

Analisa Headloss dan Estimasi Umur Pipa Water Injection pada Sistem Pompa Finish Mill Industri Semen

Wisnu Laksono, Anis Roihatin*

Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Semarang, Jl. Prof. Sudharto, SH. Tembalang, Indonesia

*E-mail: anis.roihatin@polines.ac.id

Diajukan: 21-11-2024; Diterima: 26-04-2025; Diterbitkan: 29-04-2025

Abstrak

Salah satu tahapan penting pada industri semen yaitu tahapan *finish mill* yang menentukan kualitas akhir produk semen. Peralatan *finish mill* yang banyak digunakan yaitu *Vertical Roller Mill* (VRM) yang dilengkapi dengan *Water Injection* untuk mencegah terjadinya vibrasi yang cukup besar dan peningkatan temperatur. Pengoperasian *Water Injection* dalam jangka waktu tertentu dapat menimbulkan masalah seperti penyumbatan (*fouling*), kehilangan tekanan (*Headloss*) dan deformasi pada pipa *Water Injection*. Hal tersebut mengakibatkan *Water Injection* tidak dapat beroperasi secara optimal dan dapat menghambat kegiatan *grinding* material semen. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui besarnya nilai *Headloss* dan *Grow Rate Roughness* pipa, serta memperkirakan umur pipa *Water Injection* pada sistem pompa *Finish Mill* industri semen. Dalam penelitian ini, pengambilan data dilakukan secara langsung di industri semen dan selanjutnya dianalisis nilai *Headloss*, *Growth Rate Roughness* pipa dan umur pipa secara kuantitatif dengan persamaan matematis. Hasil analisis didapat nilai *Headloss* pada pipa baru sebesar 33,68 m, nilai *Headloss* pada pipa lama sebesar 34,47 m dengan *Grow Rate Roughness* sebesar 0,00469 mm/tahun.. Rata-rata umur pakai kritis pipa adalah 7-9 tahun sehingga perlu dilakukan perawatan pipa *water injection* secara berkala, menjaga kualitas air dan pergantian pipa baru untuk mengoptimalkan kinerja dari *water injection* pada sistem pompa *finish mill* industri semen.

Kata kunci: headloss, estimasi umur pipa; water injection, finish mill

Abstract

One of the important stages in the cement industry is the finish mill where the final grinding is carried out which determines the final quality of the cement product. The most widely used finish mill equipment is the Vertical Roller Mill (VRM). Typically, the VRM is equipped with a water injection system to mitigate excessive vibration and temperature rise. Over time, the operation of the water injection system can lead to several issues, such as nozzle clogging, pressure loss (headloss), and pipe deformation. These problems hinder the optimal operation of the water injection system and can disrupt the cement grinding process. Therefore, this study aims to analyze the magnitude of headloss, the growth rate of pipe roughness, and to estimate the service life of water injection pipes in the Finish Mill pump system of a cement plant. Data were collected directly from an operating cement industry and subsequently analyzed using mathematical models to calculate headloss, pipe roughness growth rate, and pipe lifespan. The analysis revealed that the headloss for a new pipe is 33.68 meters, while for an older pipe it is 34.47 meters, with a roughness growth rate of 0.00469 mm/year.. The average critical service life of the pipes ranges from 7 to 9 years, indicating the necessity for periodic maintenance of the water injection system, ensuring water quality, and timely pipe replacement to optimize the performance of the water injection system in the Finish Mill pump system of the cement industry.

Keywords: Headloss; Estimated service life pipe; Water injection; Finish mill

1. Pendahuluan

Industri semen merupakan sektor strategis dalam pembangunan infrastruktur yang memiliki proses produksi kompleks dan intensif energi. Salah satu tahapan penting pada proses produksi semen adalah *Finish Mill* yang merupakan proses penggilingan akhir dan menentukan kualitas akhir produk semen. Salah satu jenis peralatan *Finish Mill* yang banyak digunakan di industri adalah *Vertical Roller Mill* (VRM) yang berfungsi untuk mereduksi ukuran material semen sesuai dengan standar [1]. Proses reduksi ukuran material pada VRM sering kali menimbulkan vibrasi yang cukup besar dan peningkatan temperatur di dalam mill sehingga dapat mengganggu proses produksi semen [2].

Sistem *Water Injection* pada VRM digunakan untuk mengontrol suhu yang timbul akibat proses penggilingan, menjaga efisiensi kerja alat, dan mencegah terjadinya *overgrinding* yang dapat menurunkan kualitas semen [3]. Sistem *Water Injection* pada *finish mill* umumnya terdiri atas pipa, pompa, dan perangkat pengontrol aliran air. Efisiensi sistem ini sangat dipengaruhi oleh fenomena *headloss* (kerugian tekanan) yang terjadi selama fluida mengalir dalam pipa. *Headloss* yang tinggi dapat menyebabkan penurunan performa pompa, peningkatan konsumsi energi, serta ketidakefisienan pendinginan pada sistem [4]. Di sisi lain, umur pipa dalam sistem ini juga menjadi perhatian utama, mengingat pipa beroperasi dalam lingkungan dengan tekanan tinggi, suhu fluktuatif, dan potensi korosi yang tinggi. Kegagalan pipa akibat deformasi dan degradasi material tidak hanya berdampak pada kerugian ekonomi, tetapi juga berpotensi menimbulkan resiko keselamatan kerja. Oleh karena itu, penting dilakukan analisis menyeluruh terkait kerugian tekanan (*headloss*) serta estimasi umur pipa untuk mendukung program pemeliharaan prediktif yang dapat meminimalkan resiko kerusakan sistem.

Berbagai studi telah dilakukan terkait analisis *headloss* dalam sistem perpipaan industri termasuk pendekatan analisis sistem perpipaan melalui pemodelan numerik dan simulasi aliran menggunakan software [5-11]. Persamaan matematis Hazen-Williams dan Darcy-Weisbach merupakan metode yang lazim digunakan untuk menghitung kehilangan tekanan dalam aliran fluida, yang dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti kecepatan aliran, panjang pipa, kekasaran dinding, dan viskositas fluida [12]. Sementara itu, estimasi umur pipa dalam sistem industri umumnya dilakukan dengan pendekatan berbasis *mechanical degradation*, *corrosion modeling*, serta analisis tekanan berulang (*fatigue*) menggunakan metode elemen hingga dan data historis operasi [13]. Dalam beberapa industri, khususnya minyak dan gas, pendekatan prediktif terhadap umur pipa telah diadopsi melalui pemodelan numerik dan simulasi [14,15]. Namun, pada industri semen, studi mengenai sistem *water injection* masih terbatas dan cenderung bersifat praktis tanpa dukungan model prediktif yang sistematis [16].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kerugian tekanan (*headloss*) dan estimasi umur pipa *water injection* berdasarkan data teknis dan kondisi operasional aktual pada sistem pompa *finish mill* industri semen serta memberikan rekomendasi pemeliharaan preventif. Dengan mengetahui karakteristik *headloss* dan estimasi umur pipa secara akurat, diharapkan industri semen dapat meningkatkan efisiensi energi, mengurangi biaya operasional, serta meminimalkan risiko kerusakan sistem.

2. Material dan metodologi

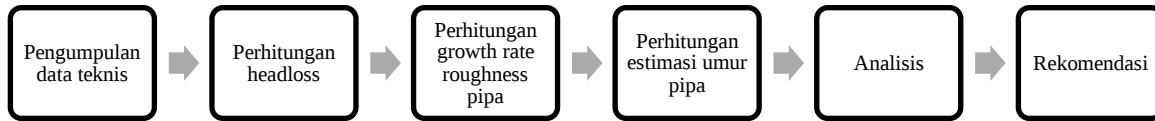
Penelitian ini dilakukan pada salah satu industri semen di Jawa Tengah, dengan objek penelitian sistem pipa *water injection* yang terintegrasi dengan pompa pada unit *Vertical Roller Mill* seperti terlihat pada Gambar 1. VRM dilengkapi dengan 3 nosel *water injection* berbahan *carbon steel* yang dipasang diantara *support roller* dan *master roller*. Ketiga nosel tersebut terhubung menjadi satu masukan dengan diameter pipa yang bervariasi yaitu 1 inci, 1¼ inci dan 1½ inci.



Gambar 1. *Vertical Roller Mill* (kiri) dan sistem *water injection* di dalamnya (kanan)

Keterangan: 1. *Main Roller*; 2. *Water Injection*; 3. *Rotary Table*

Penelitian dilaksanakan dalam beberapa tahap meliputi pengumpulan data sistem *water injection* di industri semen, penghitungan nilai *headloss*, laju perubahan kekasaran pipa (*Growth Rate Roughness*) dan estimasi umur pipa. Selanjutnya dianalisis dan diberikan rekomendasi teknis pemeliharaan preventif pada sistem *water injection*. Diagram alir tahapan penelitian ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir penelitian

2.1 Pengumpulan Data

Data sistem *water injection* pada *finish mill* di industri semen yang dikumpulkan meliputi data spesifikasi pipa, operasional sistem serta data historis dan pemeliharaan sistem. Data spesifikasi pipa dan operasional sistem *water injection* dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2. Perbandingan *headloss* pipa didasarkan pada data pipa baru (awal commissioning tahun 2017) dan pipa lama (kondisi tahun 2024).

Tabel 1. Data Spesifikasi *Pipa Water Injection* pada *Finish Mill*

Spesifikasi Pipa	Pipa 1 inchi	Pipa 1 ¼ inchi	Pipa 1 ½ inchi
Panjang (<i>l</i>)	14,28 m	6,44 m	131,7 m
Diameter (<i>D</i>)	25,4 mm = 0,0254 m	31,75 mm = 0,03175 m	38,1 mm = 0,0381 m
Jumlah Lengkapan	6 <i>Elbow</i> , 1 <i>Ball Valve</i>	7 <i>Elbow</i> , 1 <i>Swing Check Valve</i> , 1 <i>Reducer</i> , 1 <i>Standar Tees</i>	13 <i>Elbow</i> , 7 <i>Union</i> , 1 <i>Reducer</i> , 1 <i>Standar Tees</i>
Bahan Pipa	<i>Commersial Steel</i>	<i>Comersial Steel</i>	<i>Comersial Steel</i>

Tabel 2. Data operasional *Water Injection* pada *Finish Mill*

Kondisi Operasi Sistem <i>Water Injection</i>	
Temperatur (<i>T</i>)	29°C
pH	8,7
Konduktivitas/TDS	883,4 µS/cm
Ca ²⁺	196 ppm
HCO ₃	194 ppm
Massa Jenis (<i>ρ</i>)	995,996 Kg/m ³
Viskositas Dinamik (<i>μ</i>)	0,0008166 N s/m ²
Debit (<i>Q</i>)	0,001944 m ³ /s
Percepatan Gravitasi (<i>g</i>)	9,8 m/s ²

2.2 Perhitungan Headloss

Kerugian tekanan (*headloss*) total di dalam pipa merupakan hasil penjumlahan *Headloss* mayor dan *Headloss* minor pada jaringan pipa. Perbedaan pada keduanya terletak pada faktor penyebab timbulnya gesekan. [12]

$$H_L = H_{L \text{ Mayor}} + H_{L \text{ Minor}} \quad (1)$$

a) *Headloss* Mayor

Headloss Mayor dapat dihitung dengan menggunakan persamaan *Darcy Waisbach* sebagai berikut :

$$H_{L \text{ Mayor}} = f \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

Keterangan :

$H_{L \text{ Mayor}}$: Kerugian Head karena gesekan (m)

f : faktor gesekan

L : Panjang pipa (m)

v : Kecepatan aliran rata-rata fluida dalam pipa (m/s)

D : Diameter dalam pipa (m)

g : Percepatan gravitasi (m/s^2)

Besarnya f bergantung pada jenis aliran fluida tersebut seperti pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai faktor gesekan berdasarkan jenis aliran

Aliran laminar ($Re < 2000$)	Aliran Turbulen ($Re > 2300$)	Pipa Licin
$f = \frac{64}{Re}$	$f = \left(\frac{\varepsilon}{D}, Re \right)$	$f = \frac{0,316}{Re^{3/4}}$

Dengan ε : *Roughness* (mm)

D : Diameter dalam pipa (m)

Re : Bilangan *Reynold*

b) *Headloss* Minor

Untuk mencari besar nilai *Headloss* minor dapat menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$H_{L \text{ Minor}} = K \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

Keterangan :

$H_{L \text{ Minor}}$: Kerugian Head karena gesekan (m)

K : Koefisien gesekan

v : Kecepatan aliran rata-rata fluida dalam pipa (m/s)

g : Percepatan gravitasi (m/s^2)

Nilai K (koefisien gesekan) berbeda beda tergantung pada jenis lengkapan pipa [12].

2.3 Perhitungan Growth Rate Roughness pipa

Kekasaran (*roughness*) pipa seiring dengan jalanya waktu mengalami perubahan sehingga mengalami kenaikan nilai koefisien kekasarannya. Besarnya nilai kekasaran relatifnya dapat dihitung dengan persamaan (4)[12].

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \alpha \cdot t \quad (4)$$

Dimana,

$$\alpha = 10^{-(4,08+0,38 \text{ LSI})} \quad (5)$$

Keterangan :

ε : Kekasaran permukaan absolut berjalannya waktu (mm)

ε_0 : Kekasaran permukaan ketika masih baru (mm)

α : Laju pertumbuhan kekasaran permukaan (ft/year)

t : Waktu (Tahun)

LSI : *Langelier Saturation Indeks* (Kualitas Air)

Perhitungan LSI (*Langelier Saturation Indeks*) menggunakan *Langelier Indeks Calculator* pada website *Lenntech* [17].

2.4 Perhitungan Estimasi Umur Pakai Pipa

Water Injection pada *finish mill* dioperasikan secara tertutup tanpa pengolahan air atau hanya menggunakan air demin sehingga dapat terjadi korosi pada sistem. Laju korosi nominal adalah 15 sampai 20 mpy [2]. Estimasi umur pipa dihitung dengan persamaan:

$$\text{Estimasi umur pipa} = \frac{\text{Tebal dinding pipa}}{\text{Laju korosi}} \quad (6)$$

$$\text{Depresiasi pipa} = \frac{\text{laju korosi}}{\text{tebal dinding pipa}} \times 100\% \quad (7)$$

Tabel 4. Ketebalan dinding pipa *carbon steel schedule 40* [18]

Nominal Pipe size (inchi)	Wall thickness (inchi)	Wall thickness (mils)
1	0,133	133
1 ¼	0,140	140
1 ½	0,145	145

3. Hasil dan pembahasan

Berdasarkan data yang diperoleh dan dianalisa secara kuantitatif dengan menggunakan persamaan (1) sampai persamaan (7), didapatkan hasil perhitungan sebagai berikut:

3.1 Nilai Headloss Pipa

Perhitungan *headloss* pipa menggunakan data pipa baru (awal commisioning tahun 2017) dan pipa lama (tahun 2024). Hasil perhitungan *headloss* pipa baru dapat dilihat pada Tabel 5 dan perhitungan pipa lama pada Tabel 6.

Tabel 5. Hasil perhitungan *Headloss* pada pipa baru

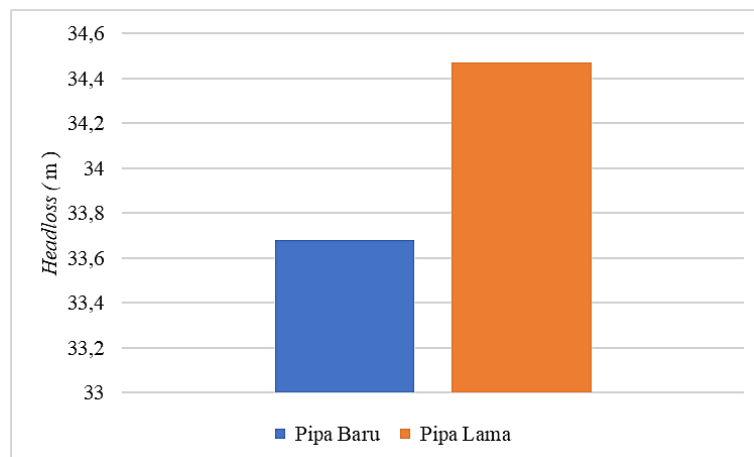
Ukuran pipa (inchi)	Bilangan Reynold	Relative Roughness ($\frac{\varepsilon}{D}$)	Faktor gesekan (f)	$H_{L \text{ Mayor}}$ (m)	$H_{L \text{ Minor}}$ (m)	$H_{L \text{ Total}}$ (m)
1	118.916,22	0,0018	0,024	10,14	5,9	16,04
1 ¼	95.132,98	0,0014	0,023	1,44	1,99	3,43
1 ½	792.277,48	0,0012	0,023	11,48	2,43	14,21
Total Headloss						33,68

Perhitungan *Headloss* Pada pipa tua terjadi perubahan pada nilai koefisien *roughness*nya. Pipa *Water Injection* di *Finish Mill* dilakukan penggantian pada saat *comisioning* tahun 2017. Perubahan nilai koefisien tersebut dapat dilakukan metode perhitungan menggunakan persamaan (4) dan (5) sehingga didapatkan nilai koefisien *roughness* sebesar 0,0507 mm. Perhitungan berikutnya menggunakan persamaan (1) sampai (3) dengan hasil sebagai berikut :

Tabel 6. Hasil perhitungan *Headloss* pada pipa lama

Ukuran pipa (inch)	Bilangan Reynold	Relative Roughness ($\frac{\epsilon}{D}$)	Faktor gesekan (f)	$H_{l\text{Mayor}}$ (m)	$H_{l\text{minor}}$ (m)	$H_{l\text{Total}}$ (m)
1	118.916,22	0,0020	0,025	10,57	5,9	16,47
1 ¼	95.132,98	0,0016	0,024	1,5	1,99	3,49
1 ½	792.277,48	0,0013	0,0236	12,08	2,43	14,51
Total <i>Headloss</i>						34,47

Berdasarkan perhitungan di atas diketahui besarnya nilai *Headloss* pada Pipa lama lebih besar dengan nilai 34,47 m sedangkan *Headloss* pada pipa baru memiliki nilai 33,68 m atau meningkat 2,3% seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Peningkatan *headloss* terjadi karena adanya korosi pada pipa seiring berjalannya waktu yang mengakibatkan permukaan dalam pipa mengalami deformasi dan degradasi material. Deformasi pada permukaan dalam pipa tersebut mengakibatkan fluida yang mengalir di dalamnya mengalami perubahan aliran sehingga rugi-rugi yang dihasilkan semakin besar. Sedangkan pada pipa baru diameter dalamnya masih ideal sesuai dengan spesifikasi awal.



Gambar 3. Grafik Perbandingan *Headloss* pipa baru dan *Headloss* pipa lama

Faktor lain yang menyebabkan kenaikan nilai *Headloss* pada pipa lama adalah besarnya nilai koefisien *Roughness*. Nilai koefisien *Roughness* pada pipa lama mengalami peningkatan sebesar 0,000671 mm/year, dimana terhitung umur pipa adalah 7 tahun dari awal *comisioning* (2017-2024). Sehingga besarnya *Growth rate of Roughness* adalah 0,00469 mm selama 7 tahun. Berdasarkan besarnya nilai *Growth rate of Roughness* tersebut didapat nilai koefisien *Roughness* pada pipa lama sebesar 0,0507 mm. Hal tersebut 1,1 kali lebih besar dibanding nilai koefisien *Roughness* pipa baru dengan nilai sebesar 0,046 mm. Semakin besar nilai koefisien *Roughness* maka akan mempengaruhi aliran fluida pada pipa dan nilai kerugiannya akan semakin besar.

3.2 Estimasi umur pakai pipa

Pipa memiliki umur pakai dengan jangka waktu tertentu, hal itu dikarenakan adanya korosi baik dari fluida yang dialirkan maupun oleh faktor lingkungan. Analisa estimasi umur pakai pipa dengan menggunakan laju korosi nominal 15 mpy – 20 mpy.

Tabel 7. Perhitungan Estimasi Umur Pipa dan depresiasi per tahun

<i>Nominal pipe size</i> (inchi)	<i>Wall Thickness</i> (mills)	Laju korosi nominal (mpy)	Umur pakai pipa (tahun)	Depresiasi per Tahun (%)
1	133	15-20	6,65 – 8,87	11,3 – 15
1,25	140	15-20	7 – 9,33	10,7 – 14
1,5	145	15-20	7,25 – 9,67	10,3 – 14

Dari Tabel 7 diperoleh rata-rata umur pipa memasuki masa kritis adalah 7 tahun dari awal *comisioning*. Hal itu dikarenakan pipa sudah mengalami penipisan ketebalan pada dinding pipa sehingga kekuatan pipa dalam menahan fluida yang mengalir sudah mencapai batasnya. Pipa *water injection* yang terpasang pada *Finish mill* sudah memasuki umur 7 tahun dari awal *comissioning* yaitu pada tahun 2017. Diperlukan pemeriksaan langsung secara menyeluruh pada pipa *water injection* seperti pengujian kekerasan, komposisi kimia, fraktografi/metalografi, produk korosi, polarisasi, efek pH, maupun simulasi aliran untuk dapat menentukan apakah terjadi kegagalan sistem *water injection* dan diperlukan penggantian pipa atau tidak [16, 19].

4. Kesimpulan

Berdasarkan analisa yang telah dilakukan maka dapat ditarik kesimpulan bahwa nilai *Headloss* pada pipa baru *Water Injection Finish Mill* adalah sebesar 33,68 m dan Pada pipa lama terjadi perubahan nilai koefisien *Roughness*nya menjadi sebesar 0,0507 mm yang disebabkan oleh penipisan pada dinding pipa sehingga nilai *Headloss* pada pipa lama sebesar 34,47 m. *Growth rate of roughness* sebesar 0,00469 mm dalam 7 tahun. Umur rata-rata pipa yang digunakan pada pipa *Water Injection Finish Mill* telah memasuki masa kritis yaitu 7-9 tahun sehingga perlu dilakukan perawatan pipa *water injection* secara berkala, menjaga kualitas air dan pergantian pipa baru untuk mengoptimalkan kinerja dari *water injection* pada sistem pompa *finish mill* industri semen.

Daftar pustaka

- [1] Reichert, M., Gerold, C., Fredriksson, A., Adolfsson, G., Lieberwirth, H. Research of iron ore grinding in a vertical-roller-mill. *Minerals Engineering*. 2015; 73: 109-115.
- [2] Fujita K, Saito T. Unstable vibration of roller mills. *Journal of sound and vibration*. 2006; 297 (1–2): 329–350.
- [3] Kurdowski, W. *Cement and concrete chemistry*. Springer Science & Business. 2014.
- [4] Munson, B. R., Young, D. F., & Okiishi, T. H. *Fundamentals of Fluid Mechanics*. John Wiley & Sons. 2013.
- [5] Yousefi A. Headloss increase in service lines with time- With examples from Asker municipality. Master's Thesis faculty of science and Technology. Norwegia: Norwegian University of Life Science. 2019.
- [6] Helmizar. Studi Eksperimental Pengukuran *Head Losses Mayor* (Pipa PVC Diameter ¾”) Dan *Head Losses Minor* (Belokan Knee 90° Diameter ¾”) Pada Sistem Instalasi Pipa. Universitas Negeri Bengkulu. 2010.
- [7] Waspodo, W. Analisa *Head Loss* Sistem Jaringan Pipa Pada Sambungan Pipa Kombinasi Diameter Berbeda. *Suara Teknik: Jurnal Ilmiah*. 2017; 8 (1).
- [8] Sudirman, Harves. Analisa *Headloss* Aliran Fluida Pada Pipa Lurus Dengan Variasi Debit Aliran Dan Variasi Diameter Pipa. *Jurnal Mekanova : Mekanikal, Inovasi dan Teknologi*. 2022.
- [9] Alkindi, Hablinur., Santosa, Hasan., Sutoyo, Edi. Analisis *Head Losses* Pada *Circulating* Fluida Air Dalam Dua Jenis Pipa. *AME (Aplikasi Mekanika dan Energi): Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*. 2023; 9 (1) : 51-56.

- [10] Hayati, Nur., Purwanto, Adi., Muladi, Erwan. CFD (*Computational Fluid Dynamic*) Untuk Menganalisis *Head Loss* Akibat Perubahan Diameter. Jurnal Teknik Mesin Indonesia. 2023; 18 (2).
- [11] Mustakim, M., & Syakura, A. Pengaruh Reynold Number (Re) Terhadap *Head Losses* Pada Variasi Jenis Belokan Pipa (Berjari – Jari Dan Patah). Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin. 2015; 3(2).
- [12] Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications. McGraw-Hill Education. 2013.
- [13] Zhou, W., Mahadevan, S., & Zhang, C. Lifetime prediction of pipelines with corrosion defects. Corrosion Science. 2017; 123: 137-147.
- [14] Al-Mashaqbeh, I., Al-Zoubi, A., & Abu-Qdais, H. Predictive modeling for pipeline condition assessment using machine learning techniques. *Engineering Failure Analysis*. 2020; 113: 104582.
- [15] K Febriani, E Moralista, P Pramusanto. Penentuan Laju Korosi dan Sisa Umur Pakai (*Remaining Service Life/RSL*) pada Pipa Transportasi Gas Bumi di PT Pertamina Ep Asset 3 Subang Field Kecamatan Cilamaya Utara Kabupaten Karawang Provinsi Jawa Barat. Skripsi Program Studi Teknik Pertambangan Fakultas Teknik. Universitas Islam Bandung. 2018.
- [16] Pratama, Andika. Analisis Kegagalan *Water Injection* pada Vertical Roller Mill di Finish Mill PT. Holcim Tuban Plant Indonesia. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh November. 2016.
- [17] Langerier Indeks Calculator.<https://www.lenntech.com/calculators/langelier/index/langelier.htm>. LENNTECH. (Diakses pada tanggal 21 Nov 2024).
- [18] LANL Engineering Standards Manual STD-342-100. Chapter 17 Pressure Safety. ASME B13.3 Piping Guide. 2014.
- [19] Sukandar. Analisa kerusakan pipa boiler feed water (BFW) pada ujung saluran injektor inhibitor. Tesis. Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik. Universitas Indonesia. 2002.