



Pengawasan Sistem Pigging Cerdas pada Pemeriksaan Pipa Saluran Bahan Bakar dari Tangki Penampung ke Terminal Pengisian

Agus Sudioanto*, & Siti Mastoah

Institut Teknologi PLN, Jl. Duri Kosambi Raya, Kota Jakarta Barat, DKI Jakarta, Indonesia 11750.

Email Korespondensi: agus.sudioanto@itpln.ac.id

Abstrak

Sistem intelligent pigging telah muncul sebagai teknologi penting untuk inspeksi in-line (ILI) pada jaringan pipa. Makalah ini memfokuskan ILI pada jaringan pipa bahan bakar hilir dari tangki penyimpanan ke stasiun pengisian. Makalah ini menawarkan metode non-intrusif untuk menilai integritas struktural, mendeteksi anomali, dan memastikan keselamatan operasional. Studi ini menyelidiki mekanisme sistem pemeriksaan pigging cerdas, dengan fokus pada akuisisi data dengan waktu yang tepat, pelayanan akurat, dan pengawasan adaptif dalam jaringan pipa yang kompleks. Sistem ini menggabungkan beberapa pengandaian penginderaan melalui kebocoran fluks magnetik (MFL) untuk memungkinkan memeriksa dalam pipa secara menyeluruh. Penekanan ditempatkan pada perancangan pengawasan algoritma yang mengelola kecepatan pig, menghubungkan sensor, dan perundingan rintangan dalam berbagai kondisi pipa bahan bakar. MFL berkaitan dengan pemrosesan sinyal, efisiensi daya dan komunikasi data di lingkungan yang terbatas. Hasil MFL menunjukkan metoda pengawasan efektif yang diusulkan dalam meningkatkan penemuan akurat dan keandalan operasional. Hasilnya menunjukan peningkatan manajemen integritas pipa dan mendukung praktik pemeliharaan prediktif di sektor transportasi bahan bakar.

Kata kunci: Sistem Pigging Cerdas; Pemeriksaan Saluran; Kebocoran Fluks Magnetik.

Intelligent Pigging System Supervision in Inspection of Fuel Line Pipeline from Storage Tank to Filling Terminal

Abstract

Intelligent pigging systems have emerged as an important technology for in-line inspection (ILI) of pipelines. This paper focuses on ILI in downstream fuel pipelines from storage tanks to filling stations. It proposes a non-intrusive method to assess structural integrity, detect anomalies, and ensure operational safety. This study investigates the mechanism of an intelligent pigging inspection system, focusing on timely data acquisition, accurate service, and adaptive monitoring in complex pipelines. The system combines multiple sensing modalities via magnetic flux leakage (MFL) to enable comprehensive in-pipe inspection. Emphasis is placed on designing a monitoring algorithm that manages pig speed, sensor coupling, and obstacle negotiation under various fuel pipeline conditions. MFL deals with signal processing, power efficiency, and data communication in a confined environment. The MFL results demonstrate the effectiveness of the proposed monitoring method in improving accurate detection and operational reliability. The results demonstrate the improvement of pipeline integrity management and support predictive maintenance practices in the fuel transportation sector.

Keywords: Intelligent Pigging System; Pipeline Inspection; Magnetic Flux Leakage.

How to Cite: Sudioanto, A., & Mastoah, S. (2025). Pengawasan Sistem Pigging Cerdas pada Pemeriksaan Pipa Saluran Bahan Bakar dari Tangki Penampung ke Terminal Pengisian. *Empiricism Journal*, 6(2), 698–705. <https://doi.org/10.36312/ej.v6i2.2945>



<https://doi.org/10.36312/ej.v6i2.2945>

Copyright© 2025, Sudioanto & Mastoah

This is an open-access article under the CC-BY-SA License.



PENDAHULUAN

Dalam industri migas dan distribusi bahan bakar, integritas pipa saluran merupakan pilar utama untuk memastikan kelancaran, efisiensi, dan keselamatan distribusi bahan bakar dari tangki penampung hingga terminal pengisian. Sistem pigging penggunaan pig cerdas dengan sensor seperti Magnetic Flux Leakage (MFL), Ultrasonic Testing (UT), dan Electromagnetic Acoustic Transducer (EMAT) telah mengubah paradigma inspeksi internal pipa dengan memungkinkan deteksi anomali seperti korosi, retakan mikro, deformasi, dan kehilangan ketebalan tanpa menghentikan aliran produk (Feng et al., n.d.; Jarić et al., 2025; Xie & Tian, 2018; Giro et al., 2021). Teknologi ini menyediakan data real-time yang dianalisis

untuk menilai kondisi pipa dan memformulasikan strategi pemeliharaan preventif (Al-Zubi & Alouini, 2025; Tiehua & Jingbo, 2019). Sementara itu, evolusi smart pig sejak 1960-an penerapan MFL pertama oleh Shell Development (1961) dan Tuboscope (1964) menghadirkan transformasi signifikan dalam pemantauan integritas pipa.

Namun demikian, implementasi pigging cerdas menghadapi sejumlah tantangan. Pertama, keandalan pemantauan real-time masih rentan terhadap noise aliran dan kondisi operasi yang variatif, sehingga sensor seperti MFL membutuhkan algoritma signal processing yang canggih untuk memastikan ketepatan deteksi. Kedua, pendeteksian retakan mikro dan pitting sangat tergantung pada resolusi sensor, dan meski UT menawarkan akurasi tinggi, kebutuhan akan couplant cair membatasi aplikasi di jalur gas. Ketiga, integrasi data inspeksi besar ("big data") dengan predictive analytics masih minim di banyak operator, walaupun AI dan machine learning sudah mulai diujicoba untuk otomatisasi pengenalan material las dan klasifikasi anomali dengan akurasi 90–98 %. Terakhir, biaya tinggi dan kebutuhan SDM dengan keahlian teknis tinggi menghambat adopsi pigging cerdas, terutama di wilayah dengan sumber daya terbatas.

Penelitian ini menawarkan beberapa kontribusi kebaruan: pertama, mengembangkan kerangka kerja pengawasan holistik terhadap pigging cerdas, yang mencakup pelacakan lokasi pig via INS/GPS, validasi kualitas data sensor secara real-time, serta sistem alarm deteksi kesalahan pengukuran. Kedua, penerapan algoritma machine learning untuk prediksi waktu optimal pelaksanaan pigging, memanfaatkan model vibro-akustik dan historical data yang pernah dicoba di Rosen & TD Williamson, serta kasus lapangan seperti pigging dual-diameter. Ketiga, analisis sinergis sensor MFL, UT, dan EMAT mengadopsi teknologi pig kombinasi DEF + SMFL + LFM + EMAT seperti yang tertera pada alat canggih T.D. Williamson untuk meningkatkan sensitivitas dan verifikasi silang data inspeksi.

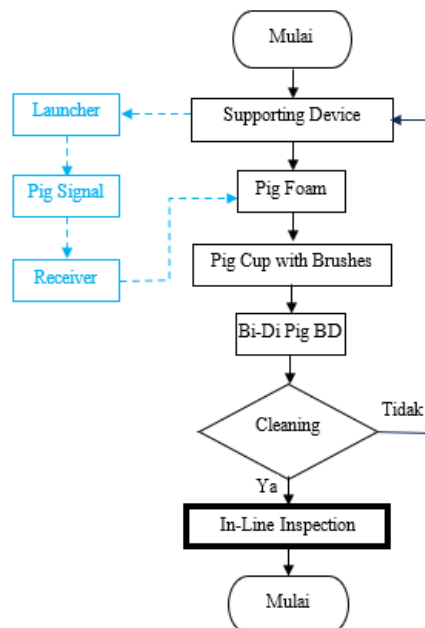
Berbagai kajian pendahulu telah mendasari arah penelitian ini. Xie & Tian (2018) serta Giro et al. (2021) menjelaskan transisi pigging dari sistem mekanik ke sistem cerdas berbasis sensor. Feng et al. (n.d.) dan Jarić et al. (2025) menghadirkan perkembangan MFL modern yang mampu mendeteksi kerusakan tanpa menghentikan aliran produk. Al-Zubi & Alouini (2025) menekankan pentingnya pengintegrasian data cerdas ke dalam strategi pemeliharaan, sedangkan Tiehua & Jingbo (2019) memperlihatkan bagaimana data inspeksi dapat diperluas untuk perencanaan preventive maintenance. Studi Giro et al. (2021) mendemonstrasikan penggunaan data vibroakustik untuk prediksi pigging, dan market report tahun 2024–2025 menunjukkan pasar smart pig global tumbuh hingga ~USD 900 juta dengan CAGR hampir 6 %.

Dengan mempertimbangkan latar belakang dan tantangan tersebut, penelitian ini bertujuan: (1) merancang kerangka kerja pengawasan real-time terhadap pergerakan dan kualitas data pigging cerdas; (2) menerapkan algoritma machine learning yang memprediksi kebutuhan pigging dan pemeliharaan berdasarkan pola data historis; (3) mengevaluasi efektivitas sensor multi-modal (MFL + UT + EMAT) dalam deteksi anomali pada tahap awal; serta (4) melakukan studi biaya-manfaat terkait pengurangan frekuensi inspeksi, downtime, dan perpanjangan umur layanan pipa. Diharapkan, pendekatan ini dapat meningkatkan keselamatan, efisiensi, dan keandalan distribusi bahan bakar melalui inspeksi internal yang akurat dan sistematis.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kualitatif secara simultan bertujuan untuk memahami proses pengawasan dan pengambilan keputusan berbasis data inspeksi. Penelitian ini bersifat aplikatif, yaitu menekankan pada pengembangan dan evaluasi sistem pengawasan pigging berbasis sensor dan kecerdasan buatan dalam mendeteksi potensi gangguan aliran dan kerusakan pipa dengan sistem pigging intelligent yang digunakan untuk melakukan inspeksi internal terhadap pipa saluran bahan bakar. Sistem ini meliputi perangkat pigging yang dilengkapi dengan sensor cerdas dengan MFL serta sistem pemantauan dan kontrolnya. Alur ILI ini dapat dilihat pada Gambar 1. Alat pendukung untuk melakukan inspeksi di dalam pipa saluran bahan bakar diantaranya adalah Launcher. Alat ini berfungsi sebagai rumah tinggal pig dan unit ILI tools sebelum bekerja yang disebut dengan major barrel. Disinilah pig dan unit ILI tools mulai bekerja. Alat pendukung berikutnya adalah pig signal, berfungsi untuk mendeteksi pig dan unit ILI tools ketika

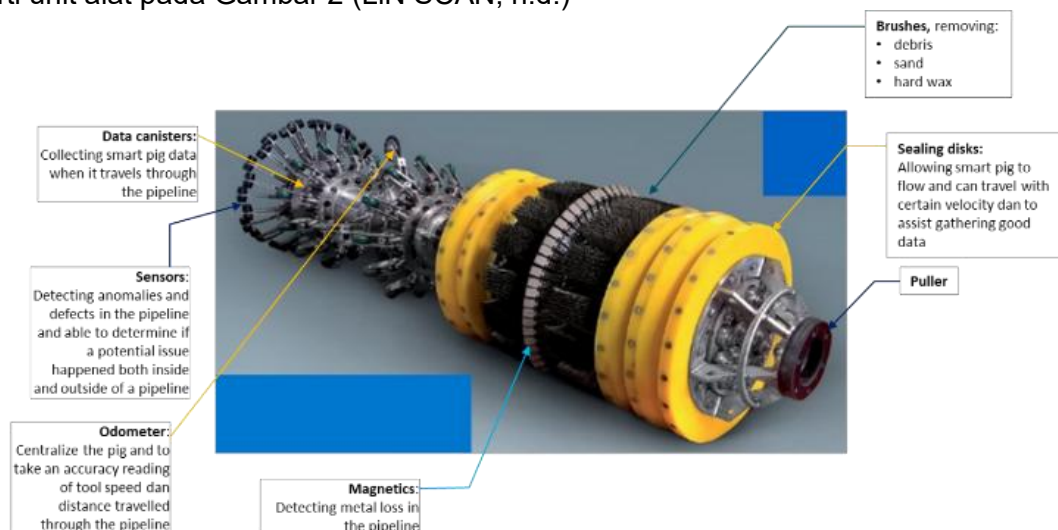
melewati posisi dimana pig signal ditempatkan. Yang lainnya adalah receiver. Alat ini berfungsi untuk menerima pig dan unit ILI tools setelah bekerja melakukan cleaning bagi pig dan inspeksi oleh unit ILI tools



Gambar 1. Alur Pemeriksaan Saluran (ILI)

Launcher dan receiver ini merupakan vessel yang dianggap bertekanan tinggi sehingga kedua alat ini dihitung dan dianalisa sebagai pressure vessel (Yu & Xie, 2020). Parameter yang diberikan pada kalkulasi tersebut meliputi tekanan design, tekanan operasional, temperatur design, temperatur operasional, diameter dalam dan luar pipa minor barrel, diameter luar dan dalam pipa major barrel, corrosion allowance, tekanan hydrtest, joint efficiency, spesifikasi material, asesoris dan standar pressure vessel. Kalkulasi yang diperlukan oleh launcher dan receiver adalah major barrel, minor barrel, reducer, nozzle, saddle, lug, berat barrel, beban akibat angin dan kalkulasi asumsi bila terjadi gempa. Design CODE yang umum dan sering digunakan dalam perhitungan barrel yaitu diantaranya persamaan kalkulasi ASME B31.3 (ASME, 2024), ASME B31.4 (ASME, 2016), ASME B31.8 (ASME, 2022) dan ASME VIII Div. 1 (ASME, 2023), dimana design CODE tersebut disesuaikan dengan fluida yang melewati pipa saluran apakah itu aliran liquid maupun aliran gas.

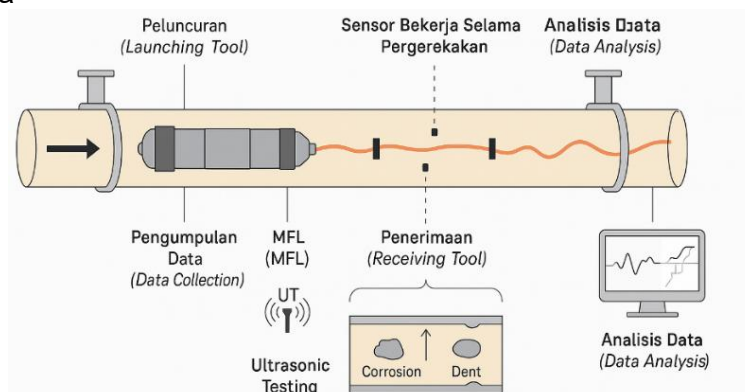
Kemudian untuk melakukan pemeriksaan pada pipa saluran bahan bakar dari tangki penampung ke terminal pengisian menggunakan ILI Tools dengan produk LiN SCAN, seperti unit alat pada Gambar 2 (LiN SCAN, n.d.)



Gambar 2. ILI Tools – LiN SCAN

In-line Inspection (ILI) tools seperti LiN SCAN bekerja berdasarkan prinsip pengumpulan data dari dalam pipa (inline) tanpa harus menghentikan aliran bahan bakar. ILI tools digunakan untuk memeriksa integritas pipa dari dalam, mendeteksi cacat seperti korosi, retakan, penyok, atau penyimpangan geometri, serta untuk pemetaan lokasi cacat dengan akurasi tinggi. ILI tools bekerja mulai dari peluncuran pada major barrel launcher bergerak didorong oleh aliran fluida (bahan bakar) di dalam pipa dengan metode non-intrusif tanpa mengganggu operasi. Karena ILI tools menggunakan jenis sensor MFL, bekerja mendeteksi kehilangan logam pada dinding dalam pipa akibat korosi. Sensor bekerja selama pergerakan, merekam data permukaan dalam pipa serta ketebalan dinding yang disimpan di data canister (media penyimpanan onboard). Setelah menyelesaikan inspeksi disepanjang lintasan, ILI tools berhenti di minor barrel receiver, kemudian puller ditarik sampai melewati dan keluar dari major barrel receiver.

Data diambil dari data canister, di ekstrak dan dianalisis menggunakan perangkat lunak software LiN SCAN yang mempunyai keunggulan presisi tinggi dalam mendeteksi pengukuran cacat dalam pipa, dapat digunakan untuk berbagai diameter pipa, cocok untuk bahan bakar cair maupun gas dan dapat menavigasi melalui pipa dengan variasi diameter dan belokan selama bekerja di lintasan dalam pipa. Sedangkan aplikasi ILI tools pada pipa bahan bakar mendeteksi dini korosi internal akibat kelembaban atau reaksi kimia. Pemantauan deformasi akibat tekanan tanah atau beban eksternal, dapat menentukan surface integrity pada keadaan sebelum dan sesudah operasi dengan prinsip kerja ILI tools yang terlihat pada



Gambar 3. Kerja ILI tools Lin SCAN

HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses in-line inspection (ILI) - LiN SCAN telah melakukan inspeksi pada pipa saluran bahan bakar berdiameter 16 inch dengan panjang 78 km. Inspeksi ini bertujuan untuk mendeteksi korosi internal, ketidakraturan bentuk (geometrical defects), serta penurunan ketebalan dinding akibat erosi. Sensor deteksi yang digunakan Magnetic Flux Leakage (MFL). Selama inspeksi, pig LiN SCAN berhasil melintasi keseluruhan jalur tanpa hambatan mekanis signifikan. Kecepatan pig berkisar antara 2,5–3,2 m/s dan tetap berada dalam batas toleransi untuk akuisisi data yang optimal.

Berdasarkan data yang diperoleh dari LIN SCAN, ditemukan beberapa anomali penting yang dijelaskan pada Tabel 1 berikut ini.

Table 1. Anomali fluida

Jenis defek	Jumlah	Posisi lokasi (Km)	Ukuran maksimum	Kategori
Internal corrosion	56 titik	12.5 – 45.3	Kedalaman hingga 3 mm	Sedang
Dents (penyok)	12 titik	7.8 – 18.6	Kedalaman 5–12 mm	Tinggi
Metal loss (general)	35 area	22.3 – 63.4	Hingga 30% ketebalan	Seang
Ovality (deformasi)	4 titik	5.0 – 10.2	Ovalitas >8%	Rendah

Efektivitas teknologi LiN SCAN dalam mendeteksi anomali internal pipa bahan bakar menunjukkan performa yang sangat baik dalam konteks inspeksi berbasis Magnetic Flux Leakage (MFL). Teknologi ini bekerja dengan prinsip gangguan medan magnet akibat diskontinuitas material seperti korosi. Dalam praktiknya, MFL mampu mendeteksi korosi internal dengan resolusi spasial tinggi hingga $\pm 0,1$ meter, memungkinkan pemetaan lokasi

kerusakan secara presisi. Akurasi ini tidak hanya penting untuk deteksi awal, tetapi juga menjadi dasar penting dalam perencanaan perawatan preventif.

Keandalan MFL dalam mengidentifikasi anomali seperti internal corrosion, metal loss, dan deformasi geometris telah banyak didokumentasikan. Penelitian oleh Shen dan Zhou (2024) serta Ling et al. (2024) menegaskan bahwa integrasi teknologi deep learning ke dalam interpretasi sinyal MFL mampu meningkatkan akurasi klasifikasi dan rekonstruksi profil 3D korosi. Ini mengonfirmasi bahwa MFL tidak lagi hanya alat deteksi pasif, tetapi telah berkembang menjadi sistem inspeksi berbasis data yang canggih. Bahkan, pendekatan kombinasi MFL dengan machine learning sebagaimana dijelaskan oleh Usarek dan Warnke (2017), serta Wari et al. (2023), memungkinkan pengembangan model prediktif yang secara dinamis dapat memantau pertumbuhan defek dan menyesuaikan jadwal inspeksi secara adaptif.

Dalam konteks hasil inspeksi, ditemukan 56 titik korosi internal yang dominan berada antara kilometer 12,5 hingga 45,3. Segmentasi spasial ini mengindikasikan pola degradasi sistematis dan terlokalisir, bukan insidental. Beberapa kemungkinan penyebab teknis mencakup kelembaman fluida akibat variasi tekanan aliran, zona stagnasi karena geometri pipa, serta potensi kontaminasi bahan bakar oleh zat-zat seperti air, sulfur, atau senyawa asam. Kajian oleh Hua et al. (2015) dan Kou et al. (2022) menunjukkan bahwa kandungan air dalam lingkungan CO₂ dapat mempercepat pembentukan asam karbonat dan menurunkan pH, mempercepat proses elektrokimia korosi. Senyawa lain seperti SO₂ dan mikroorganisme juga dapat memperparah korosi melalui mekanisme pitting dan biofilm, sebagaimana dijelaskan oleh Mahlobo et al. (2021) dan Lahme et al. (2021).

Korosi internal dengan kedalaman hingga 3 mm yang diklasifikasikan sebagai risiko sedang tetap memberikan implikasi struktural signifikan, khususnya dalam jangka menengah. Distribusi defek yang tidak merata namun terkonsentrasi mencerminkan kondisi operasional yang tidak ideal. Selain itu, deteksi kehilangan material (metal loss) sebesar 30% dari ketebalan pipa antara km 22,3 hingga 63,4 memperkuat indikasi bahwa kerusakan bersifat menyebar. Studi oleh Tronskar dan Wui (2022) serta Shaik et al. (2019) menekankan bahwa metal loss, terutama yang bersifat lokal seperti akibat korosi pitting atau MIC, berkorelasi langsung dengan penurunan umur layanan pipa dan peningkatan risiko kebocoran. Teknologi prediktif seperti GAN yang digunakan oleh Ma et al. (2024) memperlihatkan potensi dalam mengestimasi laju pertumbuhan defek sebagai acuan dalam perencanaan rehabilitasi.

Selain faktor korosi, ovalitas pada empat titik di rentang km 5,0 hingga 10,2 menunjukkan bahwa deformasi geometris turut berkontribusi terhadap kerusakan lokal. Geometri pipa sangat memengaruhi dinamika fluida, menciptakan turbulensi dan zona tekanan rendah yang dapat mempercepat korosi. Riady et al. (2022) serta Silva et al. (2021) mencatat bahwa area pipa dengan perubahan diameter atau belokan tajam cenderung mengalami peningkatan laju korosi karena gangguan lapisan protektif dan percepatan gradien elektrokimia. Keberadaan partikel padat seperti pasir juga dapat memperparah kondisi ini, sebagaimana ditemukan oleh Li dan Liu (2022), melalui mekanisme erosi-korosi akibat tumbukan partikel dengan permukaan pipa.

Situasi ini menempatkan segmen antara kilometer 12 hingga 45 sebagai zona kritis yang memerlukan pemantauan ketat dan tindakan pemeliharaan aktif. Pendekatan *Risk-Based Inspection* (RBI) menjadi sangat relevan dalam konteks ini. RBI memungkinkan penjadwalan inspeksi berdasarkan analisis probabilistik risiko yang menggabungkan data operasional, historis, dan lingkungan. Soedarsono et al. (2023) dan Hou et al. (2020) menunjukkan bahwa RBI telah berhasil diterapkan dalam manajemen pipa subsea dan jaringan pipa darat tua dengan pendekatan statistik spasial untuk mengidentifikasi segmen prioritas. Integrasi dengan algoritma pembelajaran mesin seperti yang dijelaskan oleh Aditiyawarman et al. (2022) menambah nilai RBI dengan memberikan prediksi kondisi pipa secara real-time.

Efektivitas RBI juga bertumpu pada pemahaman menyeluruh tentang mekanisme degradasi. He et al. (2023) menunjukkan bahwa kualitas fluida, interaksi dengan material pipa, serta karakteristik aliran harus dianalisis secara terpadu untuk merumuskan strategi mitigasi korosi. Teknologi inspeksi in-line seperti LiN SCAN, dalam konteks ini, menjadi penyedia data vital untuk sistem RBI. Dengan menggunakan hasil inspeksi sebagai dasar

analisis risiko, operator dapat menyesuaikan frekuensi dan metode inspeksi sesuai dengan kondisi aktual pipa.

Dengan mempertimbangkan seluruh temuan dan literatur pendukung, teknologi MFL melalui LiN SCAN terbukti tidak hanya mendeteksi anomali, tetapi juga mendukung pengambilan keputusan berbasis data dalam pengelolaan jaringan pipa. Integrasi teknologi ini dengan model prediktif dan pendekatan inspeksi berbasis risiko akan memperkuat upaya menjaga integritas jangka panjang pipa bahan bakar, mengurangi risiko kegagalan, serta mengoptimalkan efisiensi operasional dan keselamatan sistem transportasi energi.

KESIMPULAN

Berdasarkan pelaksanaan inspeksi internal pipa menggunakan in-line inspection tools dari LiN SCAN, memberikan gambaran menyeluruh terhadap integritas saluran pipa bahan bakar. Data hasil inspeksi menjadi dasar utama dalam pengambilan keputusan pemeliharaan dan mitigasi risiko kebocoran. Dari hasil data yang dikumpulkan, ditemukan sejumlah indikasi anomali di sepanjang lintasan pipa dengan kategori resiko yang paling tinggi adalah pipa saluran bahan bakar penyok pada lokasi 7.8 – 18.6 Km pada kedalam 15-12 mm. Rekomendasi perbaikan dan inspeksi lanjutan sangat disarankan untuk menjamin keberlangsungan operasional secara aman dan efisien.

REKOMENDASI

Rekomendasi yang dapat disampaikan oleh penulis yang dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan yaitu segera lakukan penggantian segmen pipa dengan tingkat metal loss >25%, lakukan evaluasi ulang sistem proteksi katodik di area dengan korosi teridentifikasi, perkuat sistem monitoring tekanan dan kebocoran pada area risiko tinggi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada civitas akademika Institut Teknologi PLN (IT PLN) yang telah memberikan dukungan moril sehingga penulisan yang dilakukan dapat berjalan dengan baik, Aamiin.

DAFTAR PUSTAKA

- Aditiyawarman, T., Soedarsono, J., Kaban, A., Riastuti, R., Rahmadani, H., Pribadi, M., ... & Suryadi, S. (2022). Risk analysis of ex-spool 16" mol: an insight of machine learning and experimental result. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(12 (117)), 20-33. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.259858>
- Al-Zubi, M. M., & Alouini, M.-S. (2025). Macroscale molecular communication in IoT-based pipeline inspection and monitoring applications. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2504.09325>
- ASME. (2016). ASME Code for Pressure Piping, B31.4. The American Society of Mechanical Engineers.
- ASME. (2022). ASME Code for Pressure Piping, B31.8. The American Society of Mechanical Engineers.
- ASME. (2023). ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1. The American Society of Mechanical Engineers.
- ASME. (2024). ASME Code for Pressure Piping, B31.3. The American Society of Mechanical Engineers.
- Baroudi, U., Al-Roubaiey, A., & Devendiran, A. (2019). Pipeline leak detection systems and data fusion: A survey. *arXiv preprint arXiv:1902.03927*. <https://arxiv.org/abs/1902.03927>
- Bo, F., Wu, J., Tu, H., Tang, J., & Kang, Y. (n.d.). A review of magnetic flux leakage nondestructive testing. *Materials*. <https://www.mdpi.com/journal/materials>
- Cheng, Y., & Xie, R. (2020). Analysis of vibration characteristics of the pig launcher based on fluid-solid coupling. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies*. <https://jmess.org>
- Feng, Y., Li, C., & Zhao, H. (n.d.). Advanced magnetic flux leakage techniques for pipeline inspection. *Journal of Pipeline Integrity Research*, 15(2), 95–110.
- Giro, R. A., Bernasconi, G., Giunta, G., & Cesari, S. (2021). Predicting pigging operations in oil pipelines. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2109.11812>

- He, T., Liao, K., Leng, J., He, G., Zhu, H., & Zhao, S. (2023). A novel non-contact, magnetic-based stress inspection technology and its application to stress concentration zone diagnosis in pipelines. *Measurement Science and Technology*, 34(9), 095001. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/acca02>
- Hou, P., Yi, X., & Dong, H. (2020). A spatial statistic based risk assessment approach to prioritize the pipeline inspection of the pipeline network. *Energies*, 13(3), 685. <https://doi.org/10.3390/en13030685>
- Hu, T., & Guo, J. (2019). Development and application of new technologies and equipment for in-line pipeline inspection. *ScienceDirect*. <https://www.sciencedirect.com>
- Hua, Y., Barker, R., & Neville, A. (2015). The influence of so₂ on the tolerable water content to avoid pipeline corrosion during the transportation of supercritical co₂. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 37, 412-423. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.03.031>
- Jarić, M., Petronić, S., Brat, Z., Polić, S., & Maksimović, I. V. (2025). Pipeline inspection gauge trap integrity estimation for upcoming pigging activities on midstream pipeline. *Processes*, 13(4), 1255. <https://doi.org/10.3390/pr13041255>
- Kou, J., Ma, D., Yang, L., & Wang, D. (2022). Effect of co₂ content on corrosion non-uniformity of 20# steel in oil–water two-phase based on wire beam electrode technique. *Corrosion Engineering Science and Technology the International Journal of Corrosion Processes and Corrosion Control*, 58(1), 23-35. <https://doi.org/10.1080/1478422x.2022.2130509>
- Lahme, S., Mand, J., Longwell, J., Smith, R., & Enning, D. (2021). Severe corrosion of carbon steel in oil field produced water can be linked to methanogenic archaea containing a special type of [nife] hydrogenase. *Applied and Environmental Microbiology*, 87(3). <https://doi.org/10.1128/aem.01819-20>
- Li, Q. and Liu, B. (2022). Erosion-corrosion of gathering pipeline steel in oil-water-sand multiphase flow. *Metals*, 13(1), 80. <https://doi.org/10.3390/met13010080>
- Lim, K., Bao, C., Sani, M., & Lim, K. (2021). Numerical study on the effect of defect length upon burst capacity of composite repaired pipe. *Key Engineering Materials*, 879, 179-188. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.879.179>
- LiN SCAN. (n.d.). Pipeline inspection and integrity solutions. <https://linscaninspection.com>
- Ling, J., Peng, X., Siggers, K., Peussner, M., Rayhana, R., & Liu, Z. (2024). Reconstruction of 3-d pipeline corrosion defect profile from mfl signals with deep learning approach., 12. <https://doi.org/10.1117/12.3010024>
- LinkeWire. (2024, October 18). Intelligent pipeline pigging market insights: Enhancing pipeline integrity 2024–2033. <https://linkewire.com/2024/10/18/intelligent-pipeline-pigging-market-insights-enhancing-pipeline-integrity-2024-2033/>
- Liu, J., Yao, D., Chen, K., Wang, C., Sun, C., Pan, H., ... & Wang, L. (2023). Effect of h₂o content on the corrosion behavior of x52 steel in supercritical co₂ streams containing o₂, h₂s, so₂ and no₂ impurities. *Energies*, 16(17), 6119. <https://doi.org/10.3390/en16176119>
- Ma, H., Geng, M., Wang, F., Zheng, W., Ai, Y., & Zhang, W. (2024). Data augmentation of a corrosion dataset for defect growth prediction of pipelines using conditional tabular generative adversarial networks. *Materials*, 17(5), 1142. <https://doi.org/10.3390/ma17051142>
- Mahlobo, M., Premilall, K., & Olubambi, P. (2021). Effect of exposure time with so₂ as an impurity on the corrosion behaviour of pipeline steel in ccs transportation. *Corrosion Engineering Science and Technology the International Journal of Corrosion Processes and Corrosion Control*, 57(1), 44-54. <https://doi.org/10.1080/1478422x.2021.1982113>
- Market Research Future. (2025, January 10). Intelligent pigging market report, 2025: Size & share, growing at a CAGR of 5.97%. <https://www.einpresswire.com/article/775799464/intelligent-pigging-market-report-2025-size-share-growing-at-a-cagr-of-5-97>
- Riady, R., Soedarsono, J., Riastuti, R., & Adipurnama, I. (2022). Material selection for raw gas pipeline at sbr#2 gas field. *Teknomekanik*, 5(2), 63-71. <https://doi.org/10.24036/teknomekanik.v5i2.13372>

- Shaik, N., Pedapati, S., & Dzubir, F. (2019). Remaining useful life prediction of crude oil pipeline by means of deterioration curves. *Process Safety Progress*, 39(S1). <https://doi.org/10.1002/prs.12112>
- Shen, Y. and Zhou, W. (2024). Classification and regression of pinhole corruptions on pipelines based on magnetic flux leakage signals using convolutional neural networks. *Algorithms*, 17(8), 347. <https://doi.org/10.3390/a17080347>
- Silva, C., Pereira, H., Taqueda, M., & Panossian, Z. (2021). Prediction models for multiphase-flow-induced corrosion of api x80 steel in co₂/h₂s environment. *Materials and Corrosion*, 72(11), 1796-1807. <https://doi.org/10.1002/maco.202112451>
- Soedarsono, J., Wijaya, A., Adityawarman, T., Kaban, A., Riastuti, R., Ramdhani, R., ... & Ayende, A. (2023). Development of risk-based inspection of 28-years-old subsea sales gas pipelines to support the energy demand. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(3 (122)), 17-27. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.277256>
- Tiehua, W., & Jingbo, L. (2019). Intelligent pigging: An efficient method for internal pipeline inspection. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 178, 752–760. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.04.054>
- Tronskar, J. and Wui, L. (2022). Inspection and remaining life assessment of subsea pipelines exposed to various forms of internal corrosion degradation mechanisms., 240-250. https://doi.org/10.1115/1.885789_ch18
- Usarek, Z. and Warnke, K. (2017). Inspection of gas pipelines using magnetic flux leakage technology. *Advances in Materials Science*, 17(3), 37-45. <https://doi.org/10.1515/adms-2017-0014>
- Wang, W., Sun, Y., Wang, B., Dong, M., & Chen, Y. (2022). Cfd-based erosion and corrosion modeling of a pipeline with co₂-containing gas–water two-phase flow. *Energies*, 15(5), 1694. <https://doi.org/10.3390/en15051694>
- Wari, E., Zhu, W., & Lim, G. (2023). A corrosion maintenance model using continuous state partially observable markov decision process for oil and gas pipelines. *Algorithms*, 16(7), 345. <https://doi.org/10.3390/a16070345>
- Xie, M., & Tian, Z. (2018). A review on pipeline integrity management utilizing in-line inspection data. *ResearchGate*. <https://www.researchgate.net/publication/328208231>
- Zhou, L. (2023). A study on the corrosion behaviour and mechanism of associated gas on surface pipes in fire-flooding oil recovery. *Journal of Physics Conference Series*, 2418(1), 012060. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2418/1/012060>
- Zhu, C., Yang, Y., Yang, K., Zhang, H., Yang, Q., & Chen, C. L. P. (2023). AI-based energy transportation safety: Pipeline radial threat estimation using intelligent sensing system. *arXiv preprint arXiv:2312.11583*. <https://arxiv.org/abs/2312.11583>