

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini disajikan hasil penelitian yang telah dilaksanakan, dengan pembahasan secara mendalam terhadap temuan-temuan yang diperoleh. Data hasil penelitian dipaparkan secara sistematis guna memberikan gambaran yang jelas dan menyeluruh mengenai pencapaian penelitian. Selanjutnya, hasil tersebut dianalisis serta diinterpretasikan dengan merujuk pada kerangka teori dan tinjauan pustaka yang telah diuraikan pada bab sebelumnya.

4.1 Percobaan Alat

Percobaan ini dilakukan untuk menguji kinerja alat manual butt fusion dalam penyambungan pipa HDPE. Proses dimulai dengan meratakan ujung pipa menggunakan *milling cutter*, kemudian memanaskannya menggunakan *heating plate* hingga mencapai suhu fusi. Setelah cukup panas, kedua ujung pipa segera ditekan dan disatukan, lalu didiamkan hingga dingin agar terbentuk sambungan yang kuat. Selama percobaan, diamati parameter seperti suhu, tekanan, dan waktu. Hasil menunjukkan bahwa jika prosedur diikuti dengan benar, alat ini mampu menghasilkan sambungan yang baik dan kuat.



Gambar 4. 1 Proses percobaan mesin las manual butt fusion

4.2 Menghitung Daya Mesin *Manual Butt Fusion*

4.2.1 *Daya Heating Plate*

Plat pemanas adalah komponen utama yang memanaskan pipa HDPE sebelum penyambungan. Karena spesifikasi tidak menyebutkan konsumsi daya masing-masing komponen, kita asumsikan 70% dari total daya digunakan untuk pemanas (amd piping) :

Diketahui :

P Total *Heating Plate* adalah 1000 W / 1 Kw

$$P_{heater} = 0.7 \times P_{total}$$

$$\begin{aligned} P_{heater} &= 0.7 \times 1000 \text{ W} \\ &= 700 \text{ W} \end{aligned}$$

Plat pemanas digunakan selama **60 detik** untuk satu kali sambungan:

$$t = \frac{60}{3600} = 0,017 \text{ Jam}$$

$$E_{heater} = P_{heater} \times t$$

$$\begin{aligned} E_{heater} &= 700 \text{ W} \times 0.017 \text{ Jam} \\ &= 11,9 \text{ Wh} \end{aligned}$$

4.2.2 Daya Milling Cutter

Milling cutter digunakan untuk meratakan permukaan pipa sebelum penyambungan. Biasanya, mesin ini membutuhkan daya 25,7% dari total daya (amd piping) :

Diketahui :

P total Milling Cutter adalah 900 W / 0.9 Kw

$$P_{cutter} = 0.257 \times P_{total}$$

$$P_{cutter} = 0.257 \times 900 \text{ W}$$

$$= 231 \text{ Watt}$$

Proses *milling cutter* digunakan selama **30 detik (0,5 menit)** untuk satu kali sambungan :

$$t = \frac{30}{3600} = 0,0083 \text{ Jam}$$

$$E_{cutter} = P_{cutter} \times t$$

$$E_{cutter} = 231 \times 0.0083$$

$$E_{cutter} = 1,917 \text{ Wh}$$

4.2.3 Total Konsumsi Energi untuk satu siklus *Butt Fusion*

Jika dalam satu siklus penyambungan menggunakan semua komponen ini:

$$E_{total} = E_{heater} + E_{cutter}$$

$$E_{total} = 11,9 + 1,917$$

$$E_{total} = 13,817 \text{ Wh}$$

4.3 Pengujian Tarik

4.3.1 Proses Pengelasan Pipa HDPE Untuk Spesimen Pengujian Tarik

Proses pengelasan pipa HDPE dilakukan sebagai tahap awal dalam pembuatan spesimen uji tarik guna mengevaluasi kekuatan sambungan hasil penyambungan. Metode pengelasan yang digunakan adalah *butt fusion welding*, dimana teknik penyambungan termoplastik yang memanfaatkan pemanasan permukaan ujung pipa hingga suhu tertentu, kemudian kedua ujung pipa ditekan dan disatukan.

Sebelum pengelasan, dilakukan persiapan awal berupa pemotongan pipa HDPE sesuai panjang yang dibutuhkan dan pembersihan permukaan untuk menghilangkan kotoran atau partikel asing. Ujung pipa kemudian diratakan menggunakan *milling cutter* untuk memastikan kesesuaian dan kontak permukaan yang optimal.

Selanjutnya, *heating plate* dengan suhu 190°C, 210°C, dan 230°C yang ditempatkan di antara kedua ujung pipa yang telah diklem sejajar. Pipa ditekan ke permukaan heating plate selama waktu pemanasan (*heat soak time*) sesuai spesifikasi diameter dan SDR pipa. Setelah itu, *heating plate* segera dilepas, dan kedua ujung pipa langsung ditekan dan ditahan selama waktu pendinginan (*cooling time*) tanpa gangguan.



Gambar 4. 2 Pengelasan pipa HDPE untuk spesimen pengujian tarik

4.3.2 Proses Pembuatan Spesimen Pengujian Tarik

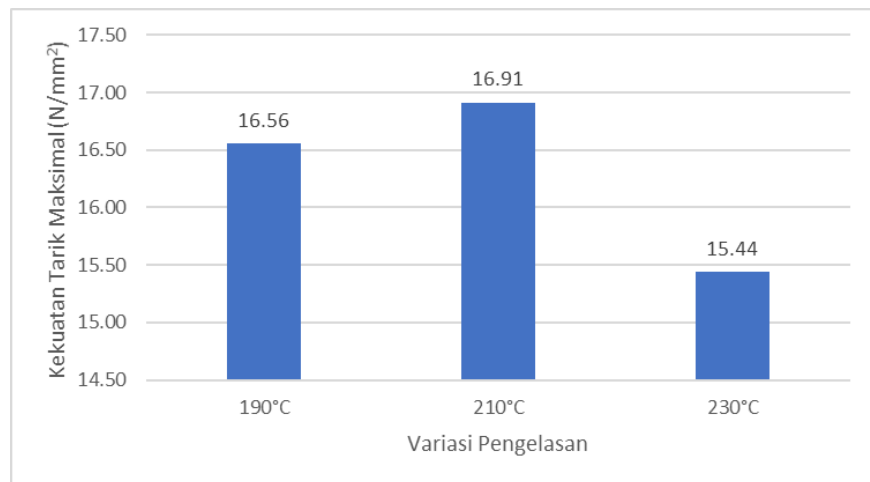
Pipa hasil sambungan dibiarkan pada suhu ruang hingga benar-benar dingin dan stabil. Selanjutnya, bagian tengah dari hasil sambungan dipotong dan dibentuk menjadi spesimen sesuai standar ASTM D638 tipe I. Spesimen inilah yang kemudian digunakan dalam pengujian tarik untuk mengetahui karakteristik mekanik hasil sambungan, seperti kekuatan tarik maksimum.

4.3.3 Analisa dan Hasil Pembahasan

4.3.3.1 Hasil Tegangan Maksimal pada Pengujian Tarik

Tabel 4. 1 Tegangan maksimal

Variasi Pengelasan	Spesimen 1 (N/mm ²)	Spesimen 2 (N/mm ²)	Spesimen 3 (N/mm ²)	Rata-rata (N/mm ²)
190°C	17.67	15.66	16.34	16.56
210°C	16.79	16.55	17.4	16.91
230°C	16.51	16.65	13.16	15.44



Gambar 4. 3 Grafik tegangan maksimal

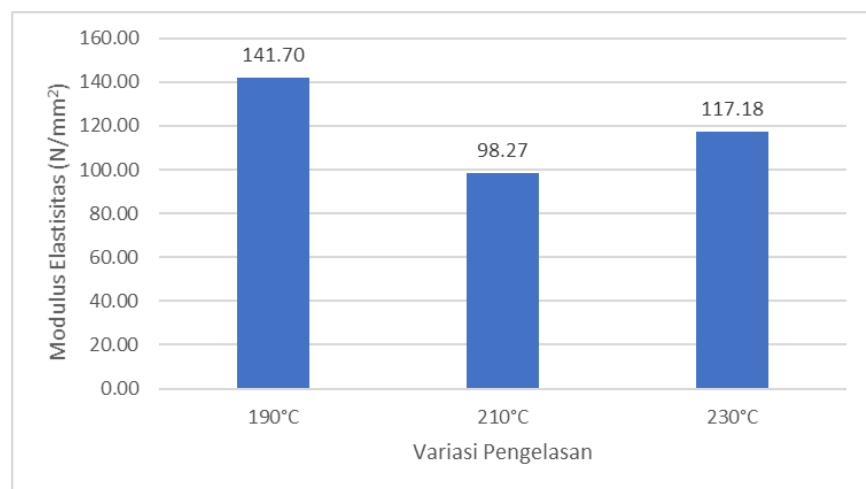
Variasi suhu plat pemanas pada metode manual butt fusion memberikan pengaruh nyata terhadap kekuatan tarik maksimum sambungan pipa HDPE. Sambungan pada suhu 210°C menunjukkan nilai rata-rata tertinggi sebesar 16,91 N/mm², lebih tinggi sekitar 2,1% dibanding sambungan pada suhu 190°C (16,56 N/mm²), dan lebih tinggi sekitar 9,5% dibanding sambungan pada suhu 230°C (15,44 N/mm²).

Hal ini menunjukkan bahwa suhu pengelasan 210°C memberikan kekuatan tarik maksimum terbaik. Sementara itu, suhu 230°C menyebabkan penurunan yang drastis, sehingga kurang direkomendasikan.

4.3.3.2 Hasil Modulus Elastisitas pada Pengujian Tarik

Tabel 4. 2 Modulus elastisitas

Variasi Pengelasan	Spesimen 1 (N/mm ²)	Spesimen 2 (N/mm ²)	Spesimen 3 (N/mm ²)	Rata-rata (N/mm ²)
190°C	149.2	120.45	155.45	141.70
210°C	86.33	51.33	157.14	98.27
230°C	66.7	146.23	138.62	117.18



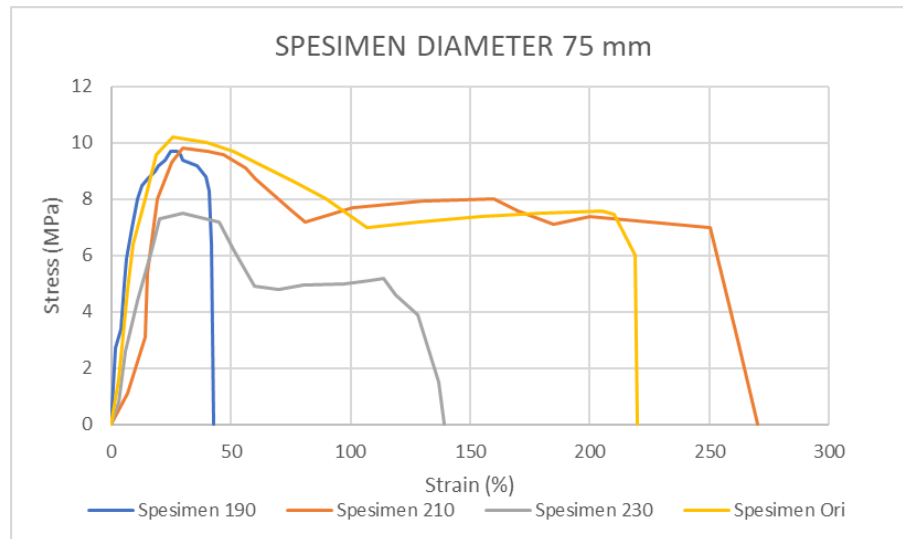
Gambar 4. 4 Grafik modulus elastisitas

Variasi suhu plat pemanas pada metode manual butt fusion berpengaruh nyata terhadap nilai modulus elastisitas sambungan pipa HDPE. Sambungan pada suhu 190°C memiliki modulus elastisitas rata-rata paling tinggi dibanding suhu lainnya yaitu 141,70 N/mm²,

Sebaliknya, sambungan pada suhu 210°C menunjukkan nilai modulus elastisitas rata-rata paling rendah yaitu 98,27 N/mm². Pada suhu 230°C, modulus elastisitas meningkat menjadi 117,18 N/mm².

Hal ini menunjukkan bahwa suhu pengelasan 190°C memberikan sifat elastisitas terbaik. Sementara itu, suhu 210°C menyebabkan penurunan drastis, sehingga kurang direkomendasikan jika ditinjau dari aspek modulus elastisitas.

4.3.3.3 Hasil Data Stress - Strain



Gambar 4. 5 Hasil perbandingan grafik *stress - strain*

Hasil uji tarik pada pipa HDPE berdiameter 75 mm menunjukkan bahwa variasi suhu pengelasan manual butt fusion berpengaruh signifikan terhadap kekuatan dan sifat patahan sambungan. Spesimen tanpa sambungan (Spesimen ori) menghasilkan tegangan maksimum tertinggi sekitar 10,5 MPa dan regangan hingga $\pm 220\%$, mencerminkan sifat material yang sangat ulet dan tidak mengalami cacat sambungan. Spesimen hasil pengelasan pada suhu 210°C memiliki karakteristik paling mendekati Ori, dengan tegangan maksimum ± 10 MPa dan regangan lebih tinggi hingga $\pm 260\%$. Hal ini menandakan bahwa suhu ini menghasilkan ikatan antar permukaan pipa yang optimal, memungkinkan terjadinya deformasi plastis yang besar sebelum patah. Jenis patahannya dikategorikan sebagai ulet, karena menunjukkan regangan tinggi dan penurunan tegangan yang bertahap setelah puncak.

Sebaliknya, spesimen yang dilas pada suhu 190°C hanya mampu menahan regangan $\pm 45\%$ meskipun tegangan maksimum relatif tinggi ($\sim 9,5$ MPa). Hal ini mengindikasikan terbentuknya sambungan yang rapuh akibat suhu las yang terlalu rendah, sehingga ikatan antar molekul polimer tidak sempurna. Kurva patahannya menunjukkan penurunan tajam setelah puncak, khas patahan getas. Sementara itu, spesimen 230°C menunjukkan performa mekanik menurun, baik dari sisi tegangan (~ 8 MPa) maupun regangan ($\sim 135\%$). Ini kemungkinan disebabkan oleh overheating, yang menyebabkan penurunan kualitas material akibat panas berlebih, disertai terbentuknya rongga-rongga kecil atau pelelehan berlebih di zona sambungan, sehingga kekuatan sambungan menurun. Jenis patahannya bersifat semi-ulet, terlihat dari regangan sedang dengan penurunan tegangan yang tidak terlalu tajam.

Secara keseluruhan, suhu pengelasan 210°C terbukti paling efektif dalam membentuk sambungan HDPE yang kuat dan ulet. Suhu terlalu rendah menyebabkan ikatan permukaan tidak sempurna, sementara suhu terlalu tinggi berisiko merusak struktur material akibat degradasi termal.

4.4 Analisis Korelasi

4.4.1 Analisis Korelasi Pearson

Setelah dilakukan serangkaian pengujian tarik terhadap sembilan spesimen pipa HDPE hasil sambungan *butt fusion* dengan variasi suhu plat pemanas 190°C, 210°C, dan 230°C, diperoleh data kuantitatif meliputi nilai tegangan, regangan, dan modulus elastisitas untuk masing-masing spesimen. Data tersebut sebelumnya telah dianalisis secara numerik pada **Subbab 4.3.3** guna menggambarkan kecenderungan

perubahan sifat mekanik akibat variasi suhu plat pemanas. Sebagai tindak lanjut dari analisis tersebut, pada bagian ini dilakukan analisis korelasi pearson untuk mengukur tingkat hubungan linear antara variabel hasil pengujian, antara tegangan maksimum dengan modulus elastisitas. Analisis ini dimaksudkan untuk mengevaluasi apakah terdapat keterkaitan yang signifikan antar variabel, sehingga dapat memberikan landasan statistik dalam menilai pengaruh variasi suhu plat pemanas terhadap kekuatan mekanik sambungan pipa HDPE yang dihasilkan.

4.4.1.1 Korelasi antara Tegangan Maksimum dan Regangan

Untuk mengetahui sejauh mana hubungan antara nilai tegangan maksimum dan modulus elastisitas pada hasil pengujian tarik, dilakukan analisis korelasi Pearson menggunakan data dari sembilan spesimen. Data hasil pengujian ditampilkan pada **Tabel 4. 3** berikut:

Tabel 4. 3 Data rata-rata (Suhu dan σ_{max}) untuk tiap kelompok

Kelompok	Suhu (°C)	σ_{max} (N/mm ²)
1	190	16.56
2	210	16.91
3	230	15.44

Setelah didapatkan rata-rata suhu dan σ_{max} dari tiap kelompok, olah data tersebut menggunakan rumus korelasi pearson.

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}}$$

Agar memudahkan pengolahan data, masukkan rata-rata Suhu dan σ_{max} ke dalam tabel bantu (lihat **tabel 4.4**)

Tabel 4. 4 Tabel bantu perhitungan analisis korelasi pearson

No.	X (°C)	Y (σ_{max})	X^2	Y^2	XY
1	190	16.56	36.100	274.234	3.146,4
2	210	16.91	44.100	285.948	3.551,1
3	230	15.44	52.900	238.394	3.551,2
Σ	630	48.91	133.100	798.576	10.248,7

Kemudian, substitusikan ke rumus analisis korelasi pearson.

Dengan :

$$n = 3$$

$$\Sigma X = 630$$

$$\Sigma Y = 48.91$$

$$\Sigma X^2 = 133.100$$

$$\Sigma Y^2 = 798.576$$

$$\Sigma XY = 10.248,7$$

$$r = \frac{3(10.248,7) - (630)(48.91)}{\sqrt{[3(133.100) - (630)^2][3(798.576) - (48.91)^2]}}$$

$$r = \frac{30248,1 - 30813,3}{\sqrt{[399.300 - 396.900][2395,73 - 2391,148]}}$$

$$r = \frac{-67,2}{\sqrt{2.400 \times 4.248}}$$

$$r = \frac{-67,2}{\sqrt{10195,2}}$$

$$r = \frac{-67,2}{100,97}$$

$$r \approx -0,67$$

Hasil perhitungan menunjukkan koefisien korelasi Pearson sebesar $r = -0,67$.

Nilai ini mengindikasikan adanya hubungan terbalik yang cukup kuat antara suhu pemanasan (X) dan tegangan maksimum (Y), di mana peningkatan suhu

menyebabkan tegangan maksimum cenderung menurun. Dengan demikian, variasi suhu plat pemanas berpengaruh nyata terhadap penurunan tegangan maksimum pada sambungan pipa HDPE.

4.5 Pengujian Hidrostatik

4.5.1 Proses Pengelasan Pipa HDPE Untuk Spesimen Pengujian Hidrostatik

Proses ini diawali dengan menjepit pipa pada mesin *butt fusion*, lalu meratakan permukaan ujung pipa menggunakan *milling cutter* agar bersih dan rata. Selanjutnya, plat pemanas dipanaskan hingga suhu pengelasan yang ditentukan (190°C , 210°C , 230°C), lalu ditempatkan di antara kedua ujung pipa. Setelah waktu pemanasan terpenuhi, plat pemanas dilepas, dan kedua ujung pipa ditekan hingga menyatu. Sambungan kemudian didinginkan selama beberapa menit hingga mencapai kekuatan awal.



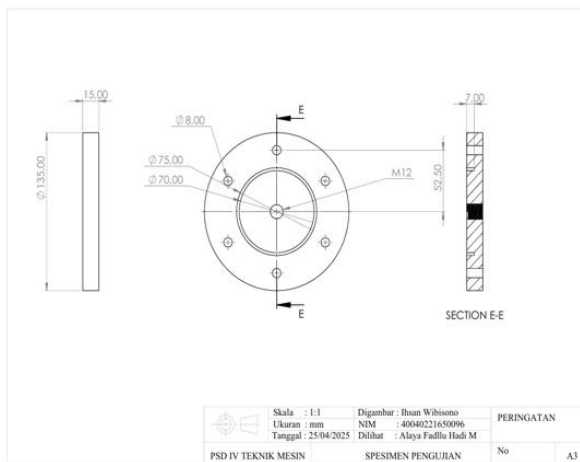
Gambar 4. 6 Proses pengelasan pipa HDPE untuk spesimen pengujian hidrostatik

Sambungan hasil pengelasan ini kemudian diuji menggunakan uji hidrostatik, yaitu dengan mengisi pipa menggunakan media air dan memberikan tekanan tertentu selama waktu tertentu untuk melihat apakah terdapat kebocoran atau kerusakan. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa kualitas sambungan

memenuhi standar ketahanan terhadap tekanan, sehingga aman digunakan dalam sistem perpipaan bertekanan.

4.5.2 Proses Pembuatan Jig Untuk Pengujian Hidrostatik

Proses pembuatan desain jig dimulai dengan menentukan dimensi pipa yang akan diuji, seperti diameter luar, panjang, dan jenis sambungan. Berdasarkan parameter ini, dilakukan perancangan menggunakan perangkat lunak yaitu *Solid Works* untuk menghasilkan bentuk jig yang sesuai.



(a) (b)
Gambar 4. 7 (a) Desain jig hidrostatik, (b) Hasil jadi jig pengujian hidrostatik

4.5.3 Pengambilan Data Pada Pengujian Hidrostatik

Pengujian hidrostatik menggunakan metode pengujian tekanan internal pada pipa HDPE untuk memastikan kekuatan dan kedapannya sambungan hasil pengelasan. Proses ini dilakukan dengan mengisi pipa menggunakan air, kemudian memberikan tekanan sebesar 15 bar dalam jangka waktu 15 menit. Tujuannya adalah untuk mendeteksi adanya kebocoran atau kerusakan pada sambungan. Pengujian ini penting untuk menjamin bahwa sambungan mampu menahan tekanan kerja sesuai standar yang ditentukan.



Gambar 4. 8 Proses pengambilan data pengujian hidrostatik

4.5.4 Analisa dan Hasil Pengujian Hidrostatik

Tabel 4. 5 Hasil pengujian hidrostatik

Id Spesimen	Suhu Pengelasan (°C)	Diameter Luar Terukur (mm)	Ketebalan Pipa Terukur (mm)	Suhu Air Uji (°C)	Tekanan Uji (bar)	Waktu-ke-Kegagalan (menit:detik) / Hasil	Waktu-ke-Kegagalan (menit:detik) / Hasil	Lokasi Kegagalan	Keterangan Tambahan
HDPE-190-01	190	75	4.5	23	15	Lulus (15:00)	-	-	Tidak ada tanda kegagalan.
HDPE-190-02	190	75	4.5	23	15	Lulus (15:00)	-	-	Tidak ada tanda kegagalan.
HDPE-190-03	190	75	4.5	23	15	Lulus (15:00)	-	-	Tidak ada tanda kegagalan.
HDPE-210-01	210	75	4.5	23	15	Lulus (15:00)	-	-	Tidak ada tanda kegagalan.
HDPE-210-02	210	75	4.5	23	15	Lulus (15:00)	-	-	Tidak ada tanda kegagalan.
HDPE-210-03	210	75	4.5	23	15	Lulus (15:00)	-	-	Tidak ada tanda kegagalan.
HDPE-230-01	230	75	4.5	23	15	Lulus (15:00)	-	-	Tidak ada tanda kegagalan.
HDPE-230-02	230	75	4.5	23	15	Lulus (15:00)	-	-	Tidak ada tanda kegagalan.
HDPE-230-03	230	75	4.5	23	15	Lulus (15:00)	-	-	Tidak ada tanda kegagalan.

Berdasarkan hasil pengujian hidrostatik yang telah dilakukan terhadap tiga spesimen pipa HDPE dengan variasi suhu plat pemanas 190°C pada **Gambar 4.9**.



Gambar 4. 9 Proses pengujian hidrostatik pada suhu 190°C

Sambungan pada suhu 190°C menunjukkan kinerja yang baik dalam menahan tekanan uji sebesar 15 bar selama 15 menit tanpa mengalami kegagalan. Tidak ditemukan adanya kebocoran, retakan, maupun tanda-tanda kerusakan pada setiap spesimen selama proses pengujian berlangsung. Hal ini menunjukkan bahwa sambungan hasil pengelasan telah memenuhi standar kedapapan dan kekuatan yang dipersyaratkan.

Selanjutnya hasil pengujian hidrostatik yang telah dilakukan terhadap tiga spesimen pipa HDPE dengan variasi suhu plat pemanas 210°C pada **Gambar 4.10**.



Gambar 4. 10 Proses pengujian hidrostatik pada suhu 210°C

Sambungan pada suhu 210°C menunjukkan kinerja yang baik dalam menahan tekanan uji sebesar 15 bar selama 15 menit tanpa mengalami kegagalan. Tidak ditemukan adanya kebocoran, retakan, maupun tanda-tanda kerusakan pada setiap spesimen selama proses pengujian berlangsung. Hal ini menunjukkan bahwa sambungan hasil pengelasan telah memenuhi standar kedapapan dan kekuatan yang dipersyaratkan.

Selanjutnya hasil pengujian hidrostatik yang telah dilakukan terhadap tiga spesimen pipa HDPE dengan variasi suhu plat pemanas 230°C pada **Gambar 4.11**.



Gambar 4. 11 Proses pengujian hidrostatik pada suhu 230°C

Sambungan pada suhu 230°C menunjukkan kinerja yang baik dalam menahan tekanan uji sebesar 15 bar selama 15 menit tanpa mengalami kegagalan. Tidak ditemukan adanya kebocoran, retakan, maupun tanda-tanda kerusakan pada setiap spesimen selama proses pengujian berlangsung. Hal ini menunjukkan bahwa sambungan hasil pengelasan telah memenuhi standar kedap dan kekuatan yang dipersyaratkan.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa seluruh sambungan pipa HDPE yang diuji layak digunakan untuk aplikasi yang membutuhkan tekanan operasi maksimum hingga 10 bar, sesuai dengan hasil perhitungan tekanan maksimum operasi (MOP). Keberhasilan ini mengindikasikan bahwa proses pengelasan yang dilakukan pada variasi suhu plat pemanas tersebut telah menghasilkan sambungan yang andal dan aman untuk digunakan dalam sistem perpipaan bertekanan.

Jika melihat sistem pendistribusian air oleh PDAM Agam Tirta yang berada di Kecamatan Lubuk Basung Sumatera Barat, distribusi ini dilakukan dengan tekanan 8 bar yang menggunakan spesifikasi pipa yang sama yaitu pipa HDPE PN 10 SDR 17 (PDAM Agam Tirta, 2019).