

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. 1Proses 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 **30 detik** untuk satu kali sambungan:

$$t = \frac{30}{3600} = 0,008 \text{ Jam}$$

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

$$\begin{aligned} E_{heater} &= 700 \text{ W} \times 0.008 \text{ Jam} \\ &= 5,6 \text{ Wh} \end{aligned}$$

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:

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

$$E_{total} = 5,6 + 1,917$$

$$E_{total} = 7,517 \text{ Wh}$$

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

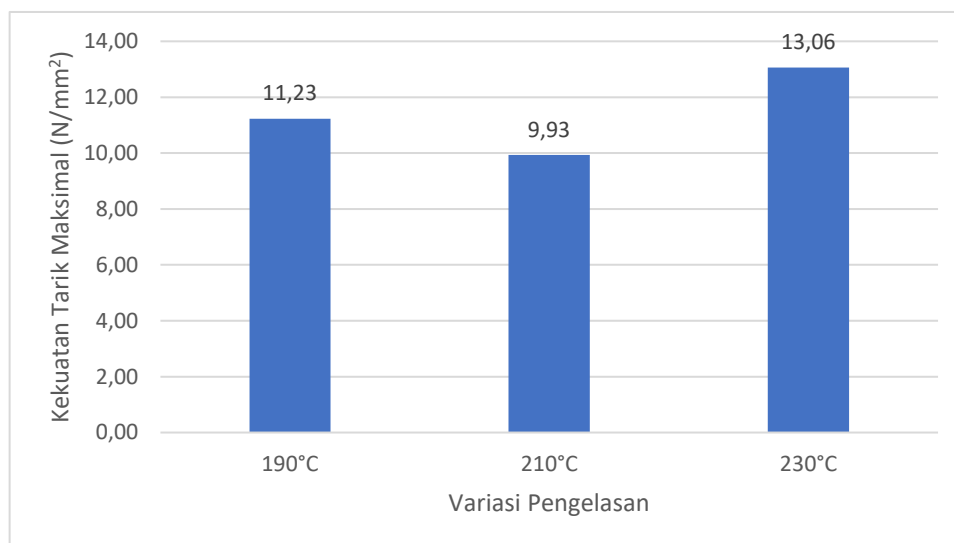
Pipa hasil sambungan dibiarkan pada suhu ruang hingga benar-benar dingin dan stabil. Selanjutnya, bagian tengah dari hasil sambungan dipotong dan dibentuk menjadi spesimen sesuai standar ASTM D638 tipe IV. Spesimen inilah yang kemudian digunakan dalam pengujian tarik untuk mengetahui karakteristik mekanik 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	13,89	13,54	6,25	11,23
210°C	9,86	9,93	10	9,93
230°C	12,78	11,11	15,28	13,06



Gambar 4. 3 Grafik tegangan maksimal

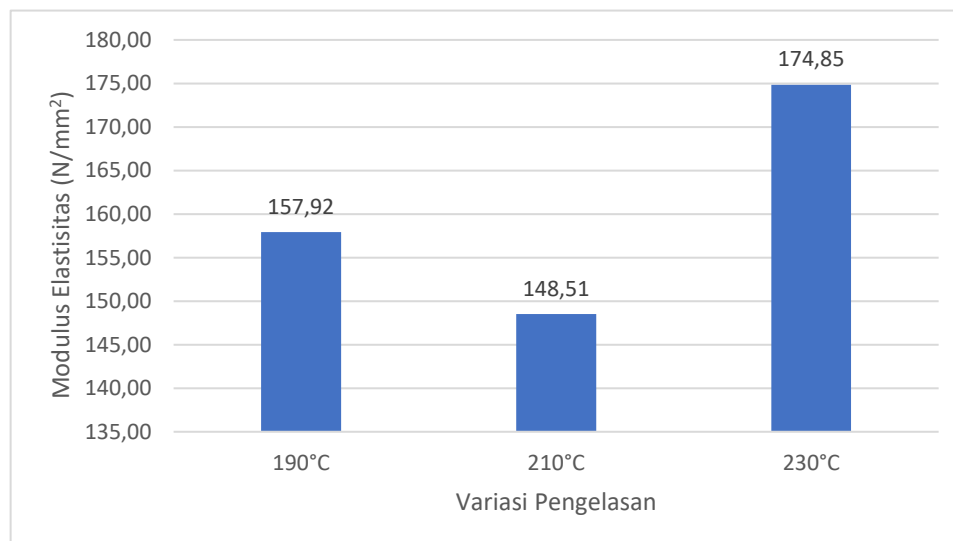
Berdasarkan hasil pengujian tegangan maksimal sambungan pipa HDPE dengan variasi suhu plat pemanas diperoleh bahwa pada suhu 230°C memiliki rata-rata tegangan maksimal sebesar 13,06 N/mm², lebih tinggi sekitar 16,3% dibanding pada suhu 190°C (11,23 N/mm²) dan lebih tinggi sekitar 31,52% dibanding pada suhu 210°C (9,93 N/mm²). Pada pengujian suhu 190°C, terlihat adanya penurunan

signifikan pada Spesimen 3 ($6,25 \text{ N/mm}^2$) dibandingkan dua spesimen lainnya, yang kemungkinan disebabkan oleh adanya cacat sambungan atau ketidaksempurnaan pemanasan sehingga menghasilkan kekuatan tarik yang lebih rendah. Oleh karena itu, meskipun rata-rata pada suhu 190°C masih lebih tinggi dibanding suhu 210°C , kualitas sambungan pada suhu tersebut kurang konsisten. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa pengelasan pada suhu 230°C memberikan kekuatan tarik sambungan paling optimal dan lebih stabil dibanding suhu lainnya.

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	169,27	148,79	155,71	157,92
210°C	150,53	158,89	136,11	148,51
230°C	177	178,75	168,79	174,85

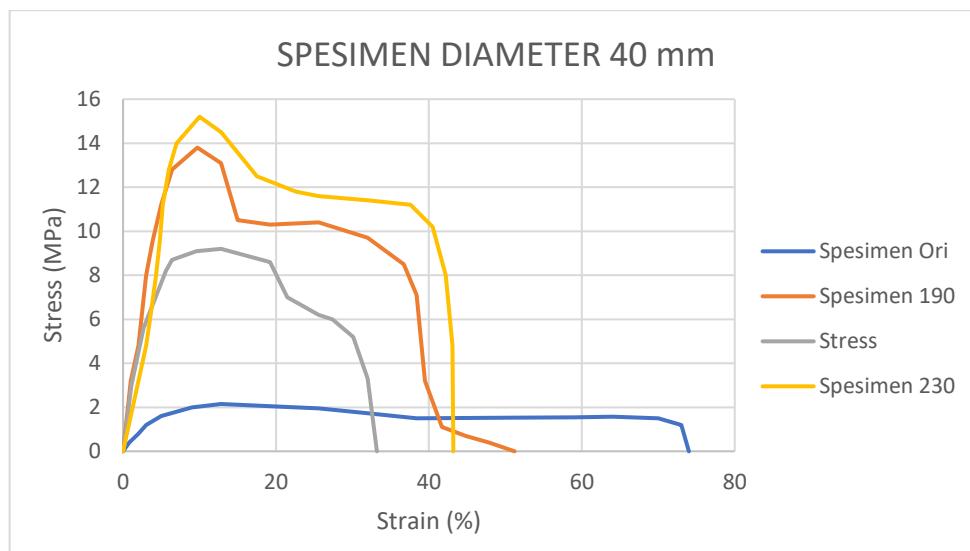


Gambar 4. 4 Grafik modulus elastisitas

Variasi suhu plat pemanas terbukti berpengaruh terhadap modulus elastisitas sambungan pipa HDPE. Nilai tertinggi diperoleh pada suhu 230°C sebesar $174,85 \text{ N/mm}^2$, lebih besar sekitar 10,73% dibandingkan pada suhu 190°C ($157,92 \text{ N/mm}^2$)

dan sekitar 17,72% dibandingkan pada suhu 210°C (148,51 N/mm²). Peningkatan ini menunjukkan bahwa pengaturan suhu pemanasan yang lebih tinggi (230°C) mampu menghasilkan kualitas sambungan dengan tingkat kekakuan yang lebih baik. Hal tersebut dapat dikaitkan dengan proses pelelehan material yang lebih merata sehingga fusi antar permukaan pipa lebih sempurna, mengurangi kemungkinan terbentuknya rongga atau area lemah pada sambungan. Dengan demikian, pengelasan pada suhu 230°C dapat dianggap sebagai kondisi yang paling optimal untuk mempertahankan modulus elastisitas sambungan pipa HDPE.

4.3.3.3 Hasil Data *Stress-Strain*



Gambar 4. 5 Hasil data perbandingan grafik *Stress-Strain*

Berdasarkan hasil uji tarik pada pipa HDPE diameter 40 mm yang disambung menggunakan metode pengelasan manual butt fusion, variasi suhu plat pemanas terbukti memberikan pengaruh signifikan terhadap karakteristik mekanis sambungan. Spesimen asli (tanpa las) menunjukkan sifat sangat ulet dengan regangan lebih dari 70% meskipun kekuatan tariknya relatif rendah, sekitar 2 MPa, yang menandakan kemampuan deformasi plastis yang besar sebelum patah. Spesimen hasil las memperlihatkan peningkatan kekuatan tarik tetapi penurunan

keuletan dibanding material induk. Pada suhu plat 190°C, tegangan maksimum tercatat sekitar 13 MPa dengan regangan mendekati 40 persen. Pada suhu 210°C, kekuatan tarik menurun menjadi sekitar 9 MPa dengan regangan sekitar 25%, menunjukkan ikatan las kurang optimal. Sedangkan pada suhu 230°C diperoleh hasil terbaik dengan tegangan puncak sekitar 15 MPa dan regangan mendekati 40%, sehingga suhu ini menghasilkan sambungan paling homogen dan kuat di antara variasi yang diuji.

Pola patahan juga mendukung temuan tersebut: spesimen tanpa las mengalami patahan ulet (*ductile fracture*) yang ditandai oleh regangan tinggi sebelum kegagalan, sedangkan spesimen hasil pengelasan cenderung menunjukkan patahan semi-ductile hingga lebih getas pada daerah sambungan, meskipun beberapa sampel las pada 230°C masih mempertahankan regangan yang relatif besar. Perbedaan ini muncul karena proses pemanasan dan pendinginan selama pengelasan mengubah kondisi mikrostruktur dan sifat mekanik pada zona sambungan (termasuk HAZ), sehingga daerah las menjadi lebih kaku dan berperilaku kurang ulet dibandingkan material induk. Dengan demikian, dari segi kombinasi kekuatan dan deformasi, parameter pemanasan 230°C direkomendasikan sebagai kondisi paling layak untuk meningkatkan keandalan sambungan pipa HDPE diameter 40 mm dalam aplikasi lapangan.

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, 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 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 regangan 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	11,23
2	210	9,93
3	230	13,06

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	11,23	36100	126,1129	2133,7
2	210	9,93	44100	98,6049	2085,3
3	230	13,06	52900	170,5636	3003,8
Σ	630	34.22	133100	395,2814	7222,8

Kemudian, substitusikan ke rumus analisis korelasi pearson.

Dengan :

$$n = 3$$

$$\Sigma X = 630$$

$$\Sigma Y = 34,22$$

$$\Sigma X^2 = 133100$$

$$\Sigma Y^2 = 395,2814$$

$$\Sigma XY = 7222,8$$

$$r = \frac{3(7222,8) - (630)(34,22)}{\sqrt{[3(133100) - (630)^2][3(395,2814) - (34,22)^2]}}$$

$$r = \frac{21668,4 - 21558,6}{\sqrt{[399300 - 396900][1185,8442 - 1171,0084]}}$$

$$r = \frac{109,8}{\sqrt{2400 \times 14,8358}}$$

$$r = \frac{109,8}{\sqrt{35605,92}}$$

$$r = \frac{109,8}{188,69531}$$

$$r \approx 0,58$$

Berdasarkan analisis statistik, diperoleh koefisien korelasi pearson sebesar $r \approx 0,58$ antara variabel suhu plat pemanas dan tegangan maksimal sambungan pipa HDPE. Nilai ini menunjukkan adanya hubungan positif dengan tingkat kekuatan sedang. Dengan demikian, peningkatan suhu plat pemanas cenderung

meningkatkan tegangan maksimal dalam sambungan, meskipun pengaruhnya tidak sepenuhnya dominan

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	40	2.4	23	15	Lulus (15:00)	Tidak ada tanda kegagalan.
HDPE-190-02	190	40	2.4	23	15	Lulus (15:00)	Tidak ada tanda kegagalan.
HDPE-190-03	190	40	2.4	23	15	Lulus (15:00)	Tidak ada tanda kegagalan.
HDPE-210-01	210	40	2.4	23	15	Lulus (15:00)	Tidak ada tanda kegagalan.
HDPE-210-02	210	40	2.4	23	15	Lulus (15:00)	Tidak ada tanda kegagalan.
HDPE-210-03	210	40	2.4	23	15	Lulus (15:00)	Tidak ada tanda kegagalan.
HDPE-230-01	210	40	2.4	23	15	Lulus (15:00)	Tidak ada tanda kegagalan.
HDPE-230-02	210	40	2.4	23	15	Lulus (15:00)	Tidak ada tanda kegagalan.
HDPE-230-03	210	40	2.4	23	15	Lulus (15:00)	Tidak ada tanda kegagalan.

Berdasarkan hasil pengujian hidrostatik yang telah dilakukan terhadap tiga spesimen pipa HDPE dengan variasi suhu 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 kedap 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 kedap 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)