

**ANALISIS PERUBAHAN KETEBALAN PIPA AKIBAT PENGARUH
KOROSI DAN SISA UMUR PAKAI PIPA DI PLTD NAMLEA
KABUPATEN BURU**

Ahmad Zulfikri Pratama¹⁾, Erwin B. Pattikayhattu²⁾, Edison Effendy³⁾

^{1,2)} Program Studi Teknologi Rekayasa Sistem Mekanikal Migas

³ Program Studi Teknik Mesin, Politeknik Negeri Ambon

ahmadzulfikriPratama@gmail.com,

aer.pattykaihattu@gmail.com,

edisoneffendy@gmail.com

ABSTRACT

In modern industry, pipelines play an important role, especially in the oil and gas sector. Pipes are susceptible to corrosion, especially those in aggressive environments such as PLTD Namlea, which is directly adjacent to the coast. Corrosion, as a natural process of metal degradation, is inevitable, but it can be controlled to extend the life of the pipe. This study measured the thickness of the pipes at PLTD Namlea using Ultrasonic Testing (UT) to determine the corrosion rate and remaining service life. Based on measurements, the minimum thickness of pipes at various measuring points (Measuring Points / MP) still meets the API 574 standard, which must not be less than 1.8 mm. The average corrosion rate ranges from 0.336 to 0.358 mm/year. These values affect the rate of degradation of the pipe and the remaining service life, which ranges from 5.5 to 6.1 years at various measurement points. Pipes that have a higher corrosion rate will have a shorter remaining service life. Overall, the pipeline at PLTD Namlea is still laid.

Keywords: Pipe, Corrosion Rate, Remaining Life

ABSTRAK

Pada industri modern, pipa memegang peran penting, terutama di sektor minyak dan gas. Pipa rentan terhadap korosi, terutama yang berada di lingkungan agresif seperti PLTD Namlea, yang berbatasan langsung dengan pantai. Korosi, sebagai proses alami degradasi logam, tidak bisa dihindari, namun dapat dikendalikan untuk memperpanjang umur pipa. Penelitian ini mengukur ketebalan pipa di PLTD Namlea menggunakan Ultrasonic Testing (UT) untuk menentukan laju korosi dan sisa umur pakai. Berdasarkan pengukuran, ketebalan minimum pipa di berbagai titik pengukuran (Measuring Point/MP) masih memenuhi standar API 574, yaitu tidak boleh kurang dari 1,8 mm. Laju korosi rata-rata berkisar antara 0,336 hingga 0,358 mm/tahun. Nilai ini mempengaruhi kecepatan degradasi pipa dan sisa umur pakai, yang berkisar antara 5,5 hingga 6,1 tahun di berbagai titik pengukuran. Pipa yang memiliki laju korosi lebih tinggi akan memiliki sisa umur pakai yang lebih pendek. Secara keseluruhan, pipa di PLTD Namlea masih layak digunakan dan memenuhi standar keamanan operasional.

Kata kunci: pipa, laju korosi, sisa umur pakai; dst

Pendahuluan

Di era industri modern, pipa memegang peranan yang sangat penting dalam berbagai bidang antara lain industri minyak dan gas, kimia, dan industri manufaktur lainnya. Pipa merupakan sarana transportasi fluida yang paling banyak digunakan dalam dunia industri minyak dan gas. Penggunaan pipa sendiri harus diperhitungkan terkait tempat yang akan ditempati pipa dan jenis fluida atau gas yang akan dialirkan didalam pipa. Permasalahan yang sering di alami pada sistem perpipaan migas adalah korosi. Korosi merupakan salah satu masalah yang sering terjadi pada pipa. Korosi merupakan suatu proses alami dari suatu material (biasanya berupa logam) untuk kembali menuju keadaan semula melalui proses elektrokimia karena reaksi dengan lingkungan sekitarnya. (Miksic dalam Hakim, M., Mulyaningsih, N., Suharno, K., & Taufik, I. 2020).

PLTD Namlea merupakan salah satu pembangkit listrik tenaga diesel milik PT. PLN (persero). Pipa distribusi bahan bakar PLTD Namlea yang berbatasan langsung dengan pantai sangat rentan

terhadap kerusakan, terutama yang dapat disebabkan oleh korosi pada dinding pelat logam, sehingga perlu dilakukan perawatan untuk mencegah terjadinya kerusakan. Korosi terjadi secara perlahan, yang berarti umur material terbatas, sedangkan material yang harus digunakan dalam jangka waktu lama menghasilkan umur yang lebih pendek dari rata-rata. Korosi merupakan permasalahan yang merugikan dan harus mendapat perhatian khusus dampak yang ditimbulkannya, karena korosi merupakan suatu proses yang alami, proses tersebut tidak dapat dihindari, yang dapat kita lakukan adalah dengan mengendalikan dan menurunkan laju korosi agar produk dapat berfungsi sebagaimana mestinya. (Leonard, J. (2015).

Salah satu metode pemeriksaan yang umum adalah dengan mengukur ketebalan pipa. Pengukuran ini dapat mengetahui laju korosi yang terjadi dan sisa masa manfaat pipa yang bersangkutan. Analisis data hasil pengukuran alat ukur ketebalan ultrasonik pada penelitian ini diharapkan dapat membantu memberikan informasi sisa umur manfaat pipa. Pentingnya penelitian ini erat kaitannya dengan keberlanjutan industri. Korosi pada pipa tidak hanya mengancam keutuhan struktur, namun juga dapat menimbulkan bahaya kecelakaan seperti kebakaran, kebocoran dan pencemaran lingkungan. Oleh karena itu, pemahaman menyeluruh mengenai korosi pipa dapat menjadi dasar bagi pengembangan metode pencegahan yang berkelanjutan dan inovatif, yang pada akhirnya akan meningkatkan efisiensi operasional dan keselamatan fasilitas industri di Indonesia.

Tinjauan Pustaka

PIPA

Pipa adalah suatu benda berbentuk lubang silinder dengan lubang di tengahnya yang terbuat dari logam atau bahan lain yang digunakan untuk mengedarkan atau mengangkut zat cair baik berupa cairan, gas, atau serbuk padat. Fluida yang mengalir ini mempunyai suhu dan tekanan yang berbeda-beda. Pipa biasanya ditentukan berdasarkan nilai nominalnya, sedangkan pipa adalah jenis pipa yang ditentukan berdasarkan diameter luarnya.. (MOCHAMAD, A. R. 2019). Fungsi pipa adalah untuk mengangkut material seperti cairan, gas atau uap dari suatu tempat ke tempat tertentu dengan memperhatikan pengaruh, suhu dan tekanan fluida yang dialirkan, lokasi dan pengaruh lingkungan. lingkungan.

JENIS - JENIS MATERIAL PIPA

Dilihat dari struktur bahan baku yang digunakan secara umum kita mengenal jenis-jenis pipa sebagai berikut:

- Pipa carbon steel
- Pipa carbon moly
- Pipa stainless steel
- Pipa duplex (biasa digunakan di proyek migas)
- Pipa galvanis
- Pipa ferro nikel
- Pipa chrom moly
- Pipa PVC
- Pipa HDPE (High Density PolyEthylene)

Pipa Carbon Steel biasa digunakan untuk pendistribusian bahan bakar minyak, seperti bensin dan solar, karena mampu menahan beban aliran minyak yang cukup tinggi, beroperasi pada suhu tinggi, dan terhindar dari bahaya kebakaran pada lingkungan. Kelemahan dari pipa jenis ini adalah mudah mengalami korosi jika pipa berada di ruang dan atmosfer terbuka.

PROSES PEMBUATAN PIPA

Berbagai macam proses berbeda yang digunakan dalam pemanufakturan (pembuatan) pipa, dimana proses-proses tersebut dikelompokkan dalam empat klasifikasi yaitu:

- A. Pipa tanpa sambungan (*seamless pipe*)

- B. Pipa tempa (*Forged pipe*)
- C. Pipa las (*Welded pipe*)
- D. Pipa cor (*Cast pipe*)

Sebagai contoh dari proses yang digunakan dalam proses pembuatan pipa yaitu pipa yang dicor (*cast*) secara sentrifugal dan dilakukan penggerakan dingin melalui ekspansi hidrolik yang akan mengubah struktur metalurgi dari coran tersebut. Pipa las juga dilakukan peng-ekspansian dingin (pemuatan dingin) atau *cold-reduced* melalui beberapa manufaktur untuk menghasilkan keseragaman daya tahan panasmaterial. Pemuatan dingin juga akan meningkatkan garis kekuatan luluh. Pada setiap klasifikasi, sejumlah proses khusus dilakukan.

A. Pipa Seamless

Seamless pipe dalam arti bahasa artinya pipa tanpa sambungan. Dalam praktek pembuatannya, seamless pipe memang merupakan pipa yang dibentuk tanpa membuat sambungan sama sekali, sehingga tidak ada bagian dari pipa yang pernah terganggu atau berubah materialnya akibat panas pengelasan. Pipa ini dibuat dari baja silinder pejal, yang dilubangi dalam kondisi hampir meleleh, biasa disebut billet.

Dengan metode pembuatan tanpa join tersebut, pipa yang dihasilkan dapat lebih baik karena kualitas baja yang dihasilkan adalah hampir sama pada setiap area permukaan pipa. Selain itu, ketebalan dengan menggunakan metode ini, pipa yang memiliki ketebalan berapapun memungkinkan untuk diproduksi.

B. Pipa Tempa

Pembuatan Pipa yang ditempa diutamakan dalam ukuran pipa yang lebih besar dan ketebalan dinding pipa yang lebih berat. Terdapat dua tipe dari forged pipe ini yang terdapat dalam spesifikasi ASTM untuk testing dan material yaitu Forged and bored pipe dan Hollow forged pipe. Pada forged and bored pipe, billet baja atau ingot pertama kali dipanaskan pada temperatur hingga 2300 F dan kemudian diteruskan dengan proses forging dengan menggunakan pemukul forging atau penekanan berat untuk mendapatkan pendekatan diameter 1 inci lebih besar daridiameter yang diinginkan.

Billet lalu dibubut untuk membuang kelebihan baja dan menghasilkan diameter luar yang actual. Bagian dalam pipa dibor dengan pengeboran khusus atau trepanning tool. Dengan proses ini banyak diproduksi pipa dengan diameter 10-30 in dan ketebalan dinding 1.5- 4 in. Proses permesinan yang telah dilakukan juga mengijinkan ketebalan pipa rata-rata untuk ditahan hingga mendekati batas minimum dari dinding yang dibutuhkan oleh perancang dalam sistem perpipaan.

C. Pipa Las

Pengelasan dari piringan, skelp, atau koil ke pipa dilakukan dengan pemanasan dan pengelasan tempa untuk pipa las butt(*butt-weld pipe*) atau dengan pengelasan penyatuhan resistansi listrik, flash, pengelasan submerged-arc, gas inert tungsten-arc welding, atau gas-shielded yang dapat digunakan pada pengelasan metal arc.

Kelim yang dilas bisa secara kelim longitudinal paralel terhadap sumbu dari pipa atau las spiral. Untuk material yang mengandung unsur ferrous dilakukan furnace welded pipe dan fusion welded pipe.

C.1 Furnace Welded Pipe

Atau yang dikenal dengan continuous-welded atau *butt-welded pipe* hanya cocok untuk grade baja karbon. Pipa secara umum dibuat dari tungku-perapian terbuka dan oksigen murni baja bassemer. Pipa FWD normalnya dipertimbangkan biaya terendah pipa baja.

C.2 Fusion Welded Pipe

Pengelasan penyatuhan dari pipa dilakukan dengan metode Resistance welding, induction welding atau arc-welding. Metode resistance welding terdiri dari empat metode yaitu:

1. Flash welding
2. Low-frequency resistance welding
3. High frequency induction welding

4. High-frequency resistance welding

C.3 Pipa Dengan Unsur Non Ferrous

Proses fussion-welding dapat dikerjakan untuk pipa dengan unsur nonferrous. Secara ekstensif digunakan proses arc-welding. Di atas dinding pipa, gasinert- gas tungsten-arc process secara luas digunakan. Aluminium dan alloys, sistem piping dengan material ini dimanufaktur dengan salah satu proses resistance welding atau proses arc-welding. Prosedur yangsama juga diberlakukan untuk penggerjaan pada pipa bermaterial aluminium. Kecuali high-frequency induction welding tidak boleh dikerjakan untuk pipa kurang dari $\frac{3}{4}$ in diameter. Untuk material tembaga dan paduannya, paduan nikel, dan titanium dan paduannya proses pengelasan tidak cocok digunakan.

D. Cast Pipe

Pipa cor dibuat dengan pengecoran statis atau pengecoran sentrifugal. Pada pipa pengecoran statis secara umum dibatasi untuk pipa dengan ukuran panjang. Katup, fitting dan komponen lain diproduksi dengan pengecoran dengan pasir(sand casting).

Pipa cor sentrifugal, diproduksi melalui baja yang dicairkan melalui busur listrik atau perapian induksi ke dalam cetakan memutar dan membiarkan logam memadat dibawah tekanan dari gaya sentrifugal. Cetakan biasanya diputar diputar pada sumbu horizontal dengan kecepatan 50-200 kali dari gravitasi. Pipa cor sentrifugal diproduksi dengan diameter luar 4-54 in dan panjang hingga 30ft. Aplikasi dari pipa ini digunakan untuk paper mill rolls, gun barrel dan lain-lain. Namun pipa ini tidak dianjurkan untuk aplikasi pada temperatur tinggi(>1050 F), dan tekanan tinggi (800psi).

KOROSI

Korosi didefinisikan sebagai penghancuran paksa suatu zat seperti logam di sekitarnya dan bahan bangunan mineral, yang biasanya berupa cairan (bahan korosif). Biasanya dimulai dari permukaan dan disebabkan oleh reaksi kimia dan, dalam kasus logam, oleh reaksi elektrokimia. Kehancuran kemudian dapat merambat pada materi..(Afandi, Y. K., Arief, I. S., & Amiadji, A. (2015).

BENTUK – BENTUK KOROSI

Klasifikasi korosi pada umumnya berdasarkan penampilan yang dapat dilihat dari permukaan yang berkarat secara visual.

Berdasarkan bentuk permukaannya, korosi dapat dibedakan atas:

1. Korosi Seragam

Korosi seragam adalah korosi yang terjadi pada seluruh permukaan suatu logam dalam waktu yang bersamaan. Oleh karena itu, logam yang mengalami korosi seragam mempunyai kerugian dimensi yang relatif besar per satuan waktu. Kerugian langsung yang diakibatkan oleh korosi permukaan antara lain hilangnya material konstruksi, keselamatan kerja dan pencemaran lingkungan akibat produk korosi berupa senyawa-senyawa berbahaya bagi lingkungan. Sedangkan kerugian tidak langsung berupa berkurangnya kapasitas produksi dan meningkatnya biaya pemeliharaan (preventive maintenance).

2. Korosi Galvanik

Korosi galvanik terjadi ketika dua logam yang berbeda disatukan dan ditempatkan dalam lingkungan yang korosif. Salah satu logam mengalami korosi sedangkan logam lainnya terlindungi dari serangan korosi. Logam yang terkorosi adalah logam yang potensialnya lebih rendah dan logam yang tidak terkorosi adalah logam yang potensialnya lebih tinggi.

3. Korosi Sumuran (pitting)

Pitting merupakan korosi lokal yang terjadi pada permukaan terbuka akibat rusaknya lapisan pasif. Korosi pitting dimulai dengan terbentuknya lapisan pasif dan seiring dengan menurunnya pH akibat elektrolit, lapisan pasif tersebut lambat laun terurai sehingga merusak lapisan pasif dan menyebabkan korosi pitting. Korosi pitting sangat berbahaya karena dapat menimbulkan kerusakan langsung pada peralatan (struktur) karena berada pada area yang sangat sempit, namun sangat dalam..

4. Korosi Erosi

Korosi Erosi mengacu pada kombinasi erosi dan korosi dengan adanya cairan korosif yang bergerak atau bagian logam yang bergerak melalui cairan korosif, yang menyebabkan percepatan kerusakan logam. Efek mekanis dari aliran atau kecepatan fluida dikombinasikan dengan aksi fluida korosif mengakibatkan hilangnya logam yang semakin cepat. Pada fase awal, lapisan pelindung logam dihilangkan secara mekanis, dan kemudian terjadi korosi pada logam telanjang melalui aliran cairan korosif.

5. Korosi Celah

Korosi celah adalah korosi lokal yang terjadi pada ruang antara dua bagian. Mekanisme korosi celah dimulai dengan korosi seragam di luar dan di dalam celah, diikuti dengan oksidasi logam dan reduksi oksigen. Pada titik tertentu, tidak ada lagi oksigen (O_2) di dalam celah tersebut, namun masih terdapat banyak oksigen di luar celah tersebut. Hal ini menyebabkan permukaan logam yang bersentuhan dengan bagian luar menjadi katoda dan permukaan logam bagian dalam menjadi anoda sehingga menimbulkan ruang yang terkorosi.

6. Korosi Retak Tegang, Retak Fatik, dan Korosi Akibat Pengaruh Hidrogen

Korosi retak tegang, korosi retak fatik dan korosi akibat pengaruh hidrogen adalah bentuk korosi dimana material mengalami keretakan akibat pengaruh lingkungannya.

7. Korosi Selective Leaching

Pencucian selektif adalah korosi selektif pada satu atau lebih komponen paduan dalam larutan padat. Ini juga disebut fragmentasi, pembubaran selektif, atau serangan selektif. Contoh paduan yang umum adalah dekarburisasi, debaltifikasi, denikifikasi, dezincifikasi, dan korosi grafit. Mekanisme pelindian selektif adalah bahwa logam dan paduan yang berbeda memiliki potensi (atau potensi korosi) yang berbeda dalam elektrolit yang sama. Paduan modern mengandung sejumlah elemen paduan berbeda yang menunjukkan potensi korosi berbeda.

8. Korosi Atmosfer

Korosi ini disebabkan adanya proses elektrokimia antara dua bagian benda padat, khususnya besi metalik, yang mempunyai potensial berbeda dan bersentuhan langsung dengan udara bebas. Faktor-faktor yang menentukan tingkat karat di atmosfer, khususnya :

- a. Jumlah polutan di udara (debu, gas), butiran karbon, oksida logam. catatan.
- b. Suhu
- c. Kelembapan kritis
- d. Arah dan kecepatan angine
- e. Radiasi matahari
- f. Jumlah curah hujan

9. Korosi Intergranular

Korosi intergranular adalah bentuk korosi yang terjadi pada paduan logam akibat terjadinya reaksi antar unsur logam di batas butirnya. Seperti yang terjadi pada baja tahan karat austenitic apabila diberi perlakuan panas.

FAKTOR PENYEBAB KOROSI

umumnya problem korosi disebabkan oleh air, tetapi ada beberapa faktor selain air yang mempengaruhi laju korosi, diantaranya:

1. Faktor Gas Terlarut.

adanya oksigen yang terlarut akan menyebabkan korosi pada metal seperti laju korosi pada mild steel alloys akan bertambah dengan meningkatnya kandungan oksigen. Reaksi korosi secara umum pada besi karena adanya kelarutan oksigen

2. Faktor suhu Peningkatan suhu umumnya meningkatkan laju korosi, meskipun pada kenyataannya kelarutan oksigen menurun dengan meningkatnya suhu. Jika logam tidak berada pada suhu yang seragam, terdapat risiko tinggi terjadinya korosi.
3. Faktor pH netral adalah 7, sedangkan pH < 7 bersifat asam dan korosif, sedangkan pH > 7 bersifat basa dan korosif. Namun untuk besi, laju korosinya rendah pada pH 7 sampai 13. Laju korosi meningkat pada pH < 7 dan pada pH > 13.
4. Bakteri Pereduksi Sulfat (SRB) Adanya bakteri pereduksi sulfat akan mengurangi ion-ion sulfat yang bersirkulasi . pada gas H₂S yang apabila gas ini bersentuhan dengan besi maka akan menimbulkan korosi.

LAJU KOROSI

Laju korosi adalah laju perambatan atau laju penurunan kualitas material seiring berjalanannya waktu. Untuk menghitung laju korosi, satuan yang umum digunakan adalah mm/th (standar internasional) atau mill/tahun (mpy, standar Inggris). Tingkat ketahanan korosi suatu material biasanya memiliki nilai korosi antara 1 dan 200 mpy. Tabel di bawah ini merupakan klasifikasi tingkat ketahanan material berdasarkan laju korosinya..

Tabel 2.1 Laju Korosi

| Relative Corrosion resistance | Approximate Metric Equivalent | | | | |
|-------------------------------|-------------------------------|------------|-------------|-----------|----------|
| | mpy | mm/year | μm/yr | nm/yr | pm/sec |
| Outstanding | < 1 | < 0.02 | < 25 | < 2 | < 1 |
| Excellent | 1 - 5 | 0.02 - 0.1 | 25 - 100 | 2 - 10 | 1 - 5 |
| Good | 5 - 20 | 0.1 - 0.5 | 100 - 500 | 10 - 50 | 5 - 20 |
| Fair | 20 - 50 | 0.5 - 1 | 500 - 1000 | 50 - 100 | 20 - 50 |
| Poor | 50 - 200 | 1 - 42125 | 1000 - 5000 | 150 - 500 | 50 - 200 |
| Unacceptable | 200+ | 5+ | 5000+ | 500+ | 200+ |

INSPEKSI

Inspeksi merupakan kegiatan pemeliharaan peralatan yang digunakan pada produk dan jasa perusahaan. Inspeksi adalah pemeriksaan terhadap peralatan untuk memastikan bahwa peralatan tersebut dalam keadaan baik dan tidak terjadi kerusakan fisik atau pengurangan fungsi dan ukuran peralatan yang ada (Nuswantoro, B. (2018).

Saat melakukan inspeksi terhadap kegiatan perminyakan sektor pipa dan gas, standar yang digunakan adalah API 570 (American Petroleum Institute), yang mengacu pada kegiatan inspeksi, perbaikan dan penilaian ulang pipa yang bertujuan untuk mencegah kerusakan, meminimalkan potensi masalah dan memastikan pengoperasian pipa yang optimal.

REMAINING LIFE (Sisa Umur Pakai)

Analisis Remaining Life (RL) Sisa umur pipa atau remaining life service adalah perkiraan atau estimasi yang digunakan untuk memprediksi sisa umur suatu pipa sehingga dapat dilakukan perencanaan penggantian atau perbaikan untuk selanjutnya. Sisa umur pipa bergantung pada nilai laju korosinya. Berdasarkan standar diketahui bahwa untuk menghitung sisa umur pipa maka dibutuhkan nilai ketebalan minimum (T required) yang ditetapkan dalam API 570 5.7 . Remaining Life (RL)

$$= \frac{t_{actual} - t_{minimum}}{corrosion\ rate} = the\ remaining\$$

Remaining Life merupakan Sisa umur pipa (Tahun), T actual adalah Nilai ketebalan pipa yang di dapat dari hasil inspeksi di lapangan (mm). T required adalah Nilai minimum wall thickness yang di tetapkan dalam API 574. Corrosion Rate adalah Laju korosi (mmpy).

Tabel 2.2 Standar ketebalan minimum pipa

| NPS | Default Minimum Structural Thickness for Temperatures < 400 °F (205 °C) in. (mm) | Minimum Alert Thickness for Temperatures < 400 °F (205 °C) in. (mm) |
|------------|--|---|
| 1/2 to 1 | 0.07 (1.8) | 0.08 (2.0) |
| 1 1/2 | 0.07 (1.8) | 0.09 (2.3) |
| 2 | 0.07 (1.8) | 0.10 (2.5) |
| 3 | 0.08 (2.0) | 0.11 (2.8) |
| 4 | 0.09 (2.3) | 0.12 (3.1) |
| 6 to 18 | 0.11 (2.8) | 0.13 (3.3) |
| 20 to 24 | 0.12 (3.1) | 0.14 (3.6) |

NDT (NON DESTRUCTION TESTING)

Non Destructive Test (NDT) merupakan pengujian fisik suatu bahan atau benda uji untuk mencari cacat pada benda tersebut tanpa merusak atau menghancurkan benda uji tersebut. Tujuan pengujian NDT adalah untuk mendeteksi cacat dengan menggunakan prosedur tertentu pada suatu objek oleh operator. Hasil pengujian ini akan menentukan apakah suatu part akan diganti atau tidak berdasarkan jumlah cacat yang ada yang mengacu pada suatu standar. (Endramawan, T., Haris, E., Dionisius, F. dan Prinka, Y. 2017).

ULTRASONIC THICKNESS (UT)

Ultrasonic thickness adalah salah satu teknik pengujian material tanpa merusak benda uji melalui pantulan gelombang ultrasonik. Pengujian ini dilakukan untuk mendeteksi adanya cacat (*flaw*) atau retak (*crack*) pada material secara dini untuk menghindari kegagalan saat digunakan. Propagasi gelombang ultrasonik didalam struktur baja mengalami pemantulan atau pembelokan pada saat mengenai medium dengan indek yang berbeda.

Propagasi gelombang ultrasonik tersebut kemudian diekstrak menggunakan metode *Continuous Wavelet Transform* (CWT) untuk merepresentasikan permukaan material yang didasarkan pada frekuensi dan waktu pantul/belok sebagai dasar jarak keberadaan rongga (cacat). CWT mempunyai keunggulan pada proses analisis sinyal yang lebih cepat dibandingkan dengan metode lain seperti transformasi fourier dan mempunyai kemampuan untuk menransformasikan sinyal nonstasioner dalam domain waktu-frekuensi.



Gambar 2.10 Ultrasonic Thickness Gauge GM 100
Sumber (isweek.com)

Fitur Pengukur Ketebalan Ultrasonik GM100:

Layar LCD 4 digit

Rentang pengukuran 1,2 hingga 225,0mm (baja)

Akurasi $\pm (1\% H + 0,1)$ mm

Rentang kecepatan suara 1000 ~ 9999m / s

Frekuensi kerja 5MHz

Batas minimum untuk pengukuran tabung: $\Phi 20*3$ mm (steel)

Tata Cara Menggunakan Ultrasonic Thickness Gauge:

1. Persiapan Alat:

- Pastikan Ultrasonic Thickness Gauge dalam kondisi baik dan baterai terisi penuh.
- Siapkan probe atau sensor yang sesuai dengan material yang akan diukur.

2. Persiapan Permukaan:

- Bersihkan permukaan material dari kotoran, minyak, atau karat untuk mendapatkan hasil pengukuran yang akurat.
- Jika diperlukan, amplas area yang akan diukur untuk menghilangkan lapisan oksida atau lapisan pelindung lainnya.

3. Kalibrasi Alat:

- Lakukan kalibrasi alat sebelum pengukuran, biasanya dengan menggunakan blok referensi (standard block) yang sudah diketahui ketebalannya.
- Ikuti petunjuk alat untuk menyesuaikan setting kecepatan suara sesuai dengan jenis material (misalnya baja, aluminium, plastik).

4. Aplikasi Couplant:

- Oleskan couplant (gel khusus) di antara permukaan material dan probe untuk memastikan transmisi gelombang ultrasonik yang baik.
- Pastikan gel terdistribusi merata agar hasil pengukuran lebih akurat.

5. Pengukuran:

- Tempatkan probe di atas permukaan material yang sudah diberi couplant.
- Tekan probe dengan lembut tetapi stabil pada permukaan material.
- Baca hasil ketebalan yang muncul pada layar Ultrasonic Thickness Gauge. Pastikan probe tetap pada posisi yang stabil hingga hasil pengukuran muncul.

6. Pengecekan Ulang:

- Lakukan pengukuran ulang di beberapa titik berbeda pada area yang sama untuk memastikan konsistensi hasil.
- Jika ada ketidaksesuaian hasil, periksa ulang kalibrasi atau coba mengukur ulang dengan aplikasi couplant yang lebih baik.

7. Catat Hasil Pengukuran:

- Setelah mendapatkan hasil pengukuran yang sesuai, catat nilai ketebalan material.
- Jika diperlukan, hitung ketebalan rata-rata dari beberapa pengukuran.

Tips Tambahan:

- Pastikan probe dan permukaan material selalu bersih saat melakukan pengukuran untuk mencegah hasil yang tidak akurat.

- Sesuaikan kecepatan suara di alat dengan jenis material yang diukur.
 - Hindari tekanan berlebihan saat menekan probe untuk menghindari kerusakan pada sensor.
- Dengan mengikuti prosedur ini, hasil pengukuran dengan Ultrasonic Thickness Gauge akan lebih akurat dan konsisten.

Dalam API 570 5.7 terdapat faktor-faktor yang dapat berkontribusi terhadap berasalnya akurasi pengukuran ultrasonik meliputi hal-hal berikut:

- a) kalibrasi instrumen yang tidak tepat; b) pelapis atau kerak eksternal;
- c) kekasaran permukaan yang signifikan;
- d) penempatan dan orientasi transduser (misalnya, penempatan permukaan melengkung, orientasi probe pitch/tangkap);
- e) cacat material di bawah permukaan, seperti laminasi;
- f) efek suhu [pada suhu di atas 150 °F (65 °C)];
- g) resolusi yang tidak tepat pada layar detektor;
- h) ketebalan kurang dari 1/8 inci (3,2 mm) untuk pengukur ketebalan digital pada umumnya;
- i) pemakaian gel probe ke permukaan yang tidak tepat (terlalu banyak atau terlalu sedikit gel)

Metodologi

Metode dan Objek Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan melakukan pengukuran langsung dengan menggunakan alat Ultrasonic Testing (UT).

Teknik pengelolahan data yang dilakukan oleh penulis ialah menghitung laju korosi, ketebalan minimum pipa dan remaining life pipa dengan menggunakan alat ultrasonic thickness gauge. Data awal yang harus dikumpulkan ialah ketebalan awal pipa saat dipasang pipa dan ketebalan pipa saat diukur dengan ultrasonic thickness gauge sehingga dapat menentukan laju korosi pada pipa, data selanjutnya yang dikumpulkan ialah ketebalan paling minimum pipa yang harus diketahui sebelum menghitung remaining life pipa yang akan diteliti oleh penulis.

Data yang diambil merupakan hasil dari pengukuran langsung dan menggunakan standard API (570) sebagai acuan pengukuran dan Langkah pengambilan data. Pengukuran dilakukan dengan Langkah awal memilih (TML) thickness monitoring location atau titik pengambilan data menggunakan alat ultrasonic thickness gauge, setelah itu dapat melakukan perhitungan menggunakan yang telah ditentukan oleh standard yang digunakan. Setelah selesai perhitungan maka hasil pengukuran laju korosi , ketebalan minimum pipa dan remaining life pipa bisa disimpulkan.

Hasil dan Pembahasan

Analisis Data

Data Pipa

Tabel 4.1 Spesifikasi Pipa

| Material Pipa | : Carbon Steel Seamless |
|---------------------------------|--------------------------------|
| Panjang Per Sambungan | : 3 Meter |
| Panjang Keseluruhan Pipa | : 15 Meter |
| Berat Kelas | : XS SCH 80 |
| Diameter | : 6,3 cm |
| Wall Thickness | : 5,54 mm |
| Tahun Pemasangan | : 2019 |

Data Hasil Inspeksi Tahun 2024

Tabel 4.2 Data Hasil Inspeksi Pipa

| RESULT OF WALL THICKNESS MEASUREMENT | | | | | | |
|---|------------------------------|------------|-------------|-------------|--|----------|
| MEASURING POINT | ACTUAL THICKNESS (mm) | | | | MINIMUM THICKNESS \pm 0,1 (mm) | |
| | 0° | 90° | 180° | 270° | | |
| 1 | 4,5 | 4,0 | 3,8 | 4,0 | 3,8 | A |
| | 4,2 | 3,7 | 3,9 | 4,1 | 3,7 | B |
| | 3,9 | 4,0 | 4,3 | 4,0 | 3,9 | C |
| | 4,0 | 4,2 | 4,0 | 4,1 | 4,0 | D |
| | 3,9 | 4,0 | 3,8 | 3,9 | 3,8 | E |
| | 4,3 | 3,9 | 4,0 | 4,1 | 3,9 | F |
| | 3,7 | 3,9 | 4,0 | 3,9 | 3,7 | G |
| | 4,2 | 3,9 | 3,8 | 4,0 | 3,8 | H |
| | 3,7 | 3,9 | 4,3 | 3,9 | 3,7 | I |
| | 4,1 | 4,0 | 4,3 | 3,8 | 3,8 | J |
| 2 | 3,9 | 3,8 | 4,0 | 3,9 | 3,8 | A |
| | 4,3 | 4,5 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | B |
| | 3,8 | 3,8 | 4,0 | 3,9 | 3,8 | C |
| | 4,0 | 4,0 | 4,3 | 4,1 | 4,0 | D |
| | 3,7 | 4,1 | 3,9 | 3,9 | 3,7 | E |
| | 3,7 | 4,0 | 4,1 | 4,0 | 3,7 | F |
| | 4,0 | 3,9 | 3,9 | 3,8 | 3,8 | G |
| | 4,1 | 4,0 | 4,2 | 3,9 | 3,9 | H |
| | 3,9 | 4,1 | 3,9 | 3,9 | 3,9 | I |
| | 3,8 | 3,9 | 3,7 | 3,7 | 3,7 | J |
| 3 | 3,6 | 3,6 | 3,8 | 4,0 | 3,6 | A |
| | 3,9 | 3,9 | 3,7 | 3,9 | 3,9 | B |
| | 3,8 | 3,9 | 3,9 | 4,0 | 3,8 | C |
| | 4,1 | 3,9 | 3,6 | 3,9 | 3,6 | D |
| | 3,6 | 3,6 | 3,8 | ,39 | 3,6 | E |
| | 3,9 | 4,0 | 4,1 | 4,1 | 3,9 | F |
| | 4,2 | 4,1 | 4,4 | 4,1 | 4,1 | G |
| | 3,8 | 4,3 | 3,8 | 3,9 | 3,8 | H |

| | | | | | | |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|----------|
| | 3,9 | 3,7 | 3,9 | 4,0 | 3,7 | I |
| | 4,0 | 3,9 | 3,6 | 3,5 | 3,5 | J |
| 4 | 3,9 | 3,9 | 4,0 | 4,6 | 3,9 | A |
| | 3,9 | 3,8 | 4,0 | 4,0 | 3,8 | B |
| | 4,1 | 4,1 | 3,8 | 3,9 | 3,8 | C |
| | 3,6 | 3,9 | 3,6 | 4,0 | 3,6 | D |
| | 3,6 | 4,1 | 3,9 | 3,9 | 3,6 | E |
| | 3,9 | 4,2 | 4,3 | 4,0 | 3,9 | F |
| | 4,0 | 3,9 | 3,6 | 3,6 | 3,6 | G |
| | 4,1 | 4,1 | 3,9 | 3,7 | 3,7 | H |
| | 4,2 | 3,9 | 3,7 | 3,7 | 3,7 | I |
| | 3,9 | 3,9 | 4,1 | 4,3 | 3,9 | J |
| 5 | 4,0 | 4,0 | 3,9 | 3,9 | 3,9 | A |
| | 3,9 | 3,7 | 3,9 | 4,0 | 3,7 | B |
| | 3,9 | 4,1 | 4,1 | 4,1 | 3,9 | C |
| | 4,0 | 4,2 | 4,2 | 4,2 | 4,0 | D |
| | 4,3 | 3,9 | 4,0 | 4,0 | 3,9 | E |
| | 3,7 | 3,9 | 3,9 | 3,9 | 3,7 | F |
| | 4,0 | 3,8 | 3,8 | 3,9 | 3,8 | G |
| | 3,8 | 3,8 | 4,0 | 3,9 | 3,8 | H |
| | 3,9 | 4,2 | 4,0 | 4,0 | 3,9 | I |
| | 4,0 | 4,0 | 4,3 | 4,1 | 4,0 | J |

Analisis Perhitungan

4.2.1 Perhitungan Laju Korosi Dan Sisa Umur Pakai Pipa

a). Contoh Perhitungan Measuring Point 1A

$$\text{Laju korosi} = \frac{t_{sebelum} - t_{aktual}}{\text{interval inspection}}$$

$$\text{Laju korosi} = \frac{5,54 - 3,8}{5}$$

$$\text{Laju korosi} = \frac{1,74}{5}$$

$$\text{Laju korosi} = 0,348 \text{ mm / Tahun}$$

$$\text{Sisa umur pakai} = \frac{t_{aktual} - t_{req}}{\text{laju korosi}}$$

$$\text{Sisa umur pakai} = \frac{3,8 - 1,8}{0,348}$$

$$\text{Sisa umur pakai} = 5,7 \text{ Tahun}$$

Tabel 4.3 Data Hasil Perhitungan MP 1

| Measuring Point 1 (MP 1) | Laju Korosi (mmpy) | Sisa Umur Pakai (Tahun) |
|----------------------------|----------------------|---------------------------|
| A | 0.348 | 5.7 |
| B | 0.368 | 5.1 |
| C | 0.328 | 6.4 |
| D | 0.308 | 7.1 |
| E | 0.348 | 5.7 |
| F | 0.328 | 6.4 |
| G | 0.368 | 5.1 |
| H | 0.348 | 5.7 |
| I | 0.368 | 5.1 |
| J | 0.348 | 5.7 |
| Rata-rata | 0.346 mm/y | 5.8 tahun |

b). Contoh Perhitungan Measuring Point 2A

$$\text{Laju korosi} = \frac{t_{sebelum} - t_{aktual}}{\text{interval inspection}}$$

$$\text{Laju korosi} = \frac{5,54 - 3,8}{5}$$

$$\text{Laju korosi} = \frac{1,74}{5}$$

$$\text{Laju korosi} = 0,348 \text{ mm / tahun}$$

$$\text{Sisa umur pakai} = \frac{t_{aktual} - t_{req}}{\text{laju korosi}}$$

$$\text{Sisa umur pakai} = \frac{3,8 - 1,8}{0,348}$$

$$\text{Sisa umur pakai} = 5,7 \text{ Tahun}$$

Tabel 4.4 Data Hasil Perhitungan MP 2

| Measuring Point 2 (MP 2) | Laju Korosi (mmpy) | Sisa Umur Pakai (Tahun) |
|----------------------------|----------------------|---------------------------|
| A | 0.348 | 5.7 |
| B | 0.308 | 7.1 |
| C | 0.348 | 5.7 |
| D | 0.308 | 7.1 |
| E | 0.368 | 5.1 |
| F | 0.368 | 5.1 |
| G | 0.348 | 5.7 |
| H | 0.328 | 6.4 |
| I | 0.328 | 6.4 |
| J | 0.368 | 5.1 |
| Rata-rata | 0.342 mm/y | 5.9 tahun |

c). Contoh Perhitungan Measuring Point 3A

$$\text{Laju korosi} = \frac{t_{sebelum} - t_{aktual}}{\text{interval inspection}}$$

$$\text{Laju korosi} = \frac{5,54 - 3,6}{5}$$

$$\text{Laju korosi} = \frac{1,94}{5}$$

Laju korosi = 0,388 mm/tahun

$$\text{Sisa umur pakai} = \frac{t_{sebelum} - t_{aktual}}{\text{interval inspection}}$$

$$\text{Sisa umur pakai} = \frac{3,6 - 1,8}{0,388}$$

Sisa umur pakai = 4,6 Tahun

Tabel 4.5 Data Hasil Perhitungan MP 3

| Measuring Point 3 (MP 3) | Laju Korosi (mmpy) | Sisa Umur Pakai (Tahun) |
|----------------------------|----------------------|---------------------------|
| A | 0.388 | 4.6 |
| B | 0.328 | 6.4 |
| C | 0.348 | 5.7 |
| D | 0.388 | 4.6 |
| E | 0.388 | 4.6 |
| F | 0.328 | 6.4 |
| G | 0.288 | 7.9 |
| H | 0.348 | 5.7 |
| I | 0.368 | 5.1 |
| J | 0.408 | 4.1 |
| Rata-rata | 0.358 mm/y | 5.5 tahun |

d). Contoh Perhitungan Measuring Point 4A

$$\text{Laju korosi} = \frac{t_{sebelum} - t_{aktual}}{\text{interval inspection}}$$

$$\text{Laju korosi} = \frac{5,54 - 3,9}{5}$$

$$\text{Laju korosi} = \frac{1,64}{5}$$

Laju korosi = 0,328 mm / tahun

$$\text{Sisa umur pakai} = \frac{t_{aktual} - t_{req}}{\text{laju korosi}}$$

$$\text{Sisa umur pakai} = \frac{3,9 - 1,8}{0,328}$$

Sisa umur pakai = 6,4 Tahun

Tabel 4.6 Data Hasil Perhitungan MP 4

| Measuring Point 4 (MP 4) | Laju Korosi (mmpy) | Sisa Umur Pakai (Tahun) |
|----------------------------|----------------------|---------------------------|
| A | 0.328 | 6.4 |
| B | 0.348 | 5.7 |
| C | 0.348 | 5.7 |
| D | 0.388 | 4.6 |
| E | 0.388 | 4.6 |
| F | 0.328 | 6.4 |
| G | 0.388 | 4.6 |
| H | 0.368 | 5.1 |
| I | 0.368 | 5.1 |
| J | 0.328 | 6.4 |
| Rata-rata | 0.358 mm/y | 5.5 tahun |

e). Contoh Perhitungan Measuring Point 5

$$\text{Laju korosi} = \frac{t_{sebelum} - t_{aktual}}{\text{interval inspection}}$$

$$\text{Laju korosi} = \frac{5,54 - 3,9}{5}$$

$$\text{Laju korosi} = \frac{1,64}{5}$$

$$\text{Laju korosi} = 0,328 \text{ mm / tahun}$$

$$\text{Sisa umur pakai} = \frac{t_{aktual} - t_{req}}{\text{laju korosi}}$$

$$\text{Sisa umur pakai} = \frac{3,9 - 1,8}{0,328}$$

$$\text{Sisa umur pakai} = 6,4 \text{ Tahun}$$

Tabel 4.7 Data Hasil Perhitungan MP 5

| Measuring Point 5 (MP 5) | Laju Korosi (mmpy) | Sisa Umur Pakai (Tahun) |
|----------------------------|----------------------|---------------------------|
| A | 0.328 | 6.4 |
| B | 0.368 | 5.7 |
| C | 0.328 | 6.4 |
| D | 0.308 | 7.1 |
| E | 0.328 | 6.4 |
| F | 0.368 | 5.7 |
| G | 0.348 | 5.1 |
| H | 0.348 | 5.1 |
| I | 0.328 | 6.4 |
| J | 0.308 | 7.1 |
| Rata-rata | 0.336 mm/y | 6.1 tahun |

Pembahasan

Berdasarkan hasil dari pengukuran, ketebalan minimum pada MP 1 sebesar 3,7 – 4,0 mm, MP 2 sebesar 3,6 – 4,0 mm, MP 3 sebesar 3,5 – 4,1 mm, MP 4 sebesar 3,6 – 3,9 mm, dan MP 5 sebesar 3,7 – 4,0 mm. Ketebalan minimum yang diizinkan (trcq) memiliki nilai yang sama, yakni tidak boleh kurang dari 1,8 mm. Hal tersebut sesuai dengan API 574 untuk standar nilai tebal minimum yang dibutuhkan. Sehingga dengan membandingkan nilai ketebalan saat ini, maka seluruh Measuring Point pada seluruh pipa masih memenuhi syarat.

Laju korosi pada setiap Measuring point ada yang memiliki nilai yang sama dan ada yang memiliki nilai yang berbeda. Pada MP 1, nilai laju korosi rata-rata adalah 0,346 mm/years, MP 2 nilai laju korosi rata-rata adalah 0,342 mm/years, MP 3 nilai laju korosi rata-rata adalah 0,358 mm/years, sedangkan MP 4 nilai laju korosi rata-ratanya sama dengan MP 3 yaitu 0,358 mm/years, dan MP 5 nilai laju korosi rata-ratanya adalah 0,336 mm/years. Nilai laju korosi akan mempengaruhi kecepatan degradasi pada logam, semakin besar nilai laju korosi, maka akan semakin cepat logam tersebut mengalami degradasi. Degradasi pada logam dapat berupa penipisan secara general (*thinning*) maupun berupa lubang (*pitting*) yang terlokalisasi. Hal tersebut yang menyebabkan ketebalan pipa pada setiap titik yang di inspeksi atau *Measuring Point* (MP) memiliki nilai yang berbeda beda. Pengukuran ketebalan saat ini sangat menentukan nilai laju korosi. Oleh sebab itu, MP sangat penting agar dapat menghitung laju korosi dititik yang sama sehingga hasilnya menjadi lebih akurat.

Nilai laju korosi, ketebalan hasil pengukuran saat ini (tmin), dan tebal minimum yang dibutuhkan (treq) dapat menentukan sisa umur (*remaining life*) dari pipa tersebut. Rata-rata sisa umur pakai pada masing - masing MP1, MP2 ,MP3, MP4, dan MP5 adalah 5,8 tahun, 5,9 tahun, 5,5 tahun, 5,5 tahun, dan 6,1 tahun. Perbedaan sisa umur Measuring Point pipa yang sama disebabkan karena laju korosi yang berbeda beda. Semakin besar nilai laju korosi maka umur sisa Pipa akan semakin kecil.

Penutup

Kesimpulan

Berdasarkan analisis data yang diperoleh selama proses penelitian di PLTD Namlea dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Dari hasil analisis dan perhitungan didapatkan bahwa pipa penyalur bahan bakar di PLTD Namlea masih layak untuk dioperasikan. Ketebalan aktual pipa saat ini masih memenuhi standar dari ketebalan minimum yang ditentukan pada API 574 yaitu **>1,8 mm**.
2. Hasil analisis menunjukan bahwa Laju korosi pada setiap Measuring point ada yang memiliki nilai yang sama dan ada yang memiliki nilai yang berbeda. Pada MP 1, nilai laju korosi rata-rata adalah **0,346 mm/years**, MP 2 nilai laju korosi rata-rata adalah **0,342 mm/years**, MP 3 nilai laju korosi rata-rata adalah **0,358 mm/years**, sedangkan MP 4 nilai laju korosi rata-ratanya sama dengan MP 3 yaitu **0,358 mm/years**, dan MP 5 nilai laju korosi rata-ratanya adalah **0,336 mm/years**.
3. Hasil analisis menunjukan bahwa Korosi sangat mempengaruhi sisa umur pakai dari pipa, dimana pipa yang memiliki laju korosi yang lebih tinggi akan memiliki sisa umur pakai yang lebih pendek. Rata-rata sisa umur pakai pada masing - masing *MP1, MP2, MP3, MP4, dan MP5* adalah 5,8 tahun, 5,9 tahun, 5,5 tahun, 5,5 tahun, dan 6,1 tahun.

Saran

Berdasarkan hasil pengamatan dan analisa, saran yang dapat diberikan demi kebaikan dan kemajuan di kemudian hari di lingkungan PLTD Namlea adalah:

1. Melakukan rutinitas memeriksa kondisi pipa secara berkala adalah langkah yang penting untuk mencegah terjadinya kebocoran pada pipa
2. Dalam pengambilan data penting untuk membuat tanda saat menginspeksi untuk memudahkan proses menginput data.

Referensi

- Afandi, Y. K., Arief, I. S., & Amiadji, A. (2015). Analisa Laju Korosi pada pelat baja Karbon dengan Variasi ketebalan coating. *Jurnal Teknik ITS*, 4(1), G1-G5.
- Ahmad, F., Saputra, R. A., & Syeptiani, S. (2023). PENGARUH PEMBERIAN DISINFEKTAN TERHADAP LAJU KOROSI DAN JENIS KOROSI YANG TERJADI PADA LOGAM. *Jurnal Multidisiplin Raflesia*, 2(1), 55-59.
- Alida, R., & Anjastara, A. P. (2021). "Penentuan Waktu Pemakaian Storage Tank Melalui Analisa Data Hasil Pengukuran Ultrasonic Thickness Pada Tangki Tep-028 Di Stasiun Pengumpul Jemenang Pt Pertamina Ep Asset 2 Field Limau". *Jurnal Teknik Patra Akademika*, Vol 11, No 2.
- Endramawan, T., Haris, E., Dionisius, F., & Prinka, Y. (2017). Aplikasi Non Destructive Test Penetrant Testing (Ndt-Pt) Untuk Analisis Hasil Pengelasan Smaw 3g Butt Joint. *JTT (Jurnal Teknologi Terapan)*, 3(2).
- Hutauruk, F. Y. (2017). Analisa Laju Korosi pada Pipa Baja Karbon dan Pipa Galvanis dengan Metode Elektrokimia. Skripsi, Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya.
- Hakim, M., Mulyaningsih, N., Suharno, K., & Taufik, I. (2020). Analisis Pengaruh Penggunaan Inhibitor Minyak Biji Kapas Terhadap Laju Korosi Pipa Radiator Mobil. *Journal of Mechanical Engineering*, 4(1), 15-21.
- Umar, H. (2003). Metode Penelitian Kuantitatif. Alfabeta, Jakarta.
- Kanaalaq, R. (t.th). <http://www.scribd.com/doc/140854092/Proses-Pembuatan-Pipa>.

Journal Mechanical Engineering (JME).
VOL 2, NO. 1, April 2024

- Leonard, J. (2015). Distribusi tingkat karat dan laju korosi baja St 37 dalam lingkungan air laut dan air tanah. *Jurnal Mekanikal*, 6(1).
- Lopulisa, G. A. I. (2021). ANALISIS KOROSI TERHADAP KEKUATAN WIREMESH PADA AREA HEAVY SULFIDE ZONE (HSZ) TAMBANG BAWAH TANAH (Studi Kasus: PT Freeport Indonesia, Kabupaten Mimika, Provinsi Papua) (Doctoral dissertation, Universitas Hasanuddin).
- MOCHAMAD, A. R. (2019). OPTIMALISASI PERAWATAN SISTEM PEMIPAAN KAPAL SELAMA PENGEDOCKAN DI PT. INDONESIA MARINA SHIPYARD GRESIK. KARYA TULIS.
- Nuswantoro, B. (2018, August). Analisis Remaining Life Dan Program Inspeksi Dengan Pendekatan Risk Management Pada Pipa Penyalur Gas. In Prosiding Seminar Sains Nasional dan Teknologi (Vol. 1, No. 1).
- Syafrizal, S. Analisa Korosi Pipa Solar Mesin Diesel di sebuah Pt. x. *Jurnal Konversi Energi dan Manufaktur*, 3(2), 354369.
- Wulandari, P., & Widiono, B. (2021). PENENTUAN LAJU KOROSI DAN REMAINING LIFE PADA PIPA JEMBATAN GAS JREBENG 1, JREBENG 2, NGINDEN DAN KALI SURABAYA DARI PT PERUSAHAAN GAS NEGARA TBK. *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, 7(2), 74-81,