnesium dan kalsium untuk pedoman perencanaan penambahan unit proses yang lain seperti CO₂ removal dan filter H₂. Data ini juga akan berguna untuk perencanaan komersial seperti ekspansi produksi CO₂ dan sabun belerang.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Hasil penelitian yang dilakukan pada pipa penyalur panas bumi perusahaan *case study* membuktikan bahwa hipotesa-hipotesa pada bab pendahuluan terbukti yang mana usia pipa penyalur panas bumi *case study* tidak sesuai dengan spesifikasi tekniknya yang seharusnya berumur minimal 20 tahun.

Selanjutnya, untuk melihat pencapaian tujuan penelitian thesis ini dapat disampaikan bahwa keseluruhan tujuannya tercapai yaitu :

1. Laju korosi sebagai fungsi dari variabel-variabel penyebab korosi didapatkan sebesar 1,333 dan 0,888 mm per tahun masing-masing untuk pipa penyalur sumur 7 dan sumur 9. Hasil ini didapatkan dengan memasukkan konsentrasi penyebab korosi (klorida dan pH) ke dalam persamaan regresi yang dihasilkan yaitu :

$$\Delta y = (1,9 \times 10^{-15} + 3,7 \times 10^{-4} * Cl - 9,67 \times 10^{-5} pH)(t)^{-4,325}$$

Persamaan ini dapat dipergunakan untuk daerah kerja penelitian dalam batas-batas pH, konsentrasi klorida dan tahun penelitian. Pengukuran pH dan klorida dilakukan dengan jumlah dan perioda yang cukup untuk mendapatkan distribusi normal (nyatanya). Satuan pengukuran yang digunakan harus sama dengan penelitian yaitu mg/L.

2. Estimasi umur pipa penyalur *case study* yang diperoleh dengan regresi nonlinier thesis ini masing-masing 13 tahun dan 17 tahun. Angka ini berbeda jauh dari spesifikasi tekniknya sebagaimana yang dituliskan di atas. Bahkan desain umur pipa penyalur biasanya jauh di atas desain umur kilang yang dapat mencapai 50 tahun.
3. Manfaat langsung dari formula thesis ini, pemilik kilang dapat memanfaatkannya untuk program RBI (Risk Based Inspection) termasuk di dalamnya untuk perencanaan penggantian pipa penyalur atau decommissioning.

5.2. Saran

Saran untuk penelitian lanjutan adalah pengambilan data yang lebih banyak yang dapat mewakili seluruh kondisi variabel, baik variabel waktu, variabel konsentrasi servis dan juga variabel ketebalan. Data ketebalan awal yang tidak terekam dapat diambil dari data statistik sertifikat material pada *heat number* terkait, namun diupayakan mendapatkan data pengukuran yang dilakukan perusahaan pada saat kontruksinya. Data ini besar kemungkinannya tersedia untuk kilang panas bumi yang baru karena pada tahun-tahun terakhir, pemerintah mensosialisasikan tentang pentingnya data awal ketebalan pipa penyalur terpasang.

Pengambilan data dilakukan pada pos-pos yang representatif untuk mendapatkan kondisi yang sebenarnya dari servis pipa penyalur, misalnya pengambilan data NH_3 dan CO_2 diambil di silencer. Pada *silincer*, konsentrasi amoniak dan karbondioksida diharapkan masih sama dengan yang ada di dalam pipa penyalur karena silencer terhubung langsung dengan pipa penyalur. Silencer adalah alat yang berfungsi meredam kebisingan pada saat pelepasan uap ke udara bila diperlukan, misalnya karena penyumbatan pada pipa penyalur.

Saran berikutnya adalah melakukan perhitungan dengan bantuan teknik Monte Carlo untuk dapat menjawab masalah keterbatasan data. Data yang terbatas itu disimulasikan untuk mendapatkan perkiraan sifat distribusi nyatanya.

DAFTAR REFERENSI

Andy Field, *Discovering Statistics Using SPSS*, SAGE Publications Ltd, London, 2005

ASME B31.1 Power Piping, An American National Standard, 2001 Edition, December 10, 2001.

ASME II, Boiler and Pressure Vessel Code, An International Code, Material, Part D, 2001 Edition, July 2001.

Benjamin Valdez and Michael Schorr, Margarito Quintero, Monica Carrillo, Roumen Zlatev and Margarita Stoytcheva, Juan de Dios Ocampo, *Corrosion and Scaling at Cerro Prieto Geothermal field*, Emerald Insight, 2009.

Gujarati D, *Basic Econometrics*, Fourth Edition, McGraw Hill Companies, 2004

Imam Ghozali, *Aplikasi Analisis Multivariate dengan Program SPSS*, 2002.

J. Bana's 1, U. Lelek-Borkowska*, B. Mazurkiewicz, W. Solarski, *Effect of CO₂ and H₂S on the Composition and Stability of Passive Film on Iron Alloys in Geothermal Water*, Sciencedirect, 2007

JC Velazquez, F Caley, A Valor, J M Hallen, *Predictive Model for Pitting Corrosion in Buried Oil and Gas Pipeline*, Corrosion May 2009, ProQuest Science Journal.

Julie Pallant, *A Step by Step Guide to Data Analysis using SPSS for Windows*, third edition, 2007.

Keith A Lichtl and Rosalind H. Julianl, *Corrosion and Scaling in High Gas (25wt%) Geothermal Fluids*, , Proceedings World Geothermal Congress, 2010

Kun-hu Wu, Li-qun Zhu, Wei-ping Li, Hui-cong Liu, Effect of Ca^{2+} and Mg^{2+} on Corrosion and Scaling of Galvanized Steel Pipe in Simulated Geothermal Water, *Corrosion Science* 52 (2010),

Miranda Herera et.al, Corrosion Degradation of Pipeline Carbon Steels Subjected to Geothermal Plant Condition, *Emerald Insight*, 2010

Nayyar, Mohinder L. Piping handbook / [edited by] Mohinder L. Nayyar, 7th ed. McGraw Hill, 2000.

Rahmat Zamzami, Analisa Proses Produksi Logam Timah dengan Perhitungan Resiko Melalui Pendekatan Monte Carlo dan Multiple Regression, 2009

Ronald DiPippo, Geothermal Power Plant, Principles, Applications and Case Studies, 2005.

S. F Mughabghab and T. M. Sullivan, Evaluation of Pitting Corrosion of Carbon Steels and Other Ferrous Metals in Soil Systems, *Pergamin Press*, 1989

Sridewi Nainggolan, Perbandingan Metode Marquardt Compromise dan Metode Gauss Newton Dalam Penaksiran Parameter Regresi Nonlinier, 2010

Tabachanic, B.G & Fidel L.S, Using Multivariate Statistic (5th Edition), Pearson Education Inc. 2007.

Y. Katano, K. Miyata, H. Shimizu, and T. Isogai, Predictive Model for Pit Growth on Underground Pipes, *Corrosion*, 2003.