Procedia of Engineering and Life Science Vol. 10 No.1 2026
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Muhammadiyah Sidoarjo

Analysis of quality control of PE pipe installation in gas network project at PT. XYZ

Analisis pengendalian kualitas pemasangan pipa PE pada proyek jaringan gas di PT. XYZ

Ali Adi[1], Hana Catur Wahyuni[2]

[1, 2, 3, 4, 5] Program Studi Manajemen, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Email Penulis Korespondensi: aliadi0404@gmail.com[1] hanacatur@umsida.ac.id[2]

Abstract. *General Background Quality control implementation within gas distribution pipeline installation ensures operational reliability and structural integrity. Specific Background Polyethylene pipes are widely chosen for gas distribution projects due to flexibility, corrosion resistance, and jointing efficiency, requiring rigorous pressure testing prior to commissioning. Knowledge Gap Although pneumatic testing using pressurized air is commonly conducted to verify joint strength, empirical evaluations documenting step-up holding pressure stability and operational quality control protocols during field assembly remain limited. Aims This study evaluates quality control procedures during 180 mm polyethylene pipe installation in a gas network project at PT. XYZ using the pneumatic test method. Results Qualitative and quantitative case evaluation shows that holding test pressures at 43.551 psig (July) and 42.451 psig (August) for 4.5 hours maintained absolute stability without pressure drops or joint leaks. Novelty Systematic step-up, holding, and step-down pressure monitoring validates butt fusion and electrofusion integrity under pressurized air conditions in distribution pipelines. Implications Adhering to standardized pneumatic test protocols guarantees network safety, minimizes minor joint imperfections, and prevents long-term gas leakage.*

Keywords *Polyethylene Pipe, Quality Control, Pneumatic Test, Gas Distribution, Joint Integrity*

Abstrak Latar Belakang Umum Penerapan pengendalian mutu dalam pemasangan pipa distribusi gas menjamin keandalan operasional dan integritas struktural. Latar Belakang Khusus Pipa polietilen banyak dipilih untuk proyek distribusi gas karena fleksibilitas, ketahanan terhadap korosi, dan efisiensi penyambungan, sehingga memerlukan uji tekanan yang ketat sebelum dioperasikan. Kesenjangan Pengetahuan Meskipun uji pneumatik menggunakan udara bertekanan umumnya dilakukan untuk memverifikasi kekuatan sambungan, evaluasi empiris yang mendokumentasikan stabilitas tekanan tahan step-up dan protokol pengendalian mutu operasional selama perakitan di lapangan masih terbatas. Tujuan Penelitian ini mengevaluasi prosedur pengendalian mutu selama pemasangan pipa polietilen berdiameter 180 mm dalam proyek jaringan gas di PT. XYZ dengan menggunakan metode uji pneumatik. Hasil Evaluasi kasus secara kualitatif dan kuantitatif menunjukkan bahwa pemeliharaan tekanan uji pada 43,551 psig (Juli) dan 42,451 psig (Agustus) selama 4,5 jam mempertahankan stabilitas mutlak tanpa penurunan tekanan atau kebocoran sambungan. Inovasi: Pemantauan tekanan secara sistematis—mulai dari peningkatan, penahanan, hingga penurunan tekanan—memvalidasi integritas sambungan fusi ujung dan fusi listrik dalam kondisi udara bertekanan pada pipa distribusi. Implikasi: Kepatuhan terhadap protokol uji pneumatik yang terstandarisasi menjamin keamanan jaringan, meminimalkan ketidaksempurnaan sambungan minor, dan mencegah kebocoran gas jangka panjang.

Kata Kunci: Pipa Polietilen, Pengendalian Kualitas, Uji Pneumatik, Distribusi Gas, Integritas Sambungan

I. PENDAHULUAN

PT. XYZ adalah perusahaan kontraktor nasional yang fokus pada bidang *Engineering, Procurement, and Construction (*EPC) di industri minyak dan gas bumi (migas). Dalam industri konstruksi jaringan perpipaan, kualitas pipa yang digunakan sangat menentukan keberhasilan instalasi dan keberlangsungan fungsi sistem secara keseluruhan. Salah satu jenis pipa yang umum digunakan dalam proyek pemasangan jaringan air bersih maupun gas adalah pipa *Polyethylene* (PE), khususnya tipe PE 180 yang dikenal memiliki kualitas yang baik, seperti ketahanan tinggi terhadap tekanan dan korosi.

Kualitas memegang peranan penting sebagai kriteria penilaian kesiapan industri. Dalam proses produksi, kegagalan dalam memenuhi standar produk sering kali menyebabkan produk cacat atau rusak. Oleh karena itu, perusahaan harus berbenah untuk mencegah dan mengurangi jumlah produk cacat yang tidak memenuhi ketetapan standarisasi [1]. Kualitas produk merupakan suatu hal yang penting dalam menentukan kepuasan pemilihan suatu produk oleh konsumen setelah melakukan pembelian dan pemakaian terhadap suatu produk atau jasa Produk dengan kualitas baik akan lebih menarik bagi konsumen Kualitas produk yang dihasilkan oleh suatu perusahaan bergantung pada kriteria dan standar tertentu yang telah ditentukan [2]. Kualitas pipa PE memiliki peran yang sangat penting dalam menjamin keamanan dan keandalan sistem distribusi gas.

Pipa merupakan tabung berbentuk silinder yang memiliki diameter dan ketebalan tertentu, berfungsi untuk mengalirkan fluida berupa cairan atau gas. Pipa plastik dibuat dari bahan dasar minyak mentah (*crude oil*) yang telah melalui proses fisika dan kimia. Jenis pipa plastik yang sering digunakan adalah *Polyvinyl Chloride* (PVC) berwarna abu-abu dan *Polyethylene* (PE) yang berwarna hitam atau kuning. Kedua jenis pipa ini memiliki perbedaan utama pada tingkat fleksibilitasnya, di mana pipa PE bersifat lentur sehingga bisa digulung, sedangkan pipa PVC bersifat kaku dan tidak dapat digulung. Salah satu material pipa yang digunakan perusahaan adalah pipa *Polyethylene* (PE) massa jenis tinggi atau high density polyethylene (HDPE) [3]. Pipa MDPE (*Medium-Density Polyethylene*) atau pipa PE banyak digunakan dalam sistem distribusi gas karena memiliki berbagai keunggulan. Pipa ini tahan terhadap kondisi cuaca dan lingkungan yang beragam, termasuk tanah yang tidak stabil. Selain itu, pipa MDPE bersifat fleksibel, ringan, dan mampu menahan tekanan dari dalam maupun luar, sehingga lebih efisien serta ekonomis untuk instalasi jangka panjang karena dapat mengurangi risiko kerusakan dan biaya perawatan [4]. Salah satu metode pengujian kebocoran pada pipa PE adalah Pneumatic Test untuk mengetahui ketahanan pipa dan sambungannya. Meskipun pipa PE memiliki berbagai macam kelebihan, tetap diperlukan *quality control* (QC) pada saat penyambungan untuk menjamin tidak adanya kebocoran pada sambungan maupun badan pipa setelah proses instalasi [5].

Quality Control (QC) adalah serangkaian kegiatan yang dilakukan secara sistematis, terencana, dan berkesinambungan untuk memastikan bahwa kualitas suatu produk tetap sesuai dengan standar, spesifikasi, serta persyaratan yang telah ditetapkan sebelumnya. QC mencakup proses pemeriksaan, pengujian, pengawasan, dan evaluasi pada setiap tahapan produksi, mulai dari bahan baku, proses pembuatan, hingga produk akhir [6]. *Quality control* merupakan serangkaian aktivitas yang terintegrasi secara efektif untuk menjaga, mengembangkan, serta meningkatkan mutu produk maupun jasa dengan cara yang paling efisien, sekaligus memastikan terpenuhinya kepuasan pelanggan. Penerapan pengendalian mutu juga berfungsi sebagai langkah preventif untuk mencegah terjadinya cacat produk, menekan biaya produksi, serta meningkatkan daya saing perusahaan di pasar [7]. Selain itu *quality control* juga merupakan aktivitas yang melibatkan seluruh unsur dalam perusahaan, mulai dari karyawan tingkat bawah hingga manajemen puncak. Tujuan penerapan *quality control* adalah meninjau, mengembangkan, serta menghasilkan produk yang sesuai dengan kebutuhan konsumen. Dalam pelaksanaannya, quality control mencakup pengendalian mutu produk, pemantauan proses, serta pengawasan terhadap kinerja tenaga kerja. Dengan penerapan *quality control* yang baik, perusahaan dapat memastikan produk yang dihasilkan sesuai dengan standar yang telah ditetapkan, mengurangi pemborosan, serta meningkatkan kepuasan pelanggan [8]. Dengan penerapan *Quality Control* yang baik, perusahaan dapat mencegah terjadinya cacat produk, mengurangi risiko kesalahan, menjaga konsistensi mutu, serta memastikan produk yang dihasilkan aman, layak, dan dapat diterima oleh pelanggan. Selain itu, QC juga berperan penting dalam meningkatkan efisiensi produksi, menekan biaya kerugian akibat produk rusak, serta mendukung terciptanya kepuasan pelanggan dan daya saing perusahaan dalam jangka panjang [9], [10]. Sehingga tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis proses pengendalian kualitas pada pemasangan pipa Polyethylene (PE) pada proyek jaringan gas yang dilaksanakan oleh PT. XYZ, pada tahap pengujian tekanan menggunakan metode pneumatic test, guna memastikan bahwa sistem perpipaan yang terpasang memenuhi standar kualitas, keamanan, serta mampu beroperasi secara optimal tanpa terjadi kebocoran pada jaringan distribusi gas.

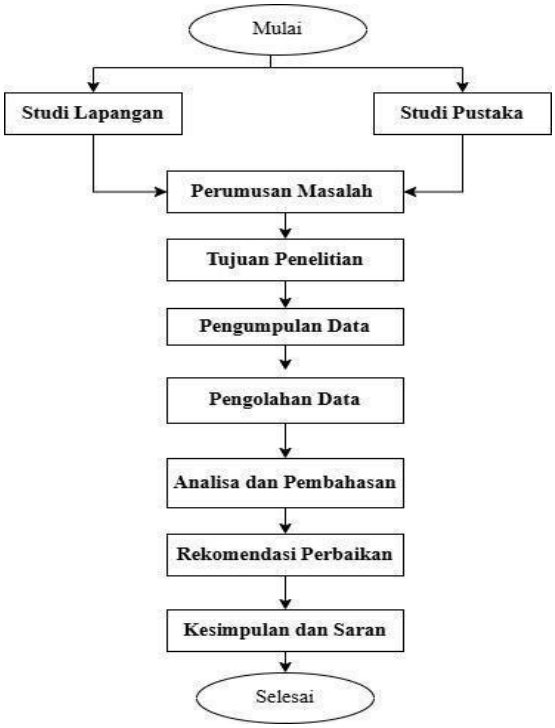
METODE

Waktu dan Lokasi Penelitian

Pelaksanaan penelitian dilakukan pada bulan Juni sampai dengan bulan September 2025 berlokasi di PT. XYZ. Metode yang dilakukan dalam pelaksanaan penelitian ini menggunakan *mixed methods*, yaitu integrasi metode kualitatif dan kuantitatif. Metode kuantitatif dilakukan dengan melakukan observasi langsung pada proses *quality control* dengan menerapkan serangkaian tes yang dilakukan perusahaan. Sedangkan metode kuantitatif dilakukan dengan serangkaian wawancara dengan manajer kualitas dan produksi PT. XYZ.

Tahapan Penelitian

Berdasarkan pelaksanaan penelitian, berikut tahapan penelitian. Gambar 1 merupakan tahapan penelitian.



Gambar 1. Tahapan penelitian

Berdasarkan gambar 1 dapat dijelaskan tahapan penelitian sebagai berikut:

a. Rumusan masalah

Bagaimana penyambungan pipa PE sesuai dengan standar perpipaan, dengan menerapkan metode Pneumatic Test.

b. **Tujuan penelitian**

Tujuan penelitian ini untuk menganalisis proses pengendalian kualitas pada pemasangan pipa Polyethylene (PE) pada proyek jaringan gas yang dilaksanakan oleh PT. XYZ Jayamahe.

c. Pengumpulan Data

Pengumpulan data didapatkan pada proses penyambungan pipa PE (*Polyethylene*). Pengumpulan data didapatkan wawancara supervisor dan leader divisi pengendalian kualitas. Selain itu data didapatkan dari data sekunder, data sekunder tersebut adalah data pneumatic test pipa 180 mm. Serta jenis alat yang digunakan saat pelaksanaan pneumatic test.

d. Pengolahan Data

Pengolahan data dilakukan dengan pendekatan statistik deskriptif. Dimana data hasil *pneumatic test* di deskripsikan berdasarkan hasil layak dan tidak layak.

e. Analisa dan pembahasan

Pada tahap ini dilakukan analisa dan pembahasan hasil pengolahan data. Hasil analisa dan pembahasan untuk menggetahui hasil dari pneumatic test tersebut memenuhi standar.

f. Rekomendasi dan Perbaikan

Rekomendasi perbaikan disusun berdasarkan hasil analisis dan pembahasan dari uji pipa dengan pnematic test. Rekomendasi mencakup saran perbaikan pada proses pengujian pnuematik pada pipa PE distribusi 180.

g. Kesimpulan dan Saran

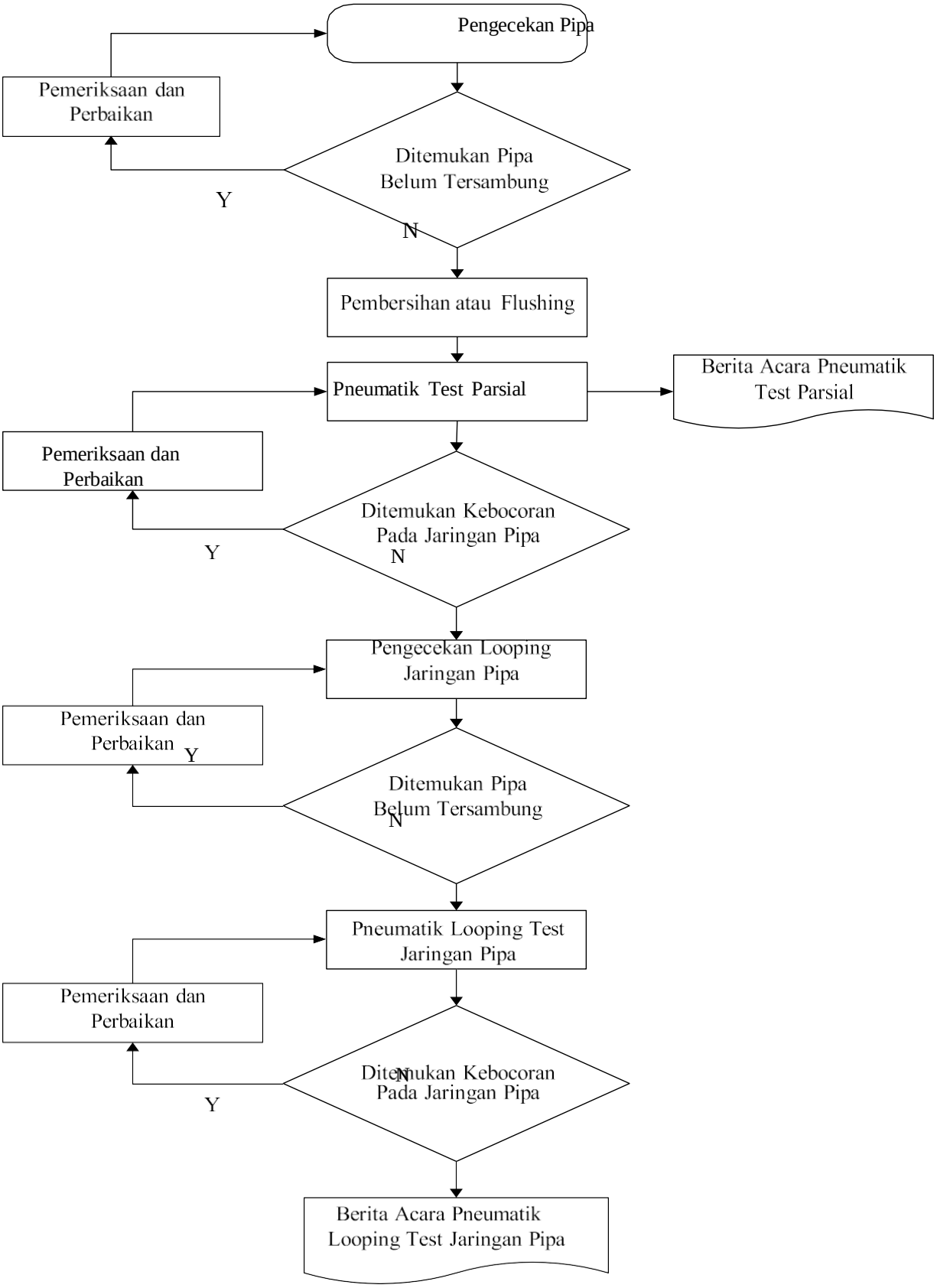
Tahap ini berisi kesimpulan hasil penelitian menjawab dari tujuan penelitian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengumpulan data

Pengumpulan data dilakukan melalui observasi langsung di lapangan dan wawancara dengan leader dan supervisor divisi pengendalian kualitas. Hasil pengumpulan data berupa alur proses pengujian pneumatic test pada pipa PE distribusi 180 mm. Selain itu juga mengidentifiksi alat yang digunakan saat pelaksanaan pengujian pnematic test, serta data hasil pengujian pada bulan Juli dan Agustus 2025. Gambar 2 berupa alur proses pengujian pneumatic test pada pipa PE distribusi 180 mm. Tabel 1 merupakan data peralatan yang digunakan pada saat pengujian pipa PE distribusi 180 mm. Berdasarkan

hasil observasi selama kegiatan magang, pada proses pengendalian kualitas pemasangan pipa PE dapat laksanaan quality control di PT. XYZ dilakukan secara sistematis sesuai dengan flowchart Gambar 2. Berikut ini adalah diagram *flowchart* proses *pnuematik test*:



Gambar 2. *Flowchart* proses pengujian *pnuematic* pada pipa PE distribusi 180 mm.

Tabel 1. merupakan identifikasi peralatan yang digunakan dalam pengujian pipa PE distribusi 180 mm.

No	Nama Alat	Fungsi
1	*Pressure Recorder*	Mencatat perubahan tekanan selama proses *pneumatic test*.
2	*Temperature Recorder*	Mencatat perubahan suhu selama proses pengujian
3	*Pressure Gauge*	Mengukur tekanan udara di dalam sistem pipa saat pengujian.
4	*Temperature Gauge*	Mengukur suhu udara atau fluida di dalam sistem saat pengujian.
5	*Dead Weight Tester*	Mengkalibrasi *pressure gauge* agar pengukuran tekanan akurat.
6	*Air Compressor*	Menghasilkan dan memasukkan udara bertekanan ke dalam pipa.
7	*Valve / Regulator Tekanan*	Mengatur besar kecilnya tekanan udara yang masuk ke pipa.
8	*Soap Solution (Bubble Test)*	Mendeteksi kebocoran pada sambungan pipa melalui gelembung sabun.

B. Pengolahan Data

Berdasarkan pengumpulan data pada jenis alat dan prosedur tahapan pada proses pengujian pipa PE disribusi 180 mm dengan metode *pneumatic test.* Tahap selanjutnya adalah melakukan pengujian pipa PE disribusi 180 mm. Hasil pengujian pipa ini terdapat pada tabel 2. Berdasarkan tabel 2 hasil pengujian pneumatic test menunjukkan bahwa tekanan tetap pada step up yang menandakan tidak terdapat kebocoran, jika tekanan tetap saat di naikan, maka pipa dapat tingkatkan ke *step up* yang lebih tinggi yang menandakan pipa tidak terdapat kebocoran, setelah itu dilakukan flashing untuk menggeluarkan nitrogen (N_2) agar gas dapat di distribusikan dengan aman.

Tabel 2. Hasil pengujian pneumatic test bulan Juli dan Agustus 2025

Laporan pneumatic Test Bulan Juli 2025						
Holding Time 4 hours 30 minutes		Test Pressure psig		Temperatur Gauge ºF		Remarks
No	Time (WIB)	Pressure (psig)		Temperture Gauge (ºF)		
Bulan Juli 2025						
1	11:50		13,053			Step Up 25%
2	12:05		33,358			Step Up 75%
3	12:21		43,551			Step Up 100%
4	13:30		43,551			Start Holding 100%
5	13:30 - 14:30		43,551			Holding 1
6	14:30 - 15:30		43,551			Holding 2
7	15:30 - 16:30		43,551			Holding 3
8	16:35		43,551			Finnish Holding 100%
9	16:49		33,358			Step Down 75%
10	17:03		13,053			Step Down 25%
11	17:36		0			Step Down 0% / Finnish
Bulan Agustus 2025						
1	09:55		12,453			Step Up 25%
2	10:10		32,258			Step Up 75%
3	10:25		42,451			Step Up 100%
4	10:30		42,451			Start Holding 100%
5	10:30 - 11:30		42,451			Holding 1

6	11:30 - 12:30		42,451			Holding 2
7	12:30 - 13:30		42,451			Holding 3
8	13:30		42,451			Finnish Holding 100%
9	13:40		32,358			Step Down 75%
10	13:55		12,153			Step Down 25%
11	14:15		0			Step Down 0% / Finnish

C. Analisa dan Pembahasan

Berdasarkan hasil pengujian Pneumatic Test yang dilakukan pada jaringan pipa PE berdiameter 180 mm di proyek pembangunan Jargas pengujian dilaksanakan selama 4 jam 30 menit dengan metode step up – holding – step down.

1. *Step Up*: Tekanan dinaikkan secara bertahap hingga mencapai 25%, 75%, dan akhirnya 100% dari tekanan uji yang ditetapkan.
2. Proses *Holding*:

a. pada bulan Juli tekanan maksimum mencapai ± 43,511 psig, dilakukan proses holding tekanan selama beberapa tahap (Holding 1, Holding 2, Holding 3) untuk memastikan stabilitas tekanan dan mendeteksi adanya potensi kebocoran. Pada tekanan maksimum tersebut jika mencapai tahap finnish holding, maka akan dilakukan tahap step down secara bertahap sampai step down finnish (0%).

b. pada bulan Agustus tekanan maksimum mencapai ± 42,451 psig, dilakukan penahanan tekanan selama beberapa tahap (Holding 1, Holding 2, Holding 3) untuk memastikan stabilitas tekanan dan mendeteksi adanya potensi kebocoran. Pada tekanan maksimum tersebut jika mencapai tahap finnish holding, maka akan dilakukan tahap step down yaitu prosedur normalisasi sistem sebelum pengujian dinyatakan selesai. Prosedur step down dilakukan secara bertahap dimulai dari 75%, kemudian 25% hingga 0%.

c. Hasil Uji Selama proses pengujian, tekanan tercatat stabil dibulan Juli pada kisaran 43,511 psig selama periode holding. Sedangkan pada bulan Agustus pada kisaran 42,451 psig selama periode holding. Pada bulan Juli dan Agustus tidak ditemukan penurunan tekanan yang signifikan, dan tidak ada indikasi kebocoran pada jaringan pipa. Pada akhir pengujian, kondisi sistem kembali normal dengan tekanan turun ke 0 psig sesuai prosedur.

3. Hasil ini menunjukkan bahwa sambungan pipa PE telah memenuhi standar kualitas yang berlaku, baik dari segi kekuatan maupun ketahanan terhadap tekanan operasi.
4. Stabilnya tekanan pada saat holding mengindikasikan bahwa kualitas sambungan butt fusion dan electrofusion yang diterapkan di lapangan cukup baik.
5. Tidak adanya kebocoran juga membuktikan efektivitas proses QC yang dilakukan, mulai dari pemeriksaan material, inspeksi visual sambungan, hingga pelaksanaan uji pneumatic sesuai prosedur.

D. Rekomendasi Perbaikan

Berdasarkan adata penggujian ditemukan waktu pengambilan data yang tidak konsisten yaitu setiap 15 menit pada proses step up. Sehingga rekomendasi pernaikannya pada tahap ini harus sesuai dengan Standar Operasional Prosedur (SOP). Selain itu juga dilakukan monitoring dan evalusasi setiap tahapan dari aspek waktu dan kesehatan dan keselamatan kerja (K3).

KESIMPULAN

Kesimpulan Hasil Uji Berdasarkan laporan pengujian, jaringan pipa PE dinyatakan lulus (accepted, no leak) dan layak untuk digunakan sebagai jalur distribusi gas rumah tangga. Hasil ini menegaskan bahwa penerapan pneumatic test sangat penting dalam memastikan keandalan sistem perpipaan sebelum dioperasikan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga laporan magang dengan judul "Analisis Proses Quality Control pada Pemasangan Pipa PE (Polyethylene) di PT. XYZ" dapat diselesaikan dengan baik. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, dosen pembimbing, serta seluruh jajaran PT. XYZ khususnya supervisor dan tim Quality Control yang telah memberikan kesempatan, bimbingan, dan dukungan selama pelaksanaan magang. Tidak lupa penulis juga berterima kasih kepada keluarga dan semua pihak yang telah membantu, baik secara langsung maupun tidak langsung, hingga terselesaikannya laporan ini.

REFERENSI

[1]M. Shania, R. J. Andryani, and C. Jesselyn, "Analisis Total Quality Control sebagai upaya meminimalisasi resiko kerusakan produk otomotif pada PT. XYZ," *Jurnal Teknik Industri UPN Veteran Jawa Timur*, pp. 146–152, 2022.

[2]K. Riyanto and Satinah, "Pengaruh penetapan harga, kualitas produk, dan kualitas pelayanan terhadap kepuasan pelanggan," *Lentera Manajemen Pemasaran*, vol. 1, no. 1, pp. 30–37, 2023.

[3]Risdiyanto and A. Prawito, "Analisis kelayakan teknis pipa HDPE pada jaringan pipa berdasarkan kelas pipa," *Perencanaan dan Rekayasa Sipil*, vol. 8, no. 2, pp. 132–136, 2025.

[4]T. N. Rohmannudin, M. F. Amrulloh, D. Nafi, and M. Fachri, "Pelayanan pengujian kekuatan pipa HDPE di Laboratorium Kimia Material Departemen Teknik Material dan Metalurgi," *PENAMAS*, vol. 4, no. 1, pp. 116–129, 2024.

[5]M. Al and B. Ontowirjo, "Penggunaan metode pneumatic test pada uji kebocoran pipa MDPE di proyek Customer Attachment PT. Chalista Mandiri Energy Sedayu City," *SPRING*, vol. 5, no. 1, pp. 45–55, 2023.

[6]K. Bahasyim and M. Kasmuri, "Pelaksanaan pemasangan pipa High Density Polyethylene (HDPE) metode manual boring," *Jurnal Ilmiah Indonesia*, vol. 8, no. 1, pp. 88–97, 2025.

[7]Z. I. Kristiono and A. Mustajab, "Dampak pembelajaran luring di masa pandemi terhadap hasil belajar kognitif siswa pada mata pelajaran IPS," *Edueksos: Jurnal Pendidikan Sosial Ekonomi*, vol. 10, no. 2, pp. 79–94, 2021, doi: 10.24235/edueksos.v10i2.9231.

[8]N. Sari, A. Yani, and S. Isnaniati, "Analisis quality control dan resiko kerusakan terhadap biaya kualitas pada PT. Sukses Mitra Sejahtera," *Jurnal Ilmiah Cendekia Akuntansi*, vol. 8, no. 3, pp. 1–12, 2023, doi: 10.32503/cendekiaakuntansi.v8i3.3543.

[9]P. Habeahan and W. Kushartomo, "Analisis penerapan quality control pada proyek Sky House Alam Sutera Tangerang," *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, vol. 6, no. 3, pp. 557–562, 2023, doi: 10.24912/jmts.v6i3.22990.

[10] S. Siallagan and D. S. Manik, "Analysis of product quality control methods to prevent production defects," *JIME*, vol. 8, no. 2, pp. 145–155, 2024.

[11] J. M. Garcia, R. P. Martinez, and H. L. Gomez, "Field verification of electrofusion joint integrity in polyethylene gas distribution networks," *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, vol. 15, no. 2, art. no. 04024008, 2024, doi: 10.1061/JPSEA2.PSENG-1520.

[12] K. T. Chen, Y. S. Lin, and M. H. Wu, "Pneumatic pressure testing protocols for medium-density polyethylene pipelines in urban gas infrastructure," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 185, pp. 310–322, 2024, doi: 10.1016/j.psep.2024.03.045.

[13] R. D. Watson and E. F. Miller, "Quality control frameworks and leak detection methods for gas pipeline installation," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 209, art. no. 105180, 2024, doi: 10.1016/j.ijpvp.2024.105180.

[14] L. Ivanov, V. M. Petrov, and S. A. Smirnov, "Structural reliability and pressure holding evaluation of butt fusion joints in HDPE piping," *Thin-Walled Structures*, vol. 198, art. no. 111720, 2025, doi: 10.1016/j.tws.2024.111720.

[15] S. H. Park and J. W. Choi, "Risk assessment and quality assurance of underground gas distribution lines during EPC construction projects," *Safety Science*, vol. 171, art. no. 106380, 2025, doi: 10.1016/j.ssci.2024.106380.