

UNIVERSITI TEKNOLOGI MALAYSIA

BORANG PENGESAHAN STATUS TESIS[♦]

JUDUL: ANALISIS STATISTIK KE ATAS DATA PENGARATAN PAIP MINYAK

SESI PENGAJIAN: 2006/2007

Saya MOHD HAKIMI BIN ABDUL RAHMAN

mengaku membenarkan tesis (PSM/Sarjana/Doktor Falsafah)* ini disimpan di Perpustakaan Universiti Teknologi Malaysia dengan syarat-syarat kegunaan seperti berikut:

1. Tesis adalah hakmilik Universiti Teknologi Malaysia.
2. Perpustakaan Universiti Teknologi Malaysia dibenarkan membuat salinan untuk tujuan pengajian sahaja.
3. Perpustakaan dibenarkan membuat salinan tesis ini sebagai bahan pertukaran antara institusi pengajian tinggi.
4. **Sila tandakan (√)

SULIT

(Mengandungi maklumat yang berdarjah keselamatan atau kepentingan Malaysia seperti yang termaktub di dalam AKTA RAHSIA RASMI 1972)

TERHAD

(Mengandungi maklumat TERHAD yang telah ditentukan oleh organisasi/badan di mana penyelidikan dijalankan)

TIDAK TERHAD

Disahkan oleh

(TANDATANGAN PENULIS)

(TANDATANGAN PENYELIA)

Alamat Tetap: Kampung Relang,
34520 Batu Kurau,
Taiping, Perak.

Dr. NORHAZILAN BIN MD NOOR

Tarikh : 18 APRIL 2007

Tarikh : _____

CATATAN:

*

Potong yang tidak berkenaan.

**

Jika tesis ini SULIT atau TERHAD, sila lampirkan surat daripada pihak berkuasa/organisasi berkenaan dengan menyatakan sekali sebab dan tempoh tesis ini perlu dikelaskan sebagai SULIT atau TERHAD.

♦

Tesis dimaksudkan sebagai tesis bagi Ijazah Doktor Falsafah dan Sarjana secara penyelidikan, atau disertasi bagi pengajian secara kerja kursus dan penyelidikan, atau Laporan Projek Sarjana Muda (PSM).

“Saya akui bahawa saya telah membaca karya ini dan pada pandangan saya
karya ini memadai dari segi skop penganugerahan
Ijazah Sarjana Muda Kejuruteraan (Awam).”

Tandatangan :

Nama Penyelia : **Dr. NORHAZILAN BIN MD NOOR**

Tarikh : **18 APRIL 2007**

ANALISIS STATISTIK KE ATAS DATA PENGARATAN PAIP MINYAK

MOHD HAKIMI BIN ABDUL RAHMAN

Laporan dikemukakan sebagai memenuhi
sebahagian daripada syarat penganugerahan
Ijazah Sarjana Muda Kejuruteraan Awam

Fakulti Kejuruteraan Awam
Universiti Teknologi Malaysia

APRIL, 2007

STATISTICAL ANALYSIS ON PIPELINE CORROSION DATA

MOHD HAKIMI BIN ABDUL RAHMAN

A report submitted in partial fulfilment of the
requirement for the award of the degree of
Bachelor of Civil Engineering

Faculty of Civil Engineering
Universiti Teknologi Malaysia

APRIL, 2007

“Saya akui karya ini adalah hasil kerja saya sendiri kecuali nukilan dan ringkasan yang tiap-tiap satunya telah saya jelaskan sumbernya”

Tandatangan : -----
Nama Penulis : Mohd Hakimi bin Abdul Rahman
Tarikh : 18 APRIL 2007

*Buat mak, ayah dan adik-beradik yang tersayang
Terima kasih atas segala curahan dan sokongan yang telah dihulurkan selama ini.*

*Ku harapkan
Ini adalah permulaan bagi perjalanan hidupku.*

PENGHARGAAN

Alhamdulillah, syukur ke hadrat Allah s.w.t. kerana dengan limpah kurniaNya dapat saya menyiapkan laporan Projek Sarjana Muda ini.

Saya ingin merakamkan ucapan setinggi terima kasih kepada penyelia, Dr. Norhazilan Md. Noor kerana dengan tunjuk ajar, bantuan, pendapat dan dorongan daripada beliau membolehkan saya menyiapkan kajian dan laporan ini dengan jayanya. Ucapan terima kasih juga diucapkan kepada mak, ayah dan adik-beradik yang telah memberi banyak dorongan dan bantuan dalam menghadapi liku-liku kehidupan. Segala bantuan dan didikan yang diberikan akan sentiasa dikenang dan dijadikan sebagai pedoman untuk menghadapi hari-hari mendatang.

Tidak lupa juga kepada sahabat seperjuangan dalam Projek sarjana Muda ini iaitu Azran bin Heran@Royaney kerana kehadirannya telah banyak memberi bantuan dalam menyiapkan kajian serta laporan ini. Ucapan terima kasih juga kepada Mohd Faiza bin yahat dan Azlan bin Zainal Abidin kerana secara tidak langsung buah fikiran daripada mereka turut membantu dalam proses penyiapan Projek Sarjana Muda ini. Semoga Allah S.W.T. membalas segala jasa dan kebaikan yang telah dicurahkan.

Akhir sekali, penghargaan juga ditujukan kepada semua pihak yang terlibat sama ada secara langsung atau tidak langsung dalam menyiapkan Projek Sarjana Muda ini. Semoga segala budi baik yang dicurahkan mendapat balasan rahmat yang tidak terhingga.

ABSTRAK

Kegagalan struktur talian paip minyak dan gas meyebabkan implikasi kepada ekonomi dan mendatangkan bahaya kepada alam sekitar disebabkan tumpahan minyak. Oleh itu, ramalan keupayaan semasa pada peringkat awalan struktur talian paip minyak adalah penting untuk menyediakan penilaian awal bagi tujuan pemeriksaan, penyelenggaraan dan penggantian pada masa hadapan. Metodologi dalam kajian ini menunjukkan data-data karat yang diperolehi melalui alat pemeriksaan yang dikenali sebagai *pig* pada tiga tahun pemeriksaan yang berbeza dianalisis menggunakan pendekatan statistik. Objektif-objektif kajian ini adalah untuk menentukan kadar pertumbuhan karat, meramalkan masa paip akan gagal dan menilai kualiti data-data karat yang diperolehi daripada talian paip minyak yang terdedah kepada pengaratan dalaman. Model linear digunakan kerana sifatnya yang ringkas dan fleksibel untuk meramal dimensi karat pada masa hadapan. Kod penilaian DNV RP-F101 digunakan pada peringkat pemodelan parameter karat bagi meramalkan masa kegagalan paip minyak akibat pengaratan dalaman. Kod penilaian DNV RP-F101 digunakan terutamanya untuk menghitung tekanan maksimum yang dibenarkan bagi operasi paip minyak yang berkarat. Metodologi yang terlibat adalah pepadanan data, analisis kualiti data-data sepadan, analisis pertumbuhan dimensi karat dan membuat ramalan masa gagal bagi struktur talian paip minyak. Keputusan kajian sangat penting bagi pengendali paip minyak untuk merancang aktiviti pemeriksaan, penyelenggaraan dan penggantian pada masa hadapan.

ABSTRACT

The failure of oil and gas pipelines contributes to economic implications and also constitute a serious hazards to the environment due to leakage. Thus, the prediction of pipeline integrity in the early stage are important in order to provide assessment for future inspection, repair and replacement activities. The methodology proposed in this paper shows corrosion data obtained from periodic on-line inspection tools called pig over three times of inspection has been analysed using statistical approach. The objectives of this study are to predict the time of failure, determine the corrosion growth rate and to access the quality of data obtained for pipelines subjected to extensive internal corrosion. The linear model is deployed due to its simplicity and flexibility to project the corrosion dimension in the future. Recommended practice DNV RP-F101 is used to model the corrosion behaviour in order to predict the time of failure for corroded pipelines. DNV RP-F101 is mainly about accessing the allowable corroded pipe pressure. The methodology involved are data matching, matched data quality analysis, analysis of corrosion dimension growth and predicting time of failure for corroded pipelines. The results are important for pipeline operators to assist their planning program of inspection, repairing and replacement activities in the future.

KANDUNGAN

BAB	PERKARA	MUKA SURAT
	HALAMAN JUDUL	i
	HALAMAN PENGAKUAN	iii
	DEDIKASI	iv
	PENGHARGAAN	v
	ABSTRAK	vi
	ABSTRACT	vii
	KANDUNGAN	viii
	SENARAI JADUAL	xii
	SENARAI RAJAH	xiii
	SENARAI SIMBOL	xiv
BAB 1	Pengenalan	1
	1.0 Pendahuluan	1
	1.1 Kenyataan Masalah	2
	1.2 Objektif Kajian	4
	1.3 Skop Kajian	5
	1.4 Kepentingan Kajian	6

B 2	KAJIAN LITERATUR	7
2.0	Pengenalan	7
2.1	Petronas Serta Industri Minyak Dan Gas Di Malaysia	7
2.2	Struktur Perpaipan Minyak	9
2.3	Sejarah Penggunaan Struktur Perpaipan Minyak	10
2.4	Definisi Serta Mekanisma Pengaratan	10
2.5	Punca-Punca Pengaratan	13
2.5.1	Hidrokarbon CO_2 Dan H_2S	13
2.5.2	Bakteria Mikrobiologi	14
2.5.3	Kehadiran Air	15
2.5.4	Aliran Minyak Pada Tekanan Rendah	15
2.5.5	Faktor Suhu Dan Nilai pH	16
2.6	Kandungan Dan Komposisi minyak	17
2.7	Jenis-Jenis Pengaratan	18
2.7.1	Pengaratan Seragam Atau Pengaratan Am	18
2.7.2	Pengaratan Berlubang (<i>pitting</i>)	19
2.7.3	Pengaratan Menumpu	19
2.7.4	Pengaratan Bakteria	20
2.7.5	Pengaratan Titik	20
2.8	Pemeriksaan Karat Pada Struktur Paip Minyak	21
2.9	<i>Magnetic Flux Leakage (MFL)</i>	23
2.10	Teknik Ultrasonik	25
2.11	Langkah-Langkah Pencegahan	26
2.11.1	Salutan Perlindungan	26
2.11.2	Perlindungan Katod	27
2.11.3	Pemilihan Bahan	27
2.11.4	Penghalang Pengaratan (<i>inhibitor</i>)	28
BAB 3	METODOLOGI KAJIAN	29
3.1	Pemadanan Data	29
3.1.1	Parameter-Parameter Bagi Pemadanan Data	29

3.1.2	Toleransi Jarak Relatif Dan Orientasi Karat	30
3.2	Analisis Data-Data Sepadan	30
3.2.1	Analisis Kualiti Data-Data Sepadan	31
3.2.2	Penentuan Kadar Pertumbuhan Karat	32
3.2.3	Hubungan Kolerasi Antara Kadar Pertumbuhan Dan Ukur Dalam Karat	33
3.3	Penentuan Masa Berlakunya Kegagalan Paip Minyak	33
3.3.1	Kod Penilaian DNV RP-F101	34
3.3.2	Terbitan Persamaan DNV RP-F101	35
3.3.3	Penentuan Dimensi Karat Pada Tahun Ramalan	35
3.3.4	Pembinaan Garisan Model Kegagalan Tekanan	35
3.4	Carta Alir Metodologi Kajian	37
BAB 4	ANALISIS STATISTIK	41
4.0	Pengenalan	42
4.1	Kualiti Data-Data Pengaratan Yang Sepadan	43
4.2	Analisis Dimensi Karat	44
4.3	Analisis Pertumbuhan Karat	45
4.4	Analisis Penentuan Masa Kritikal Paip Minyak	46
4.4.1	Kod Penilaian DNV RP-F101	46
4.4.2	Persamaan Tekanan Kerja Maksimum	47
4.4.3	Persamaan Keadaan Kritikal Paip Minyak	48
4.5	Penentuan Keadaan Kritikal	49
BAB 5	KEPUTUSAN	51
5.0	Pendahuluan	51
5.1	Kadar Pertumbuhan Karat	51
5.2	Kolerasi Kadar Pertumbuhan Dan Ukur Dalam Karat	52
5.3	Penentuan Tahun Berlakunya Kegagalan Paip Minyak	54
5.3.1	Bahagian A	54

	xi
5.3.2 Bahagian B	56
5.4 Penilaian Keputusan	58
BAB 6 PERBINCANGAN DAN KESIMPULAN	61
6.0 Pendahuluan	61
6.1 Perbincangan Ralat Pada Data-Data Karat Paip Minyak	63
6.2 Perbincangan Kaedah-Kaedah Pembetulan Data-Data Karat	63
6.2.1 Model deWaard Dan Milliams	63
6.2.2 Kaedah Faktor Pembetulan Rawak	63
6.2.3 Kaedah Pembetulan Kecacatan Sifar	64
6.3 Perbincangan Jenis-Jenis Model Ramalan Pengaratan	65
6.4 Kesimpulan	65
RUJUKAN	68
LAMPIRAN	69

SENARAI JADUAL

JADUAL	TAJUK	MUKA SURAT
4.1	Maklumat-maklumat penting data kajian	41
4.2	Perbezaan jarak relatif bagi data-data pengaratan yang sepadan	43
4.3	Nilai purata dan sisihan piawai bagi ukur dalam karat	44
4.4	Nilai purata dan sisihan piawai bagi panjang karat	44
4.5	Kadar pertumbuhan karat	46
4.6	Perubahan nilai γ_d , ε_d dan $Std[d/t]$	49
5.1	Sisihan piawai dan purata kadar pertumbuhan karat	52

SENARAI RAJAH

RAJAH	TAJUK	MUKA SURAT
2.1	Mekanisma pengaratan	12
2.2	Peningkatan kadar pengaratan oleh penurunan nilai pH	17
2.3	Pengaratan seragam	18
2.4	Pengaratan berlubang	19
2.5	Komponen-komponen utama <i>pig</i>	22
2.6	<i>Pig</i> , alat pemeriksaan panjang dan ukur dalam karat	23
3.1	Prosedur kerja analisis statistik	37
3.2	Carta Alir Peringkat 1, Pematangan Data	38
3.3	Carta Alir Peringkat 2, Analisis Data-Data Sepadan	39
3.4	Carta Alir Peringkat 3, Penentuan Keadaan Kritikal Paip Minyak	40
5.1	Kolerasi kadar pertumbuhan CR_{90-92} dan ukur dalam karat 1990	53
5.2	Kolerasi kadar pertumbuhan CR_{90-95} dan ukur dalam karat 1990	53
5.3	Kolerasi kadar pertumbuhan CR_{92-95} dan ukur dalam karat 1992	53
5.4	Taburan ukur dalam dan panjang karat pada tahun 1995	55
5.5	Taburan titik karat pada tahun 1995	55
5.6	Taburan titik karat pada tahun 1998	55
5.7	Taburan titik karat pada tahun 2001	56
5.8	Keadaan kritikal paip minyak pada tahun 2003	56
5.9	Taburan titik karat pada tahun 1992	57
5.10	Keadaan kritikal paip minyak pada tahun 2000	58

SENARAI SIMBOL

D	=	Diameter (mm)
t	=	Ketebalan paip (mm)
CR	=	Kadar pertumbuhan karat
P_{corr}	=	Tekanan paip berkarat yang dibenarkan (N/mm^2)
γ_m	=	Faktor keselamatan untuk ramalan model pengawatan
$SMTS$	=	Kekuatan tegangan minimum (N/mm^2)
γ_d	=	Faktor keselamatan untuk ukur dalam karat
Q	=	Faktor pembetulan panjang karat
T	=	Tempoh masa ramalan
d_{T1}	=	Ukur dalam karat pada tahun T_1
d_{T2}	=	Ukur dalam karat pada tahun T_2
T_1	=	Tahun pemeriksaan, T_1
T_2	=	Tahun pemeriksaan T_2
L_{T1}	=	Panjang karat pada tahun T_1
L_{T2}	=	Panjang karat pada tahun T_2
$StD[d/t]$	=	Sisihan piawai alat pemeriksaan pada masa hadapan
$StD[d/t]_{asal}$	=	Sisihan piawai awalan alat pemeriksaan
$Stdev[d/t]$	=	Sisihan piawai sampel ukur dalam puncak karat

BAB 1

PENGENALAN

1.0 Pendahuluan

Struktur talian paip minyak merupakan elemen yang penting dalam industri minyak. Paip minyak berfungsi untuk mengalirkan bendalir hidrokarbon yang terdiri daripada minyak mentah dan gas semulajadi dari pelantar cari gali minyak yang berada di kawasan luar pantai ke daratan sama ada ke pusat pengumpulan atau ke loji penapisan minyak. Jarak pelantar cari gali minyak di tengah-tengah lautan dari daratan boleh mencecah beribu-ribu kilometer. Oleh yang demikian, paip minyak adalah penting bagi menjamin produktiviti yang terjamin dan pada kadar kecekapan yang tinggi. Masalah utama yang mengancam industri minyak di seluruh dunia adalah pengaratan pada bahagian dalam struktur talian paip minyak ini. Masalah pengaratan dalaman struktur paip minyak dasar laut semakin kritikal dan mempunyai implikasi yang buruk terutamanya kepada pengusaha industri minyak akibat daripada produktiviti yang berkurangan serta kos pengeluaran yang semakin meningkat. Pengaratan juga menyumbang bencana kepada alam semulajadi. Ini disebabkan berlakunya tumpahan minyak akibat daripada kebocoran paip minyak yang menjejaskan kawasan lautan, pantai dan hidupan laut. Selain itu kos yang besar diperlukan untuk mengganti semula struktur talian paip yang telah rosak akibat pengaratan.

Terdapat dua kategori fenomena pengaratan yang sering berlaku iaitu pengaratan *sweet* dan pengaratan *sour* yang dikelaskan berdasarkan punca-punca yang menyebabkannya berlaku. Pengaratan yang terjadi pada struktur dalaman paip minyak dasar laut berpunca daripada pelbagai faktor antaranya bakteria mikrobiologi, kehadiran air bersama-sama minyak, aliran pada tekanan rendah dan faktor suhu. Pertumbuhan karat yang berlaku secara berterusan adalah sukar diperhatikan dengan mata kasar. Tambahan pula, maklumat yang diperolehi melalui alat penyiasatan berteknologi tinggi seperti *pig* tidak dapat memberi maklumat yang tepat. Oleh yang demikian, kajian analisis statistik ini sangat penting terutamanya untuk menilai kadar pertumbuhan karat yang berlaku dan seterusnya dapat menilai keupayaan struktur tersebut dari aspek kadar pengaratan yang berlaku serta masa kegagalan struktur talian paip minyak pada masa hadapan.

1.1 Kenyataan Masalah

Pengaratan merupakan mekanisme utama kegagalan struktur talian paip minyak dasar laut sejajar kepentingan minyak dalam kehidupan manusia sebagai sumber tenaga contohnya untuk menggerakkan kenderaan bermotor, kegunaan industri-industri dan untuk tujuan memasak di rumah. Aliran minyak mentah dan gas semulajadi dalam talian minyak yang cekap dan secara berterusan dapat menjamin kestabilan ekonomi, sosial dan politik memandangkan industri ini menjadi nadi ekonomi kepada kebanyakan negara terutamanya di wilayah rantau teluk. Ancaman utama kepada potensi ini adalah pengaratan yang berlaku pada struktur dalaman talian paip minyak memandangkan ia tidak dapat dikesan dengan mata kasar dan data-data yang diperolehi melalui alat pemeriksaan sentiasa terdedah kepada ralat. Kegagalan paip minyak akibat pengaratan akan mengundang kepada kerugian kepada syarikat operasi minyak, merosakkan alam sekitar dan membawa kematian. Contohnya di Venezuela pada tahun 1993, 51 orang kebanyakannya pekerja syarikat operasi minyak mati akibat talian paip minyak yang bocor akibat pengaratan dalaman, terbakar dan meletup. Peristiwa yang sama turut berlaku di New Jersey, Amerika

Syarikat melibatkan kematian lebih daripada 50 orang. Bagi mengelakkan peristiwa sedemikian daripada berulang, adalah penting bagi kajian ini bagi menentukan integriti struktur talian paip minyak pada masa-masa yang tertentu terutamanya untuk meramalkan masa struktur ini akan gagal akibat mekanisma pengaratan.

Kebiasaannya, program penyelenggaraan paip minyak dilakukan berasaskan skala masa. Program ini adalah kurang berkesan kerana melibatkan peruntukan kewangan yang besar dan penggunaan masa yang berlebihan. Pemeriksaan terhadap struktur dalaman paip minyak dasar laut sangat mahal. Dianggarkan pihak industri terpaksa membelanjakan kira-kira US\$ 204,000 bagi setiap 50 batu untuk menjalankan pemeriksaan fenomena karat pada struktur dalaman talian paip minyak dasar laut ini. Pihak industri tidak mampu menanggung beban kos yang sangat tinggi ini memandangkan peringkat penyelenggaraan perlu dilakukan pada skala besar dan secara kerap. Terdapat pula proses pemeriksaan yang dilakukan di sepanjang talian paip minyak atau pemeriksaan pada segmen-segmen yang tidak berkarat. Adalah lebih efektif sekiranya proses penyelenggaraan dilakukan pada segmen-segmen yang telah dikenal pasti tahap pengaratannya dan benar-benar memerlukan bagi mengelakkannya gagal. Metodologi kajian ini membolehkan integriti dan kadar pengaratan yang berlaku pada setiap segmen dapat dilakukan dan seterusnya program penyelenggaraan yang tersusun, berkesan dan cekap dapat dirancang.

Pengaratan pada permukaan dalam paip minyak dapat dikesan dengan menggunakan peralatan berteknologi tinggi yang dikenali sebagai *pig* yang menggunakan teknik *magnetic flux Leakage (MFL)* atau *ultrasonic*. Alat *pig* bergerak di dalam paip minyak dan pada masa yang sama akan merekodkan perubahan saiz ketebalan paip minyak dalam bentuk isyarat elektrik. Melalui isyarat elektrik yang diperolehi maklumat tentang keadaan karat yang berlaku seperti ukur dalam puncak, panjang, orientasi karat dan panjang melengkung karat dapat diketahui. Walaupun alat *pig* diiktiraf sebagai peralatan berteknologi tinggi dan dapat memberi maklumat yang diperlukan, tetapi data-data yang diperolehi sentiasa terdedah kepada ralat. Ralat yang berlaku disebabkan oleh beberapa faktor seperti lubang karat yang ditutupi sediment, spesifikasi alat yang berbeza, halaju *pig* dalam paip minyak sentiasa berubah dan

keadaan persekitaran dalam paip yang berbeza. Melalui kaedah statistik dan penggunaan kod penilaian RP-F101, keputusan yang lebih tepat dapat berdasarkan situasi sebenar dapat diramalkan. Oleh yang demikian, kajian analisis statistik ke atas data pengamatan struktur talian paip minyak dasar laut ini sangat penting kerana ia menyediakan penyelesaian yang terbaik kepada permasalahan seperti mana yang telah diterangkan di atas. Hasil daripada keputusan analisis statistik membolehkan penilaian kadar pertumbuhan karat masa hadapan struktur paip talian minyak dasar laut diketahui dan seterusnya ramalan masa struktur ini akan gagal dapat dilakukan. Hasil keputusan kajian dapat digunakan bagi membuat perancangan bagi tujuan penyelenggaraan, pemeriksaan dan penggantian struktur talian paip minyak pada masa hadapan sebelum struktur berkenaan gagal. Pengendali struktur ini dapat bersiap-sedia untuk menghadapi sebarang kemungkinan yang dijangka berlaku seperti menyediakan tangki simpanan minyak bagi membolehkan minyak dan gas ini diangkut dengan menggunakan kemudahan kapal pengangkut.

1.2 Objektif Kajian

Dalam kajian ini terdapat beberapa objektif atau tujuan yang ingin dicapai. Di antara objektif-objektif kajian ini ialah :

- i. Menentukan kadar pertumbuhan pengamatan struktur paip minyak dasar laut melalui data-data karat yang dikaji.
- ii. Meramalkan tahun berlakunya keadaan kritikal struktur paip minyak untuk gagal.
- iii. Membuat penilaian masa hadapan terhadap kadar pengamatan yang terjadi kepada struktur dalaman paip minyak.

- iv. Menggunakan kaedah statistik dan kebarangkalian bagi menentukan integriti struktur paip minyak dasar laut yang terdedah kepada pengaratan dalaman.

1.3 Skop Kajian

Kajian ini menumpukan kepada mekanisma pengaratan yang berlaku pada bahagian dalam struktur talian paip minyak. Pengaratan berlaku pada kedua-dua bahagian luar dan dalam struktur paip minyak tetapi kajian pengaratan terhadap bahagian dalam struktur paip minyak lebih utama kerana kebanyakan punca kegagalan paip minyak disebabkan oleh pengaratan yang berlaku pada bahagian dalam ini. Data untuk kajian ini diperolehi daripada struktur paip minyak yang berada di dalam laut. Selain itu, kajian ini memberi tumpuan mekanisma pengaratan pada struktur dalam paip minyak yang berlaku disebabkan minyak yang dialirkan melaluinya. Ciri-ciri dan kandungan minyak seperti kehadiran bakteria mikrobiologi, suhu, faktor tekanan kerja dan kehadiran molekul air menjadi punca pengaratan. Kajian ini merujuk kepada data-data pengaratan seperti ukur dalam, d panjang, l orientasi karat dan jarak relatif karat dari setiap segmen (*spool*) yang diperolehi semasa pemeriksaan paip minyak tersebut dengan menggunakan peralatan berteknologi tinggi yang dikenali sebagai *pig* dan kaedah *MFL*. Jenis pengaratan yang berlaku adalah daripada jenis pengaratan berlubang (*pitting*). Jenis kegagalan adalah pengaratan tunggal iaitu karat yang bertumbuh secara bebas tanpa dipengaruhi oleh karat-karat lain yang berada di sekitarnya.

Terdapat pelbagai jenis kod penilaian yang boleh digunakan untuk menentukan masa berlakunya keadaan kritikal paip minyak seperti ASME B31G, DNV RP-F101, SHELL dan simulasi Monte Carlo. Dalam kajian ini, kod penilaian DNV RP-F101 digunakan memandangkan ia adalah prosedur kerja yang kurang konservatif berbanding prosedur-prosedur kerja lain (Norhazilan, 2000). Di dalam

prosedur penilaian ini, faktor keselamatan digunakan pada nilai yang agak tinggi bagi menjamin sistem penilaian yang lebih tepat. Binaan struktur talian paip minyak ini adalah diperbuat daripada keluli karbon yang cenderung kepada pengaratan pada bahagian dinding dalamnya. Sifat semulajadi karat iaitu bertumbuh secara berterusan sejajar perubahan masa khidmatnya turut dipertimbangkan dalam mengakses sifat-sifat pertumbuhan karat.

1.4 Kepentingan Kajian

Kepentingan kajian ini membabitkan manfaat kepada pengusaha-pengusaha industri minyak melalui penilaian integriti struktur talian paip minyak pada masa hadapan dan manfaat kepada manusia dari aspek jaminan terhadap kualiti alam sekitar yang lebih baik memandangkan hasil kajian ini dapat membantu pengendali paip minyak mengelakkan berlakunya kebocoran dan seterusnya tumpahan minyak. Matlamat utama kajian ini adalah untuk menentukan kadar pengaratan pada struktur dalam paip minyak. Setelah kadar pengaratan pada struktur tersebut diketahui, keupayaan struktur paip minyak pada masa hadapan dapat dinilai.

Hasil dari kajian serta penilaian kadar pengaratan tersebut, program perancangan bagi aktiviti penyelenggaraan dan penggantian struktur paip minyak pada masa hadapan dapat dilakukan. Program penyelenggaraan berkala ini dapat dirancang bagi tempoh sepanjang jangka hayat paip minyak tersebut. Seperti mana yang diketahui, kajian ini menggunakan kaedah statistik bagi menentukan kadar pengaratan tersebut. Penggunaan kaedah statistik dapat meningkatkan kualiti maklumat serta hasil yang bakal diperolehi berbanding penentuan kadar pengaratan secara purata yang tidak mewakili kadar pengaratan sebenar yang berlaku.

BAB 2

KAJIAN LITERATUR

2.0 Pengenalan

Dalam bab 1, telah diterangkan tentang pengenalan kajian ini yang merangkumi pendahuluan, kenyataan masalah, objektif, skop kajian dan juga kepentingan kajian. Sebagai lanjutan, dalam bab 2 ini akan diterangkan tentang kajian literatur yang berkaitan kajian ini. Fenomena yang berkaitan kajian terhadap pengedaran dalam struktur dalaman saluran perpaipan minyak adalah sangat kompleks. Ini melibatkan kefahaman tentang sifat-sifat kimia minyak, kaji logam dan ciri-ciri hidraulik struktur tersebut yang saling berkaitan antara satu sama lain.

2.1 Petronas Serta Industri Minyak Dan Gas Di Malaysia

PETRONAS (Petroleum Nasional Berhad) diasaskan pada 17 Ogos 1974 sebagai syarikat minyak negara yang mempunyai hak pemilikan sumber minyak dan

gas di Malaysia seperti termaktub dalam Akta Pembangunan Petroleum 1974. Petronas telah berjaya diiktiraf sebagai di antara 500 syarikat terbesar di dunia oleh Majalah *Fortune* berdasarkan status PETRONAS yang mempunyai kepentingan di dalam 30 negara. PETRONAS berjaya meluaskan operasi pengeluaran dan penerokaan sumber minyak di luar negara seperti Syria, Turkmenistan, Iran, Pakistan, China, Vietnam, Libya, Angola dan banyak lagi Negara terutamanya di negara-negara Benua Afrika. Dianggarkan 80% perolehan kewangan Petronas diperolehi daripada operasi di negara-negara terbabit. Pada masa yang sama Malaysia turut mengeksport minyak ke negara-negara Jepun, Thailand, Singapura dan Korea Selatan. Melalui anak syarikatnya iaitu PETRONAS Carigali Sdn. Bhd, PETRONAS terlibat dalam penerokaan, pembangunan dan pengeluaran minyak dan gas melalui perkongsian kontrak bersama-sama syarikat gergasi lain. PETRONAS menghasilkan pelbagai produk untuk kegunaan pengguna dalam negara serta untuk tujuan eksport. Produk-produk tersebut termasuklah minyak kenderaan, diesel, minyak pelincir, kerosin dan minyak kapal terbang. Di Malaysia, PETRONAS memiliki dua loji penghasilan dengan keupayaan pengeluaran 256500 tong sehari dan tambahan 100000 tong sehari melalui loji pengeluaran di Afrika Selatan melalui anak syarikat, Engen Limited. Bagi industri petrokimia, PETRONAS mempunyai dua kompleks di Kertih, Terengganu dan di Gebeng, Pahang bagi mencapai cita-cita terutamanya untuk meningkatkan nilai tambah dalam sumber gas semulajadi.

Di Malaysia, pengeluaran minyak dan gas dilakukan di luar pantai terutamanya di Semenanjung Malaysia. Minyak dan gas yang dikeluarkan di Malaysia adalah berkualiti tinggi berdasarkan kandungan sulfurnya yang rendah. Syarikat Esso (M) Sdn. Bhd. anak syarikat ExxonMobil diberi tanggungjawab menjalankan cari gali dan pengeluaran industri ini di Malaysia. Esso beroperasi di tujuh lapangan atau blok terutamanya di kawasan Seligi. Di Sabah, Syarikat Petroleum Shell Sabah memonopoli pengeluaran dan cari gali minyak. Sementara itu, Malaysia turut menjalankan kerjasama pengeluaran minyak bersama-sama negara-negara jiran seperti Indonesia dan Thailand. Pada masa yang sama, Malaysia mengeksport 150 juta meter padu sehari ke Singapura melalui talian paip minyak. Malaysia turut mengimport gas dari Indonesia bagi kegunaan domestik. Langkah ini bertujuan untuk mengurangkan kos penggunaan dalam negara.

2.2 Struktur Perpaipan Minyak

Struktur talian minyak biasanya diperbuat daripada keluli karbon. Saiznya berbagai-bagai, dengan ukurannya boleh menjangkau sehingga diameter 200 mm hingga 900 mm manakala ketebalannya adalah di antara 4 mm hingga 25 mm bergantung kepada kegunaannya. Panjang struktur perpaipan minyak boleh mencecah sehingga ratusan kilometer. Tujuan utama pemasangan talian paip minyak adalah mengalirkan minyak dari struktur luar pantai contohnya dari pelantar cari gali minyak ke daratan terutamanya ke loji pengumpulan dan loji penapisan minyak. Perpaipan tersebut sentiasa terdedah kepada persekitaran yang tercemar memandangkan ia berada di dalam laut dan keadaan air masin. Beban-beban yang ditanggung oleh paip minyak adalah tekanan dalaman, beban paksi dan beban lenturan. Kebiasaannya, terdapat tiga jenis kecacatan karat yang berlaku dalam paip minyak iaitu kecacatan tunggal, berkait dan kecacatan kompleks. Kecacatan tunggal adalah karat yang tidak berinteraksi dengan karat yang berada disekitarnya dan diistilahkan sebagai kecacatan bebas. Kecacatan karat berkait adalah karat yang berinteraksi dengan karat yang berdekatan dengannya sama ada dalam bentuk paksi atau melengkung. Kecacatan karat yang kompleks adalah berbeza berbanding kecacatan karat lain kerana ia terhasil akibat dua atau lebih karat yang sama atau berbeza bergabung untuk membentuk satu kecacatan karat. Struktur dalaman perpaipan minyak terdedah kepada pengarat disebabkan kehadiran air pada sebatian petroleum yang dialirkannya, tindakan bakteria mikrobiologi, suhu dan faktor-faktor lain.

Disebabkan peranannya yang sangat penting untuk mengalirkan minyak serta bahan-bahan kimia petroleum, sebarang kebocoran yang berlaku akan membawa kesan yang buruk kepada alam sekitar, adalah perlu untuk sentiasa membuat pemeriksaan, kawalan serta penyelenggaraan ke atas struktur ini secara berkala. Untuk mengetahui keadaan sebenar dan membuat pemeriksaan ke atas struktur ini, peralatan yang dikenali sebagai *pig* digunakan. Secara ringkasnya, *pig* menggunakan teknik ultrasonik atau *MFL* untuk menjalankan pemeriksaan tersebut. Dalam kajian literatur ini, penekanan akan diberikan kepada pemeriksaan struktur paip minyak

dengan menggunakan teknik *MFL* memandangkan data yang diperolehi untuk kajian ini adalah dari teknik *MFL*.

2.3 Sejarah Penggunaan Struktur Perpaipan Minyak

Sejarah berlakunya penggunaan Struktur Perpaipan Minyak bermula pada tahun 1893 tetapi industri tersebut mulai berkembang pada tahun 1929 apabila Tuscarora Pipe Line Company Ltd, memulakan penghasilan produk berasaskan petroleum dan minyak. Kira-kira dua tahun berikutnya, Great Lakes Pipe Line Company, Atlantic Refining Company, Philips Petroleum Company, Socony Mobil Oil Company inc dan Sun Oil Company mula menuruti langkah Tuscarora Pipe Line Company Ltd untuk membina saluran perpaipan minyak bagi tujuan yang sama. Sejak dari itu, bermulalah penggunaan struktur talian minyak secara meluas. Lima tahun berikutnya iaitu pada tahun 1934, masalah pengaratan pada struktur dalaman saluran perpaipan minyak mula mendatangkan masalah kepada syarikat-syarikat terbabit. Secara rasminya mesyuarat yang pertama kali bagi membincangkan masalah pengaratan ini telah diadakan pada 1935 pada musim panas di St. Louis. Sejak dari itu dan sehinggalah ke hari ini, kajian dan pembangunan (*R & D*) telah diadakan untuk mengawal masalah pengaratan dalam struktur perpaipan minyak.

2.4 Definisi Serta Mekanisma Pengaratan

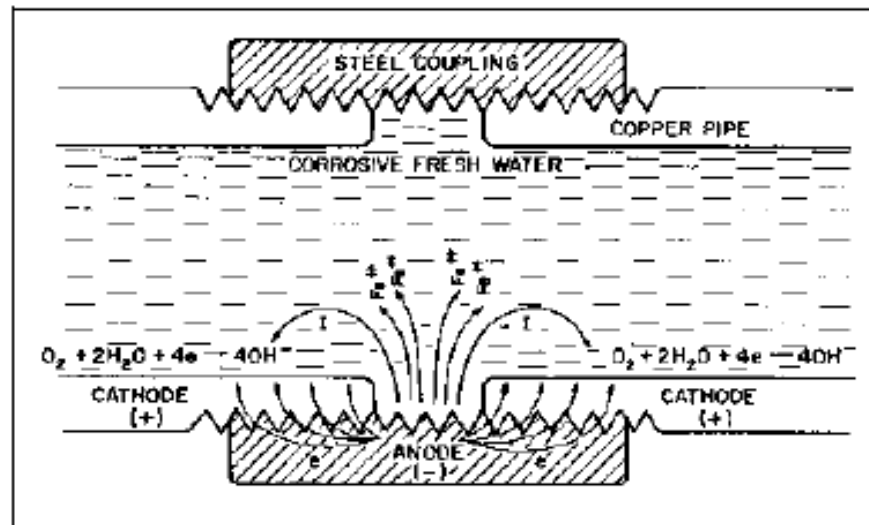
Istilah pengaratan boleh ditafsirkan sebagai merosakkan gred, mereput dan menambah keburukan sehingga menyebabkan struktur itu kurang kuat dan gagal akibat daripada tindak balas keadaan di sekeliling. Dalam konteks sains, pengaratan merupakan tindak balas bahan pepejal logam dengan sekeliling. Dari aspek

kejuruteraan, pengaratan adalah tindak balas logam pembinaan terhadap keadaan di sekeliling yang menyebabkan kesan buruk kepada sifat-sifat logam.

Selain itu, Evan (1960) membuat takrifan pengaratan sebagai tindak balas kimia yang melibatkan logam dan bukan logam serta ia merupakan hasil daripada kepelbagaian afiniti elektron dan beliau turut menyatakan pengaratan adalah satu proses elektrokimia bagi sel litar pintas. Selain daripada takrifan di atas, Uhlig (1971) turut memberi pandangan dengan menyatakan pengaratan adalah serangan yang boleh memusnahkan dan berlaku ke atas logam disebabkan oleh tindak balas atau proses elektrokimia di sekelilingnya. Beliau turut menegaskan kecacatan logam disebabkan oleh faktor fizikal tidak dikenali sebagai pengaratan tetapi disebut sebagai kakisan, *galling* dan *wear*.

ISO 8044 turut mendefinisikan pengaratan sebagai interaksi kimia yang terjadi disebabkan tindakan elektrokimia secara semulajadi. Interaksi antara persekitaran dan struktur keluli menyebabkan perubahan sifat-sifat keluli mendorong kepada kegagalan berfungsi akibat tindakan alam sekitar dan sistem teknikal yang menjadikan sistem terbabit berkait antara satu sama lain (Mattson, 1989).

Dari segi definisi kimia, pengaratan logam merupakan satu proses kakisan logam di mana tersebut dioksidakan secara spontan melalui kehilangan elektron untuk membentuk ion-ion logam. Logam di dalam bentuk asalnya merupakan unsur yang stabil. Walaupun begitu, kebanyakan logam wujud di dalam bentuk sebatian melalui tindak balas kimia bersama-sama unsur-unsur lain. Pengaratan ke atas logam adalah disebabkan oleh kecenderungan logam itu untuk kembali kepada keadaan asalnya. Contohnya, bijih besi sebenarnya merupakan ekstrak daripada ferum oksida sejenis sebatian karat yang boleh dijumpai pada permukaan besi tetulang yang diserang. Rajah 2.1 menunjukkan elemen-elemen pengaratan yang terdiri daripada anod, katod, elektrolit dan logam bagi membolehkan pengaliran elektron. Pengaliran elektron yang berlaku pada elektrolit bermula pada anod dan mengalir ke katod.



Rajah 2.1 : Mekanisma pengurangan

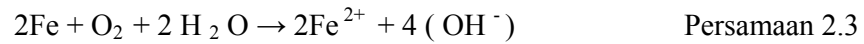
Sesetengah logam yang lebih reaktif daripada logam yang lain dan mempunyai kecenderungan yang besar untuk bertukar menjadi ion dalam larutan akues dan membentuk pelbagai sebatian lain. Oleh itu, kecenderungan inilah yang mengakibatkan berlakunya pengurangan ke atas struktur logam yang terendam di dalam larutan akues atau bersentuhan dengan tanah lembap hasil daripada tindak balas penurunan dan pengoksidaan atau yang lebih dikenali sebagai tindak balas redoks. Pada anod akan berlaku tindak balas pengoksidaan iaitu proses kehilangan elektron manakala pada katod akan berlaku tindak balas penurunan iaitu proses penerimaan elektron. Oleh itu, tindak balas pengoksidaan adalah seperti di bawah.



Manakala pada katod tindak balas penurunan akan berlaku yang menyebabkan pengurangan gas oksigen.



Persamaan keseimbangan kimia (pengoksidaan dan penurunan) yang berlaku dapat ditulis seperti di bawah.



Selain itu, menurut Lee Chong Son (1997), pengoratan merupakan proses elektrokimia yang melibatkan proses kimia dan pengaliran arus. Untuk pengoratan berlaku, tiga elemen perlu wujud iaitu sel galvani atau sel elektrik, elektrolit dan permukaan logam yang dapat menghasilkan perbezaan keupayaan elektrod.

2.5 Punca-Punca Pengoratan

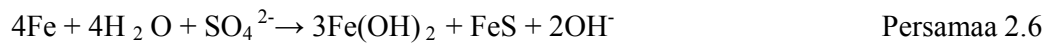
2.5.1 Hidrokarbon CO_2 Dan H_2S

Minyak dan gas yang mengalir bersama-sama sebatian hidrokarbon CO_2 Dan H_2 turut menyumbang kepada berlakunya mekanisma pengoratan. Pengoratan yang berpunca daripada hidrokarbon dapat dikelaskan kepada dua iaitu pengoratan *sweet* dan pengoratan *sour*. Kehadiran air adalah punca utama yang menyebabkan berlakunya pengoratan *sweet*. Kehadiran asid organik dan gas tertentu yang dapat larut dalam air akan menggalakkan pengoratan ini berlaku. Elemen-elemen ini akan bertindak dan membentuk asid karbonat yang bertindak pada struktur keluli karbon paip minyak untuk menghasilkan ion karbonat dan seterusnya membentuk pengoratan berlubang atau setempat.

Pengoratan *sour* pula disebabkan oleh tindakbalas gas hidrogen sulfida. Bakteria pengurang sulfat yang berada dalam minyak akan bertindak mengurangkan kandungan sulfat dalam minyak dan seterusnya bertindak balas dengan gas hidrogen sulfida bersama-sama struktur binaan paip minyak dan membentuk ferum sulfida. Pada bahagian anod dan katod, berlaku tindak balas seperti mana yang dinyatakan di bawah.



Gabungan bagi kedua-dua persamaan akan menghasilkan ferum sulfat seperti mana di bawah.



2.5.2 Bakteria Mikrobiologi

Mikrobiologi merupakan penyumbang utama kepada berlakunya pengaratan dalam struktur perpaipan minyak. Minyak yang telah dicemari oleh bakteria mikrobiologi ini sangat merbahaya kerana dengan kehadiran sekurang-kurangnya 0.1% kandungan air akan mendorong kepada mekanisme pengaratan. Pengaratan Mikrobiologi atau Pengaratan bacteria adalah pengaratan yang berpunca daripada mikroorganisma. Kebiasaannya, mikroorganisma yang terlibat ialah Chemoautotrophs. Pengaratan Mikrobiologi ini boleh bertindak pada kedua-dua struktur, besi dan bukan besi. Pengaratan yang berpunca daripada Mikrobiologi ini menjadi lebih ketara memandangkan ia boleh bertindak dengan atau tanpa kehadiran oksigen. Dalam keadaan tanpa atau sedikit sahaja kandungan bakteria, mikroorganisma ini akan mengubah ion sulfat kepada molekul hidrogen sulfida dan menyebabkan keadaan *sulfide stress cracknig*. Mekanisma ini berkait rapat dengan kehadiran gas-gas hidrokarbon seperti H_2S dan CO_2 . Sementara itu dalam kehadiran oksigen, mikroorganisma ini akan mengoksidakan besi kepada besi oksida dan besi hidroksida. Terdapat mikroorganisma lain yang mengoksidakan sulfur kepada asid sulfurik. Sel-sel yang tertumpu pada sesuatu tempat pada struktur perpaipan minyak ini menyebabkan berlakunya pengaratan galvanik.

2.5.3 Kehadiran Air

Faktor kehadiran air, tidak dapat dielakkan dalam mengkaji punca-punca berlakunya pengaratan dalam struktur perpaipan minyak. Ini adalah kerana, walaupun struktur tersebut digunakan untuk mengalirkan minyak tetapi kehadiran kuantiti air bersama-sama minyak memang tidak dapat dielakkan. Contohnya, kes tumpahan minyak pada struktur perpaipan minyak di Prudhoe Bay, Alaska. Seorang pegawai British Petroleum (BP) menyatakan bahawa, terdapat kehadiran air di dalam struktur tersebut. Apabila syarikat minyak tersebut bertindak mengepam keluar minyak dari perpaipan minyak tersebut, ia turut mengandungi kandungan air yang panas, mikroorganisma, sulfur dan karbon dioksida. Mekanisma pengaratan yang disebabkan oleh kehadiran air telah diterangkan seperti mana di atas. Kehadiran air bersama-sama minyak dalam struktur perpaipan minyak tidak akan mempunyai kesan sekiranya alirannya laju. Air tersebut akan bercampur dan bergerak secara sekata bersama-sama minyak. Ini dapat mengelakkan air tersebut daripada bertindak pada struktur dalaman perpaipan minyak tersebut.

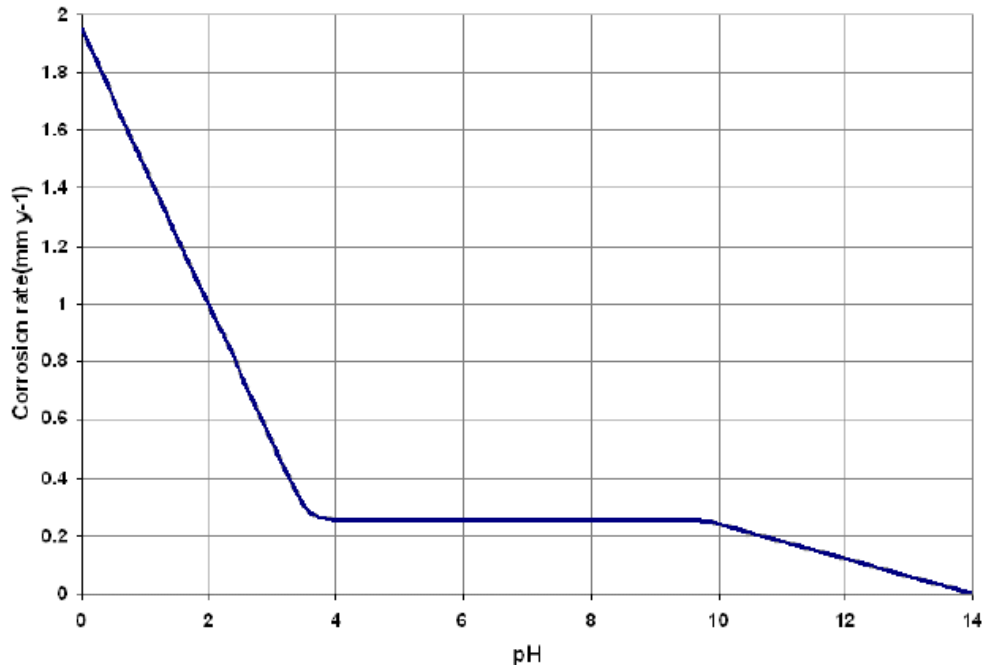
2.5.4 Aliran Minyak Pada Tekanan Rendah

Masalah pengaratan boleh berlaku pada minyak yang mengalir dalam paip pada tekanan rendah. Pada tekanan rendah, titisan-titisan air boleh bergabung dan membentuk saiz yang besar. Air ini seterusnya akan terasing dari aliran minyak. Sepertimana yang diterangkan di atas, air adalah satu faktor yang menyumbang kepada mekanisma pengaratan. Selain itu, bahan-bahan kotoran dalam minyak mempunyai kecenderungan untuk berkumpul dan membentuk enapan bahan enapcemar terutamanya pada bahagian hujung paip yang dihubung antara satu sama lain dengan menggunakan kaedah kimpalan. Bahan kotoran atau enapan ini akan bertindak bersama-sama bakteria pengaratan.

Aliran minyak dalam paip pada tekanan rendah berlaku disebabkan oleh keadaan paip yang telah lama digunakan dan tiada penyelenggaraan dilakukan. Terdapat satu cara yang diamalkan oleh jurutera untuk meningkatkan tekanan dalam paip iaitu dengan meletakkan paip tersebut pada ukur dalam yang lebih besar ke dalam laut. Cara ini mampu untuk meningkatkan tekanan dalam paip serta meningkatkan kadar pengeluaran, tetapi ia boleh menyumbang kepada pengurangan paip minyak.

2.5.5 Faktor Suhu Dan Nilai pH

Dalam kajian tentang punca-punca berlakunya pengurangan, pertimbangan perlu diberikan pada faktor suhu dan nilai pH minyak. Suhu minyak banyak mempengaruhi proses pengurangan. Peningkatan suhu akan meningkatkan kadar pengurangan. Walaupun begitu, peningkatan suhu pula akan mengurangkan kandungan gas oksigen dalam minyak. Peningkatan suhu dan penurunan kandungan oksigen mempunyai kesan kepada proses pengurangan. pH merupakan satu skala nombor yang menerangkan tentang kealkalian atau keasidan sesuatu sebatian. Pengurangan juga turut dipengaruhi oleh nilai pH. Nilai pH yang lebih rendah iaitu lebih bersifat asid lebih berisiko bagi mekanisma pengurangan untuk berlaku. Nilai pH yang lebih rendah merangsang reaksi pada bahagian katod dan memberi kesan kepada kestabilan permukaan struktur paip. Dalam rajah 2.1 di bawah menunjukkan pertambahan kadar pengurangan berdasarkan penurunan nilai pH. Semakin rendah nilai pH menunjukkan minyak lebih bersifat asid.



Rajah 2.2: Peningkatan kadar pengaratan oleh penurunan nilai pH

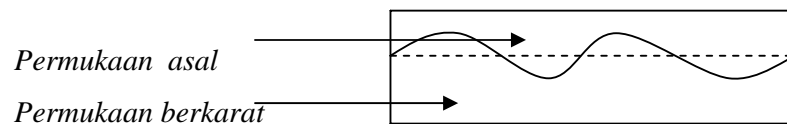
2.6 Kandungan Dan Komposisi Minyak

Minyak adalah sebatian hidrokarbon yang kompleks. Kandungan utamanya adalah terdiri daripada karbon dioksida dan hidrogen. Terdapat juga sulfur (10%), oksigen (5%), nitrogen (1%), ferum, aluminium dan kuprum dalam kuantiti yang kecil. Minyak yang mempunyai kandungan sulfur yang banyak dikenali sebagai *sour* atau *sweet*. Kandungan sulfur yang banyak dalam minyak akan mendorong berlakunya pengaratan *sour* atau pengaratan *sweet*. Kira-kira 10 peratus daripada sebatian ini adalah sebatian tepu dan berbau wangi. Terdapat molekul-molekul yang berbeza mengikut saiz dan berubah berdasarkan takat didihnya. Selain daripada sebatian hidrokarbon seperti yang diterangkan di atas, minyak turut mengandungi air dan mikroorganisma yang turut mendorong kepada berlakunya mekanisme pengaratan.

2.7 Jenis-Jenis Pengaratan.

2.7.1 Pengaratan Seragam Atau Pengaratan Am.

Melalui pengaratan seragam, corak dan kadar pengaratan bertindak secara seragam pada permukaan paip minyak. Tindak balas elektrokimia terjadi anod dan katod pada kadar yang sekata pada permukaan dalam paip minyak. Rajah 2.3 menunjukkan pengaratan pada struktur paip minyak.



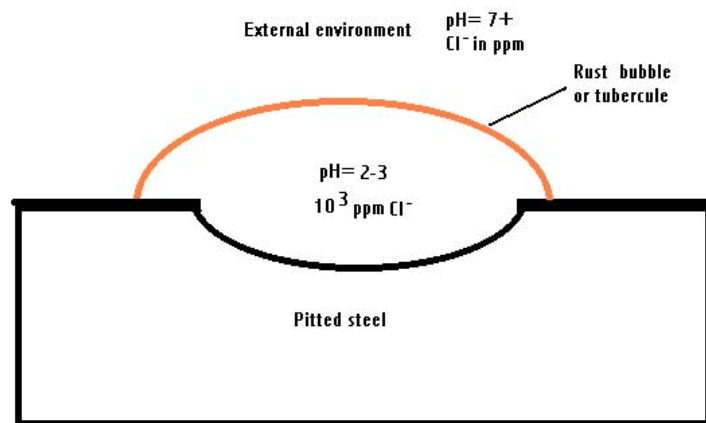
Rajah 2.3: Pengaratan seragam

Anod yang menjadi lokasi pengaratan semakin mengkakis dengan bertambahnya masa dan kawasan berhampiran anod asal akan mula aktif dan seterusnya muncul sebagai anod baru. Pertukaran anod dan katod baru pada permukaan tetulang akan meningkat sejajar perubahan masa. Ini menunjukkan pengaratan boleh dilihat sebagai kehilangan tebal karat pada permukaan tetulang berbanding masa. Ini dapat dinyatakan sebagai perubahan karat dalam unit $\mu\text{m} / \text{tahun}$. Nilai baki ketebalan struktur paip minyak yang diperolehi merupakan parameter penting bagi menentukan tahap pengaratan yang berlaku.

2.7.2 Pengaratan Berlubang (*pitting*)

Struktur paip minyak yang mengalami pengaratan berlubang akan mengalami kesan lubang pada permukaannya. Tindakan karat akan meninggalkan kesan

berlubang yang besar tetapi kedalamannya adalah kecil. Kedalaman lubang yang terhasil semakin bertambah mendorong struktur ini untuk rosak dan menyebabkan tumpahan minyak. Disebabkan pengaratan jenis ini sukar dikesan pada peringkat awal, kegagalan struktur boleh berlaku secara tiba-tiba. Jenis pengaratan berlubang ini sangat merbahaya kerana ia bertumpu pada satu kawasan dan kegagalan struktur boleh berlaku secara mendadak tanpa sebarang petanda awal. Rajah 2.4 di bawah menunjukkan mekanisma pengaratan berlubang yang berlaku pada permukaan keluli.



Rajah 2.4 : Pengaratan berlubang

2.7.3 Pengaratan Menumpu

Pengaratan penumpuan sel berlaku apabila terdapat persekitaran yang berbeza di sekeliling logam dan pada yang mempunyai kandungan klorida yang banyak. Pengaratan penumpuan sel juga dikenali sebagai pengaratan retak, pengaratan gasket dan pengaratan deposit kerana ia turut berlaku pada kawasan yang setempat sama seperti pengaratan berlubang. Pengaratan menumpu ini dapat menyebabkan keretakan terutamanya pada bahagian kimpal, sambungan, kelengkapan bibir dan penyangkut (*coupling*). Sekurang-kurangnya lima jenis penumpuan sel wujud. Kebiasaannya sel oksigen dan sel ion logam. Permukaan yang bersentuhan dengan elektrolit biasanya mempunyai penumpuan oksigen yang tinggi

akan menjadi bahagian katod dan anod pada keadaan sebaliknya. Bahagian anod akan berkarat terlebih dahulu berbanding bahagian katod yang mempunyai penumpuan oksigen yang tinggi.

2.7.4 Pengaratan Bakteria

Kehadiran bakteria seperti bakteria pengurang sulfat boleh menghasilkan hakisan pada struktur paip minyak. Bakteria ini menyerang pada keadaan *anaerobic* iaitu proses yang berlaku tanpa memerlukan kehadiran oksigen. Bakteria yang bertindak pada permukaan struktur paip minyak dasar laut akan membentuk ion sulfat. Pengaratan bakteria pada struktur keluli menjadi lebih kritikal dengan kehadiran kuantiti air air yang banyak.

2.7.5 Pengaratan Titik

Bagi pengaratan titik, bentuk kecacatan yang terhasil pada bahagian dalam permukaan paip minyak adalah berbentuk titik-titik atau lubang-lubang kecil yang dalam. Kebiasaannya titik-titik tersebut berada berdekatan antara satu sama lain. Pengaratan titik dapat diperhatikan pada jumlah bilangan yang besar dalam sesuatu kawasan karat tetapi pengaratan jenis ini sukar ini memerlukan masa yang lama untuk menembusi dinding paip minyak.

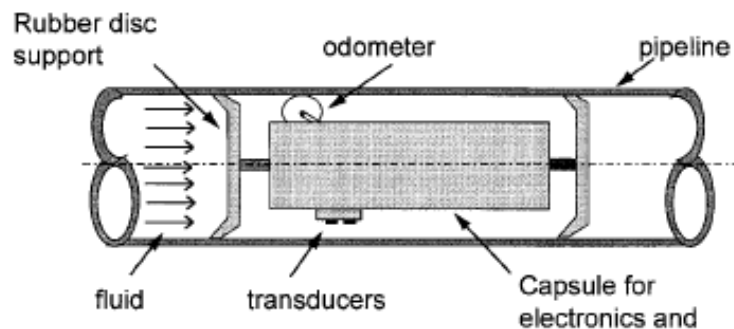
2.8 Pemeriksaan Karat Pada Struktur Paip Minyak

Pemeriksaan struktur dalaman paip minyak merupakan satu keperluan penting yang tidak boleh dielakkan. Pemeriksaan ini dilakukan bertujuan untuk mengetahui keadaan struktur paip minyak tersebut terutamanya bagi mengesan mekanisma karat yang berlaku dalam struktur tersebut. Pengaratan yang berlaku menjadi punca berlakunya kebocoran paip minyak. Sebarang kebarangkalian kebocoran mesti dikesan sebelum ianya berlaku dan tindakan segera perlu diambil bagi mengelakkan kerugian yang besar dan bencana kepada alam sekitar. Peralatan berteknologi tinggi yang digunakan untuk membuat pemeriksaan ke atas struktur tersebut adalah dikenali sebagai *pig*. *Pig* ini akan bergerak di dalam dan di sepanjang struktur perpaipan minyak sehingga boleh mencecah jarak sehingga satu kilometer untuk mengumpul data-data mengenai pengaratan seperti kedudukan karat (jarak relatif), ukur dalam karat, orientasi dan panjang karat yang berlaku. Peralatan *pig* ini direkabentuk berdasarkan saiz diameter paip minyak bagi memudahkan operasinya untuk mengesan karat dan juga dapat digunakan pada aktiviti pembersihan. Dengan ini keadaan sebenar struktur tersebut serta tahap pengaratan yang berlaku dapat diketahui. Bahagian-bahagian utama peralatan *pig* ini adalah:-

- i. Kapsul Silinder
- ii. Pengubah (*transducer*)
- iii. Pengukur (*odometer*)
- iii. Cakera Getah (*rubber discs*)

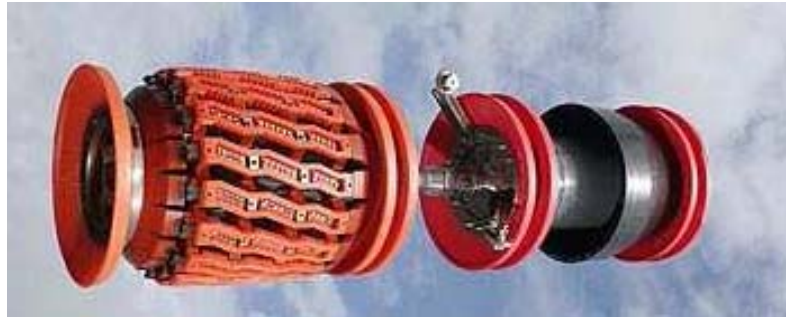
Kapsul silinder berputar pada paksinya dan pada pusat gravity bagi membolehkan pengubah ultrasonik bergerak pada arah yang bertentangan arah laluan minyak dalam perpaipan minyak tersebut. Cakera getah memastikan kapsul sentiasa berada pada kedudukan berpusat pada perpaipan minyak dan juga untuk menyokong pergerakan alat *pig* ini daripada daya tolakan oleh aliran minyak. Pengukur berfungsi

untuk mengukur dan merekodkan jarak perjalanan *pig*. *Odemeter* juga bertindak sebagai medium yang menghubungkan antara *pig* dan dinding dalaman perpaipan melalui denyutan elektrik. Komponen yang paling penting adalah pengubah yang berfungsi untuk menukarkan maklumat fizikal kepada denyutan elektrik. Melalui maklumat denyutan elektrik tersebut, maklumat-maklumat berkaitan geometri tersebut dapat ditentukan. Bagi membolehkannya beroperasi di dalam struktur paip minyak pada tempoh yang dikehendaki, sumber tenaga daripada bateri digunakan. Rajah 2.5 menunjukkan komponen-komponen utama *pig* dan kedudukannya dalam paip minyak sewaktu pemeriksaan untuk mengesan karat dilakukan.



Rajah 2.5: Komponen-komponen utama *pig*

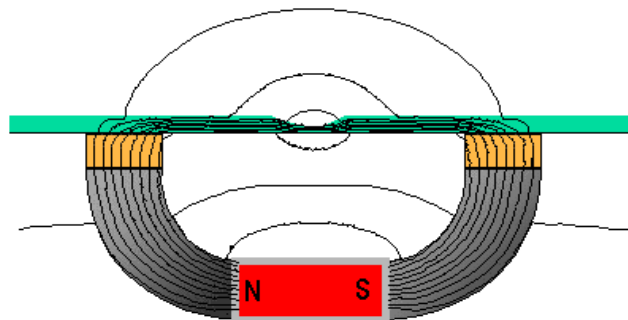
Sejajar perkembangan teknologi, pelbagai teknik serta kaedah telah dibangunkan oleh penyelidik bagi mengesan mekanisma pengaratan yang berlaku dalam paip minyak. Walaupun teknik serta kaedah yang digunakan berbeza, *pig* masih digunakan sebagai peralatan bagi membolehkannya bergerak di sepanjang paip minyak bagi mengumpul maklumat pengaratan. Terdapat dua teknik penting yang berjaya dibangunkan dan menjadi pilihan utama iaitu Teknik *Magnetic Flux Leakage (MFL)* dan Teknik *Ultrasonik*.



Rajah 2.6 : Pig, alat pemeriksaan panjang dan ukur dalam karat

2.9 *Magnetic Flux Leakage (MFL).*

Magnetic Flux Leakage (MFL), adalah alat pemeriksaan yang menggunakan kaedah magnet untuk mengesan karat pada bahagian dalam dan luar paip minyak terutamanya daripada jenis berlubang (*pitting*). *MFL* telah digunakan sejak suku abad yang lalu dan kerap digunakan dalam aktiviti pemeriksaan struktur dalam paip minyak ini memandangkan ia menguntungkan dari aspek pengurangan kos penyelenggaraan. Teknik *MFL* bergantung kepada *pig* bagi membolehkannya digerakkan di sepanjang paip minyak. Selain dari mengesan karat, *MFL* juga dapat mengesan calar dan juga rekahan yang berlaku dalam struktur ini. Rajah 2.7 di bawah menunjukkan aplikasi *MFL* dalam pemeriksaan struktur paip minyak dasar laut dengan mewujudkan keadaan bermagnet (*magnetic*) di dalam struktur tersebut.



Rajah 2.7 : Keadaan bermagnet yang wujud dalam struktur paip minyak

Prinsip utama alat ini ialah keadaan bermagnet dikenakan dalam struktur paip minyak pada kedudukan 5 meter pada lokasinya. Keadaan magnet yang seragam akan wujud pada sesuatu lokasi yang tidak berkarat. Pada kawasan permukaan dalaman paip minyak yang terdapat karat, *MFL* dapat mengesan perubahan magnetik yang berlaku. Kemudiannya perubahan magnetik yang dikesan dan telah direkodkan akan dianalisa. Hasil daripada data-data yang diperolehi, maklumat karat seperti kedudukan karat, orientasi karat, ukur dalam dan panjang karat dapat diketahui. Kelebihan utama menggunakan kaedah *MFL* ialah ia dapat mengesan karat pada kejituan saiz 1 mm. Secara asasnya, komponen-komponen utama *MFL* adalah seperti di bawah :

- i. Sistem Pengesan (*sensor system*)
- ii. Sistem Magnetik
- iii. Sistem Kuasa.
- iv. Sistem Perakam Dan Penilaian Data

Pengesan terdapat di dalam bahagian *magnetizer* dan dipasang bersama-sama bahan magnet. Bahan magnet di dalam bahagian *magnetizer* akan membentuk keadaan bermagnet di dalam struktur paip minyak di sepanjang pergerakannya. Pergerakan alat *pig* di sepanjang paip membolehkan pengesan untuk mengesan karat melalui gangguan pada keadaan magnetik pada permukaan dalam paip minyak. Kecacatan yang dikesan oleh bahan magnetik adalah disebabkan kehilangan besi. Magnetik memerlukan besi sebagai medium untuk bergerak, tanpa kehadirannya keadaan magnetik akan terganggu. Sistem perakam dan penilaian data akan merekodkan bacaan pengesan berdasarkan jarak perjalanannya atau perubahan masa. Bahagian kedua adalah anggota elektronik yang terdiri daripada bahan-bahan elektronik. Selain itu, system kuasa seperti bateri digunakan sebagai sumber tenaga dan *odometer* sebagai untuk merekodkan jarak dan halaju *pig*. Selepas pemeriksaan ke atas struktur tersebut selesai dijalankan, data yang diperolehi pada pengesan disimpan bagi membolehkan analisa dijalankan untuk menilai data dan bagi

menentukan ciri-ciri karat. Perisian komputer digunakan untuk menganalisa data-data yang diperolehi.

2.10 Teknik Ultrasonik

Penggunaan teknik ultrasonik untuk membuat pemeriksaan ke atas struktur dalaman paip minyak lebih mudah berbanding teknik-teknik lain termasuklah *Magnetic Flux Leakage (MFL)*. Teknik ini berasaskan kuantiti iaitu ia membuat pengukuran secara terus parameter-parameter karat dengan menggunakan pengubah (*transducer*). Teknik ultrasonik mempunyai keupayaan untuk membuat pemeriksaan ke atas bahagian-bahagian yang sempit contohnya pada kedudukan injap dan bahagian sambungan antara segmen paip yang dikimpal. Penggunaan teknik ultrasonik untuk mengesan pelbagai jenis karat dan saiznya dilakukan berdasarkan prinsip pengukuran halaju gelombang bunyi. Pengukuran ketebalan struktur paip adalah berdasarkan tempoh pergerakan gelombang dan ciri-ciri perubahan spektrum bunyi struktur dalam paip minyak. Walaupun begitu, teknik ultrasonik tidak sesuai untuk digunakan pada gas yang kering kerana ia memerlukan medium cecair bagi pergerakan gelombang. Tambahan pula, ultrasonik tidak dapat mengesan kewujudan sedimen pada lubang karat semasa peringkat dan ini seterusnya mengganggu fungsi *pig* semasa peringkat pembersihan paip minyak dilakukan.

Data yang diperolehi melalui teknik ultrasonik adalah dalam bentuk jarak di antara permukaan dalam paip dan ketebalan paip. Proses menganalisa data tersebut dilakukan dalam dua keadaan iaitu dalam talian dan luar talian. Ini melibatkan proses pengukuran masa kembara gelombang bunyi melalui pengubah. Melalui pengubah maklumat tentang ketebalan struktur paip minyak apabila ia bergerak melalui permukaan dalam dan luar paip minyak. Jarak di antara pengubah dan dinding paip boleh diperolehi daripada isyarat tersebut dan pengamatan pada permukaan dalam paip minyak dapat diketahui.

2.11 Langkah-langkah Pencegahan

Struktur dalaman perpaipan minyak yang tidak dilindungi, cenderung untuk mengalami pengaratan. Perhatian perlu diberikan bagi menangani pengaratan pada struktur ini di samping proses penyelenggaraan yang baik perlu sentiasa dilakukan. Pengaratan mengurangkan integriti struktur ini dan menyebabkan keadaan yang tidak selamat untuk operasi minyak. Berikut, dibincangkan empat kaedah untuk mengelakkan pengaratan daripada berlaku iaitu dengan menyediakan salutan perlindungan, perlindungan katod, pemilihan bahan yang sesuai dan bahan penghalang pengaratan (*inhibitor*).

2.11.1 Salutan Perlindungan

Menyediakan salutan perlindungan merupakan prinsip asas bagi mencegah pengaratan bagi menyediakan medium halangan antara permukaan paip minyak dan persekitaran. Salutan perlindungan disediakan pada struktur dalaman perpaipan minyak sebelum pemasangan paip dilakukan di tapak. Pemasangan salutan ini kebiasaannya dilakukan di kilang pengeluaran. Pemilihan salutan yang sesuai adalah berdasarkan kepada persekitaran, jangka hayat rekabentuk, tujuan salutan, keadaan permukaan salutan dan sejarah pengaratan lampau. Penggunaan kaedah salutan perlindungan melibatkan kos yang tinggi berdasarkan keperluan tenaga buruh dan keperluan bahan salutan pada kuantiti yang tinggi. Walaupun begitu, kaedah ini akan membawa keuntungan jangka panjang disebabkan salutan perlindungan terbukti dapat memanjangkan jangka hayat paip minyak.

2.11.2 Perlindungan Katod

Perlindungan katod (*cathodic protection*) sesuai untuk menghalang karat pada struktur yang terdedah atau terbenam dalam tanah. Perlindungan katod berfungsi apabila voltan elektrik pada kadar tertentu dikenakan kepada logam yang aktif seperti magnesium dan kuprum bagi membenarkan pengaliran elektron. Hasilnya, bahagian anod yang cenderung kepada pengaratan dilindungi manakala bahagian katod sahaja akan berkarat. Perlindungan katod hanya sesuai digunakan pada struktur logam yang berada di dalam air dan ditanam dalam tanah serta dapat disalut dengan bahan salutan. Walaupun begitu, kaedah ini lebih berkesan bagi struktur luaran struktur perpaipan minyak. Perlindungan katod dapat menghindari pengaratan daripada berlaku dan juga dapat memberhentikan pengaratan yang sedang berlaku.

2.11.3 Pemilihan Bahan

Pemilihan bahan merujuk kepada pemilihan dan penggunaan bahan yang tahan daripada pengaratan seperti keluli tahan karat, plastik dan logam campuran. Ini dapat memanjangkan jangka hayat struktur perpaipan minyak kerana ketahanan dan kekuatannya yang tinggi. Realitinya, kebanyakan bahan adalah berisiko kepada fenomena pengaratan. Langkah terbaik bagi memilih bahan yang sesuai adalah berdasarkan persekitaran di sekeliling paip minyak, jangka hayat yang diperlukan dan toleransi kadar pertumbuhan yang dibenarkan.

2.11.4 Penghalang Pengaratan (*Inhibitor*)

Penghalang pengaratan merupakan bahan kimia tertentu yang disuntik atau dialirkan bersama-sama bahan petroleum atau minyak untuk menjadi penghalang pengaratan pada struktur dinding dalaman perpaipan minyak dan mengurangkan kadar pengaratan. Contoh-contoh penghalang yang biasa digunakan adalah *organic sulfophosphate inhibitor (Tol-Aerometer-AQ1)* dan *sodium chromate*. *Organic sulfophosphate inhibitor* lebih kerap digunakan. Penggunaan *organic sulfophosphate inhibitor* dapat menurunkan kadar pengaratan secara mendadak dengan penggunaan 0.5 gelen sehari.

BAB 3

METODOLOGI KAJIAN

3.1 Pemadanan Data

Metodologi penting kajian pada peringkat pertama ini adalah pemadanan data-data karat. Peringkat pemadanan ini sangat penting bagi membolehkan analisis penentuan masa kegagalan paip minyak dapat dilakukan secara tepat pada titik-titik karat yang sama. Walaupun begitu, proses membuat pemadanan data ini adalah rumit dan memerlukan ketelitian yang tinggi memandangkan terdapat kira-kira 6000 bilangan data-data karat dan hakikat bahawa data-data karat hasil pemeriksaan melalui alat *pig* ini terdedah kepada ralat yang besar. Oleh yang demikian adalah sukar untuk memperolehi data-data sepadan sebenar yang tepat dan berkualiti tinggi.

3.1.1 Parameter-Parameter Bagi Pemadanan Data

Parameter-parameter yang digunakan bagi pemadanan data adalah jarak relatif dan orientasi bagi setiap data-data karat yang dipertimbangkan. Jarak relatif

merujuk kepada ukuran jarak sesuatu titik karat daripada pangkal setiap segmen atau *spool*. Orientasi pula merujuk kepada kedudukan sesuatu titik karat pada keratan rentasnya berasaskan skala masa pada struktur jam berdasarkan kedudukan nombor-nombor mengikut arah pusingan jam.

3.1.2 Toleransi Jarak Relatif Dan Orientasi Karat

Toleransi yang ditetapkan pada peringkat pemadanan data adalah antara nilai 0.00 m sehingga 0.15 meter bagi parameter jarak relatif manakala 30 minit pada parameter orientasi karat. Walaupun begitu, toleransi bagi parameter jarak relatif dan orientasi ini boleh ditingkatkan bagi memperolehi bilangan data-data sepadan yang lebih tinggi. Pertimbangan perlu dititikberatkan agar langkah ini tidak menjejaskan kualiti data-data sepadan memandangkan lebih banyak ralat yang dijangka pada nilai toleransi yang lebih besar.

3.2 Analisis Data-Data Sepadan

Peringkat kedua metodologi kajian ini adalah analisis kualiti data-data sepadan. Kualiti data-data pengamatan bergantung pada perbezaan jarak relatif dan orientasi titik pengamatan yang diperolehi hasil pertimbangan pada peringkat penentuan data-data pengamatan yang sepadan. Penentuan kadar pertumbuhan karat turut ditentukan dengan menggunakan persamaan linear. Memandangkan terdapat tiga set data karat, nilai kadar pertumbuhan karat tahun 1990 ke 1992 dapat ditentukan selain nilai $CR_{1990-1995}$ dan $CR_{1992-1995}$. Selain itu, hubungan kolerasi antara kadar pertumbuhan dan ukur dalam karat turut dikaji. Anggapan awal yang dijangka adalah nilai ukur dalam karat berubah secara linear mengikut peningkatan nilai kadar pertumbuhan karat setiap titik-titik karat.

3.2.1 Analisis Kualiti Data-Data Sepadan

Analisis pada peringkat ini melibatkan penentuan kualiti data-data sepadan yang diperolehi pada analisis peringkat pertama di atas. Parameter-parameter bagi analisis tersebut adalah ukur dalam, jarak relatif dan panjang karat. Bagi parameter ukur dalam karat dan panjang karat, nilai purata dan sisihan piawai bagi setiap data pengaratan dihitung. Melalui nilai purata dan sisihan piawai yang diperolehi, perbandingan dapat dilakukan bagi menilai ketepatan bagi setiap data-data karat dan seterusnya penentuan data tahun pemeriksaan yang paling tepat bagi digunakan pada analisis ramalan tahun kegagalan paip minyak. Sebaliknya, pendekatan bagi penentuan kualiti bagi parameter jarak relatif adalah berbeza. Persamaan bagi menilai kualiti jarak relatif bagi setiap data-data yang sepadan adalah seperti di bawah.

$$\Delta \text{ perbezaan jarak} = \text{jarak relatif 1} - \text{jarak relatif 2} \quad \text{Persamaan 3.1}$$

Petunjuk;

$$\begin{aligned} \Delta \text{ perbezaan jarak} &= \text{perbezaan jarak relatif antara dua titik karat} \\ \text{jarak relatif 1} &= \text{jarak relatif pada tahun penyiasatan sebelumnya} \\ \text{jarak relatif 2} &= \text{jarak relatif pada tahun penyiasatan seterusnya} \end{aligned}$$

Perbezaan jarak relatif bagi ketiga-tiga data karat dihitung dan seterusnya nilai purata perbezaan tersebut serta nilai sisihan piawainya dapat diketahui. Nilai sisihan piawai yang lebih tinggi menunjukkan selerakan data yang semakin besar.

3.2.2 Penentuan Kadar Pertumbuhan Karat

Kadar pengaratan dihitung menggunakan persamaan seperti di bawah dengan menganggap pertumbuhan karat berlaku secara linear seperti mana yang dicadangkan oleh Pandey (1997). Persamaan linear tersebut adalah seperti berikut.

$$CR = \frac{d_{T2} - d_{T1}}{T_2 - T_1}$$

Persamaan 3.2

Persamaan linear ini digunakan kerana ia ringkas serta fleksibel tanpa mengambil kira parameter-parameter tambahan seperti suhu aliran, tekanan karbon dioksida dalam paip minyak, halaju aliran dan diameter hidraulik struktur talian paip minyak.

Melalui ketiga-tiga nilai kadar pertumbuhan karat yang diperolehi, pemilihan kadar pertumbuhan karat yang dipercayai tepat dan kurang ralat dapat ditentukan. Pemilihan ini dilakukan berdasarkan nilai nilai ukur dalam purata dan nilai sisihan piawainya. Umumnya, nilai ukur dalam purata bagi tahun pemeriksaan yang lebih awal adalah lebih kecil berbanding nilai pada tahun pemeriksaan yang lebih tinggi. Ini adalah sifat semulajadi karat yang bertumbuh secara berterusan dan rawak. Selain itu, nilai sisihan piawai yang besar menunjukkan selerakan data dan ralat yang lebih besar. Oleh yang demikian, nilai purata ukur dalam karat yang lebih munasabah serta nilai sisihan piawai digunakan sebagai petunjuk semasa memilih kadar pertumbuhan karat yang dipercayai tepat dan kurang ralat.

3.2.3 Hubungan Kolerasi Antara Kadar Pertumbuhan Dan Ukur Dalam Karat

Analisis hubungan kolerasi antara kadar pertumbuhan dan ukur dalam karat membolehkan sifat semulajadi ukur dalam karat yang bertumbuh secara selanjat dan rawak bergantung kepada nilai kadar pertumbuhan dapat diketahui. Anggaran yang digunakan adalah nilai ukur dalam yang lebih tinggi diperolehi pada nilai kadar pertumbuhan karat yang lebih tinggi. Analisis ini memerlukan setiap taburan ukur dalam pada kadar pertumbuhan karat dianalisis berdasarkan nilai kolerasi yang dapat ditentukan melalui fungsi pada perisian *Microsoft Excel 2003*. Nilai kolerasi yang lebih tinggi dapat digunakan semasa penunjuk kepada wujudnya hubungan kolerasi yang kuat antara kadar pertumbuhan dan ukur dalam karat.

3.3 Penentuan Masa Berlakunya Kegagalan Paip Minyak

Kegagalan paip minyak berlaku apabila nilai ukur dalam karat pada sesuatu masa adalah lebih besar atau sama dengan ukuran ketebalan paip minyak. Adalah menjadi keutamaan bagi kajian ini untuk menentukan masa berlakunya kegagalan paip minyak ini bagi membolehkan aktiviti penyelenggaraan, pemeriksaan dan penggantian pada masa hadapan dapat dirancang secara lebih sistematik. Kegagalan paip minyak secara tiba-tiba bakal membawa kerugian yang besar kepada pengendali paip minyak dan bencana kepada alam sekitar disebabkan berlakunya tumpahan minyak yang boleh menjejaskan hidupan akuatik.

3.3.1 Kod Penilaian DNV RP-F101

RP-F101 adalah kod penilaian yang dicadangkan sebagai panduan bagi menilai integriti struktur talian paip minyak yang berkarat. Prosedur penilaian ini diperkenalkan oleh Det Norske Veritas dan lebih dikenali sebagai DNV RP-F101. Prosedur yang dicadangkan ini sesuai digunakan bagi membuat penilaian karat yang hanya disebabkan tekanan beban dalaman dan tekanan beban dalaman yang disertai tegasan mampatan paksi. Kod amalan RP-F101 memberi penekanan yang lebih kepada faktor keselamatan. Faktor keselamatan ini mengambil kira ketidakpastian pada data pemeriksaan ukur dalam karat dan sifat-sifat bahan binaan struktur talian paip minyak. Beban tekanan dalaman paip minyak boleh menyumbang kepada tiga jenis kecacatan karat iaitu kecacatan tunggal, kecacatan berkait dan kecacatan kompleks. Dalam kajian ini, data karat dianalisis dengan menggunakan prosedur analisis bagi jenis kecacatan tunggal. Kecacatan tunggal adalah kecacatan yang tidak berinteraksi dengan kecacatan karat yang berdekatan dengannya. Oleh yang demikian, tekanan gagal bagi sesuatu struktur paip minyak adalah bebas dan tidak dipengaruhi oleh karat yang berdekatan. Beban-beban yang dikenalpasti akan menjejaskan struktur paip minyak adalah beban-beban paksi, lenturan dan suhu pada sesuatu titik karat. Persamaan 3.3 dan 3.6 di bawah dapat digunakan untuk memperolehi nilai tekanan

kerja maksimum seperti yang digariskan oleh Det Norske Veritas dalam DNV RP-F101.

$$P_{corr} = \frac{\gamma_m 2 t SMTS (1 - \gamma_d (d/t)^*)}{(D - t) \left(\frac{1 - \gamma_d (d/t)^*}{Q} \right)} \quad \text{Persamaan 3.3}$$

$$Q = \sqrt{1 + 0.31 \left(\frac{\ell}{\sqrt{Dt}} \right)} \quad \text{Persamaan 3.4}$$

$$(d/t)^* = (d/t)_{means} + \varepsilon_d StD[d/t] \quad \text{Persamaan 3.5}$$

$$\text{Jika } \gamma_d (d/t)^* \geq 1 \text{ oleh itu } p_{corr} = 0 \quad \text{Persamaan 3.6}$$

3.3.2 Terbitan Persamaan DNV RP-F101

Bagi membuat penentuan masa berlakunya kegagalan struktur talian paip minyak, terbitan persamaan perlu dilakukan daripada persamaan asal DNV RP-F101. Terbitan persamaan ini dilakukan dengan mengeluarkan parameter panjang karat daripada persamaan asal. Panjang karat pada persamaan ini adalah panjang karat maksimum bagi 15 Mpa tekanan kerja operasi paip minyak. Selain itu, nilai faktor keselamatan untuk ukur dalam karat γ_d dan nilai faktor keselamatan bagi *fractile* ukur dalam karat ε_d akan berubah berlandaskan masa tahun ramalan yang dilakukan. Analisis terbitan persamaan ini akan diterangkan secara lebih jelas dalam bahagian analisis dalam bab berikutnya.

3.3.3 Penentuan Dimensi Karat Pada Tahun Ramalan

Terdapat tiga parameter karat yang perlu dihitung bagi menentukan masa berlakunya kegagalan paip minyak. Parameter-parameter tersebut adalah nilai kadar pertumbuhan, ukur dalam dan panjang karat pada tahun ramalan. Ketiga-tiga nilai parameter ini dihitung dengan menggunakan persamaan linear seperti mana yang dicadangkan oleh Pandey (1997). Persamaan linear bagi menghitung nilai kadar pertumbuhan karat adalah seperti di bawah.

$$CR = \frac{dT_2 - dT_1}{T_2 - T_1} \quad \text{Persamaan 3.7}$$

Ukuran dalam karat pada suatu tempoh tertentu boleh diramalkan dengan menggunakan persamaan linear di bawah.

$$dT_2 = dT_1 + CR \times (T_2 - T_1) \quad \text{Persamaan 3.8}$$

Sementara itu, parameter panjang karat pada tempoh tertentu boleh diramalkan dengan menggunakan persamaan linear di bawah. Persamaan ini mengambil kira nilai nisbah panjang kepada ukur dalam karat kerana diyakini terdapat kolerasi yang besar antara pertumbuhan ukur dalam dan panjang karat.

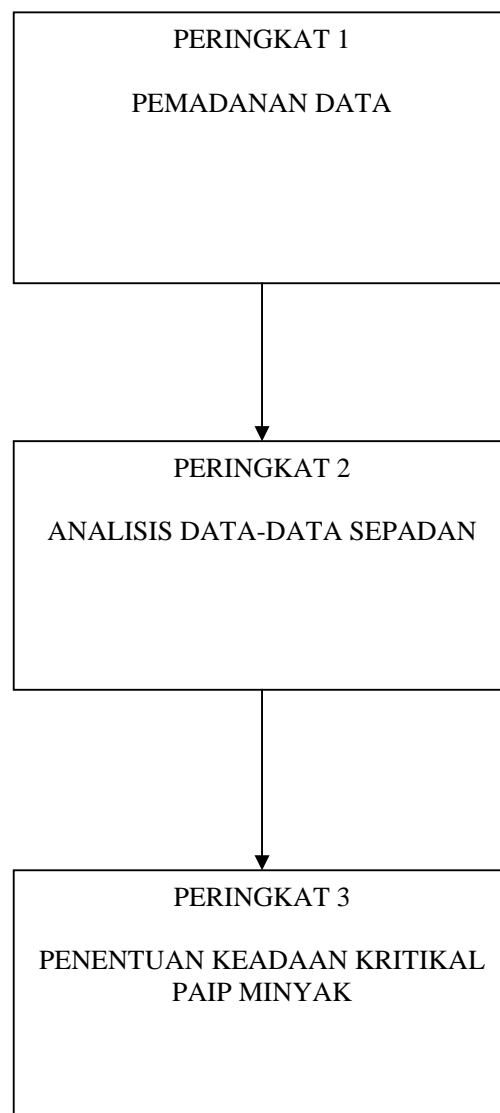
$$LT_2 = LT_1 + CR \times (T_2 - T_1) \times \left(\frac{LT_1}{dT_1} \right) \quad \text{Persamaan 3.9}$$

3.3.4 Pembinaan Garisan Model Kegagalan Tekanan

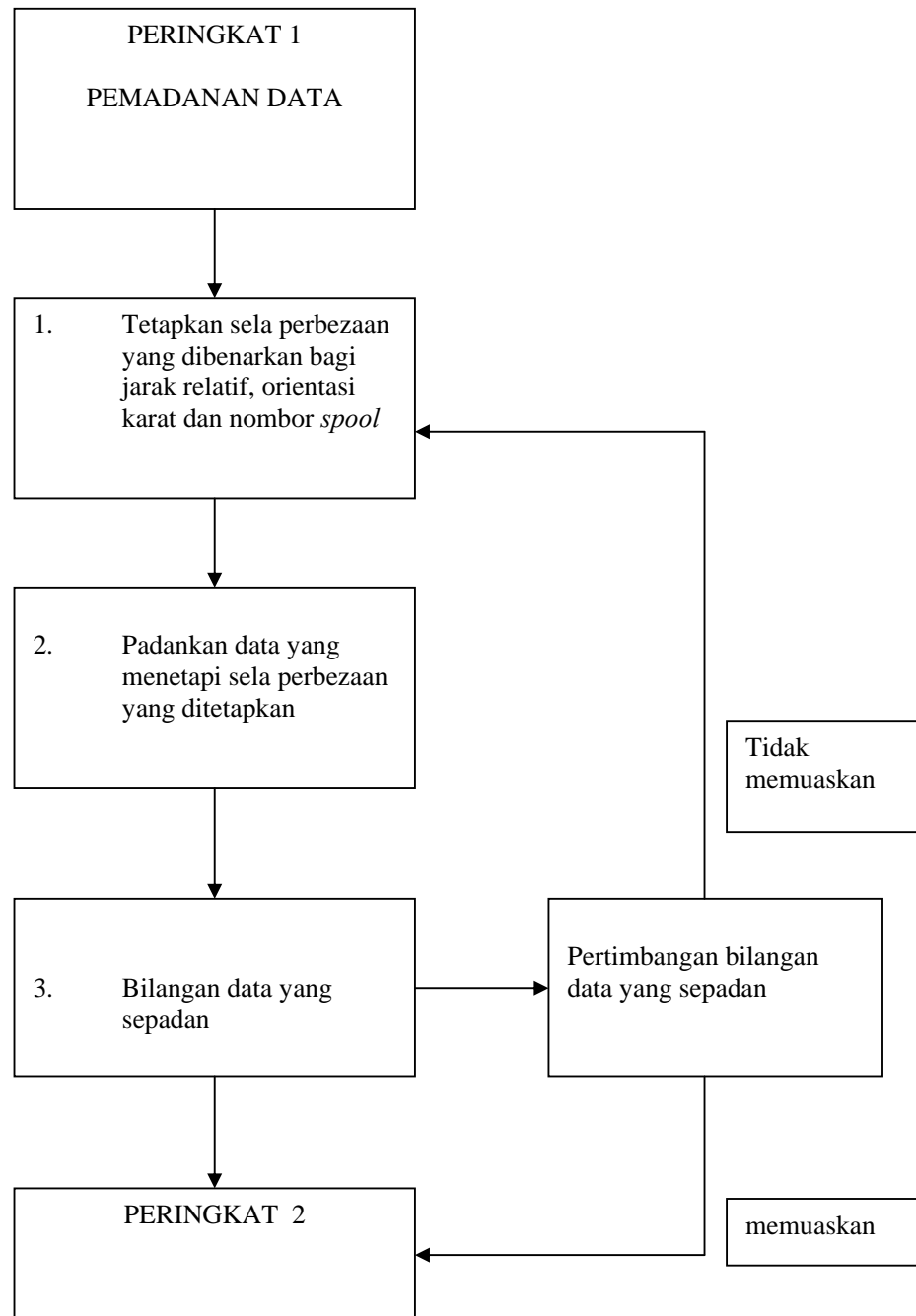
Garisan model kegagalan tekanan dibina berdasarkan nilai ukur dalam dan panjang maksimum karat pada 15 Mpa tekanan kerja operasi paip minyak. Oleh yang demikian, terdapat dua siri data yang perlu dibina bagi menentukan masa berlakunya

kegagalan paip minyak. Siri pertama adalah taburan data ukur dalam dan panjang karat pada tahun ramalan manakala siri kedua adalah garisan model kegagalan tekanan yang dibina daripada nilai ukur dalam dan panjang maksimum karat pada 15 Mpa tekanan kerja. Sesuatu paip minyak dipercayai akan gagal apabila taburan data ukur dalam dan panjang karat pada tahun ramalan melepasi garisan model kegagalan tekanan yang dibina berdasarkan kod amalan DNV RPF-101.

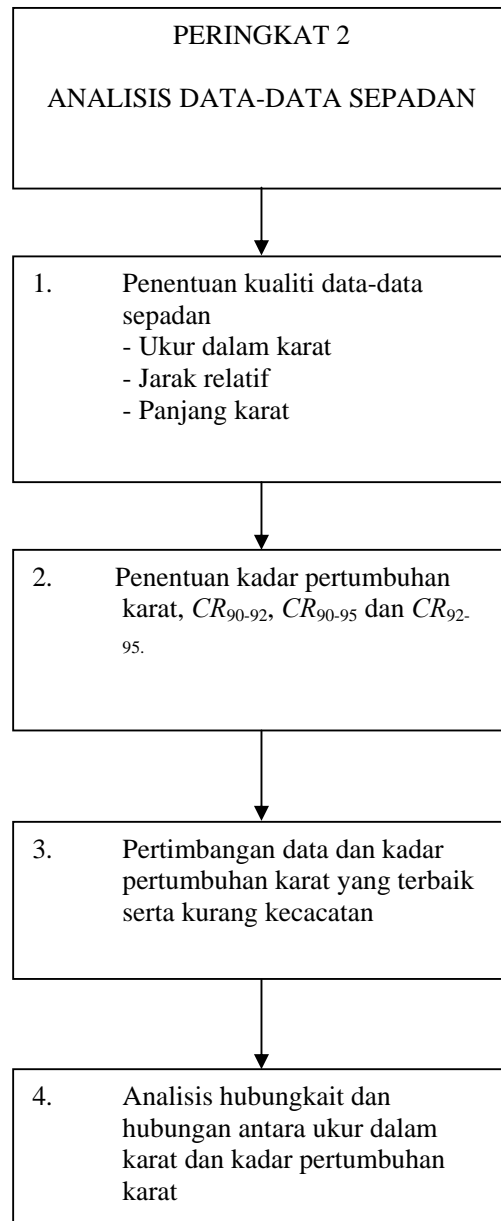
3.4 Carta Alir Metodologi Kajian



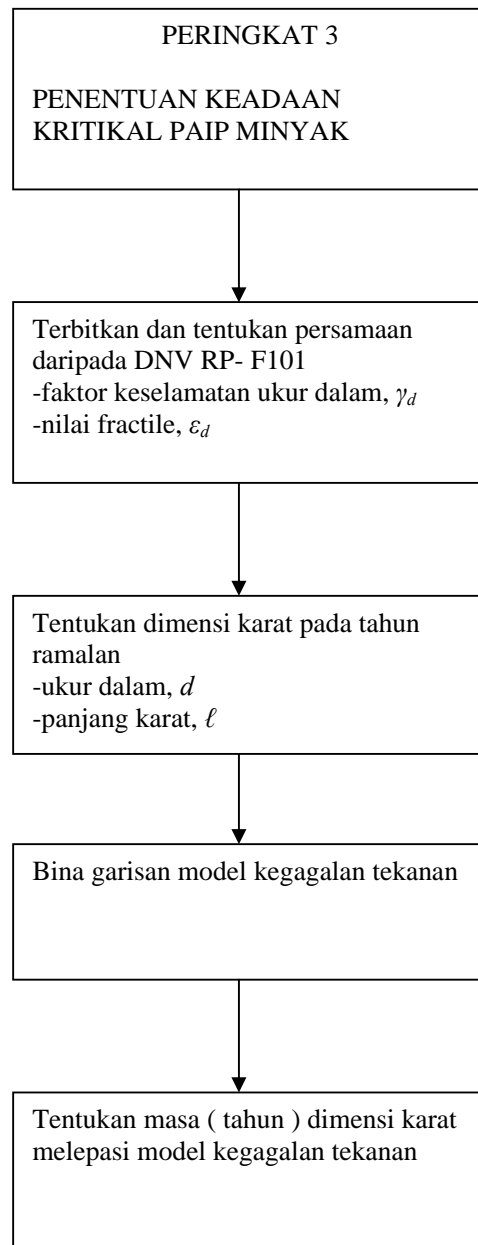
Rajah 3.1 : Prosedur kerja analisis statistik



Rajah 3.2 : Carta alir peringkat 1, Pemadanan Data



Rajah 3.3 : Carta alir peringkat 2, Analisis Data-Data Sepadan



Rajah 3.4 : Carta alir peringkat 3, Penentuan Keadaan Kritikal Paip Minyak

BAB 4

ANALISIS STATISTIK

4.0 Pengenalan

Dalam bab ini, penekanan diberikan kepada analisis untuk meramalkan tahun kegagalan struktur talian paip minyak dasar laut ini. Selain itu, ketepatan set-set data karat juga akan dianalisa memandangkan parameter dimensi karat yang diperolehi melalui alat *pig* ini terdedah kepada ralat. Sebelum analisis statistik ini dijalankan, kualiti data-data pengaratan yang sepadan perlu ditentukan terlebih dahulu dengan membuat perbandingan bagi parameter kadar pertumbuhan karat, ukur dalam purata dan nilai sisihan piawai bagi setiap set data. Selain itu, nilai dimensi dan kadar pertumbuhan karat pada masa hadapan turut dititikberatkan bagi tujuan analisis untuk meramalkan masa kegagalan paip minyak yang dikaji. Maklumat-maklumat penting data kajian struktur talian minyak ini dinyatakan dalam jadual 4.1 di bawah.

Jadual 4.1 : Maklumat-maklumat penting data kajian

Diameter (mm)	812.8
Ketebalan (mm)	22
Tahun Pemeriksaan	1990, 1992, 1995
Tahun Pemasangan	1977
Bilangan Data	1425 (1990), 2995 (1992), 3314(3314)

Analisis dijalankan ke atas data pengaratan paip minyak yang sepadan. Dalam analisis statistik ini, terdapat beberapa peringkat analisis yang dijalankan. Peringkat analisis itu melibatkan penentuan kualiti data-data pengaratan yang sepadan, analisis dimensi karat, analisis pertumbuhan pengaratan dan analisis pada keadaan kritikal paip minyak untuk gagal. Penentuan kualiti data-data pengaratan sepadan bergantung kepada toleransi jarak relatif dan orientasi titik pengaratan yang telah dipertimbangkan. Pada peringkat analisis pertumbuhan pengaratan, parameter-parameter kadar pertumbuhan, ukur dalam dan panjang karat ditentukan untuk digunakan pada peringkat analisis kegagalan paip minyak pada tekanan kerja operasi paip minyak tersebut. Tekanan kerja 15 Mega Pascal (MPa) telah dipilih untuk kajian ini sama seperti mana tekanan kerja yang dipraktikkan di tapak.

4.1 Kualiti Data-Data Pengaratan Yang Sepadan

Kualiti data-data pengaratan bergantung pada perbezaan jarak relatif dan orientasi titik pengaratan yang diperolehi hasil pertimbangan atau toleransi pada peringkat penentuan data-data pengaratan yang sepadan. Nilai toleransi yang digunakan pada peringkat pepadanan seperti yang telah dilakukan sebelum ini adalah sehingga 0.15 meter bagi perbezaan jarak relatif manakala 30 minit pada parameter orientasi karat. Perbezaan jarak relatif pada setiap data yang sepadan ditentukan berdasarkan persamaan 4.1 di bawah dan seterusnya perbandingan dilakukan pada hasil keputusan yang diperolehi daripada persamaan tersebut.

$$\Delta \text{ perbezaan jarak} = \text{ jarak relatif 1} - \text{ jarak relatif 2} \quad \text{Persamaan 4.1}$$

Petunjuk;

$$\begin{aligned} \Delta \text{ perbezaan jarak} &= \text{ perbezaan jarak relatif antara dua titik karat} \\ \text{ jarak relatif 1} &= \text{ jarak relatif pada tahun penyiasatan sebelumnya} \\ \text{ jarak relatif 2} &= \text{ jarak relatif pada tahun penyiasatan seterusnya} \end{aligned}$$

Jadual 4.2 : Perbezaan jarak relatif bagi data-data pengaratan yang sepadan

Set Data	1990-1992	1990-1995	1992-1995
Purata (mm)	107.63	99.20	42.28
Sisihan Piawai (mm)	86.98	80.24	47.91

Sepertimana ditunjukkan dalam Jadual 4.2, perbezaan jarak relatif bagi data-data pengaratan sepadan yang dikelaskan kepada tahun-tahun 1990 hingga 1992, 1990 hingga 1995 dan 1992 hingga 1995 menunjukkan taburan yang tidak seragam pada kedua-dua aspek nilai purata dan sisihan piawai yang diperolehi. Hal ini berlaku disebabkan faktor ralat sewaktu pemeriksaan yang dilakukan ke atas paip minyak tersebut. Kesilapan dalam pemeriksaan tersebut adalah berkaitan dalam aspek penentuan lokasi titik-titik pengaratan yang terlibat. Pemandangan bagi data 1992 ke 1995 menunjukkan nilai sisihan piawai yang paling kecil berbanding set-set sepadan yang lain. Ini menjadikannya sebagai salah satu sebab pemilihan data pada tahun 1995 sebagai data analisis yang utama, manakala data tahun 1992 sebagai data pilihan kedua sebagai parameter untuk menyemak kesahihan data kajian.

4.2 Analisis Dimensi Karat

Seperti mana yang diketahui, parameter penting yang digunakan semasa penentuan data-data pengaratan yang sepadan adalah jarak relatif dan orientasi karat. Sebaliknya, ukur dalam karat dan panjang karat akan digunakan bagi penentuan pertumbuhan karat dan seterusnya penentuan masa berlakunya kegagalan paip minyak. Oleh itu, ukur dalam karat dan panjangnya telah dianalisa dengan menghitung nilai purata dan sisihan piawainya. Secara teorinya, nilai-nilai ukur dalam karat serta panjangnya pada tahun-tahun pemeriksaan yang berikutnya adalah lebih tinggi jika dibandingkan nilai-nilai sebelumnya. Ini adalah disebabkan fakta pertumbuhan karat yang berlaku secara berterusan sejajar peningkatan jangka hayat talian paip minyak. Oleh yang demikian, anggapan awal yang ditetapkan adalah

sekiranya nilai purata saiz karat untuk tahun pemeriksaan yang lebih tinggi menunjukkan penurunan, data karat pada tahun tersebut boleh dianggap sebagai ralat. Jadual 4.3 dan jadual 4.4 menunjukkan nilai purata dan sisihan piawai bagi parameter ukur dalam dan panjang karat pada tahun pemeriksaan 1990, 1992 dan 1995.

Jadual 4.3 : Nilai purata dan sisihan piawai bagi ukur dalam karat

Set Data	1990	1992	1995
Purata (mm)	4.293	4.253	4.697
Sisihan Piawai (mm)	2.135	2.206	1.956

Jadual 4.4 : Nilai purata dan sisihan piawai bagi panjang karat

Set Data	1990	1992	1995
Purata (mm)	20.542	23.172	23.591
Sisihan Piawai (mm)	23.456	21.078	19.410

Pertumbuhan bagi ukur dalam karat seperti dalam jadual 4.3 menunjukkan keadaan yang tidak munasabah iaitu berlakunya pertumbuhan negatif. Ini adalah kerana, nilai ukur dalam karat bagi tahun pemeriksaan 1992 adalah lebih kecil daripada nilai ukur dalam karat yang diperolehi bagi pemeriksaan pada tahun 1990. Bagi ukur dalam karat pada tahun 1992 dan 1995, nilai yang diperolehi adalah wajar dan boleh diterima. Oleh yang demikian, dipercayai bahawa terdapat ralat yang besar pada data tahun 1990.

4.3 Analisis Pertumbuhan Karat

Pemeriksaan ke atas paip minyak yang dilakukan pada tahun yang berbeza iaitu tahun 1990, 1992 dan 1995 membolehkan analisis pertumbuhan karat dapat dilakukan secara terperinci. Kadar pengaratan dihitung menggunakan persamaan seperti di bawah dengan menganggap pertumbuhan karat berlaku secara linear seperti mana yang dicadangkan oleh Pandey (1997). Persamaan linear tersebut adalah seperti di bawah.

$$CR = \frac{d_{T2} - d_{T1}}{T_2 - T_1} \quad \text{Persamaan 4.2}$$

Ukuran dalam karat pada suatu tempoh tertentu boleh diramalkan dengan menggunakan persamaan linear di bawah.

$$d_{T2} = d_{T1} + CR \times (T_2 - T_1) \quad \text{Persamaan 4.3}$$

Parameter panjang karat pada tempoh tertentu boleh diramalkan dengan menggunakan persamaan linear di bawah. Persamaan ini mengambil kira nilai nisbah panjang kepada ukur dalam karat kerana diketahui terdapat kolerasi yang besar antara pertumbuhan ukur dalam dan panjang karat.

$$L_{T2} = L_{T1} + CR \times (T_2 - T_1) \times \left(\frac{L_{T1}}{d_{T1}} \right) \quad \text{Persamaan 4.4}$$

Berasaskan persamaan 4.2 di atas, kadar pertumbuhan karat pada tahun 1990 ke 1992, 1990 ke 1995 dan 1992 ke 1995 dapat ditentukan. Nilai kadar pertumbuhan karat yang diperolehi sangat penting untuk meramalkan nilai ukur dalam dan panjang karat pada masa hadapan. Selain itu, nilai kadar pertumbuhan karat dapat juga digunakan sebagai petunjuk bagi mengetahui kesahihan data pemeriksaan yang dilakukan. Jadual 4.5 menunjukkan analisis kadar pertumbuhan karat berdasarkan persamaan di atas. Perbincangan kadar pertumbuhan karat akan dibincangkan secara lebih terperinci dalam bab 5 iaitu pada bahagian keputusan kadar pertumbuhan karat.

Jadual 4.5 : Kadar pertumbuhan karat

Set Data	1990-1992 (CR ₁₉₉₀₋₁₉₉₂)	1990-1995 (CR ₁₉₉₀₋₁₉₉₅)	1992-1995 (CR ₁₉₉₂₋₁₉₉₅)
Purata (mm/tahun)	-0.0202	0.0808	0.1481
Sisihan Piawai (mm/tahun)	0.6153	0.2473	0.3840

4.4 Analisis Penentuan Masa Kritikal Paip Minyak

Penentuan masa kritikal paip minyak merujuk kepada situasi paip minyak pada masa tertentu untuk mengalami kegagalan. Kegagalan paip minyak merujuk kepada saiz ukur dalam karat yang berukuran sama atau lebih besar daripada ukuran ketebalan struktur tersebut. Kebocoran adalah fenomena yang dapat diperhatikan akibat kegagalan ini berlaku. Kebocoran paip minyak yang tidak diselenggara boleh menyebabkan berlakunya letupan dan kebakaran.

4.4.1 Kod Penilaian DNV RP-F101

Dalam bahagian metodologi kajian, telah diterangkan secara jelas tentang kod penilaian DNV RP-F101. Umumnya, kod penilaian DNV RP-F101 digunakan bagi menghitung nilai tekanan kerja maksimum bagi struktur talian paip minyak yang terdedah kepada pengaratan dalaman. Bagi membuat penentuan masa berlakunya keadaan kritikal paip minyak untuk gagal, DNV RP-F101 akan digunakan sebagai model bagi tujuan membuat ramalan pengaratan pada masa hadapan. Kadar pertumbuhan ukur dalam dan panjang karat pada masa hadapan akan ditentukan berdasarkan persamaan linear. Seterusnya, persamaan-persamaan yang terdapat dalam kod penilaian ini akan digunakan untuk membuat ramalan masa berlakunya kegagalan paip minyak. Sebelum itu, terbitan persamaan perlu dilakukan pada

persamaan asal DNV RP-F101 dengan membuat terbitan parameter ukur dalam panjang karat. Ukuran panjang karat ini adalah panjang karat maksimum pada 15 Mpa tekanan operasi struktur talian paip minyak.

4.4.2 Persamaan Tekanan Kerja Maksimum

DNV RP-F101 telah menggariskan beberapa persamaan bagi menentukan tekanan maksimum yang dibenarkan bagi paip minyak yang berkarat pada tahun-tahun khidmatnya yang tertentu. Persamaan yang dinyatakan di bawah adalah tidak sesuai bagi kecacatan tunggal yang merekodkan panjang melengkung melebihi panjang paksi. Persamaan 4.5 dan 4.6 di bawah dapat digunakan untuk memperolehi nilai tekanan kerja maksimum seperti yang digariskan oleh Det Norske Veritas dalam DNV RP-F101.

$$P_{corr} = \frac{\gamma_m 2 t SMTS (1 - \gamma_a (d/t)^*)}{(D - t) \left(\frac{1 - \gamma_a (d/t)^*}{Q} \right)} \quad \text{Persamaan 4.5}$$

$$Q = \sqrt{1 + 0.31 \left(\frac{\ell}{\sqrt{Dt}} \right)} \quad \text{Persamaan 4.6}$$

$$(d/t)^* = (d/t)_{means} + \varepsilon_d StD [d/t] \quad \text{Persamaan 4.7}$$

$$\text{Jika } \gamma_a (d/t)^* \geq 1 \text{ oleh itu } p_{corr} = 0 \quad \text{Persamaan 4.8}$$

4.4.3 Persamaan Keadaan Kritikal Paip Minyak

Bagi menentukan tahun jangkaan struktur talian paip minyak ini akan berada dalam keadaan kritikal, beberapa terbitan persamaan daripada persamaan 4.5 dan 4.6 perlu dilakukan. Terbitan persamaan ini perlu dilakukan untuk menentukan nilai panjang karat maksimum bagi setiap ukur dalam pucak, d/t pada tekanan kerja 15 MPa. Persamaan 4.9 dan 4.10 di bawah menunjukkan terbitan persamaan yang dihasilkan.

$$Q = \frac{\gamma_d((d/t)^*)}{1 - \frac{\gamma_m 2t SMTS (1 - \gamma_d (d/t)^*)}{(D-t)(P_{corr})}} \quad \text{Persamaan 4.9}$$

$$\ell = \sqrt{\frac{Dt}{0.31}} \times \sqrt{Q^2 - 1} \quad \text{Persamaan 4.10}$$

Selain itu, bagi meramalkan keadaan kritikal paip minyak, DNV RP-F101 telah menekankan kepada penggunaan nilai faktor keselamatan yang tinggi. Kesan penggunaan nilai faktor keselamatan yang tinggi ini dapat diperhatikan melalui garisan model kegagalan tekanan yang semakin menguncup apabila nilai tahun kegagalan yang digunakan untuk ramalan semakin besar. Analisis ini memerlukan penentuan nilai-nilai γ_d dan ε_d secara manual dengan menggunakan persamaan 4.11 dan 4.12 di bawah.

$$\gamma_d = 1 + 4.6Std[d/t] - 13.9Std[d/t]^2 \quad \text{Persamaan 4.11}$$

$$\varepsilon_d = -1.33 + 37.5Std[d/t] - 104.2Std[d/t]^2 \quad \text{Persamaan 4.12}$$

Jadual 4.6 menunjukkan nilai γ_d , ε_d dan $Std[d/t]$ pada analisis data karat pada tahun 1995 yang berubah sejajar perubahan masa ramalan yang semakin meningkat.

Jadual 4.6 : Perubahan nilai γ_d , ε_d dan $Std[d/t]$ sejajar perubahan masa ramalan

Tahun	StD[d/t]	γ_d	ε_d
1995	0.080	1.280	1.000
1998	0.090	1.301	1.196
2001	0.114	1.344	1.592
2003	0.135	1.367	1.831

Sebelum itu, nilai sisihan piawai yang berasaskan kepada spesifikasi alat pemeriksaan *MFL* perlu diubahsuai dengan mengambil kira nilai sisihan piawai asal, sisihan piawai ukur dalam puncak dan perbezaan antara tahun pemeriksaan dan tahun ramalan. Nilai sisihan piawai yang telah diubahsuai dinyatakan seperti persamaan 4.13 di bawah.

$$Std[d/t] = \sqrt{(Std[d/t]_{asal})^2 + \sqrt{T_2/t_2}(Stdev[d/t])} \quad \text{Persamaan 4.13}$$

4.5 Penentuan Keadaan Kritikal

Penentuan keadaan kritikal paip minyak memerlukan dua siri data digabungkan dalam satu graf yang sama. Kedua-dua siri graf ini mempunyai paksi-paksi yang sama iaitu ukuran panjang karat, ℓ pada paksi-x manakala ukur dalam puncak karat, d/t pada paksi-y. Data karat dan nilai kadar pertumbuhan pengaratan yang digunakan adalah masing-masing pada tahun 1995 dan nilai purata dari tahun 1992 ke 1995, ($CR_{1992-1995}$).

Oleh yang demikian, terdapat dua jenis siri graf yang dibina iaitu titik ukur dalam puncak karat pada ukuran panjangnya dan garisan model kegagalan tekanan. Prinsip analisis ini sangat mudah iaitu struktur paip minyak ditakrifkan berada dalam

keadaan kritikal pada situasi saiz panjang pada ukur dalam puncak karat yang diramalkan berada pada kedudukan sama atau melewati garisan model kegagalan tekanan. Pada keadaan kritikal ini langkah proaktif perlu dilakukan bagi membendung masalah yang lebih buruk daripada berlaku. Contohnya, penggantian struktur talian paip minyak perlu dilakukan bagi mengelakkan daripada berlakunya kebocoran paip minyak yang boleh menyebabkan pencemaran kepada alam sekitar dan kerugian kepada pihak pengendali paip minyak.

BAB 5

KEPUTUSAN

5.0 Pendahuluan

Bab ini memaparkan hasil-hasil keputusan bagi setiap analisis yang telah dijalankan. Hasil-hasil keputusan analisis termasuklah keputusan analisis kadar pertumbuhan karat, hubungan kolerasi antara kadar pertumbuhan pada ukur dalam karat dan ramalan tahun berlakunya kegagalan paip minyak. Bagi meramalkan tahun berlakunya kegagalan paip minyak, analisis dijalankan dalam dua bahagian, iaitu bahagian A dan bahagian B. Bahagian A adalah penentuan keadaan kritikal paip minyak, manakala bahagian B adalah semakan data bagi membandingkan persembahan data karat pada tahun 1995 yang digunakan dalam bahagian A.

5.1 Kadar Pertumbuhan Karat

Jadual 5.1 di bawah menunjukkan nilai-nilai kadar pertumbuhan karat bagi setiap set-set data karat yang telah dianalisis.

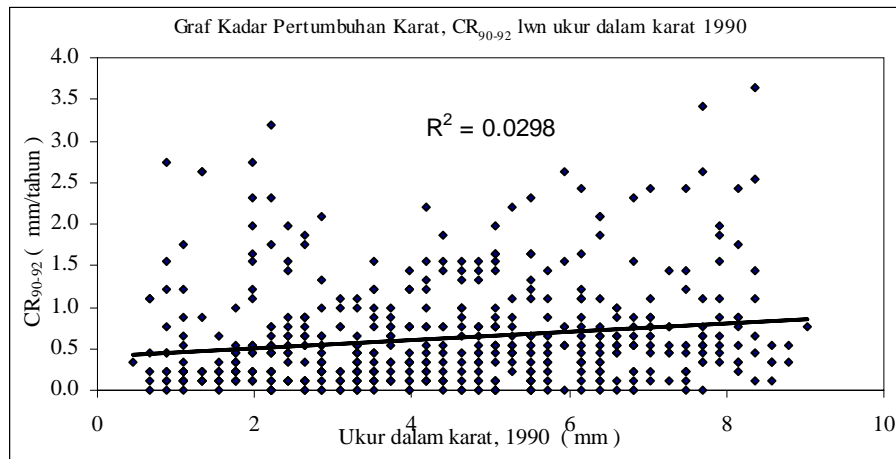
Jadual 5.1 : Sisihan piawai dan purata kadar pertumbuhan karat

Set Data	1990-1992 ($CR_{1990-1992}$)	1990-1995 ($CR_{1990-1995}$)	1992-1995 ($CR_{1992-1995}$)
Purata (mm/tahun)	-0.0202	0.0808	0.1481
Sisihan Piawai (mm/tahun)	0.6153	0.2473	0.3840

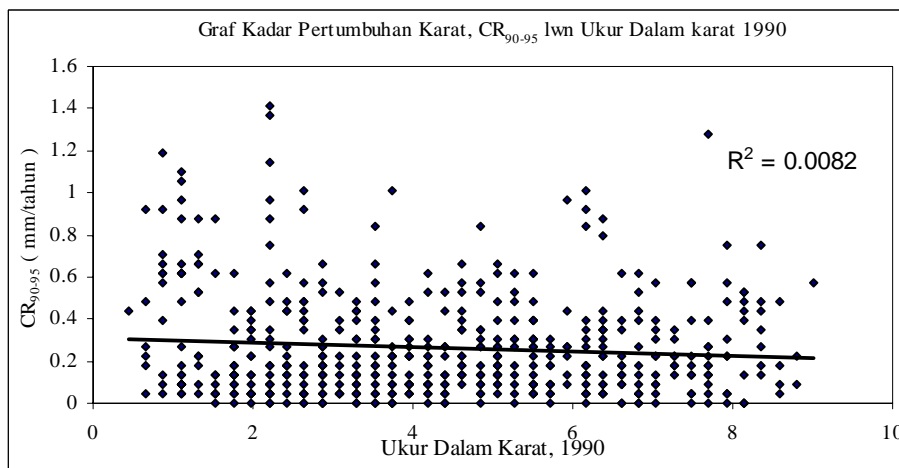
Daripada jadual, diketahui kadar pertumbuhan pengamatan pada tahun 1990 ke 1992 ($CR_{1990-1992}$) bernilai negatif. Nilai negatif tersebut dikenal pasti berpunca daripada kesilapan pada data pemeriksaan pada tahun 1990. Nilai kadar pertumbuhan negatif tidak boleh digunakan dalam kajian ini. Selain itu, nilai kadar pertumbuhan pengamatan yang diperolehi menunjukkan nilai yang tidak seragam malah nilai perbezaannya agak tinggi. Berdasarkan situasi ini, data karat pada tahun 1995 dianggap lebih tepat berbanding data karat pada tahun 1990 dan 1992. Kadar pertumbuhan karat yang bernilai negatif yang diperolehi mungkin berpunca daripada bahan-bahan mendak yang menutupi lubang karat dan seterusnya menjejaskan bacaan alat pemeriksaan *pig*. Disebabkan kadar pertumbuhan pengamatan tahun 1990-1992 ($CR_{1990-1992}$) bernilai negatif dan data tahun 1990 terdapat banyak kesilapan, kadar pertumbuhan pengamatan yang diterima adalah pada tahun 1992 ke 1995 ($CR_{1992-1995}$). Sambil itu, data tahun 1995 akan digunakan semasa peringkat analisis manakala data tahun 1992 digunakan untuk menyemak kesahihan data karat yang telah diperolehi itu.

5.2 Kolerasi Antara Kadar Pertumbuhan Karat Dan Ukur Dalam Karat

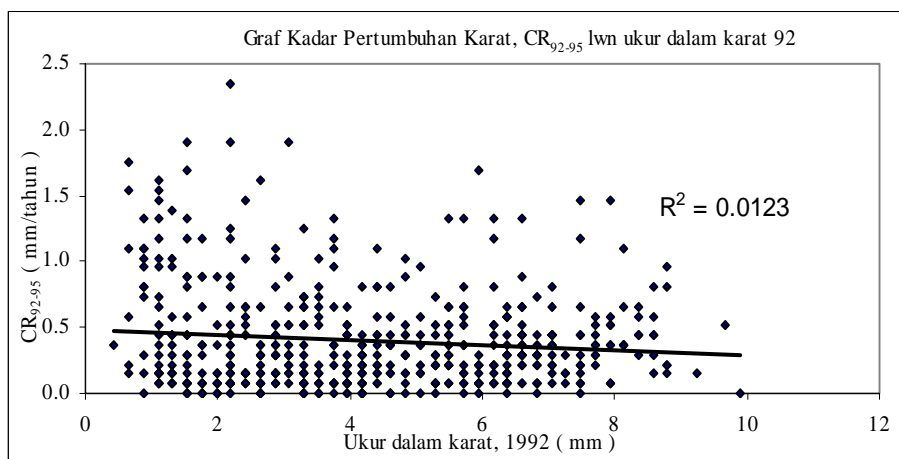
Rajah di bawah menunjukkan titik-titik ukur dalam karat berbanding nilai kadar pertumbuhannya. Umumnya, nilai-nilai kolerasi yang diperolehi adalah terlalu kecil berbanding nilai hadnya iaitu nilai negatif 1 hingga nilai positif 1. Daripada graf-graf tersebut didapati bahawa hubungan kolerasi adalah lemah dan ini menunjukkan terdapat ralat yang besar pada data-data karat yang telah dianalisis.



Rajah 5.1: Kolerasi kadar pertumbuhan karat CR_{90-92} dan ukur dalam karat 1990



Rajah 5.2: Kolerasi kadar pertumbuhan karat CR_{90-95} dan ukur dalam karat 1990

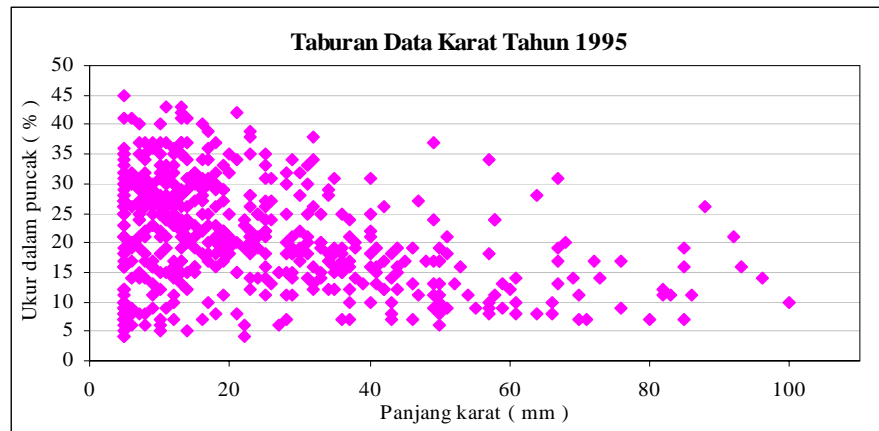


Rajah 5.3: Kolerasi kadar pertumbuhan karat CR_{92-95} dan ukur dalam karat 1992

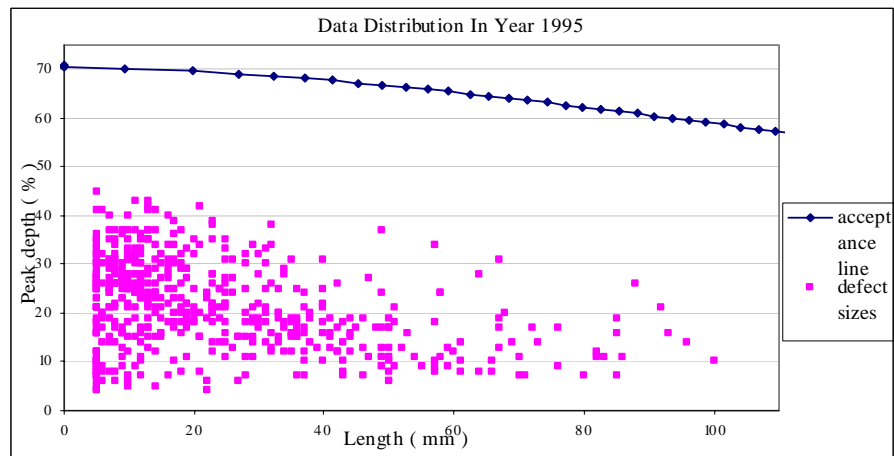
5.3 Penentuan Tahun Berlakunya Kegagalan Paip Minyak

5.3.1 Bahagian A

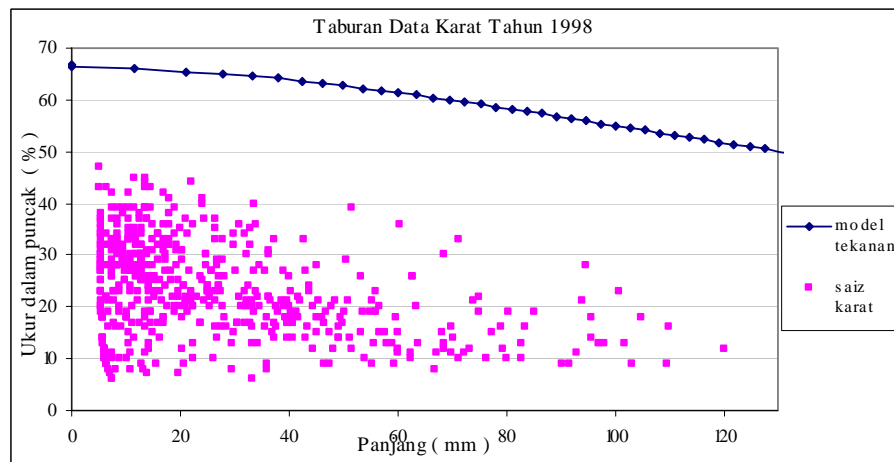
Analisis pada bahagian A menggunakan data pada tahun 1995 dan kadar pertumbuhan pengurangan tahun 1992 ke tahun 1995, ($CR_{1992-1995}$). Keputusan pada bahagian A merangkumi beberapa jenis rajah, iaitu rajah 5.4 hingga rajah 5.8. Rajah 5.4 menunjukkan taburan titik-titik karat pada tahun 1995. Secara jelas dapat diperhatikan pada rajah 5.5, terdapat ruang kelegaan yang besar antara garisan model kegagalan tekanan dan ukur dalam puncak terbesar titik karat. Seterusnya pada rajah 5.6, ramalan titik karat dilakukan pada tahun 1998. Pada ketika ini, khidmat paip minyak masih lagi dalam keadaan normal disebabkan titik karat belum melepasi garisan model kegagalan tekanan. Ini juga menunjukkan ukuran titik karat pada tahun 1998 adalah kurang daripada ukuran ketebalan struktur paip minyak. Keadaan yang sama turut berlaku pada analisis karat pada tahun 2001. Sebaliknya, situasi yang berbeza berlaku pada tahun 2003. Ukur dalam puncak serta panjang karat yang masing-masing bersaiz 50.4 % dan 5.6 mm telah melepasi garisan model kegagalan tekanan. Ini menunjukkan paip minyak telah mencapai tahap kritikal dan penilaian terhadap khidmat paip minyak ini perlu dilakukan. Penilaian ini melibatkan pertimbangan sama ada untuk membuat program penyelenggaraan ke atas paip minyak tersebut atau menggantikannya dengan paip minyak yang baru. Selain itu, dapat diperhatikan bahawa ukur dalam puncak yang lebih tinggi nilainya diperolehi pada ukur dalam karat yang kecil. Ini adalah berdasarkan mekanisma yang telah diterapkan dalam kod penilaian DNV RP-F101.



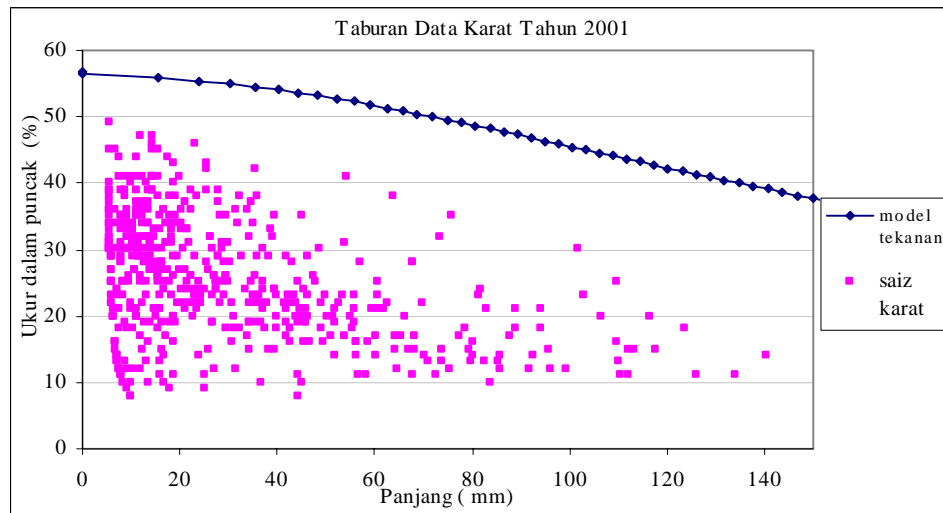
Rajah 5.4 : Taburan ukur dalam dan panjang karat pada tahun 1995



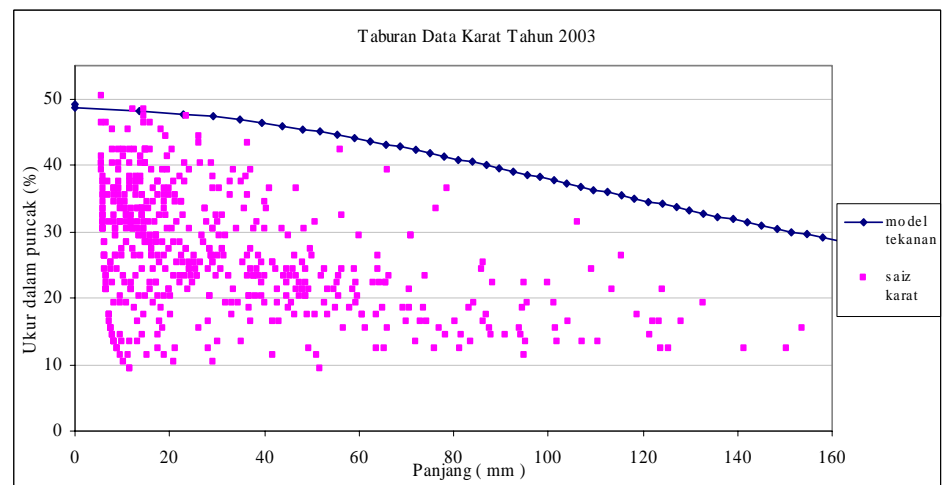
Rajah 5.5 : Taburan titik karat pada tahun 1995



Rajah 5.6 : Taburan titik karat pada tahun 1998



Rajah 5.7 : Taburan titik karat pada tahun 2001



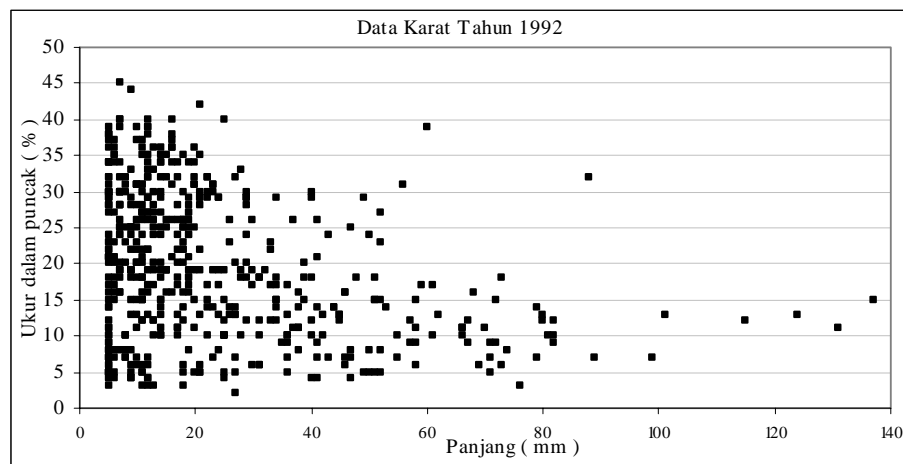
Rajah 5.8 : Keadaan kritikal paip minyak pada tahun 2003

5.3.2 Bahagian B

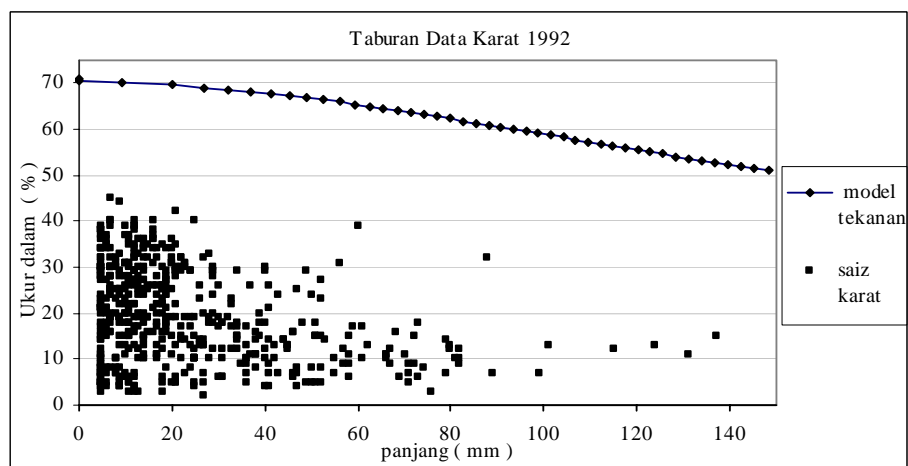
Prosedur kerja-kerja analisis dalam bahagian B secara umumnya adalah sama seperti mana yang telah dilakukan dalam bahagian A. Bahagian B secara amnya bertujuan untuk menyemak kesahihan atau persembahan data yang telah digunakan dalam bahagian A. Hasil keputusan yang diperolehi dapat digunakan sebagai

petunjuk bagi menganggarkan kadar ralat yang terlibat. Ini memandangkan data yang digunakan semasa analisis dalam bahagian B adalah data kedua yang diragui ketepatannya.

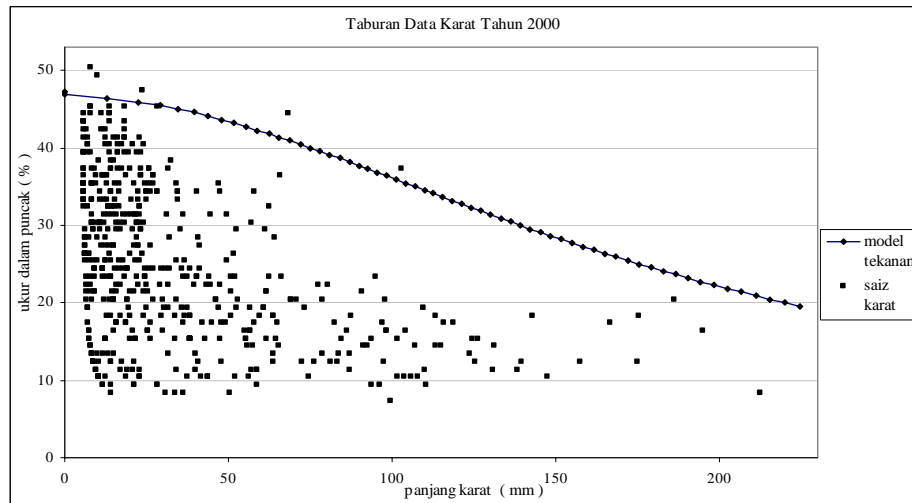
Parameter-parameter yang digunakan dalam bahagian B secara relatifnya berbeza daripada bahagian A. Data ukur dalam puncak dan panjang karat yang digunakan diperolehi pada pemeriksaan tahun ke 1992. Kadar pertumbuhan pengaratan yang digunakan masih lagi sama iaitu dari tahun 1992 ke tahun 1995 ($CR_{1992-1995}$). Sebaliknya, perbezaan dapat dilihat pada rajah 5.11 yang menunjukkan keadaan kritikal struktur paip minyak yang berlaku pada tahun 2000.



Rajah 5.9: Taburan titik karat pada tahun 1992



Rajah 5.10 : Taburan titik karat tahun 1992



Rajah 5.11: Keadaan kritikal paip minyak pada tahun 2000

5.4 Penilaian Keputusan

Sebagaimana yang telah ditunjukkan dalam rajah-rajah di atas, keputusan yang diperolehi dalam analisis bahagian A adalah berbeza berbanding keputusan yang diperolehi dalam bahagian B. Perbezaan tersebut dapat dilihat apabila bahagian A yang menggunakan data pada tahun 1995 akan mencapai keadaan kritikal pada tahun 2003 berbanding tahun 2000 yang diperolehi daripada analisis pada bahagian B. Walaupun keputusan ramalan yang diperolehi daripada analisis bahagian A menghasilkan keputusan yang lebih konservatif, tetapi ia lebih diyakini berbanding bahagian B disebabkan data-data yang digunakan dalam bahagian A diyakini tepat dan lebih dipercayai. Selain itu, keputusan analisis yang diperolehi dalam analisis bahagian A dan B menunjukkan taburan data ukur dalam karat lebih ketara berbanding data ukuran panjang karat. Ukuran panjang karat yang pendek, contohnya kurang daripada 50 mm seperti mana dalam kajian ini akan mendorong kepada pertambahan ukur dalam karat menjadi bertambah besar dan seterusnya menyebabkan paip minyak gagal atau mencapai keadaan kritikalnya.

Memandangkan struktur paip minyak dalam kajian ini akan berada dalam keadaan kritikal untuk gagal pada tahun 2003, beberapa langkah proaktif perlu dilaksanakan bagi mengelakkan kejadian yang tidak diingini daripada berlaku. Contohnya, pihak operator perlu menggantikan paip minyak yang dijangka gagal pada tahun 2003 ini dengan paip minyak yang baru. Tindakan ini perlu dilakukan pada atau sebelum tahun 2003. Selain itu, pilihan lain yang boleh dipertimbangkan adalah menjalankan program penyelenggaraan ke atas struktur yang dijangka gagal ini.

BAB 6

PERBINCANGAN DAN KESIMPULAN

6.0 Pendahuluan

Dalam bab ini, perbincangan dan kesimpulan yang berkaitan kajian ini akan dihuraikan secara lebih jelas bagi meningkatkan kefahaman tentang analisis statistik yang telah dilakukan ke atas data pengaratan paip minyak. Bahagian ini meliputi perbincangan-perbincangan tentang ralat pada data-data karat paip minyak, kaedah-kaedah pembetulan data-data karat, jenis-jenis model ramalan pengaratan paip minyak dan kesimpulan tentang kajian yang telah dijalankan ini. Pada bahagian kesimpulan, penekanan akan diberikan pada keputusan yang diperolehi bagi memenuhi objektif-objektif seperti yang telah digariskan dalam bab 1.

6.1 Perbincangan Kesilapan Pada Data-Data Karat Paip Minyak

Data-data karat paip minyak yang diperolehi melalui alat *pig* sentiasa terdedah kepada kesilapan. Keputusan kajian analisis statistik ke atas data pengaratan

paip minyak ini, bergantung pada ketepatan data-data karat yang diperolehi. Ketepatan nilai data-data karat yang diperolehi membantu dalam penentuan tahun kegagalan paip minyak secara lebih tepat dan jitu. Kesilapan pada data-data karat ini boleh berlaku disebabkan oleh aspek teknikal pada alat pemeriksaan *pig*. Secara umumnya, aspek-aspek teknikal tersebut adalah halaju alat *pig* dalam paip, kesilapan pada proses penukaran maklumat isyarat elektrik dalam bentuk gelombang kepada nilai berbentuk penomboran dan faktor-faktor lain yang telah dipertimbangkan.

Halaju alat *pig* dalam paip semasa aktiviti pemeriksaan karat akan mempengaruhi ketepatan data-data karat yang diperolehi. Proses mengawal halaju *pig* dalam paip adalah sukar terutamanya pada aliran minyak yang bertekanan rendah. Halaju yang sederhana diperlukan agar kecekapan pemeriksaan yang tinggi diperolehi dan membolehkan semua karat yang berlaku dapat dicerap (Smith, 1992). Halaju *pig* yang tinggi akan mengurangkan keupayaan amplitud alat *pig* untuk mengesan perubahan medan magnet dalam paip dan mengurangkan amplitud isyarat yang diperolehi. Kelajuan alat *pig* yang sesuai adalah antara 0.2 m/s hingga 0.8 m/s bagi minyak mentah dan 1 m/s hingga 5 m/s bagi aliran berbentuk gas. Pada kebiasaannya, syarikat-syarikat operasi minyak hanya tertumpu kepada dimensi karat yang bersaiz besar berbanding karat yang bersaiz kecil (Munir, 2001). Karat-karat yang bersaiz kecil seharusnya dititikberatkan dalam laporan pemeriksaan kerana secara relatifnya karat-karat tersebut berkemungkinan akan bertumbuh dengan lebih pantas pada masa hadapan. Tambahan pula, karat-karat yang bersaiz kecil ini akan menjadi lebih kritikal disebabkan sifat-sifat karat yang bertumbuh secara rawak.

Selain itu, pemeriksaan dalam paip minyak yang dilakukan pada tahun pemeriksaan yang berbeza akan turut menyumbang kepada kecacatan data-data yang diperolehi. Ini disebabkan keadaan persekitaran dalam paip minyak yang berbeza kerana sisa-sisa produk hidrokarbon dan sedimen yang berkumpul dan menjadi bertambah tebal sejajar perubahan masa. Keadaan akan menjadi bertambah buruk sekiranya operasi pembersihan secara berkala tidak dilakukan kerana bahan-bahan mendakan ini akan menutupi lubang-lubang karat yang berlaku dan mengganggu alat *pig* untuk mengesan lubang-lubang karat tersebut. Ini menyebabkan nilai-nilai ukur

dalam dan panjang karat yang diperolehi adakalanya lebih rendah berbanding nilai-nilai sebenar yang berlaku.

6.2 Perbincangan Kaedah-Kaedah Pembedulan Data-Data Karat

Sepertimana yang diketahui, data-data karat paip minyak yang diperolehi melalui alat *pig* sentiasa terdedah kepada kesilapan. Walaupun begitu, kehadiran data-data karat tersebut boleh dikenalpasti ketika peringkat analisis pertumbuhan karat. Nilai kadar pertumbuhan karat yang bernilai negatif berpunca daripada ralat semasa pemeriksaan paip minyak, kesilapan pada alat *pig* dan ralat semasa peringkat pemadanan data-data karat pada tiga tahun pemeriksaan tersebut. Oleh itu, tiga jenis kaedah pembedulan data-data karat tersebut dinyatakan di bawah.

6.2.1 Model deWaard dan Milliams

Analisis karat dengan menggunakan Model deWaard dan Milliams perlu dilakukan pada peringkat penentuan kadar pertumbuhan karat. Walaupun begitu, model ini hanya sesuai digunakan pada set data-data karat yang tunggal iaitu set data-data karat pada satu tahun pemeriksaan sahaja. Melalui Model deWaard dan Milliams ini, pemadanan data tidak perlu dilakukan memandangkan penentuan kadar pertumbuhan karat adalah berdasarkan sifat-sifat minyak tersebut. Sifat-sifat minyak yang perlu dipertimbangkan termasuklah suhu minyak, tekanan karbon dioksida CO_2 dan kadar aliran minyak tersebut. Kadar pertumbuhan karat dihitung berdasarkan persamaan linear dengan membuat anggapan ukur dalam puncak dan panjang karat pada tahun pemeriksaan sebelumnya bernilai sifar.

6.2.2 Kaedah Faktor Pembetulan Rawak

Kaedah faktor pembetulan rawak memerlukan penentuan faktor pembetulan terlebih dahulu dengan menggunakan teknik simulasi. Teknik simulasi ini akan memilih faktor pembetulan berdasarkan nilai-nilai tertentu dalam bentuk taburan normal dengan fungsi *mean* yang bernilai kosong. Seterusnya, nilai faktor pembetulan tersebut akan didarabkan dengan data-data karat yang telah diperolehi. Walaupun begitu, kaedah ini hanya sesuai digunakan pada set data-data karat yang dipercayai terlebih tinggi atau rendah daripada nilai sebenar.

6.2.3 Kaedah Pembetulan Kecacatan Sifar

Kaedah ini adalah rumit dan memerlukan teknik simulasi bagi menghasilkan set-set data baru. Pada peringkat awal, kadar pertumbuhan karat ditentukan dengan menganggap tiada kecacatan titik-titik karat pada pemeriksaan karat awalan iaitu pada pertama kali pemeriksaan. Seterusnya, kadar pertumbuhan karat ditentukan dengan mengambil kira perbezaan tempoh masa pemeriksaan pada pertama kali dan pada kali kedua. Daripada taburan kadar pertumbuhan karat tersebut, set-set data karat baru dihasilkan dengan menggunakan teknik simulasi. Set-set data karat baru tersebut dikategorikan sebagai set-set data yang tepat. Walaupun begitu, kaedah ini memerlukan maklumat tentang tahun pemasangan paip minyak secara tepat.

6.2.4 Kaedah Pembetulan Perolehan-Z

Kaedah Pembetulan Perolehan-Z ini adalah kaedah yang paling ringkas dan mudah untuk dilaksanakan. Melalui kaedah ini, nilai sisihan piawai bagi taburan kadar pertumbuhan karat akan dikurangkan. Walaupun begitu, kaedah ini hanya

sesuai digunakan pada data-data pertumbuhan karat yang dipersembahkan dalam bentuk taburan normal. Selain itu, walaupun ianya ringkas dan mudah tetapi ketepatan hasil data-data karat yang diperolehi masih lagi boleh dipersoalkan.

6.3 Perbincangan Jenis-Jenis Model Ramalan Pengaratan Paip Minyak

Dalam kajian ini, kod penilaian DNV RP-F101 digunakan sebagai piawaian dan panduan untuk menentukan masa jangkaan paip minyak berada dalam keadaan kritikal untuk gagal. Selain daripada kod penilaian DNV RP-F101, terdapat pelbagai kod penilaian lain yang boleh digunakan. Model-model tersebut adalah SHELL, ASME-B31G dan ASME-B31G ubah suai. Umumnya, model-model ini melibatkan prosedur analisis yang hampir sama. Walaupun demikian, keputusan masa jangkaan paip minyak berada dalam keadaan kritikal yang dihitung melalui setiap model-model di atas akan memberi nilai yang berbeza di antara satu sama lain. Ini berlaku kerana kod penilaian DNV RP-F101 adalah kurang konservatif dan menekankan penggunaan faktor keselamatan yang tinggi jika dibandingkan dengan model-model lain (Norhazilan, 2000). Selain itu, kod penilaian DNV RP-F101 adalah lebih berkesan bagi analisis yang berasaskan statistik dan kebarangkalian bagi membuat penentuan kekuatan sebenar paip minyak yang telah berkarat.

6.4 Kesimpulan

Analisis statistik ke atas data pengaratan paip minyak dalam kajian ini bertujuan untuk meramalkan masa berlakunya keadaan kritikal paip minyak untuk gagal. Kajian ini melibatkan beberapa peringkat. Pepadanan data-data karat pada tiga tahun pemeriksaan berbeza perlu dilakukan. Peringkat pepadanan data perlu dilakukan bagi membolehkan analisis dilakukan pada titik-titik karat yang sama dan

dapat mengelakkan penggunaan data-data karat yang silap atau tidak tepat. Seterusnya penentuan pertumbuhan dimensi karat dilakukan untuk menentukan saiz ukur dalam dan panjang karat pada tahun ramalan yang tertentu. Pada peringkat analisis karat, terdapat dua bahagian analisis dilakukan. Bahagian A melibatkan penentuan masa berlakunya keadaan kritikal paip minyak dengan menggunakan data primer yang lebih tepat. Pada bahagian B, analisis melibatkan penggunaan data sekunder yang kurang tepat. Analisis pada bahagian B adalah bertujuan untuk menentukan persembahan dan kesahihan data karat yang telah digunakan. Hasil keputusan analisis yang dilakukan pada kedua-dua bahagian memberikan nilai yang berbeza. Walaupun begitu, keputusan dalam bahagian A lebih diterima berbanding keputusan dalam bahagian B. Ini adalah kerana, data yang digunakan dalam bahagian A adalah data-data primer yang lebih tepat dan diterima berbanding data-data dalam bahagian B.

Objektif-objektif seperti mana yang telah digariskan dalam bab 1 telah berjaya dipenuhi. Metodologi kajian adalah berdasarkan kod penilaian DNV RP-F101 sebagai panduan semasa membuat analisis ke atas struktur paip minyak yang cenderung kepada pengurangan pada bahagian dalam struktur tersebut. Keputusan akhir yang diperolehi ternyata memenuhi objektif awal dan jangkaan keputusan yang diramalkan. Dalam bahagian analisis, penyiasatan dan ujikaji lengkap telah dijalankan pada data pengurangan paip minyak. Teori statistik dan kebarangkalian telah digunakan untuk menentukan parameter-parameter penting seperti dimensi karat dan kadar pertumbuhan karat. Kesilapan data telah dikesan kerana nilai kadar pertumbuhan karat yang diperolehi bernilai negatif dan ia dikenalpasti berpunca daripada data yang diperolehi semasa proses pemeriksaan karat pada paip minyak. Berdasarkan analisis, kadar pertumbuhan karat pada tahun 1990 ke 1992 adalah -0.0202 ($CR_{1990-1992}$), 1990 ke 1995 adalah 0.0808 ($CR_{1990-1995}$) dan 1992 ke 1995 adalah 0.1481 ($CR_{1992-1995}$). Kadar pertumbuhan karat dari tahun 1992 ke 1995 ($CR_{1992-1995}$) yang bernilai 0.1481 telah digunakan kerana dipercayai bahawa terdapat ralat yang besar pada data karat pada tahun 1990. Selain itu, turut dikenalpasti bahawa nilai bagi setiap saiz ukur dalam karat mempunyai hubungan kolerasi yang lemah antara kadar pertumbuhan karat.

Selain itu, objektif lain adalah untuk meramalkan masa berlakunya keadaan kritikal paip minyak untuk gagal. Hasil keputusan menunjukkan pada tahun 2003 struktur paip ini diramalkan akan berada dalam keadaan kritikal untuk gagal. Berdasarkan keputusan itu, penilaian terhadap struktur paip minyak tersebut dapat dilakukan. Proses penggantian atau penyelenggaraan perlu dilakukan sebelum tahun 2003 bagi mengelakkan kebocoran paip minyak daripada berlaku. Kebocoran paip minyak berlaku apabila nilai ukur dalam karat bernilai sama atau lebih besar daripada ukuran ketebalan dinding paip minyak. Kegagalan atau kebocoran paip minyak boleh membawa kesan negatif terutamanya kerugian kepada operator paip minyak disebabkan produktiviti yang rendah dan boleh mencemarkan alam sekitar terutamanya kawasan laut serta hidupan akuatik.

RUJUKAN

- Bruce. R.N (1991). *Pipeline Integrity: Program Development, Risk Assessment and Data Management*. GIS for oil and gas proceedings.
- Det Norske Veritas (1999). *RP-F101 Corroded Pipelines 1999*. Det Norske Veritas.
- Dillon. C.P (1995). *Corrosion Resistant of Stainless Steel*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Fontana. M.G (1987). *Corrosion Engineering*. New York: Mc Graw-Hill.
- Mohd. Nawi Ab. Rahman (2001). *Asas Statistik*. 4th ed. Penerbit Universiti Putra Malaysia
- Norhazilan Md Noor (2000). *Realiability Method In Predicting The Remaining Life Of Pipelines Under Internal Corrosion*. Universiti Teknologi Malaysia: Tesis Sarjana.

LAMPIRAN A

DATA-DATA PENGARATAN PAIP MINYAK

Lampiran A-1

Sampel Data-Data Karat Tahun 1990

No. Spool	Panjang Spool (m)	Jarak Relatif (m)	Jarak Sebenarnya (m)	(%)	Panjang Paksi (m)	Orientation (jam:minit)
A580	11.8	0.116	372.816	13	10	4:30
580	11.8	6.075	378.775	31	14	6:00
600	11.8	5.8	402.4	29	17	5:00
600	11.8	5.94	402.54	10	12	4:30
630	11.5	4.108	436.308	9	44	4:30
640	11.7	11.523	455.223	16	7	4:00
640	11.7	11.533	455.233	8	10	4:00
660	12.1	4.348	471.848	11	25	5:30
660	12.1	4.414	471.914	28	18	5:30
660	12.1	4.789	472.289	30	13	6:00
660	12.1	5.171	472.671	31	19	6:00
660	12.1	5.267	472.767	18	79	6:00
660	12.1	8.4	475.9	35	5	5:30
660	12.1	10.807	478.307	27	59	5:30
670	12.2	1.244	480.844	39	9	7:30
710	12	0.813	527.613	28	5	3:30
790	11.8	3.607	625.107	15	17	3:30
970	12.2	8.138	843.838	9	5	11:30
970	12.2	8.201	843.901	20	19	11:30
970	12.2	8.39	844.09	12	36	11:30
1030	12.2	0.409	908.309	17	48	4:30
1030	12.2	10.718	918.618	17	49	4:00
1030	12.2	11.467	919.367	18	55	4:00
1600	4.8	1.755	1595.655	20	82	8:00
1840	12.2	1.434	1873.034	4	15	6:30
1840	12.2	2.174	1873.774	8	80	6:30
1840	12.2	4.415	1876.015	7	107	6:00
2170	12.6	7.294	2278.194	15	32	2:30
2210	12.1	11.428	2331.028	10	41	7:30
2550	12.6	11.05	2741.85	7	24	6:30
2720	11.9	3.369	2939.369	16	40	5:00
2720	11.9	9.327	2945.327	23	13	7:00
2770	12.4	7.99	3004.39	10	6	3:00
2960	12.3	5.148	3233.748	14	26	7:00
2960	12.3	5.178	3233.778	19	13	7:30
2960	12.3	5.869	3234.469	28	9	7:00
3000	11.8	0.923	3277.523	18	9	7:30
3010	12.2	11.96	3300.36	8	43	6:30
3030	12.7	0.6	3313.4	8	95	8:00
3030	12.7	0.859	3313.659	10	51	7:30

Lampiran A-2

Sampel Data-Data Karat Tahun 1992

No. Spool	Panjang Spool (m)	Jarak Relatif (m)	Jarak Sebenar (m)	Peak Depth (%)	Panjang Paksi (m)	Orientation (jam:minit)
540	12	11.2	338.8	16	21	4:30
540	12	11.2	338.8	21	22	6:00
580	12	0.1	376.8	8	7	4:00
580	12	6.1	382.8	39	12	5:30
580	12	11.5	388.2	24	13	5:00
600	12	5.9	406.8	31	23	4:30
600	12	6	406.9	12	13	4:30
600	12	6.2	407.1	22	16	6:00
600	12	6.3	407.2	25	27	6:00
600	12	7.2	408.1	32	7	6:00
600	12	8.4	409.3	36	19	6:00
600	12	9.1	410	30	17	6:00
600	12	9.1	410	27	20	6:00
600	12	9.5	410.4	36	14	5:00
600	12	11.2	412.1	14	5	4:30
600	12	11.9	412.8	9	9	6:00
630	12.1	11.3	448.4	12	24	5:30
640	12	7.5	456.7	25	7	6:00
640	12	11.5	460.7	13	14	6:30
640	12	11.8	461	6	28	3:30
660	12.2	3.4	476.9	34	5	3:00
660	12.2	3.7	477.2	38	8	8:30
660	12.2	3.7	477.2	36	5	5:00
660	12.2	4.4	477.9	29	44	5:00
660	12.2	4.5	478	33	12	5:00
660	12.2	4.9	478.4	35	14	5:30
660	12.2	5.2	478.7	31	20	5:30
660	12.2	5.3	478.8	16	46	5:30
660	12.2	7.9	481.4	32	5	5:30
660	12.2	8.5	482	36	5	5:30
660	12.2	10.9	484.4	27	52	5:00
660	12.2	11	484.5	16	12	5:00
660	12.2	11.3	484.8	22	43	5:30
670	12.4	1.3	487	36	5	7:30
700	11.6	7	529.2	39	6	5:00
710	12.2	0.8	534.6	27	5	3:00
740	12.2	1.2	571	24	36	3:30
740	12.2	10.3	580.1	7	19	4:30
790	12	3.7	634.1	12	11	3:00
970	12.4	8.2	856.7	8	8	11:00
970	12.4	8.3	856.8	17	19	11:00

Lampiran A-3

Sampel Data-Data Karat Tahun 1995

No. Spool	Panjang Spool (m)	Jarak Relatif (m)	Jarak Sebenar (m)	Peak Depth (%)	Panjang Paksi (m)	Orientation (jam:minit)
450	12.358	8.373	228.494	24	8	4:30
480	12.108	8.466	266.515	21	16	4:00
490	11.885	0.103	270.26	8	16	6:00
490	11.885	3.189	273.346	11	36	7:00
540	12.037	11.228	341.779	19	22	4:30
540	12.037	11.934	342.485	8	17	3:00
540	12.037	11.943	342.494	13	11	3:30
550	12.245	3.133	345.721	24	11	9:30
580	11.942	0.109	379.776	13	13	4:00
580	11.942	2.55	382.217	27	13	5:00
580	11.942	6.115	385.782	43	13	6:00
580	11.942	11.485	391.152	17	23	5:30
580	11.942	11.515	391.182	25	21	5:00
580	11.942	11.827	391.494	17	108	5:00
600	12.021	5.871	409.716	37	49	4:30
600	12.021	6.034	409.879	12	23	4:30
600	12.021	6.231	410.076	27	13	6:00
600	12.021	6.412	410.257	22	10	6:00
600	12.021	7.24	411.085	26	8	6:00
600	12.021	9.475	413.32	31	13	5:00
600	12.021	11.197	415.042	23	5	4:30
600	12.021	11.916	415.761	6	11	6:00
640	11.909	7.455	459.752	22	8	6:00
640	11.909	11.444	463.741	10	7	6:30
640	11.909	11.785	464.082	17	30	3:30
640	11.909	11.788	464.085	30	7	4:00
660	12.243	4.85	481.359	30	15	5:30
660	12.243	5.224	481.733	28	13	6:00
660	12.243	5.318	481.827	24	58	6:00
660	12.243	7.85	484.359	29	12	6:00
660	12.243	10.903	487.412	24	58	5:30
660	12.243	10.954	487.463	15	11	5:00
660	12.243	11.303	487.812	27	30	5:30
670	12.345	1.251	490.003	35	7	7:30
690	12.139	2.336	515.439	20	8	6:00
690	12.139	7.753	520.856	26	15	4:00
690	12.139	9.035	522.138	12	46	3:00
690	12.139	11.545	524.648	5	69	5:00
710	12.16	0.818	537.703	28	5	3:00