

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 **90 detik** untuk satu kali sambungan:

$$t = \frac{90}{3600} = 0,025 \text{ Jam}$$

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

$$\begin{aligned} E_{heater} &= 700 \text{ W} \times 0.025 \text{ Jam} \\ &= 17,5 \text{ Wh} \end{aligned}$$

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:

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

$$E_{total} = 17,5 + 1,917$$

$$E_{total} = 19,417 \text{ Wh}$$

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

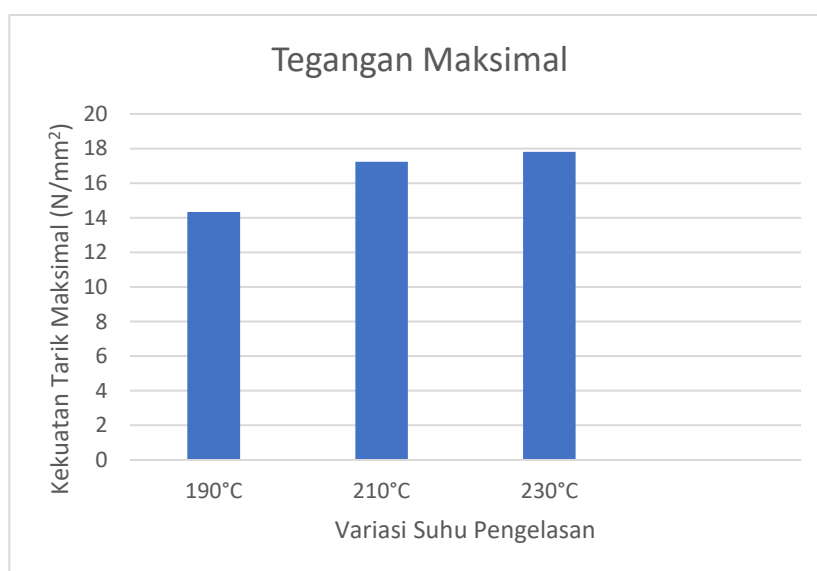
Pipa hasil sambungan dibiarkan pada suhu ruang hingga benar-benar dingin dan stabil. Selanjutnya, bagian tengah dari hasil sambungan dipotong dan dibentuk menjadi spesimen sesuai standar ASTM D638 tipe III. Spesimen inilah yang kemudian digunakan dalam pengujian tarik untuk mengetahui karakteristik mekanik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

4.3.3 Analisa dan Hasil Pembahasan

4.3.3.1 Hasil Data Tarik Maksimal Terhadap Variasi Suhu

Tabel 4. 1 Tegangan maksimal

Variasi Suhu Pengelasan	Spesimen 1 (N/mm ²)	Spesimen 2 (N/mm ²)	Spesimen 3 (N/mm ²)	Rata-rata (N/mm ²)
190°C	16,927	10,526	15,561	14,338
210°C	20,142	13,726	17,823	17,230
230°C	17,908	16,714	18,824	17,815



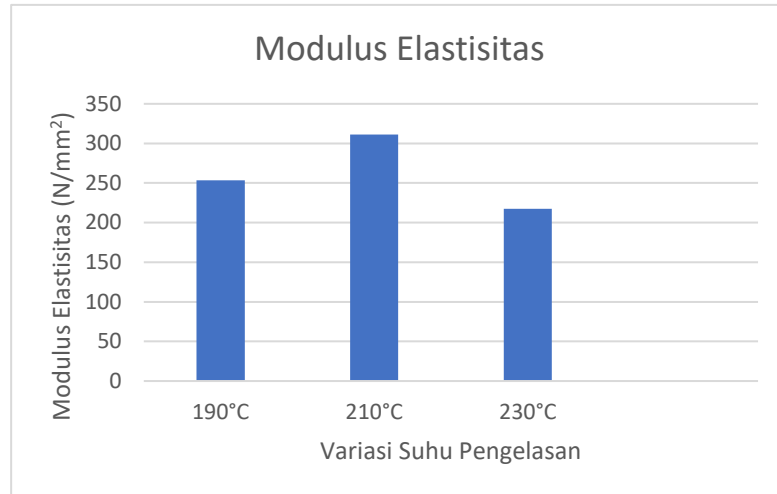
Gambar 4. 3 Grafik tegangan maksimal

Berdasarkan Tabel hasil pengujian tegangan maksimal sambungan pipa HDPE dengan variasi suhu pada plat pemanas, diperoleh bahwa pada suhu 190°C nilai rata-rata tegangan maksimal sebesar 14,338 N/mm² dengan rentang nilai yang cukup bervariasi antar spesimen, dimana spesimen 2 memiliki nilai terendah 10,526 N/mm². Pada suhu 210°C terjadi peningkatan rata-rata tegangan maksimal menjadi 17,230 N/mm², meskipun masih terdapat perbedaan yang cukup signifikan antar spesimen. Sementara itu, pada suhu 230°C diperoleh nilai rata-rata tertinggi yaitu 17,815 N/mm², dengan hasil antar spesimen yang lebih seragam dibandingkan suhu sebelumnya. Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa peningkatan suhu pengelasan dari 190°C hingga 230°C memberikan pengaruh positif terhadap kekuatan sambungan pipa HDPE, di mana kondisi pada suhu 230°C menunjukkan kualitas sambungan yang lebih optimal dan konsisten.

4.3.3.2 Hasil Data Modulus Elastisitas Terhadap Variasi Suhu

Tabel 4. 2 Modulus elastisitas

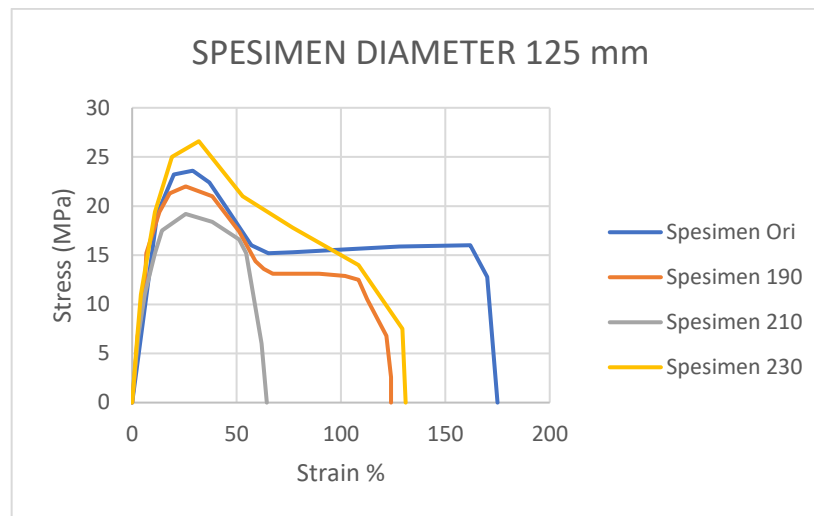
Variasi Pengelasan	Spesimen 1 (N/mm ²)	Spesimen 2 (N/mm ²)	Spesimen 3 (N/mm ²)	Rata-rata (N/mm ²)
190°C	186,503	283,462	290,825	253,5966667
210°C	284,495	435,45	213,36	311,1016667
230°C	186,132	244,94	221,315	217,4623333



Gambar 4. 4 Grafik modulus elastisitas

Berdasarkan hasil pengujian modulus elastisitas sambungan pipa HDPE dengan variasi suhu plat pemanas, diperoleh bahwa pada suhu 190°C nilai rata-rata modulus elastisitas adalah 253,59 N/mm², dengan nilai antar spesimen berkisar antara 186,503 N/mm² hingga 290,825 N/mm². Pada suhu 210°C terjadi peningkatan rata-rata modulus elastisitas menjadi 311,10 N/mm², dimana spesimen 2 menunjukkan nilai tertinggi sebesar 435,45 N/mm². Sementara itu, pada suhu 230°C nilai rata-rata modulus elastisitas menurun menjadi 217,46 N/mm² dengan variasi antar spesimen relatif lebih rendah dibandingkan suhu lainnya. Hasil ini menunjukkan bahwa suhu pengelasan berpengaruh terhadap sifat elastisitas sambungan pipa HDPE, dimana suhu 210°C memberikan nilai modulus elastisitas tertinggi, sedangkan pada suhu 230°C terjadi penurunan yang mengindikasikan adanya penurunan kemampuan material dalam menahan deformasi elastis.

4.3.3.3 Hasil Data *Stress – Strain*



Gambar 4. 5 Hasil data perbandingan *stress – strain*

Berdasarkan hasil uji tarik pipa HDPE dengan sambungan manual butt fusion diameter 125 mm, terlihat bahwa spesimen ori (tanpa sambungan) memiliki sifat paling duktail dengan regangan mencapai lebih dari 150% dan tegangan maksimum sekitar 21 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa material asli mampu menahan deformasi yang sangat besar sebelum mengalami kegagalan, dengan jenis patahan dominan berupa patah liat (ductile fracture). Pada spesimen hasil pengelasan dengan suhu 190°C, kekuatan tarik menurun hingga sekitar 17 MPa dengan regangan sekitar 110%. Kondisi ini menunjukkan bahwa ikatan antar molekul kurang sempurna akibat pemanasan yang kurang optimal, sehingga menghasilkan patahan kombinasi liat dan getas. Sementara itu, spesimen dengan suhu 210°C menunjukkan performa paling rendah, dengan tegangan maksimum hanya sekitar 18 MPa dan regangan sangat kecil di bawah 40%. Hal ini menandakan adanya degradasi molekul akibat overheating sehingga sambungan menjadi rapuh dan menyebabkan patah getas (brittle fracture). Adapun spesimen yang dilas pada suhu 230°C justru menghasilkan kekuatan tarik tertinggi mencapai 26 MPa dengan

regangan cukup panjang sekitar 120%. Sambungan ini menunjukkan bahwa suhu tinggi memberikan fusi molekul yang optimal, meskipun sifat liatnya tetap berkurang dibandingkan dengan material ori. Secara keseluruhan dapat disimpulkan bahwa suhu pengelasan sangat mempengaruhi sifat mekanik sambungan butt fusion HDPE. Spesimen ori tetap menjadi yang paling daktil, sedangkan sambungan pada suhu 230°C menghasilkan kekuatan tarik paling tinggi, meskipun dengan daktilitas yang lebih rendah.

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 pemanasan 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 Sub bab 4.3.3 guna menggambarkan kecenderungan perubahan sifat mekanik akibat variasi parameter pengelasan. Sebagai tindak lanjut dari analisis tersebut, pada bagian ini dilakukan analisis korelasi pearson untuk mengukur tingkat hubungan linear antara variabel hasil pengujian, yaitu antara tegangan maksimum dengan regangan, serta 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 pemanasan terhadap kekuatan mekanik sambungan pipa HDPE yang dihasilkan.

4.4.1.1 Korelasi antara Suhu dan Tegangan Maksimum

Untuk mengetahui sejauh mana hubungan antara nilai suhu dan tegangan maksimum 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_{maks}) untuk tiap kelompok

Kelompok	Suhu (°C)	σ_{maks} (N/mm ²)
1	190	14,338
2	210	17,230
3	230	17,815

Setelah didapatkan rata-rata suhu dan σ_{maks} 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_{maks} ke dalam tabel bantu pada table 4.4

Tabel 4. 4 Tabel bantu perhitungan analisis korelasi pearson

No.	X (Suhu)	Y (σ_{maks})	X^2	Y^2	XY
1	190	14,338	36.100	205,580	2.724,22
2	210	17,230	44.100	296,874	3.618,30
3	230	17,815	52.900	317,370	4.097,45
Σ	630	49,383	133.100	819,825	10.439,97

Kemudian, substitusikan ke rumus analisis korelasi pearson.

Dengan:

$$n = 3$$

$$\Sigma X = 630$$

$$\Sigma Y = 49,383$$

$$\Sigma X^2 = 133.100$$

$$\Sigma Y^2 = 819,825$$

$$\Sigma XY = 10.439,97$$

$$r = \frac{3(10,439.97) - (630)(49,383)}{\sqrt{[3(133.100) - (630)^2][3(819,825) - (49,383)^2]}}$$

$$r = \frac{31.319,91 - 31.111,29}{\sqrt{[399.300 - 396.000][2.459,46 - 2.438,72]}}$$

$$r = \frac{208,62}{\sqrt{2.400 \times 20,74}}$$

$$r = \frac{208,62}{\sqrt{49.776}} = \frac{208,62}{223,18}$$

$$r \approx 0,934$$

Berdasarkan analisis statistik, diperoleh koefisien korelasi Pearson sebesar $r \approx 0,934$ antara variabel suhu plat pemanas dan tegangan maksimal sambungan pipa HDPE. Nilai ini menunjukkan adanya hubungan positif yang sangat kuat: peningkatan suhu plat pemanas dari 190 °C menuju 230 °C secara signifikan berkaitan dengan peningkatan nilai tegangan maksimal. Dengan demikian, kenaikan suhu memberikan pengaruh yang positif dan konsisten terhadap kekuatan sambungan, mendukung temuan dalam pengujian modulus elastisitas bahwa suhu pengelasan optimal berada di rentang menengah hingga tinggi.

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.



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	Keterangan Tambahan
HDPE-190-01	190	125	7.4	23	15	Lulus (15:00)	Tidak ada tanda kegagalan.
HDPE-190-02	190	125	7.4	23	15	Lulus (15:00)	Tidak ada tanda kegagalan.
HDPE-190-03	190	125	7.4	23	15	Lulus (15:00)	Tidak ada tanda kegagalan.
HDPE-210-01	210	125	7.4	23	15	Lulus (15:00)	Tidak ada tanda kegagalan.
HDPE-210-02	210	125	7.4	23	15	Lulus (15:00)	Tidak ada tanda kegagalan.
HDPE-210-03	210	125	7.4	23	15	Lulus (15:00)	Tidak ada tanda kegagalan.
HDPE-230-01	230	125	7.4	23	15	Lulus (15:00)	Tidak ada tanda kegagalan.
HDPE-230-02	230	125	7.4	23	15	Lulus (15:00)	Tidak ada tanda kegagalan.
HDPE-230-03	230	125	7.4	23	15	Lulus (15:00)	Tidak ada tanda kegagalan.

Berdasarkan hasil pengujian hidrostatik yang telah dilakukan terhadap tiga spesimen pipa HDPE dengan variasi suhu pengelasan 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 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 tersebut telah menghasilkan sambungan yang andal dan aman untuk digunakan dalam sistem perpipaan bertekanan.

Selanjutnya hasil pengujian hidrostatik yang telah dilakukan terhadap tiga spesimen pipa HDPE dengan variasi suhu pengelasan 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 kedap dan kekuatan yang dipersyaratkan.

Selanjutnya hasil pengujian hidrostatik yang telah dilakukan terhadap tiga spesimen pipa HDPE dengan variasi suhu pengelasan 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 15 bar, sesuai dengan hasil perhitungan tekanan maksimum operasi (MOP). Keberhasilan ini mengindikasikan bahwa proses pengelasan yang dilakukan pada variasi suhu 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).