

Analisis risiko penarikan pipa HDPE-100 pada proyek instalasi perpipaan metode *horizontal directional drilling* (HDD)

Novean Husni Dini Reca^{1,*}, Dwi Dinariana¹, Krishna Suryanto Pribadi¹

¹Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Persada Indonesia Y.A.I, Jakarta, Indonesia

Article Info

Available online

Keywords:

HDPE-100

HDD

Tensile strength

Pull force

Monte carlo simulation

Corresponding Author:

Novean Husni

Abirna69@gmail.com

Abstract

The rapid expansion of underground utility networks has increased the use of Horizontal Directional Drilling (HDD) for trenchless pipeline installation, especially with PE100 pipes due to their good mechanical strength and durability. However, many HDD projects still use theoretical tensile strength values from standards or catalogues instead of laboratory results. This can cause inaccurate pull force calculations and raise the risk of mechanical failure during pullback. Most polyethylene pipe standards do not require tensile strength testing of fused pipes, while ASTM F1962-22 gives detailed pull force calculation procedures but assumes that mechanical properties are already reliable. This creates a practical gap for HDD contractors when defining safe pull force limits. This study evaluates the pullback risk of HDPE-100 pipes in HDD works by combining laboratory tensile testing with a risk management framework based on SNI ISO 31000:2018. Pipe specimens from commercial HDPE-100 products are tested according to ISO 527-1 and ISO 6259-3 to obtain actual tensile strength values of fused pipes. These values are then used as inputs for pull force calculations following ASTM F1962-22. In parallel, risks are identified and assessed using expert questionnaires, project records, a risk matrix, and Monte Carlo simulation to quantify how parameter variability influences failure probability. The results indicate that using only theoretical tensile strength can underestimate failure probability, while incorporating laboratory-based tensile strength improves the reliability of allowable pull force estimates and strengthens technical risk mitigation.

Copyright © 2026 Universitas Islam Indonesia
All rights reserved

Pendahuluan

Pembangunan infrastruktur jaringan utilitas bawah tanah di kawasan perkotaan menuntut metode instalasi perpipaan yang minim gangguan terhadap aktivitas permukaan, sehingga teknologi tanpa galian (*trenchless*) seperti *Horizontal Directional Drilling* (HDD) (Krechowicz 2021), semakin luas diaplikasikan untuk jalur air minum, sanitasi, gas, listrik, dan telekomunikasi. Pipa Polyethylene (PE) 100 atau HDPE-100 banyak dipilih dalam aplikasi HDD karena memiliki kekuatan tarik, fleksibilitas, ketahanan korosi, serta umur layanan yang panjang.

Rumusan masalah dalam penelitian ini dirumuskan sebagai berikut. Pertama, masih terdapat penggunaan nilai *tensile strength* teoritis tanpa uji laboratorium aktual, yang berpotensi menurunkan akurasi perhitungan pull force serta meningkatkan risiko kegagalan instalasi pipa. Kedua, ketiadaan ketentuan eksplisit mengenai kewajiban uji *tensile strength* dalam standar pipa PE menyebabkan kontraktor mengalami keterbatasan penetapan batas tarik yang aman. Ketiga, kondisi tersebut berimplikasi pada meningkatnya potensi kerugian teknis dan finansial akibat penentuan nilai tarik yang tidak tepat. Keempat, keadaan ini menegaskan perlunya kajian sistematis

mengenai penerapan manajemen risiko berbasis SNI ISO 31000:2018 dalam proyek HDD sebagai upaya untuk mengidentifikasi, menganalisis, dan mengendalikan risiko secara lebih terstruktur.

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) identifikasi potensi risiko kegagalan instalasi pipa HDPE-100 metode Horizontal Directional Drilling (HDD), (2) evaluasi karakteristik kegagalan teknis pada tahap *pullback* pipa, dan (3) analisis pengaruh nilai *tensile strength* hasil uji laboratorium terhadap penentuan besar gaya tarik (*pull force*) yang aman.

Ruang lingkup dibatasi pada pipa HDPE-100 dengan sambungan *butt fusion*, nilai *tensile strength* hasil uji laboratorium di fasilitas terkalibrasi, data proyek HDD periode 2022–2025, serta penerapan standar SNI ISO 31000:2018, DVS 2207-1:2016 (DVS 2016), ISO 4427-2:2019 (ISO 2019), ISO 6259-3:2015 (ISO 2015), dan ASTM F1962-22 (ASTM 2025) dengan analisis probabilistik menggunakan simulasi *Monte Carlo*.

Manajemen risiko dan SNI ISO 31000

Manajemen risiko didefinisikan sebagai proses sistematis untuk mengidentifikasi, menganalisis, mengevaluasi, dan mengendalikan risiko sehingga tujuan proyek dapat tercapai (Vaughan and Sinha 1994) dengan gangguan minimal. SNI ISO 31000:2018 menekankan integrasi proses risiko dalam seluruh siklus hidup proyek, meliputi penyusunan rencana manajemen risiko, identifikasi, analisis kualitatif dan kuantitatif, perencanaan respons, implementasi, serta monitoring.

Dalam konteks HDD, sumber risiko utama meliputi kondisi geoteknik, peralatan, prosedur kerja, keselamatan kerja, dan kualitas material pipa, sehingga pendekatan manajemen risiko perlu menggabungkan data teknis, pengalaman lapangan, dan masukan pemangku kepentingan. Penggunaan *risk register*, matriks probabilitas–dampak, dan mekanisme pelaporan berkala menjadi instrumen

penting untuk memastikan setiap risiko memiliki penanggung jawab dan rencana penanganan yang jelas.

Pipa polyethylene (PE) 100

Pipa PE memiliki keunggulan berupa ketahanan tekanan jangka panjang, fleksibilitas, ketahanan retak, sambungan fusi yang rapat, ringan, ketahanan kimia, permukaan dalam halus, dan umur layanan panjang sehingga cocok untuk aplikasi tekanan dan HDD. *Handbook of Polyethylene Pipe* mencatat bahwa sambungan *heat fusion* yang baik memberikan kekuatan sambungan yang sebanding atau lebih tinggi daripada pipa induk, sehingga kualitas proses fusi menjadi variabel kunci dalam analisis risiko penarikan.

Aplikasi PE100 mencakup pipa air minum, gas, dan pelindung kabel, di mana kombinasi tekanan internal, beban tanah, dan gaya tarik instalasi harus dijaga agar tidak melampaui batas desain material.

Horizontal directional drilling dan kegagalannya

ASTM F1962-22 mengklasifikasikan HDD sebagai metode pemasangan utilitas bawah tanah tanpa galian terbuka melalui tahap *pilot hole*, *reaming*, dan *pullback* dengan pengendalian jalur dan gaya tarik. Penelitian terdahulu oleh (Krechowicz and Ph 2020), (Kong dkk., 2022), dan (Tabesh dkk., 2019) menekankan pentingnya pemodelan risiko geoteknik, prediksi beban rig, dan daftar risiko teknis–operasional untuk mengurangi kegagalan HDD, tetapi belum banyak yang mengkaitkan secara eksplisit nilai *tensile strength* aktual dengan probabilitas kegagalan penarikan pipa.

Tensile strength pipa HDPE-100

Tensile strength adalah kemampuan material menahan tegangan tarik maksimum sebelum mengalami kegagalan, dengan parameter penting berupa kekuatan luluh, kekuatan ultimit, dan kekuatan pada saat putus. Pada pipa HDPE, *tensile strength* diukur sesuai ISO 527-1:2019 dan ISO 6259-3:2015,

dengan satuan umum MPa atau psi, dan digunakan untuk evaluasi material, kontrol kualitas, desain struktur, serta analisis kegagalan.

Dalam konteks HDD, batas desain biasanya dinyatakan sebagai persentase dari *tensile strength at yield*, misalnya 40%, sehingga gaya tarik tidak menimbulkan deformasi plastis permanen pada pipa. Perbedaan antara nilai teoritis dan nilai aktual hasil uji dapat mempengaruhi margin keamanan dan probabilitas terjadinya kerusakan selama penarikan.

Perhitungan gaya tarik (pull force)

ASTM F1962-22 memberikan formulasi untuk menghitung gaya tarik total sebagai penjumlahan komponen gaya akibat gesekan, gaya *fluid drag*, gaya akibat pembengkokan, dan efek gaya apung lumpur bor. *Pull force* desain dihitung dengan mengalikan gaya tarik yang diperkirakan dengan faktor keamanan tertentu, kemudian dibandingkan dengan nilai maksimum yang diizinkan berdasarkan *tensile strength* dan luas penampang pipa. Dengan demikian, akurasi input *tensile strength* menjadi komponen kritis dalam memastikan konsistensi antara perencanaan dan operasi di lapangan.

Simulasi monte carlo dalam analisis risiko HDD

Simulasi *Monte Carlo* dalam penelitian ini ditempatkan sebagai tahap analisis risiko kuantitatif untuk mengukur probabilitas kegagalan penarikan pipa HDPE-100 secara lebih terukur, bukan sekadar kualitatif. Setiap variabel teknis utama dimodelkan sebagai variabel acak dengan distribusi tertentu yang merefleksikan variasi data laboratorium, pengalaman proyek, dan ketidakpastian kondisi lapangan.

Variabel yang dimasukkan antara lain nilai *tensile strength* pipa hasil uji laboratorium, koefisien gesekan antara pipa dan tanah/lumpur, densitas dan karakteristik fluida pengeboran, panjang lintasan HDD, radius lengkung dan geometri jalur, serta parameter operasional seperti kecepatan

tarik dan tekanan pompa. Masing-masing variabel diberi rentang (minimum–maksimum) atau distribusi (misalnya normal, lognormal, atau triangular) berdasarkan hasil pengujian, data proyek HDD tahun 2022 s.d. 2025, dan validasi pakar.

Simulasi dijalankan dalam jumlah iterasi besar, di mana pada setiap iterasi kombinasi nilai input diambil secara acak dari distribusi masing-masing variabel, lalu digunakan untuk menghitung gaya tarik total menurut model perhitungan berbasis ASTM F1962-22. Dari setiap skenario diperoleh nilai gaya tarik dan dibandingkan dengan batas gaya tarik yang diizinkan, yang diturunkan dari *tensile strength* aktual pipa dengan faktor keamanan tertentu untuk mendapatkan margin keamanan.

Simulasi *Monte Carlo* juga memungkinkan analisis “bagaimana-jika” dengan memodifikasi asumsi variabel, misalnya menurunkan kualitas *tensile strength* (mewakili sambungan yang kurang baik), meningkatkan koefisien gesekan (mewakili tanah urugan/heterogen. Perbandingan antar skenario ini menunjukkan seberapa besar penurunan probabilitas kegagalan bila digunakan nilai *tensile strength* aktual versus nilai teoritis saja, serta efektivitas kombinasi tindakan teknis tertentu dalam menurunkan risiko.

Metodologi Penelitian

Penelitian ini disusun agar mudah dipahami, baik oleh praktisi maupun pembaca umum, dengan menggabungkan pendekatan kualitatif dan kuantitatif dalam bentuk studi kasus proyek HDD pemasangan pipa HDPE-100 di Indonesia periode 2022–2025.

Pendekatan dan objek penelitian

Penelitian berfokus pada beberapa proyek nyata HDD yang telah selesai dikerjakan dan menggunakan pipa HDPE-100 sebagai media utama yang ditarik (*pullback*). Proyek-proyek ini dipilih karena memiliki variasi kondisi tanah, panjang lintasan, dan catatan operasional yang cukup lengkap untuk dianalisis.

Pendekatan kualitatif digunakan untuk memahami proses kerja, pola risiko, dan pengalaman lapangan melalui wawancara, kuesioner, dan telaah dokumen. Pendekatan kuantitatif digunakan untuk mengolah data numerik seperti hasil uji *tensile strength*, parameter perhitungan gaya tarik, dan analisis probabilistik risiko dengan bantuan model matematis.

Instrumen dan Sumber Data

Instrumen utama yang digunakan terdiri atas: (1) Studi literatur: standar teknis (ISO, SNI, ASTM), pedoman pabrikan pipa HDPE-100, dan referensi manajemen risiko konstruksi serta HDD. (2) Kuesioner terstruktur: diberikan kepada praktisi HDD (kontraktor, *engineer*, supervisor lapangan) untuk mengidentifikasi tahapan kerja, jenis risiko, dan kejadian gangguan di lapangan. (3) Wawancara mendalam: dilakukan dengan pakar HDD dan manajemen risiko untuk menggali akar penyebab (*root causes*) kegagalan dan praktik terbaik (*best practice*) di lapangan. (4) Observasi: wawancara langsung prosedur kerja HDD pada beberapa proyek, termasuk tahapan persiapan, *pilot hole*, *reaming*, *cleaning*, dan penarikan pipa. (5) Dokumen proyek: metode kerja (metode pelaksanaan), laporan harian, catatan gangguan, data gaya tarik dari mesin, serta laporan inspeksi kualitas. (6) Hasil uji laboratorium: pengujian *tensile strength* pada sampel pipa HDPE-100 dan sambungan *butt fusion* di laboratorium terkalibrasi.

Tahapan Pengumpulan Data

Metodologi penelitian disusun melalui kombinasi studi literatur, wawancara dengan pakar horizontal directional drilling (HDD), serta penyebaran kuesioner kepada praktisi lapangan. Tahap awal dilakukan penelaahan dokumen dan standar teknis yang relevan, antara lain ISO 4427-2:2019, (SNI 4829-1:2015), SNI ISO 31000:2018, DVS 2207-1:2016, ISO 527-1:2019, ISO 6259-3:2015, dan ASTM F1962-22, untuk memperoleh pemahaman mengenai kriteria material, prosedur pengujian, dan metode perhitungan

gaya tarik. Selain itu, dokumen teknis pabrikan, seperti datasheet, dikaji guna mengidentifikasi spesifikasi produk. Penelaahan dokumen dan standar

Berdasarkan kajian literatur dan pengalaman awal dalam proyek Horizontal Directional Drilling (HDD), tim menyusun kuesioner yang berfokus pada beberapa aspek kunci: tahapan kerja, jenis gangguan yang sering terjadi, karakteristik lokasi dan kondisi tanah saat gangguan, metode penanganan yang diterapkan, serta penilaian responden terhadap tingkat risiko. Kuesioner ini disebarkan kepada para praktisi yang terlibat dalam proyek HDD pada periode 2022 hingga 2025, sehingga terkumpul basis data empiris yang cukup luas dan representatif terhadap kondisi aktual di lapangan.

Untuk memperdalam pemahaman, dilakukan juga wawancara semi-terstruktur dengan beberapa narasumber kunci, seperti site manager, engineer desain, dan ahli manajemen risiko. Wawancara ini difokuskan pada identifikasi tahapan paling kritis dalam proses HDD, faktor-faktor teknis penyebab kegagalan—seperti collapse lubang bor, putusnya pipa, dan deviasi jalur—serta sejauh mana data *tensile strength* aktual dimanfaatkan dalam perhitungan gaya tarik selama tahap perencanaan dan eksekusi.

Sebagai pelengkap data empiris dan analitis, dilakukan pengambilan dan pengujian sampel pipa HDPE-100, termasuk segmen yang telah disambung dengan metode butt fusion. Sampel diambil dari proyek atau batch yang sama dengan pipa yang digunakan di lapangan untuk menjamin kesesuaian karakteristik material. Pengujian laboratorium kemudian dilaksanakan sesuai standar ISO 527-1:2019 dan ISO 6259-3:2015 guna memperoleh nilai *tensile strength* aktual. Hasil pengujian ini menjadi input utama dalam perhitungan pull force dan evaluasi margin keamanan desain.

Pengolahan dan analisis data

Data kualitatif dari kuesioner, wawancara, dan observasi dikodekan untuk

mengidentifikasi pola tahapan kerja kritis, jenis risiko dominan, dan akar penyebabnya. Hasil ini disusun dalam bentuk daftar risiko (*risk register*) beserta deskripsi dan sumber penyebabnya.

Pengujian laboratorium

Data kuantitatif, terutama hasil uji *tensile strength* dan parameter proyek (panjang lintasan, radius, koefisien gesekan, gaya tarik terukur) diolah untuk menghitung gaya tarik desain dan margin keamanan berdasarkan ASTM F1962-22. Selanjutnya, kombinasi data ini menjadi dasar analisis probabilistik dan simulasi *Monte Carlo* untuk mengukur probabilitas kegagalan penarikan pipa.

Dengan cara ini, pembaca non-teknis dapat melihat alur yang jelas: mulai dari membaca standar, mengumpulkan pengalaman lapangan melalui kuesioner dan wawancara, menguji pipa di laboratorium, hingga mengolah angka untuk mengetahui seberapa besar peluang kegagalan dan bagaimana risikonya dapat dikurangi.

Sampel pipa HDPE-100 diuji di laboratorium menggunakan mesin uji tarik terkalibrasi sesuai standar ISO 527-1:2019 dan ISO 6259-3:2015. Nilai *tensile strength* aktual digunakan sebagai acuan dalam analisis risiko.

Sampel pipa HDPE-100 diambil dari produk komersial yang digunakan pada proyek nyata dan diuji pada laboratorium pabrikan yang telah terkalibrasi untuk memperoleh nilai *tensile strength* aktual sesuai ISO 527-1:2019 dan ISO 6259-3:2015. Data uji ini kemudian digunakan sebagai input perhitungan *pull force* berdasarkan formula ASTM F1962-22, yang dikombinasikan dengan data geometri jalur dan parameter tanah dari proyek.

Analisis data

Data dianalisis menggunakan matriks risiko berdasarkan SNI ISO 31000:2018 dan simulasi *Monte Carlo* untuk memprediksi probabilitas kegagalan teknis.

Simulasi monte carlo

Digunakan untuk memodelkan ketidakpastian dalam perhitungan *pull force* dan *tensile strength*. Simulasi ini membantu dalam menilai risiko kegagalan pipa selama *pullback*.

Hasil dan Pembahasan

Identifikasi dan profil risiko teknis penarikan pipa

Berdasarkan hasil wawancara dan studi literatur, teridentifikasi 76 faktor risiko yang berpotensi terjadi selama instalasi HDD sebagaimana pada Tabel 1.

Tabel 1. Data probabilitas risiko yang dapat terjadi pada instalasi pipa PE dengan metode HDD berdasarkan urutan langkah kerja

No	Faktor Risiko	Sumber
Kontrak Kerja		
<u>Kontrak (Surat Perintah Kerja)</u>		
X 1	Terjadi perselisihan antara kontraktor dengan pemilik kerja mengenai kontrak	Amir Tabesh, 2019, M. Krechowicz, 2022
X 2	Gambar kerja tidak ada atau tidak sesuai dengan kondisi lapangan Peta utilitas	MAB 07 PPI, 2025
X 3	Denah/gambar utilitas didalam tanah tidak ada atau tidak sesuai dengan kondisi lapangan	MAB 07 PPI, 2025, Blake Peters, 2014
<u>Izin pemilik lahan yang dilewati</u>		
X 4	Pekerjaan tertunda perizinan dari warga atau instansi terkait	F. Ruthriana, 2025, M. Krechowicz, 2021
X 5	Pekerja terluka akibat protes anarkis warga sekitar proyek karena perizinan lahan.	F. Ruthriana, 2025
<u>Survei lokasi</u>		
X 6	Kesalahan data pengukuran kondisi di permukaan tanah	Amir Tabesh, 2019, Blake Peters, 2014, M. Krechowicz, 2022
X 7	Pekerja tergelincir dan terluka lecet atau tergores saat survei. <i>Land clearing</i>	F. Ruthriana, 2025
X 8	Pekerja terkena paparan bahan berbahaya yang mungkin terkubur dalam tanah dan menyebabkan iritasi kulit, gangguan pernapasan, luka bakar saat pembersihan lahan.	F. Ruthriana, 2025, M. Krechowicz, 2022

No	Faktor Risiko	Sumber
X 9	Pekerjaan pembersihan lahan tertunda akibat cuaca ekstrim seperti badai, banjir dll.	Amir Tabesh, 2019, M. Krechowicz, 2021
Pekerjaan pendahuluan		
<u>Pemeriksaan kondisi tanah</u>		
X 10	Kondisi di dalam tanah tidak sesuai untuk pekerjaan HDD	Amir Tabesh, 2019, M. Krechowicz, 2022
<u>Penentuan unit/alat bantu</u>		
X 11	Unit / alat bantu HDD tidak layak	Amir Tabesh, 2019, Blake Peters, 2014
<u>Setting peralatan</u>		
X 12	Indikator pada unit HDD tidak akurat	Amir Tabesh, 2019, Blake Peters, 2014, M. Krechowicz, 2021
X 13	Pekerja tertabrak alat berat hingga patah tulang, cacat tetap, atau meninggal saat penyetelan peralatan.	F. Ruthriana, 2025
Pekerjaan Pilot Hole		
<u>Piloting</u>		
X 14	Mata bor berhenti/tidak bisa maju karena kondisi tanah.	Amir Tabesh, 2019, M. Krechowicz, 2021
X 15	Galian runtuh saat <i>piloting</i> .	Amir Tabesh, 2019, M. Krechowicz, 2021
X 16	Terjadi <i>frac-out</i> (keluarnya lumpur di tempat yang tidak diperhitungkan)	Amir Tabesh, 2019, M. Krechowicz, 2021
X 17	Komposisi <i>drill fluid</i> tidak sesuai	Amir Tabesh, 2019
X 18	Pencemaran lingkungan akibat penggunaan <i>drill fluid</i> yang tidak ramah lingkungan	MAB 07 PPI, 2025
X 19	Penanganan limbah <i>drill fluid</i>	MAB 07 PPI, 2025
X 20	Pekerja tertusuk alat berat atau bor hingga luka sobek, cedera saraf, patah tulang, atau meninggal saat <i>piloting</i> .	F. Ruthriana, 2025
X 21	Pekerja tergelincir dan terluka lecet atau tergores saat <i>piloting</i> .	F. Ruthriana, 2025
X 22	Pekerja terkena paparan bahan berbahaya yang mungkin terkubur dalam tanah dan menyebabkan iritasi kulit, gangguan pemapasan, luka bakar.	M. Krechowicz, 2022
X 23	Pekerjaan <i>piloting</i> tertunda akibat cuaca ekstrim seperti badai, banjir dll.	Amir Tabesh, 2019, M. Krechowicz, 2021
<u>Pelacakan hasil pekerjaan pemasangan pipa (tracking)</u>		
X 24	Pekerja tergelincir dan terluka lecet atau tergores saat pekerjaan <i>tracking</i> .	F. Ruthriana, 2025
X 25	Deviasi arah pengeboran (<i>pilot hole</i>)	Amir Tabesh, 2019, M. Krechowicz, 2021
Pekerjaan Reaming		
<u>Pekerjaan pembesaran lubang bor (reaming)</u>		
X 26	Mata back <i>reamer</i> berhenti/tidak bisa ditarik karena kondisi tanah.	Amir Tabesh, 2019
X 27	Galian runtuh saat <i>reaming</i> .	Amir Tabesh, 2019, M. Krechowicz, 2021
X 28	Terjadi <i>frac-out</i> (keluarnya lumpur di tempat yang tidak diperhitungkan) saat <i>reaming</i> .	Amir Tabesh, 2019, M. Krechowicz, 2021
X 29	Komposisi <i>drill fluid</i> tidak sesuai	Amir Tabesh, 2019
X 30	Pencemaran lingkungan akibat penggunaan <i>drill fluid</i> yang tidak ramah lingkungan	MAB 07 PPI, 2025
X 31	Penanganan limbah <i>drill fluid</i>	M. Krechowicz, 2021
X 32	Pekerja tertusuk alat berat atau <i>back reamer</i> hingga luka sobek, cedera saraf, patah tulang, atau meninggal.	F. Ruthriana, 2025
X 33	Pekerja tergelincir dan terluka lecet atau tergores saat <i>reaming</i> .	F. Ruthriana, 2025
X 34	Pekerja terkena paparan bahan berbahaya yang mungkin terkubur dalam tanah dan menyebabkan iritasi kulit, gangguan pemapasan, luka bakar.	F. Ruthriana, 2025 M. Krechowicz, 2022
X 35	Pekerjaan <i>reaming</i> tertunda akibat cuaca ekstrim seperti badai, banjir dll.	Amir Tabesh, 2019, M. Krechowicz, 2021
<u>Cleaning</u>		
X 36	Pekerja tertusuk alat berat atau bor hingga luka sobek, cedera saraf, patah tulang, atau meninggal saat <i>cleaning</i> sesudah <i>reaming</i> .	F. Ruthriana, 2025
X 37	Pekerja tergelincir dan terluka lecet atau tergores saat <i>cleaning</i> .	F. Ruthriana, 2025
X 38	Pekerja terkena paparan bahan berbahaya yang mungkin terkubur dalam tanah dan menyebabkan iritasi kulit, gangguan pemapasan, luka bakar saat pekerjaan <i>cleaning</i> .	F. Ruthriana, 2025, M. Krechowicz, 2022
Penyiapan dan Penyambungan Pipa		
<u>Penyiapan pipa</u>		
X 39	Pekerja tertimpa material hingga luka memar, luka sobek, atau patah tulang.	F. Ruthriana, 2025
<u>Penyambungan pipa</u>		
X 40	Pekerjaan pemeriksaan pipa yang akan disambung, tertunda akibat cuaca ekstrim seperti badai, banjir dll.	DVS 2207-1:2016, M. Krechowicz, 2021

No	Faktor Risiko	Sumber
X 41	Pekerjaan penyambungan tertunda akibat cuaca ekstrim seperti badai, banjir dll.	Amir Tabesh, 2019, M. Krechowiec, 2021
<u>Menghubungkan sumber listrik ke mesin butt fusion</u>		
X 42	Pekerja tersengat listrik, mengalami luka bakar	Amir Tabesh, 2019
<u>Pemasangan dengan alat, mesin berat dan pipa berat</u>		
X 43	Pekerja tertusuk, terjatuh, terjepit alat bantu kerja hingga luka sobek, cedera saraf, patah tulang, atau meninggal.	F. Ruthriana, 2025
<u>Menentukan besarnya drag pressure</u>		
X 44	Pekerja tertusuk, terjatuh, terjepit alat bantu kerja hingga luka sobek, cedera saraf, patah tulang, atau meninggal.	F. Ruthriana, 2025
X 45	Indikator tekanan tidak akurat	DVS 2207-1:2016 M. Krechowiec, 2021
<u>Penyerutan ujung pipa menggunakan mesin serut (miller)</u>		
X 46	Pekerja tertusuk, terjatuh, terjepit alat bantu kerja hingga luka sobek, cedera saraf, patah tulang, atau meninggal.	F. Ruthriana, 2025
X 47	Pekerja tersengat listrik alat serut	Amir Tabesh, 2019
X 48	Indikator tekanan tidak akurat saat penyerutan dilakukan	DVS 2207-1:2016, Blake Peters, 2014, M. Krechowiec, 2021
<u>Pembersihan ujung pipa dengan lap/tissue + alkohol</u>		
X 49	Pekerja terkena paparan bahan berbahaya yang mungkin terkubur dalam tanah dan menyebabkan iritasi kulit, gangguan pemapasan, luka bakar.	F. Ruthriana, 2025, M. Krechowiec, 2022
X 50	Pekerja tertusuk, terjatuh, terjepit alat bantu kerja hingga luka sobek, cedera saraf, patah tulang, atau meninggal.	F. Ruthriana, 2025
X 51	Pekerja tergelincir dan terluka lecet atau tergores.	F. Ruthriana, 2025
<u>Pemeriksaan kesejajaran pipa</u>		
X 52	Pekerja terjepit, tertimpa pipa yang sedang diperiksa kesejajarannya	Amir Tabesh, 2019
X 53	Indikator tekanan tidak akurat saat pipa dirapatkan	DVS 2207-1:2016, Blake Peters, 2014
<u>Pemanasan ujung pipa yang akan disambung dengan plat pemanas</u>		
X 54	Suhu pemanas tidak sesuai saat pemanasan awal	DVS 2207-1:2016, Blake Peters, 2014
X 55	Indikator tekanan tidak akurat saat pemanasan awal	DVS 2207-1:2016, Blake Peters, 2014
<u>Penyambungan (las) kedua ujung pipa</u>		
X 56	Pekerja tersengat aliran listrik, mengalami luka bakar	Amir Tabesh, 2019
X 57	Suhu pemanas tidak sesuai	DVS 2207-1:2016, Blake Peters, 2014
X 58	Indikator tekanan tidak akurat	DVS 2207-1:2016, Blake Peters, 2014
<u>Menunggu waktu pendinginan kemudian pelepasan clamp</u>		
X 59	Indikator tekanan tidak akurat saat pipa yang sudah tersambung akan dilepas.	DVS 2207-1:2016, Blake Peters, 2014
X 60	Pekerja tertusuk, terjatuh, terjepit alat bantu kerja hingga luka sobek, cedera saraf, patah tulang, atau meninggal.	F. Ruthriana, 2025
X 61	Pekerja tergelincir dan terluka lecet atau tergores.	F. Ruthriana, 2025
<u>Pemeriksaan kualitas sambungan</u>		
X 62	<i>Hidrostatic test</i> gagal, terjadi kebocoran pada sambungan	Amir Tabesh, 2019, P. Micic, 2012
<u>Pekerjaan Penarikan Pipa</u>		
<u>Pullback</u>		
X 63	Pipa putus	Amir Tabesh, 2019, Blake Peters, 2014
X 64	Mata reamer terhenti/tidak bisa maju	Amir Tabesh, 2019, M. Krechowiec, 2021
X 65	Galian runtuh	Amir Tabesh, 2019, M. Krechowiec, 2021
X 66	Terjadi <i>frac-out</i> (keluarnya lumpur di tempat yang tidak diperhitungkan)	Amir Tabesh, 2019, Blake Peters, 2014, M. Krechowiec, 2021
X 67	Komposisi <i>drill fluid</i> tidak sesuai	Amir Tabesh, 2019
X 68	Pencemaran lingkungan akibat penggunaan <i>drill fluid</i> yang tidak ramah lingkungan	MAB 07 PPI, 2025
X 69	Penanganan limbah <i>drill fluid</i>	MAB 07 PPI, 2025, M. Krechowiec, 2021
X 70	Pekerjaan tertunda akibat cuaca ekstrim seperti badai, banjir dll.	Amir Tabesh, 2019, M. Krechowiec, 2021
<u>Pengujian pipa</u>		
X 71	<i>Hidrostatic test</i> gagal	Amir Tabesh, 2019

No	Faktor Risiko	Sumber
X 72	Pekerja tergelincir dan terluka lecet atau tergores.	F. Ruthriana, 2025
Penyelesaian pekerjaan		
<u>Pekerjaan pembersihan lokasi setelah HDD</u>		
X 73	Pekerja terluka lecet atau tergores akibat runtuhnya galian tanah yang tidak stabil.	F. Ruthriana, 2025
X 74	Pekerjaan tertunda akibat cuaca ekstrim seperti badai, banjir dll.	Amir Tabesh, 2019, M. Krechowicz, 2021
<u>Demobilisasi alat</u>		
X 75	Pekerja terluka lecet atau tergores akibat terkena alat yang rusak atau jatuh.	F. Ruthriana, 2025
X 76	Pekerja tergelincir dan terluka lecet atau tergores.	F. Ruthriana, 2025
X 77	Selisih faham antara masyarakat dengan tenaga kerja	Amir Tabesh, 2019
X 78	Retaknya dinding bangunan di sekitar lokasi	Amir Tabesh, 2019, Blake Peters, 2014
<u>Kordinasi dan sosialisasi</u>		
X 79	Kecelakaan warga	Amir Tabesh, 2019, Blake Peters, 2014

Berdasarkan wawancara, diperoleh bahwa tahapan kritis dalam pelaksanaan Horizontal Directional Drilling (HDD) mencakup empat tahap utama, yaitu persiapan dan pekerjaan pendahuluan, piloting, reaming dan *cleaning*, serta *pullback*. Pada tahap persiapan dan pekerjaan pendahuluan disusun desain jalur bor, rencana metode kerja, serta pengaturan lalu lintas dan penataan area kerja.

Setelah dilakukan eliminasi terhadap variabel-variabel non-teknis, diperoleh 27 faktor risiko teknis sebagaimana disajikan pada Tabel 2. Selanjutnya, berdasarkan hasil survei responden, dilakukan analisis kejadian risiko dan teridentifikasi 12 faktor risiko yang telah terjadi selama periode tahun 2022 hingga 2025, seperti ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 2. Data risiko teknis yang terjadi pada instalasi pipa PE dengan metode HDD

No	Faktor Risiko
X 10	Kondisi di dalam tanah tidak sesuai untuk pekerjaan HDD
X 11	Unit / alat bantu HDD tidak layak
X 12	Indikator pada unit HDD tidak akurat
X 14	Mata bor saat <i>piloting</i> terhenti/tidak bisa maju.
X 15	Galian runtuh saat <i>piloting</i> .
X 16	Terjadi <i>frac-out</i> (keluarnya lumpur di tempat yang tidak diperhitungkan) saat <i>piloting</i>
X 17	Komposisi <i>drill fluid</i> saat <i>piloting</i> , tidak sesuai
X 25	Deviasi arah pengeboran (<i>pilot hole</i>)
X 26	Mata <i>back reamer</i> terhenti/tidak bisa ditarik.
X 27	Galian runtuh saat <i>reaming</i> .
X 28	Terjadi <i>frac-out</i> (keluarnya lumpur di tempat yang tidak diperhitungkan) saat <i>reaming</i> .
X 29	Komposisi <i>drill fluid</i> saat <i>reaming</i> , tidak sesuai
X 45	Saat menentukan besarnya <i>drag pressure</i> , indikator tekanan tidak akurat
X 48	Indikator tekanan tidak akurat saat penyerutan dilakukan
X 53	Indikator tekanan tidak akurat saat pipa dirapatkan untuk diperiksa kelurusannya.
X 54	Suhu pemanas tidak sesuai saat pemanasan awal
X 55	Indikator tekanan tidak akurat saat pemanasan awal
X 57	Suhu pemanas tidak sesuai saat pemanasan.
X 58	Indikator tekanan tidak akurat saat pemanasan.
X 59	Indikator tekanan tidak akurat saat pipa yang sudah tersambung akan dilepas.
X 62	<i>Hidrostatic test</i> gagal, terjadi kebocoran pada sambungan
X 63	Pipa putus saat <i>pullback</i> .
X 64	Mata <i>reamer</i> terhenti/tidak bisa maju saat <i>pullback</i> .
X 65	Galian runtuh saat <i>pullback</i> .
X 66	Terjadi <i>frac-out</i> (keluarnya lumpur di tempat yang tidak diperhitungkan) saat <i>pullback</i> .
X 67	Komposisi <i>drill fluid</i> tidak sesuai saat <i>pullback</i> .
X 71	<i>Hidrostatic test</i> gagal

Sumber: penelitian sendiri, 2025

Tabel 3. Data frekuensi risiko yang terjadi

Variabel	Tahun				Jumlah
	2022	2023	2024	2025	
X 10	2	0	1	1	4
X 27	0	1	0	0	1
X 65	0	0	0	1	1
X 16	0	1	0	0	1
X 28	1	3	1	0	5
X 29	1	0	1	0	2
X 11	0	1	0	1	2
X 12	0	0	0	1	1
X 63	0	0	0	1	1
X 14	1	1	1	1	4
X 25	0	0	0	1	1
X 26	2	2	2	0	6

Sumber: penelitian sendiri, 2025

Pengelompokan tingkat kemungkinan (likelihood) kejadian risiko ditetapkan berdasarkan frekuensi dan waktu kejadiannya dengan kategori sebagai berikut: (1) hampir pasti terjadi, untuk risiko yang tercatat terjadi lebih dari tiga kali dalam periode pengamatan; (2) sangat mungkin terjadi, untuk risiko yang terjadi dalam dua tahun terakhir; (3) mungkin terjadi, untuk risiko yang terjadi dua kali dalam tiga tahun terakhir; (4) kecil kemungkinan terjadi, untuk risiko yang hanya terjadi satu kali dalam tiga tahun terakhir; dan (5) hampir tidak pernah terjadi, untuk risiko yang terakhir kali terjadi lebih dari tiga tahun yang lalu.

Tabel 4. Data dampak risiko yang terjadi berdasarkan survei

Variabel	Dampak				
	Kecil	Cukup kecil	Sedang	Besar	Sangat besar
X 10	1				
X 11			1		
X 12		1			
X 14			1		
X 25		1			
X 26			1		
X 28		1			
X 29	1				
X 63				1	
X 65		1			

Sumber: penelitian sendiri, 2025

Selanjutnya, analisis data responden untuk penilaian tingkat dampak (consequence) kerugian finansial diklasifikasikan ke dalam lima kategori, yaitu: (1) kecil, jika nilai kerugian yang ditimbulkan kurang dari Rp 50 juta; (2) cukup kecil, jika nilai kerugian berada pada rentang Rp 50–100 juta; (3) sedang, jika nilai kerugian berada pada rentang Rp 100–250 juta; (4) besar, jika nilai

kerugian berada pada rentang Rp 250–500 juta; dan (5) sangat besar, jika nilai kerugian yang berpotensi ditimbulkan melebihi Rp 500 juta.

Berdasarkan analisis risiko yang menggabungkan aspek frekuensi dan dampak, teridentifikasi tiga risiko dominan dengan konsekuensi signifikan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Risiko pertama, X63 (pipa putus saat tahap pullback), tercatat terjadi pada tahun 2025 dengan estimasi kerugian finansial antara Rp 250 juta hingga 500 juta. Risiko kedua, X14 (mata bor terhenti saat tahap piloting), terjadi setiap tahun selama periode 2022–2025 dengan estimasi kerugian finansial sebesar Rp 100 juta hingga 250 juta per kejadian. Risiko ketiga, X26 (mata reamer macet saat tahap reaming), terjadi hampir setiap tahun pada periode 2022–2024 dengan estimasi kerugian finansial yang sama, yaitu Rp 100 juta hingga 250 juta. Ketiga risiko tersebut diklasifikasikan sebagai risiko prioritas tinggi yang memerlukan perencanaan mitigasi dan pengendalian lebih lanjut.

Matriks 5 x 5		Dampak				
		1	2	3	4	5
Frekuensi	5	X10	X28	X14 X26		
	4		X12 X25 X65	X11	X63	
	3					
	2	X29				
	1					

Sumber: penelitian sendiri, 2025

Gambar 1. Matriks risiko

Mitigasi risiko

Menurut Maria Gierczak (Gierczak 2014) salah satu faktor risiko utama dalam pemasangan pipa adalah kesalahan menghitung beban dan tegangan, sehingga melebihi batas kemampuan pipa yang dapat menimbulkan berbagai masalah, seperti asumsi teknik yang keliru, pipa rusak saat dipasang, pemilihan mesin bor yang tidak

tepat, dan proyek menjadi molor. Untuk mencegah risiko-risiko tersebut, perlu penelitian kekuatan pipa lebih lanjut, terutama kuat tariknya,.

Analisis tensile strength dan pull force

Pengujian laboratorium terhadap sampel pipa HDPE-100 yang telah disambung menunjukkan bahwa nilai *tensile strength* aktual tidak selalu identik dengan nilai teoritis yang diacu dalam desain, meskipun masih berada dalam rentang yang dapat diterima menurut standar. Hasil uji tarik disajikan pada tabel 5.

Sebagai perbandingan, dilakukan perhitungan menggunakan rumus-rumus yang mengacu ke ASTM F1962-22 dengan parameter teoritis sebagai berikut:

1. Tensile strength teoritis 22,1 MPa,
2. Masa jenis teoritis 0,9530 kg/mm³
3. Koefisien friksi tanah (v_a) 0,5 (tanpa roller) di titik masuk pipa
4. Koefisien friksi lumpur (v_b) 0,4
5. Faktor keamanan desain kuat tarik @ yield (f_y) sebesar 0,4

Didapatkan perhitungan bahwa pipa diameter 315 mm dengan SDR 13,6 (PN12,5) pada kedalaman 12 meter dari permukaan tanah, sepanjang 500 meter aman ditarik jika sudut masuk sesuai rekomendasi yaitu 9° dan sudut keluar 15°.

Selanjutnya dengan menggunakan rumus yang sama namun nilai *tensile strength @ yield* diambil dari hasil pengujian sebagaimana tabel 5, maka diketahui untuk semua nilai hasil pengujian aman.

Simulasi monte carlo untuk prediksi risiko

Simulasi Monte Carlo adalah teknik komputasi yang menggunakan pengambilan sampel acak berulang kali dan analisis statistik untuk memperkirakan suatu hasil. Pada dasarnya, metode ini seperti menjalankan eksperimen virtual ribuan kali untuk melihat semua kemungkinan yang bisa terjadi, karena dalam kenyataannya banyak faktor yang sifatnya tidak pasti dan

tidak dapat diprediksi sebelumnya, (Samik Raychaudhuri 2008).

Tabel 5. Data Hasil Uji Tarik

Tanggal produksi	No sambungan.	Kode sampel	Tensile Strength @ yield (MPa)
26/06/2025	509	A1	23,4
		A2	22,7
		A3	24,3
		A4	22,9
		A5	24,0
	510	B1	22,7
		B2	22,2
		B3	22,7
		B4	22,3
		B5	22,5
	511	C1	22,7
		C2	22,7
		C3	22,8
		C4	22,5
		C5	22,8
	512	D1	22,6
		D2	21,7
		D3	20,5
		D4	22,4
		D5	23,7
	514	E1	23,0
		E2	22,8
		E3	21,5
		E4	24,2
		E5	22,9
18/12/2024	515	F1	22,6
		F2	23,5
		F3	22,1
		F4	23,4
		F5	22,6
	517	G1	22,9
		G2	22,7
		G3	23,2
		G4	21,9
		G5	22,3
	518	H1	22,1
		H2	23,1
		H3	21,6
		H4	22,0
		H5	22,2
	519	I1	20,7
		I2	22,2
		I3	21,4
		I4	21,8
		I5	22,0
	520	J1	21,6
		J2	24,1
		J3	22,0
		J4	20,8
		J5	18,5

Sumber: penelitian sendiri, 2025

Dalam konteks proyek penarikan pipa dengan metode HDD, simulasi ini dilakukan dengan memasukkan variasi data, seperti kekuatan tarik material dan koefisien

gesekan, yang direpresentasikan sebagai distribusi probabilitas, bukan angka tunggal.

Selanjutnya dilakukan perbandingan perhitungan parameter teoritis dengan hasil uji menggunakan rumus-rumus pada ASTM F1962-22.

Untuk pipa dengan spesifikasi diameter (D) sebesar 315 mm; SDR13,6; kuat tarik @ yield (σ_{pb}) sebesar 22,10 MPa dan berat jenis material (γ_a) sebesar 0,9530 kg/mm³. Dimana sudut masuk pipa (α) sebesar 9°; sudut keluar pipa (β) sebesar 15°; kedalaman lubang bor (H) sebesar 12 m dan panjang lintasan (L_{cross}) sebesar 400 m

Dari hasil perhitungan didapatkan gaya tarik pada titik B (T_B) sebesar 86,01 kN; gaya tarik pada titik C (T_C) sebesar 126,93 kN; gaya tarik pada titik D (T_D) sebesar 141,33 kN dan beban tarik yang diizinkan (ATL) sebesar 145,45 kN.

Validasi dilakukan dengan memasukkan parameter hasil uji ke dalam persamaan tersebut dan dihasilkan data sebagai berikut:

Hasil perhitungan pada terendah σ_{pb} sebesar 18,50 MPa dan γ_a sebesar 0,9587 kg/mm³ didapatkan T_A sebesar 43,83 kN; T_B sebesar 131,45 kN; T_C sebesar 197,70 kN; T_D sebesar 261,83 kN dan ATL sebesar 304,39 kN.

Sehingga dapat diputuskan bahwa hasil pengujian pipa dapat digunakan pada pekerjaan HDD menggunakan perhitungan rumus acuan.

Simulasi monte carlo

Simulasi Monte Carlo digunakan untuk mengevaluasi probabilitas keberhasilan penarikan pipa dengan mengacu pada rasio keberhasilan (RK), yang didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan izin (σ_{allow}) terhadap gaya tarik maksimum (T_{max}) pada titik A, B, C, atau D (RK: σ_{allow}/T_{max}). Variabel keluaran ini diklasifikasikan ke dalam tiga kategori sebagai berikut:

1. Pipa **berhasil ditarik sempurna** (RK: 1), tercapai apabila semua gaya tarik di

setiap titik lebih kecil dari gaya penarikan yang diizinkan (σ_{allow}).

2. Pipa **berhasil ditarik tetapi tidak sempurna** ($0,8 \leq RK < 1$), Kondisi ini mengindikasikan bahwa meskipun penarikan berhasil, terdapat satu atau beberapa titik di mana gaya tarik melebihi σ_{allow} , namun belum melampaui kemampuan pipa dalam menerima beban tarik (*tensile load*) berpotensi menyebabkan deformasi plastik pada pipa.
3. **Kegagalan penarikan** ($RK < 0,8$), Pada kondisi ini, gaya tarik di salah satu titik diperhitungkan telah melampaui *tensile load*, sehingga berisiko mengakibatkan deformasi plastis permanen. Deformasi tersebut dapat berupa perubahan bentuk (*collapse*) hingga putus, yang menyebabkan kinerja pipa tidak lagi memenuhi persyaratan standar minimum.

Tensile load ditetapkan berdasarkan tegangan izin kali faktor keamanan (*safety factor*) 1,25. Penetapan nilai faktor keamanan ini mengacu pada koefisien perencanaan (*design coefficient*) untuk pipa Polietilena. Pada simulasi memasukkan variabel random nilai distribusi normal *tensile strength* dan distribusi segitiga untuk koefisien gesek dalam lintasan. Untuk variabel tetap yang digunakan diameter pipa (400 mm); SDR pipa (13,6 atau PN 12,5); sudut masuk pipa (9°); sudut keluar pipa (15°); kedalaman lintasan (12 m) dan panjang lintasan (400 m).

Hasil simulasi menggunakan rumus-rumus standar acuan menunjukkan bahwa:

1. Pada kondisi tanah *medium to very stiff clays and silts*, probabilitas kegagalan pekerjaan adalah 11,76%, probabilitas berhasil tidak sempurna adalah 88,24%.
2. Probabilitas kegagalan pekerjaan meningkat menjadi 17,65%, sementara probabilitas berhasil tidak sempurna menjadi 82,35% pada kondisi tanah *hard clays and highly weathered shales*.

Probabilitas akan menjadi 100% jika menggunakan *roller* pada titik masuk pipa. Opsi lain adalah menggunakan PN pipa yang lebih besar.

Hasil simulasi mengungkap bahwa probabilitas gagal atau berhasilnya penarikan pipa sangat dipengaruhi oleh dua hal utama yaitu variasi kekuatan tarik material pipa dan kondisi tanah yang ditunjukkan oleh koefisien gesekan serta stabilitas lubang bor. Secara khusus, pada jenis tanah seperti “lempung keras sampai sangat keras dan lanau” serta “lempung sangat keras dan batuan lapuk”, peluang keberhasilan penarikan bisa meningkat signifikan jika batas gaya tarik ditetapkan

berdasarkan kekuatan tarik aktual material dengan faktor keamanan yang konservatif.

Temuan penting lainnya adalah, analisis risiko ini menunjukkan bahwa beberapa skenario operasi yang secara perhitungan konvensional (deterministik) dianggap aman, ternyata masih menyimpan probabilitas kegagalan yang tidak boleh diabaikan ketika variabilitas data diperhitungkan. Hal ini membuktikan bahwa pendekatan probabilistik dengan Monte Carlo memberikan gambaran risiko yang jauh lebih lengkap dan kaya dibandingkan sekadar perhitungan tunggal yang kaku. Contoh simulasi sebagaimana ditampilkan pada tabel 6.

Tabel 6. Penggunaan aplikasi excel untuk Simulasi Monte Carlo untuk

Data for HDD calculation																				
Pipe specification				Tensile Load		Path profile			Calculation					Conclusion		pull back successful but not perfectly	pull back successful perfectly	Success ratio		
Outside Diameter	SDR or DR	Tensile Strength @ yield point	specific gravity of pipe	Safety factor of tensile strength	Allowable tensile force	Safety factor of tensile load	Tensile load	Path of bore	Coef. of friction	Pull force (T)										
OD		γ_s	f_y	σ_{allow}			L_{max}	drill string μ_s	shurry μ_s	T_A	T_B	T_C	T_D							
mm		Mpa	kg/mm ³		kN		kN	m		v_s	kN	kN	kN	kN						
160	13,6	23,2	0,9530	1	70,561	1,25	88,5762	500	0,279	0,343	7,547	22,864	41,195	49,656	pull back successful	perfectly	0	0	1	1,0000
160	13,6	24,0	0,9530	1	73,417	1,25	91,7708	500	0,183	0,263	4,876	17,534	32,323	37,763	pull back successful	perfectly	0	0	1	1,0000
160	13,6	22,3	0,9530	1	68,164	1,25	85,2049	500	0,233	0,294	5,987	19,638	35,733	42,286	pull back successful	perfectly	0	0	1	1,0000
160	13,6	19,9	0,9530	1	61,044	1,25	76,3044	500	0,407	0,463	11,235	30,840	54,589	68,551	pull back successful	not perfect	0	1	0	0,9905
160	13,6	22,0	0,9530	1	67,230	1,25	84,0380	500	0,319	0,380	8,673	25,289	45,314	55,362	pull back successful	perfectly	0	0	1	1,0000
160	13,6	23,5	0,9530	1	71,818	1,25	89,7721	500	0,418	0,474	11,570	31,569	55,791	70,294	pull back successful	perfectly	0	0	1	1,0000
160	13,6	20,5	0,9530	1	62,632	1,25	78,2899	500	0,357	0,416	9,787	27,695	49,360	61,058	pull back successful	perfectly	0	0	1	1,0000
160	13,6	23,4	0,9530	1	71,770	1,25	89,7125	500	0,172	0,255	4,580	16,977	31,409	36,568	pull back successful	perfectly	0	0	1	1,0000
160	13,6	23,1	0,9530	1	70,606	1,25	88,2570	500	0,326	0,388	8,898	25,774	46,132	56,506	pull back successful	perfectly	0	0	1	1,0000
160	13,6	24,3	0,9530	1	74,501	1,25	92,8767	500	0,127	0,221	3,365	14,689	27,627	31,667	pull back successful	perfectly	0	0	1	1,0000
160	13,6	22,7	0,9530	1	69,325	1,25	86,6568	500	0,226	0,297	6,076	19,807	36,026	42,648	pull back successful	perfectly	0	0	1	1,0000
160	13,6	22,4	0,9530	1	68,503	1,25	85,6285	500	0,222	0,293	5,943	19,554	35,616	42,104	pull back successful	perfectly	0	0	1	1,0000
160	13,6	23,0	0,9530	1	70,515	1,25	87,8934	500	0,283	0,347	7,673	23,134	41,655	50,289	pull back successful	perfectly	0	0	1	1,0000
160	13,6	22,0	0,9530	1	67,258	1,25	84,0728	500	0,264	0,329	7,121	21,950	39,631	47,514	pull back successful	perfectly	0	0	1	1,0000
160	13,6	20,6	0,9530	1	63,117	1,25	78,5958	500	0,184	0,264	4,896	17,572	32,386	37,846	pull back successful	perfectly	0	0	1	1,0000
160	13,6	22,5	0,9530	1	68,831	1,25	86,0389	500	0,422	0,477	11,686	31,821	56,206	70,899	pull back successful	not perfect	0	1	0	0,9708
160	13,6	21,0	0,9530	1	64,275	1,25	80,3434	500	0,237	0,305	6,384	20,399	36,989	43,933	pull back successful	perfectly	0	0	1	1,0000
160	13,6	22,5	0,9530	1	68,898	1,25	86,1229	500	0,302	0,365	8,202	24,274	43,594	52,969	pull back successful	perfectly	0	0	1	1,0000
160	13,6	23,2	0,9530	1	70,935	1,25	88,6684	500	0,254	0,320	6,840	21,347	38,596	46,104	pull back successful	perfectly	0	0	1	1,0000

Sumber: penelitian sendiri, 2025

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa pekerjaan instalasi pipa dengan metode *Horizontal Directional Drilling* (HDD) menyimpan banyak potensi bahaya. Ditemukan 76 faktor risiko dalam instalasi HDD, dan 27 di antaranya risiko teknis yang muncul khusus pada tahap penarikan pipa (*pullback*). Tiga yang paling kritis adalah pipa putus saat penarikan, mata bor yang terhenti di dalam tanah, serta mata reamer yang macet dan sulit ditarik atau digerakkan.

Selain itu, penelitian ini menegaskan bahwa penggunaan nilai *tensile strength* pipa HDPE-100 yang hanya didasarkan pada data teoritis sangat berisiko. Praktik ini dapat

membuat perhitungan gaya tarik (*pull force*) menjadi kurang akurat, sehingga peluang kegagalan penarikan pipa meningkat. Untuk itu dilakukan pendekatan yang lebih komprehensif dengan menggabungkan uji *tensile strength* di laboratorium sesuai standar ISO 527-1 dan ISO 6259-3, perhitungan *pull force* berdasarkan ASTM F1962-22, serta kerangka manajemen risiko mengacu pada SNI ISO 31000.

Melalui kombinasi pendekatan teknis dan manajerial tersebut, gambaran risiko pada saat penarikan pipa menjadi lebih realistis dan mendekati kondisi lapangan yang sebenarnya. Penggunaan simulasi *Monte Carlo* terbukti efektif sebagai alat kuantitatif

untuk memperkirakan probabilitas kegagalan dan menentukan batas gaya tarik aman pada berbagai jenis tanah dan konfigurasi jalur pipa. Sehingga *Monte Carlo* tidak hanya menghasilkan angka probabilitas kegagalan, tetapi juga memberikan dasar numerik untuk pengambilan keputusan manajemen risiko,

Daftar Pustaka

- ASTM. 2025. *ASTM F1962-22 Standard Guide for Use of Maxi-Horizontal Directional Drilling for Placement of Polyethylene Pipe or Conduit Under Obstacles, Including River Crossings*.
- BSN. 2015. *SNI 4829-1:2015 Sistem Perpipaan Plastik - Pipa Polietilena (PE) Dan Fiting Untuk Sistem Penyediaan Air Minum – Bagian 1: Umum*.
- DVS. 2016. *DVS 2207-1 Welding of Thermoplastics – Heated Tool Welding of Pipes, Pipeline Components and Sheets Made of PE*.
- Gierczak, Maria. 2014. “The Qualitative Risk Assessment of MINI, MIDI and MAXI Horizontal Directional Drilling Projects.” *Tunnelling and Underground Space Technology* 44:148–56. doi:10.1016/j.tust.2014.07.010.
- ISO. 2015. *ISO 6259-3:2015 Thermoplastics Pipes - Determination of Tensile Properties Part 3: Polyolefin Pipes*. Vol. 2015.
- ISO. 2019. *ISO 527-1:2019 Plastics — Determination of Tensile Properties — Part 1: General Principles*.
- Kong, Lingrong, Yu Wang, and Zhiqiao Wang. 2022. “Rig Load Prediction Model in Horizontal Directional Drilling within Water-Rich Unstable Strata.” *KSCCE Journal of Civil Engineering* 26(2):556–68. doi:10.1007/s12205-021-0088-8.
- Krechowicz, Maria. 2021. “The Hybrid Fuzzy Fault and Event Tree Analysis in the Geotechnical Risk Management in HDD Projects.” *Georisk* 15(1):12–26. doi:10.1080/17499518.2020.1723646.
- Krechowicz, Maria, and D. Ph. 2020. “Comprehensive Risk Management in Horizontal Directional Drilling Projects.” 146(5):1–11. doi:10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001809.
- Samik Raychaudhuri. 2008. “Introduction to Monte Carlo Simulation.” *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference* 91–100.
- Tabesh, Amir, Mohammad Najafi, Zahra Kohankar, Mohammadreza Malek Mohammadi, and Taha Ashoori. 2019. “Risk Identification for Pipeline Installation by Horizontal Directional Drilling (HDD).” *Pipelines 2019: Multidisciplinary Topics, Utility Engineering, and Surveying -*

Proceedings of Sessions of the Pipelines 2019 Conference (July):141–50. doi:10.1061/9780784482506.015.

Vaughan, E. J., and Tapen Sinha. 1994. *Fundamentals of Risk and Insurance*. Vol. 61.