

BAB IV

ANALISA HASIL PENGUJIAN

Bab ini menyajikan hasil penelitian yang telah dilakukan serta pembahasan mendalam mengenai temuan yang diperoleh. Data yang diperoleh dari penelitian akan diuraikan secara sistematis untuk memberikan gambaran yang jelas tentang capaian penelitian ini. Selanjutnya, hasil-hasil tersebut akan dianalisis dan diinterpretasikan dengan mengacu pada kerangka teori dan tinjauan pustaka yang telah dibahas sebelumnya.

4.1 Prosedur Pengujian

Berikut merupakan tahapan yang dilakukan secara sistematis untuk menguji ketahanan geser material Tembaga menggunakan alat pengujian geser (*shearing*):

1. Persiapan Alat dan Bahan

Siapkan seluruh perlengkapan yang dibutuhkan, yaitu: alat uji shearing, spesimen Tembaga, dan alat bantu seperti penggaris, kaliper, spidol, alat tulis, kertas data, dan laptop untuk pemantauan data.

2. Menentukan Tegangan Tarik dan Tegangan Geser Awal

Cari data tegangan tarik (*tensile strength*) dari material Tembaga. Untuk diameter spesimen 3,5 mm, tegangan tariknya berkisar antara 210-312 MPa.

Hitung estimasi tegangan geser menggunakan rumus:

$$\tau = 0,8 \times \text{Tensile Strength}$$

Sumber : (McCauley 2004)

Nilai ini digunakan sebagai acuan awal kalibrasi dan perhitungan.

3. Persiapan Spesimen

Sesuai standar ASTM B565, panjang spesimen minimal 2 kali diameter (≥ 7 mm). Beri tanda setiap 10 mm (atau ukuran yang diinginkan) menggunakan alat ukur dan spidol untuk memudahkan peletakan di dudukan uji.

4. Pemasangan Spesimen

Letakkan spesimen pada dudukan mekanisme pemotong sesuai dengan tanda yang telah dibuat. Pastikan posisinya presisi dan kunci spesimen agar tidak bergeser saat proses pemotongan.

5. Pemasangan Sistem Elektronik

Sambungkan kabel *load cell* ke modul HX711 dengan benar, lalu sambungkan ke Arduino sesuai diagram pin. Pastikan koneksi kuat dan tidak terbalik.

6. Pengunggahan Program Arduino

Masukkan kode program ke dalam Arduino IDE dan unggah ke board. Program ini akan membaca output tegangan dari *load cell* dan mengonversinya menjadi nilai gaya (Kg).

7. Kalibrasi Sistem

Lakukan proses kalibrasi untuk menentukan faktor kalibrasi (*calibration factor*) yang tepat. Kalibrasi dilakukan minimal 3 kali untuk melihat kestabilan pembacaan dan menghindari kesalahan akibat fluktuasi tegangan listrik. Nilai kalibrasi harus berada dalam rentang hasil estimasi tegangan geser.

8. Pelaksanaan Pengujian

Setelah kalibrasi sesuai, lakukan pemompaan secara perlahan pada sistem hidrolik hingga pisau mulai menggeser spesimen. Gerakan harus konstan dan tidak tergesa-gesa agar hasil pembacaan gaya akurat.

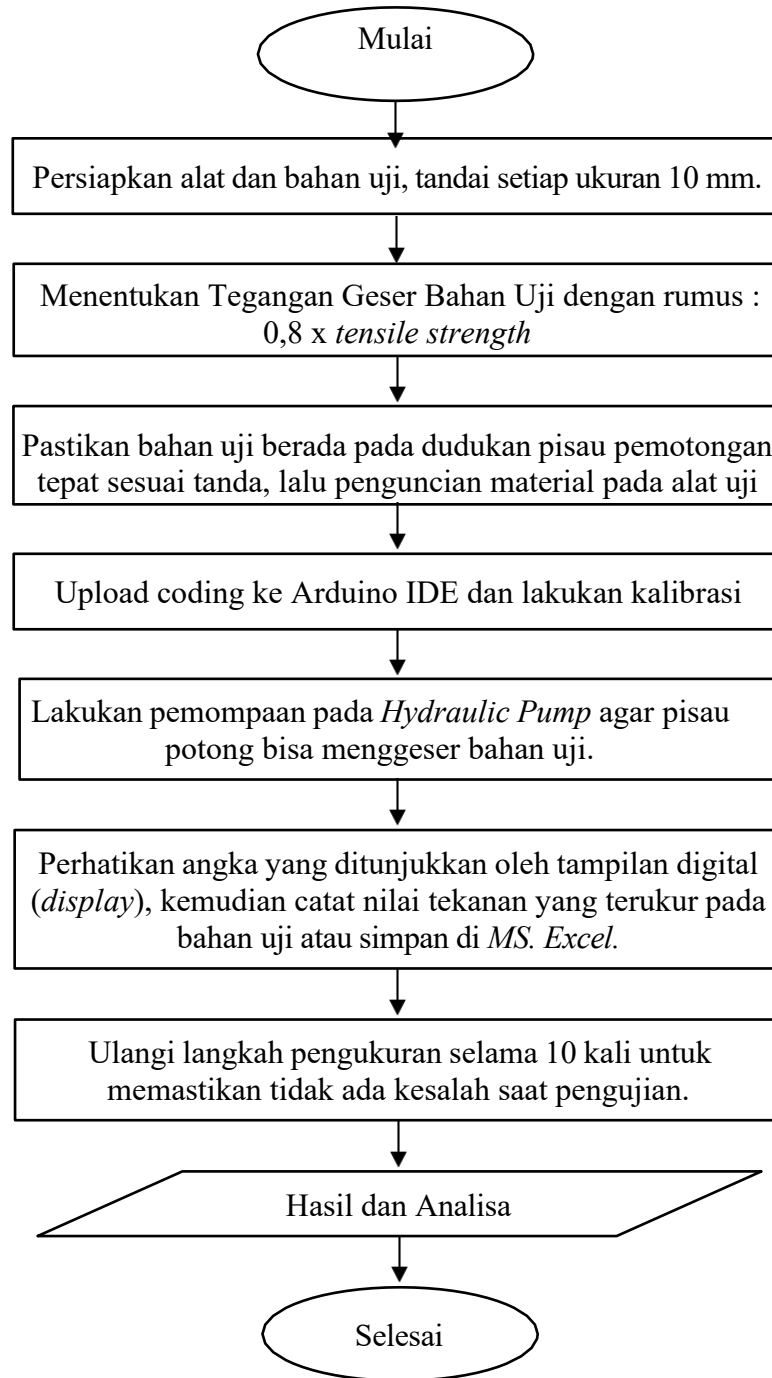
9. Pencatatan Data

Amati angka yang muncul pada layar monitor dari Arduino. Catat nilai gaya maksimum yang terukur dari sensor *load cell* dengan integrasi ke *Microsoft Excel*.

10. Pengulangan Pengujian

Ulangi seluruh prosedur dari awal hingga 10 kali untuk mendapatkan data yang konsisten dan memastikan validitas hasil.

Berikut prosedur yang dilakukan pada pengujian geser dalam bentuk *flowchart*, sebagai berikut :



Gambar 4. 1 Prosedur Pengujian

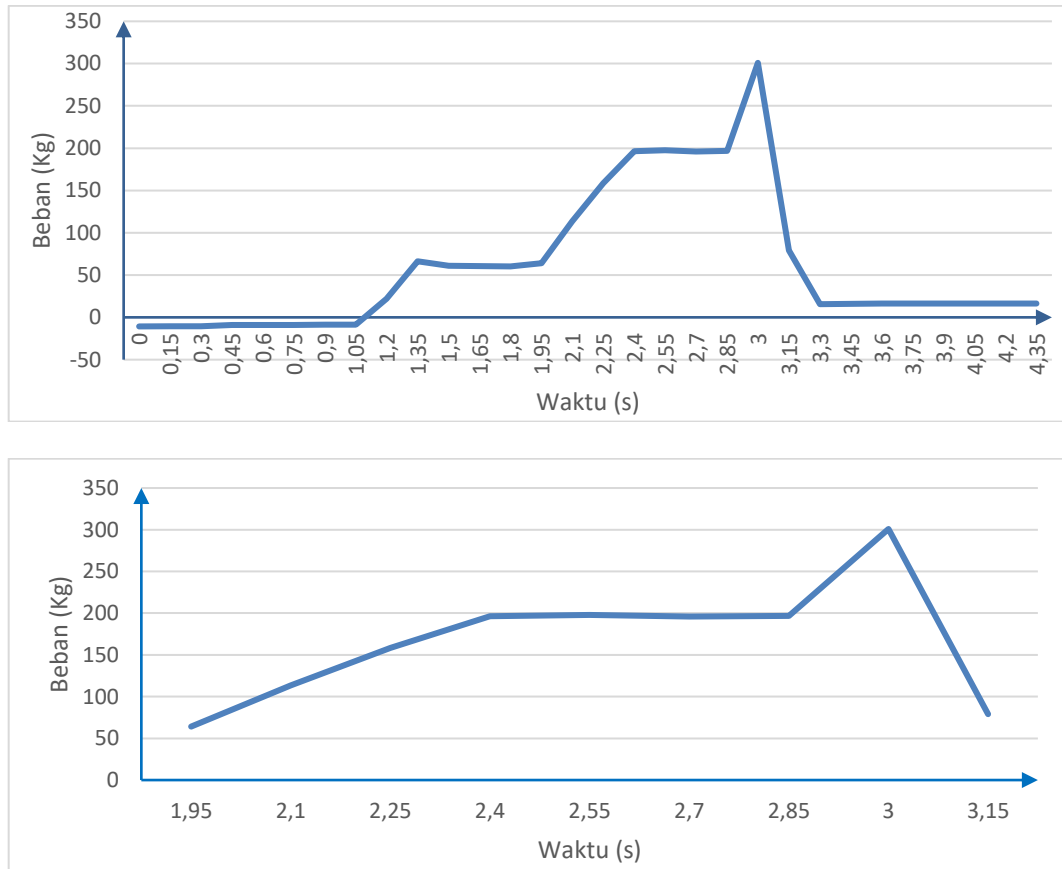
4.2 Pengambilan Data Pengujian Menggunakan Sensor *Load Cell*

Pada pengujian geser material Tembaga dilakukan pencarian nilai tekanan selama 10 kali percobaan pada bahan uji berdiameter 3,5 mm dan panjang 10 mm. Pengulangan ini bertujuan untuk memastikan konsistensi data gaya atau tekanan yang diperoleh selama proses penggeseran. Sensor *load cell*, yang terhubung dengan Arduino, akan merekam nilai gaya yang diterima oleh spesimen hingga terjadi kegagalan geser pada setiap percobaan. Data yang dihasilkan telah dikalibrasi melalui pemrograman (*coding*), sehingga nilai gaya yang ditampilkan merupakan gaya murni dari silinder pemotong, dengan memperhitungkan adanya momen akibat bentuk geometris pemotong.

Setelah melakukan pengujian geser didapatkan hasil nilai pergeseran dari setiap percobaan yang direkam melalui sensor *load cell*. Berikut uraian hasil pengujian geser material Tembaga :

4.2.1 Hasil pengujian pada bahan uji percobaan ke-1

Merujuk pada Gambar 4.2 ditunjukkan distribusi beban terhadap waktu selama pengujian geser ke-1. Terlihat bahwa beban mengalami peningkatan seiring waktu hingga mencapai nilai maksimum yang tercatat sebesar 300,91, kemudian menurun drastis yang menandakan terjadinya patahan pada spesimen. Untuk memperjelas bagian utama pengujian, Gambar 4.3 menampilkan distribusi aktual beban pada rentang waktu 1,95–3,15 detik ketika proses geser terjadi secara signifikan.



Gambar 4. 2 Distribusi beban selama waktu pengujian geser ke-1

Merujuk pada gambar 4.2, maka nilai tegangan gesernya dapat diperhitungkan sebagai berikut :

$$A = 9,62 \text{ mm}^2$$

$$F = 300,91 \text{ Kg}$$

$$F = 2.951,92 \text{ N}$$

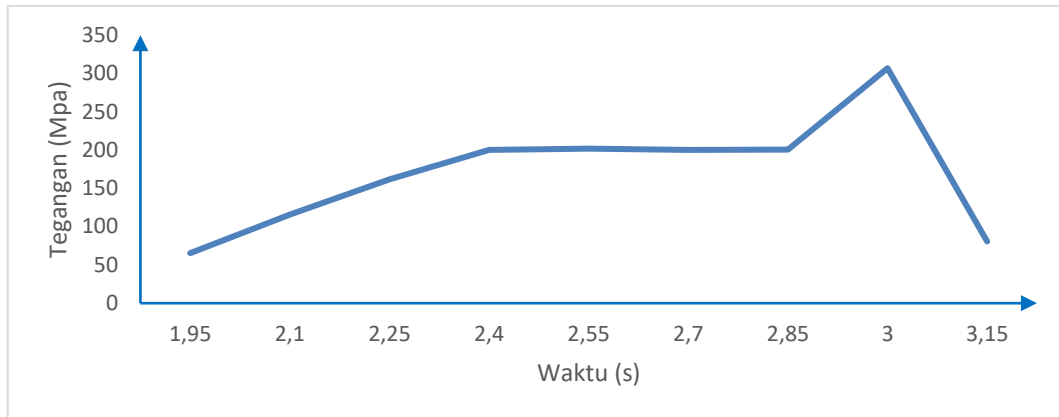
$$\tau = \frac{F}{A}$$

$$\tau = \frac{2.951,92 \text{ N}}{9,62 \text{ mm}^2}$$

$$\tau = 306,85 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau = 306,85 \text{ MPa}$$

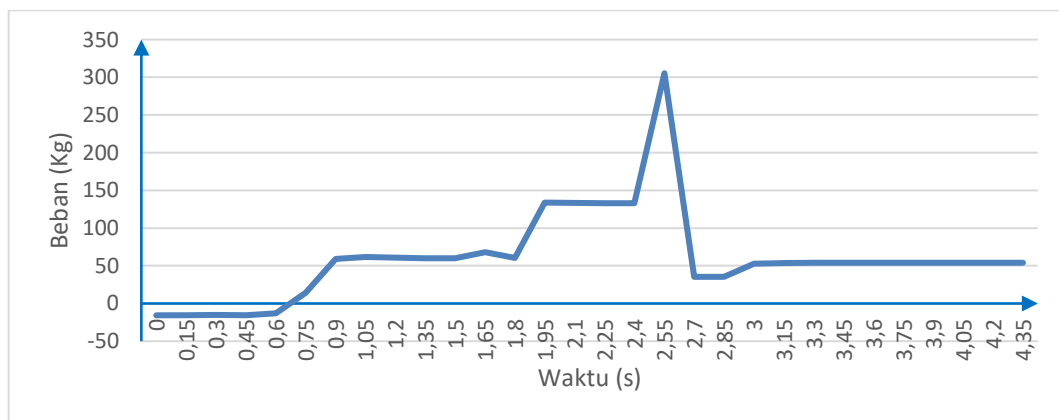
Jadi hasil perhitungan tegangan geser pada material Tembaga percobaan ke-1 sebesar 306,85 Mpa.

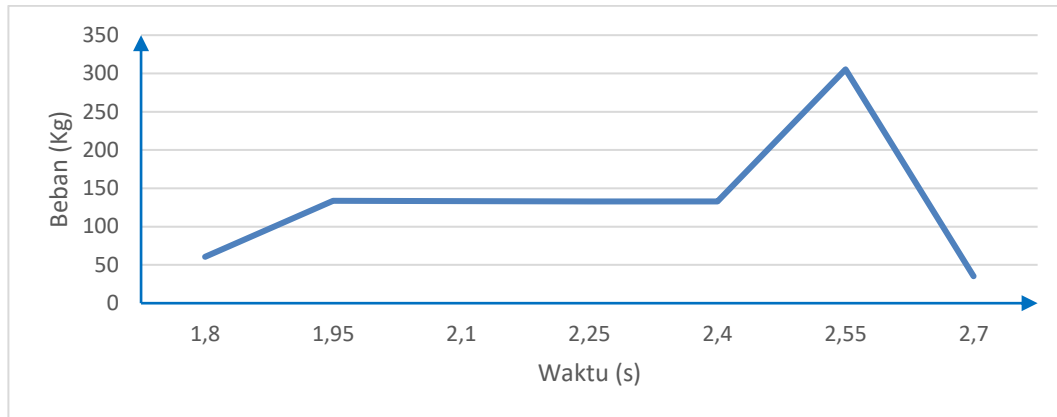


Gambar 4. 3 Distribusi aktual tegangan selama waktu pengujian geser ke-1

4.2.2 Hasil pengujian pada bahan uji percobaan ke-2

Merujuk pada Gambar 4.4 ditunjukkan distribusi beban terhadap waktu selama pengujian geser ke-2. Terlihat bahwa beban mengalami peningkatan seiring waktu hingga mencapai nilai maksimum yang tercatat sebesar 305,35, kemudian menurun drastis yang menandakan terjadinya patahan pada spesimen. Untuk memperjelas bagian utama pengujian, Gambar 4.5 menampilkan distribusi aktual tegangan pada rentang waktu 1,8–2,7 detik ketika proses geser terjadi secara signifikan.





Gambar 4. 4 Distribusi beban selama waktu pengujian geser ke-2

Merujuk pada gambar 4.4, maka nilai tegangan gesernya dapat diperhitungkan sebagai berikut :

$$A = 9,62 \text{ mm}^2$$

$$F = 305,35 \text{ kg}$$

$$F = 2.995,48 \text{ N}$$

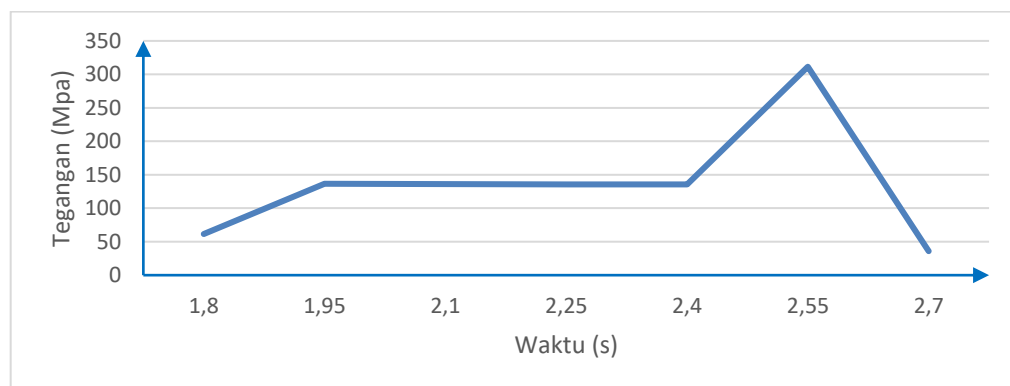
$$\tau = \frac{F}{A}$$

$$\tau = \frac{2.995,48 \text{ N}}{9,62 \text{ mm}^2}$$

$$\tau = 311,38 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau = 311,38 \text{ Mpa}$$

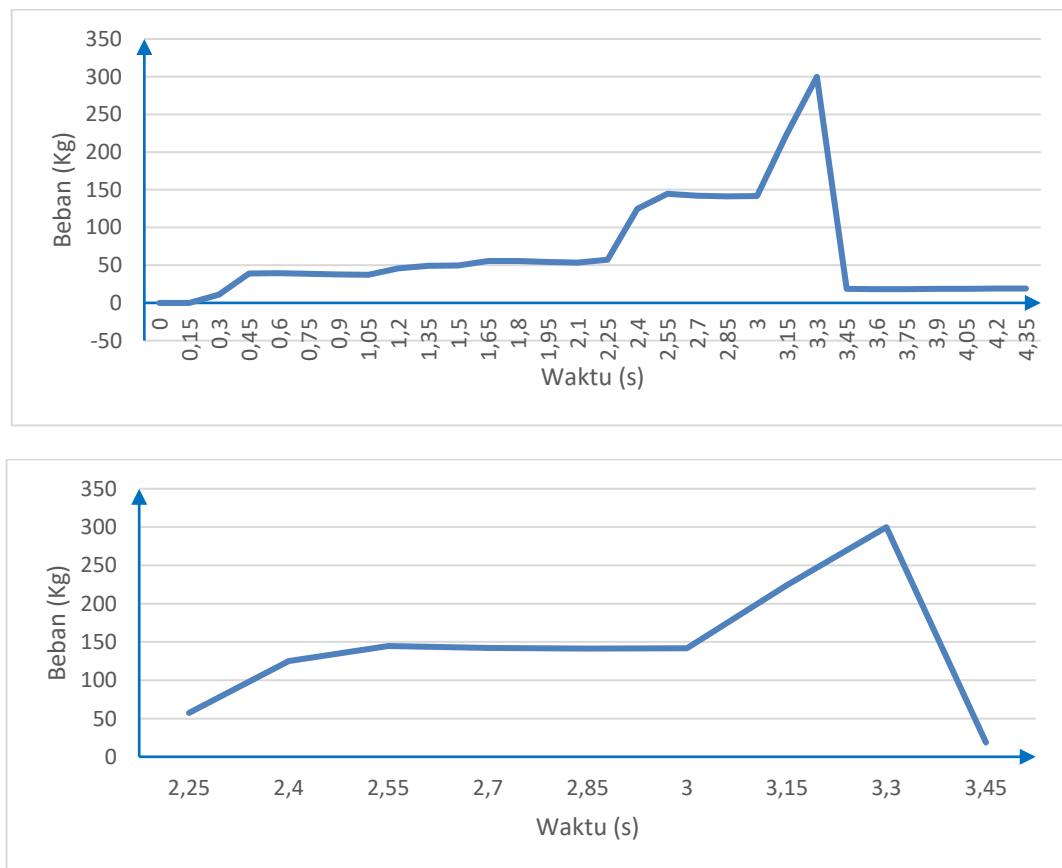
Jadi hasil perhitungan tegangan geser pada material Tembaga percobaan ke-2 sebesar 311,38 Mpa.



Gambar 4. 5 Distribusi aktual tegangan selama waktu pengujian geser ke-2

4.2.3 Hasil pengujian pada bahan uji percobaan ke-3

Merujuk pada Gambar 4.6 ditunjukkan distribusi beban terhadap waktu selama pengujian geser ke-3. Terlihat bahwa beban mengalami peningkatan seiring waktu hingga mencapai nilai maksimum yang tercatat sebesar 299,86, kemudian menurun drastis yang menandakan terjadinya patahan pada spesimen. Untuk memperjelas bagian utama pengujian, Gambar 4.7 menampilkan distribusi aktual tegangan pada rentang waktu 2,25-3,45 detik ketika proses geser terjadi secara signifikan.



Gambar 4. 6 Distribusi beban selama waktu pengujian geser ke-3

Merujuk pada gambar 4.6, maka nilai tegangan gesernya dapat diperhitungkan sebagai berikut :

$$A = 9,62 \text{ mm}^2$$

$$F = 299,86 \text{ kg}$$

$$F = 2.941,63 \text{ N}$$

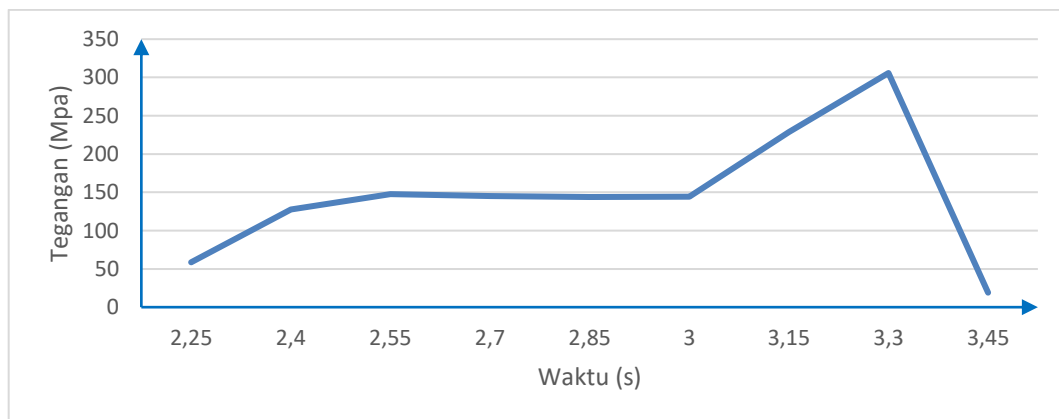
$$\tau = \frac{F}{A}$$

$$\tau = \frac{2.941,63 \text{ N}}{9,62 \text{ mm}^2}$$

$$\tau = 305,9 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau = 305,9 \text{ Mpa}$$

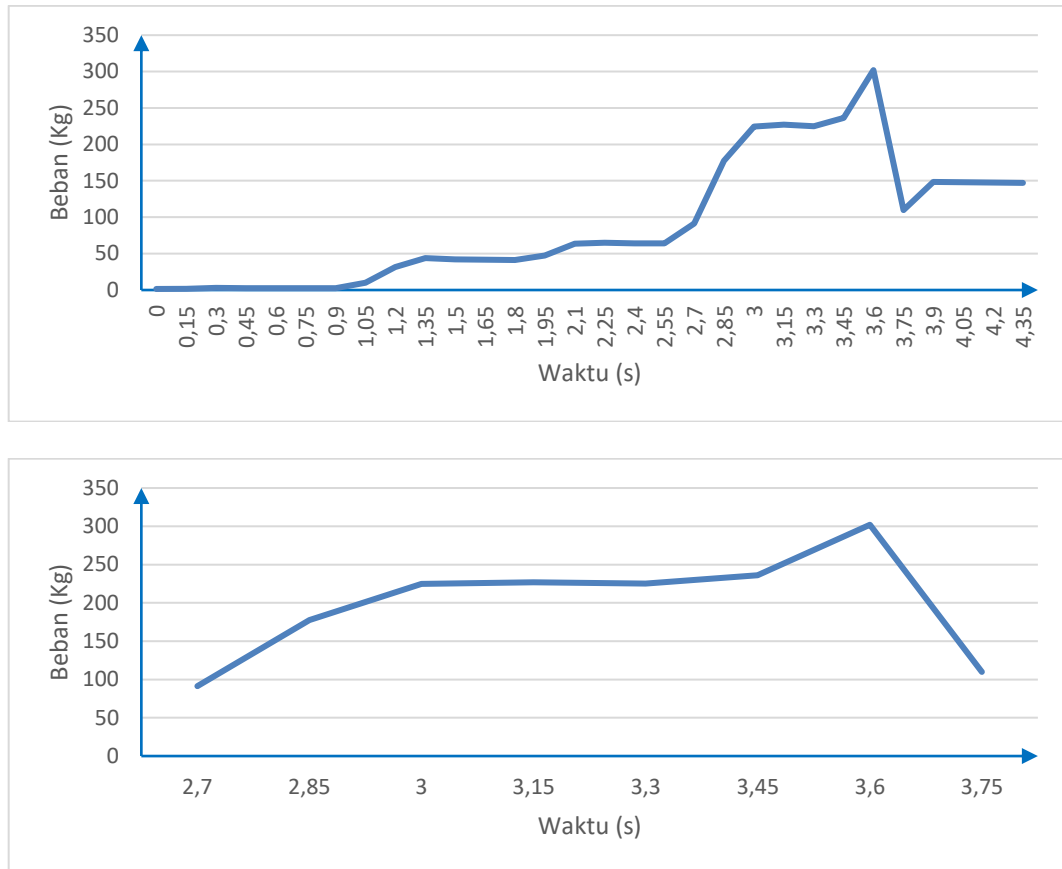
Jadi hasil perhitungan tegangan geser pada material Tembaga percobaan ke-3 sebesar 305,95 Mpa.



Gambar 4. 7 Distribusi aktual tegangan selama waktu pengujian geser ke-3

4.2.4 Hasil pengujian pada bahan uji percobaan ke-4

Merujuk pada Gambar 4.8 ditunjukkan distribusi beban terhadap waktu selama pengujian geser ke-4. Terlihat bahwa beban mengalami peningkatan seiring waktu hingga mencapai nilai maksimum yang tercatat sebesar 301,99, kemudian menurun drastis yang menandakan terjadinya patahan pada spesimen. Untuk memperjelas bagian utama pengujian, Gambar 4.9 menampilkan distribusi aktual tegangan pada rentang waktu 2,7-3,75 detik ketika proses geser terjadi secara signifikan.



Gambar 4. 8 Distribusi beban selama waktu pengujian geser ke-4

Merujuk pada gambar 4.8, maka nilai tegangan gesernya dapat diperhitungkan sebagai berikut :

$$A = 9,62 \text{ mm}^2$$

$$F = 301,99 \text{ kg}$$

$$F = 2.962,52 \text{ N}$$

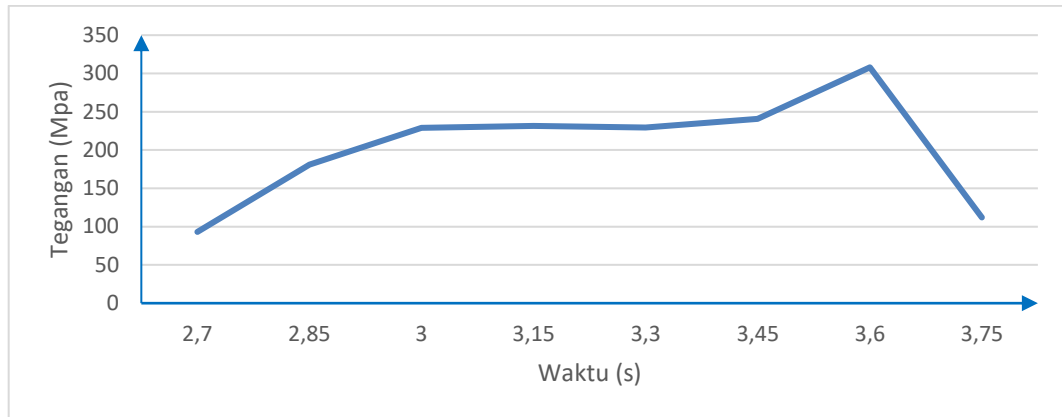
$$\tau = \frac{F}{A}$$

$$\tau = \frac{2.962,52 \text{ N}}{9,62 \text{ mm}^2}$$

$$\tau = 307,95 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau = 307,95 \text{ Mpa}$$

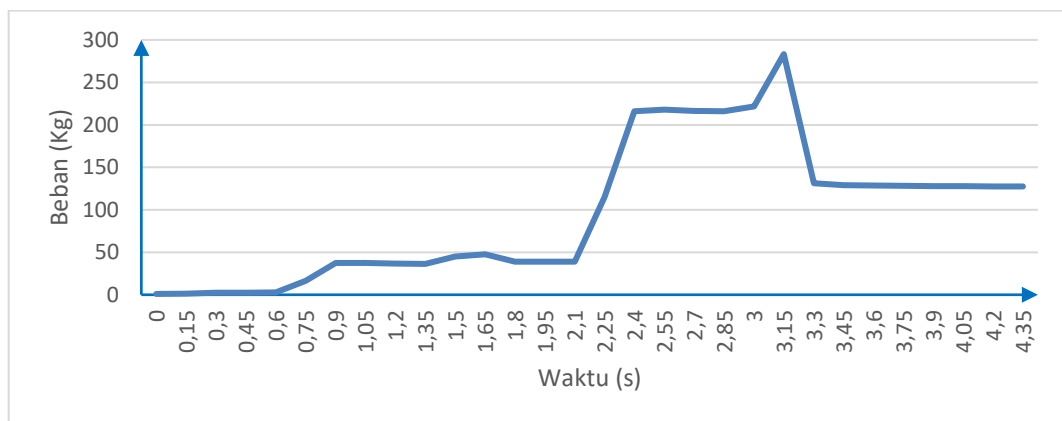
Jadi hasil perhitungan tegangan geser pada material Tembaga percobaan ke-4 sebesar 307,95 Mpa.

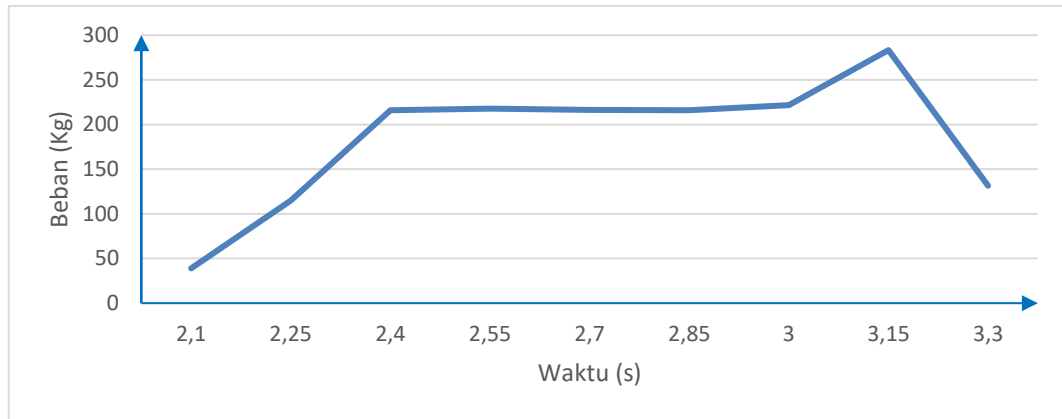


Gambar 4. 9 Distribusi aktual tegangan selama waktu pengujian geser ke-4

4.2.5 Hasil pengujian pada bahan uji percobaan ke-5

Merujuk pada Gambar 4.10 ditunjukkan distribusi beban terhadap waktu selama pengujian geser ke-5. Terlihat bahwa beban mengalami peningkatan seiring waktu hingga mencapai nilai maksimum yang tercatat sebesar 283,25, kemudian menurun drastis yang menandakan terjadinya patahan pada spesimen. Untuk memperjelas bagian utama pengujian, Gambar 4.11 menampilkan distribusi aktual tegangan pada rentang waktu 2,1-3,3 detik ketika proses geser terjadi secara signifikan.





Gambar 4. 10 Distribusi beban selama waktu pengujian geser ke-5

Merujuk pada gambar 4.10, maka nilai tegangan gesernya dapat diperhitungkan sebagai berikut :

$$A = 9,62 \text{ mm}^2$$

$$F = 283,25 \text{ kg}$$

$$F = 2.778,7 \text{ N}$$

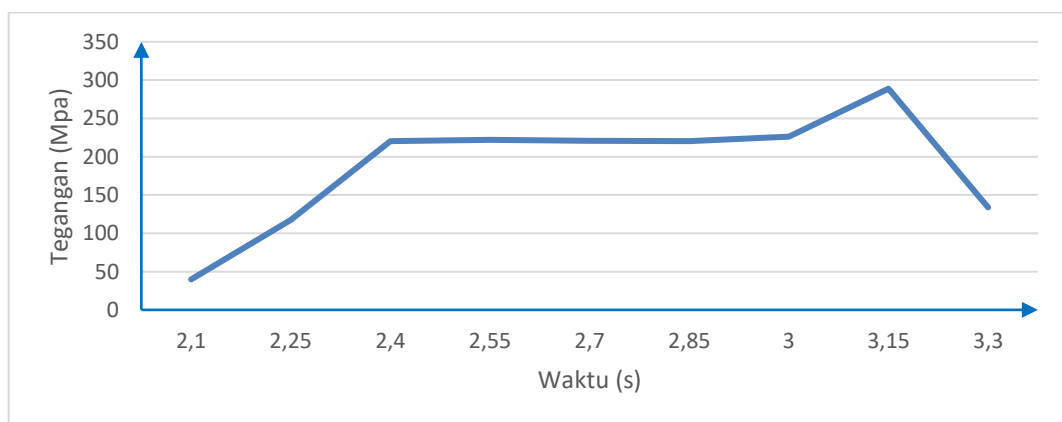
$$\tau = \frac{F}{A}$$

$$\tau = \frac{2.778,7 \text{ N}}{9,62 \text{ mm}^2}$$

$$\tau = 288,84 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau = 288,84 \text{ Mpa}$$

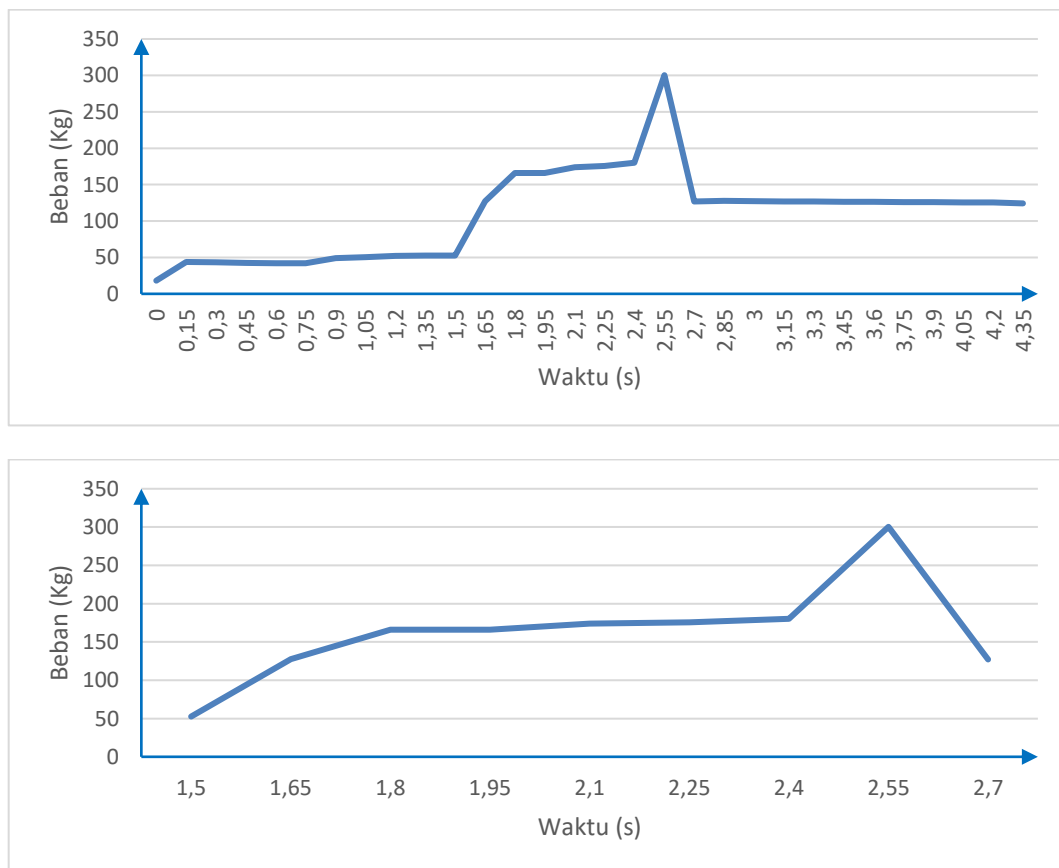
Jadi hasil perhitungan tegangan geser pada material Tembaga percobaan ke-5 sebesar 288,84 Mpa.



Gambar 4. 11 Distribusi aktual tegangan selama waktu pengujian geser ke-5

4.2.6 Hasil pengujian pada bahan uji percobaan ke-6

Merujuk pada Gambar 4.12 ditunjukkan distribusi beban terhadap waktu selama pengujian geser ke-6. Terlihat bahwa beban mengalami peningkatan seiring waktu hingga mencapai nilai maksimum yang tercatat sebesar 300,29 , kemudian menurun drastis yang menandakan terjadinya patahan pada spesimen. Untuk memperjelas bagian utama pengujian, Gambar 4.13 menampilkan distribusi aktual tegangan pada rentang waktu 1,5-2,7 detik ketika proses geser terjadi secara signifikan.



Gambar 4. 12 Distribusi beban selama waktu pengujian geser ke-6

Merujuk pada gambar 4.12, maka nilai tegangan gesernya dapat diperhitungkan sebagai berikut :

$$A = 9,62 \text{ mm}^2$$

$$F = 300,29 \text{ kg}$$

$$F = 2.945,84 \text{ N}$$

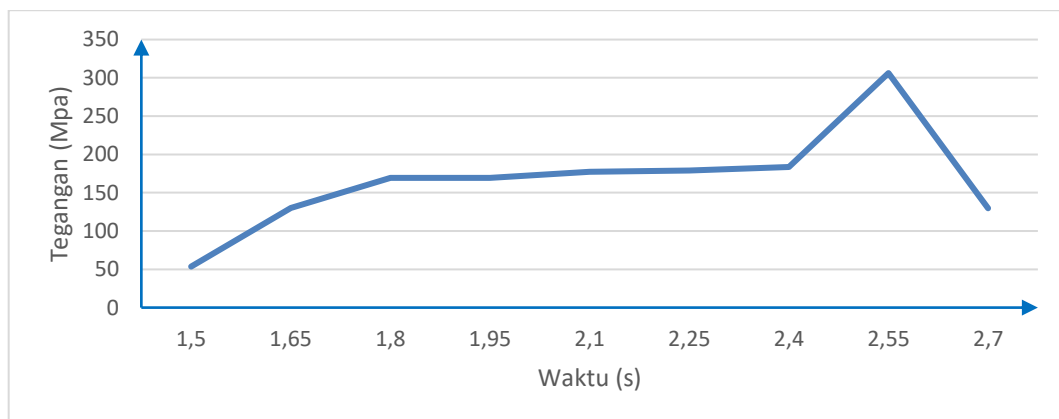
$$\tau = \frac{F}{A}$$

$$\tau = \frac{2.945,84 \text{ N}}{9,62 \text{ mm}^2}$$

$$\tau = 306,22 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau = 306,22 \text{ Mpa}$$

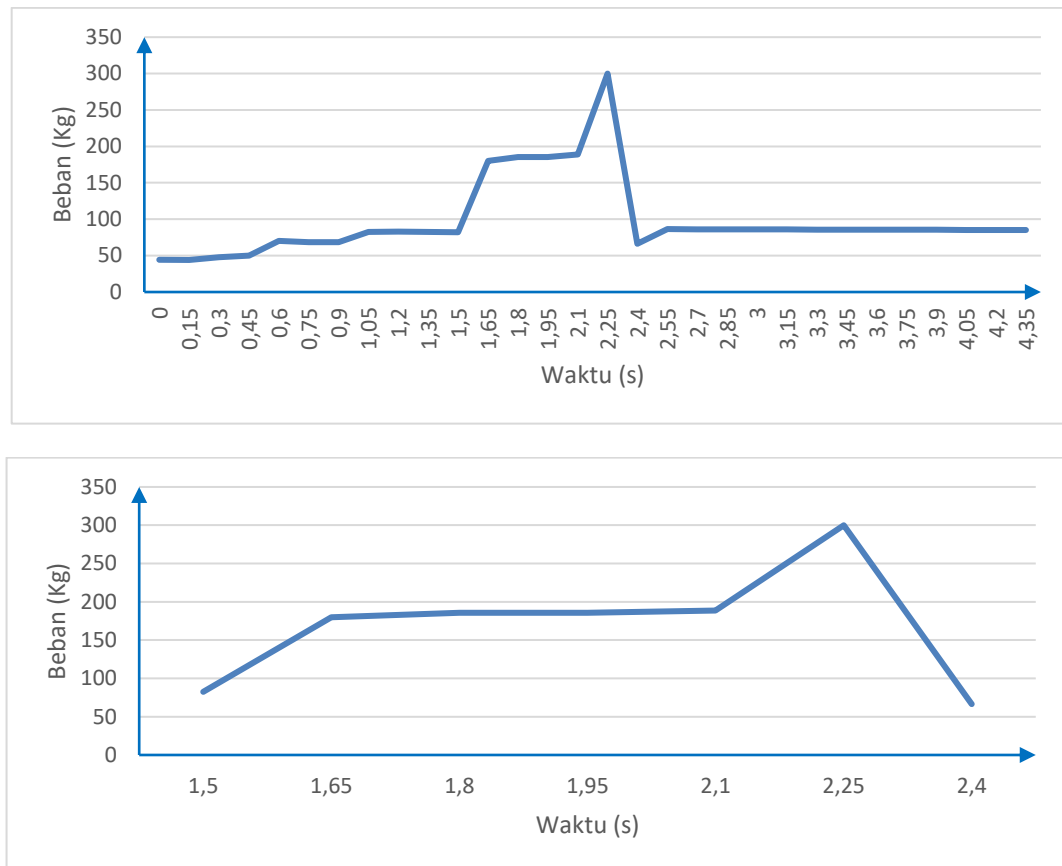
Jadi hasil perhitungan tegangan geser pada material Tembaga percobaan ke-6 sebesar 306,22 Mpa.



Gambar 4. 13 Distribusi aktual tegangan selama waktu pengujian geser ke-6

4.2.7 Hasil pengujian pada bahan uji percobaan ke-7

Merujuk pada Gambar 4.14 ditunjukkan distribusi beban terhadap waktu selama pengujian geser ke-7. Terlihat bahwa beban mengalami peningkatan seiring waktu hingga mencapai nilai maksimum yang tercatat sebesar 299,96, kemudian menurun drastis yang menandakan terjadinya patahan pada spesimen. Untuk memperjelas bagian utama pengujian, Gambar 4.15 menampilkan distribusi aktual tegangan pada rentang waktu 1,5-2,4 detik ketika proses geser terjadi secara signifikan.



Gambar 4. 14 Distribusi beban selama waktu pengujian geser ke-7

Merujuk pada gambar 4.14, maka nilai tegangan gesernya dapat diperhitungkan sebagai berikut :

$$A = 9,62 \text{ mm}^2$$

$$F = 299,96 \text{ kg}$$

$$F = 2.942,6 \text{ N}$$

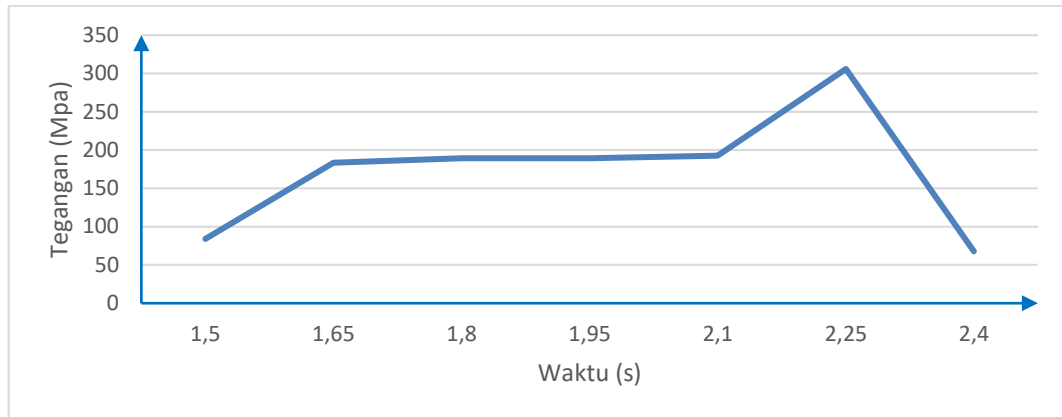
$$\tau = \frac{F}{A}$$

$$\tau = \frac{2.942,6 \text{ N}}{9,62 \text{ mm}^2}$$

$$\tau = 305,9 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau = 305,9 \text{ Mpa}$$

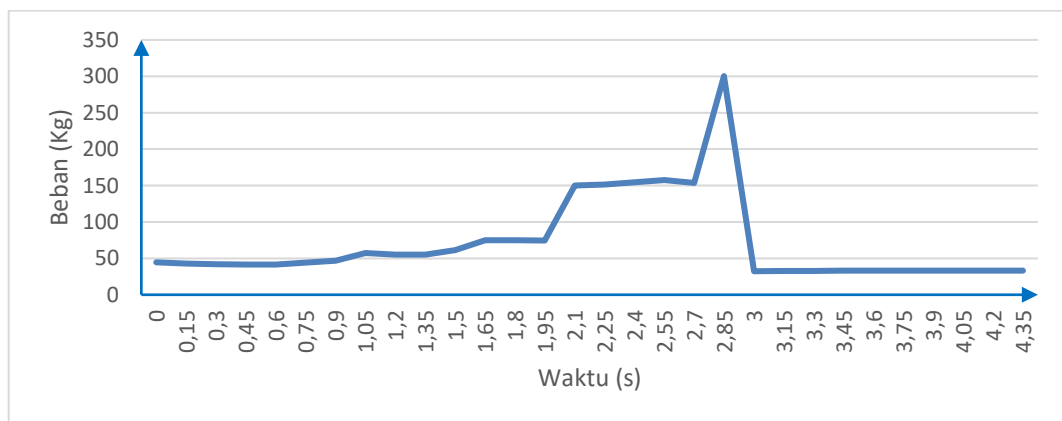
Jadi hasil perhitungan tegangan geser pada material Tembaga percobaan ke-7 sebesar 305,9 Mpa.

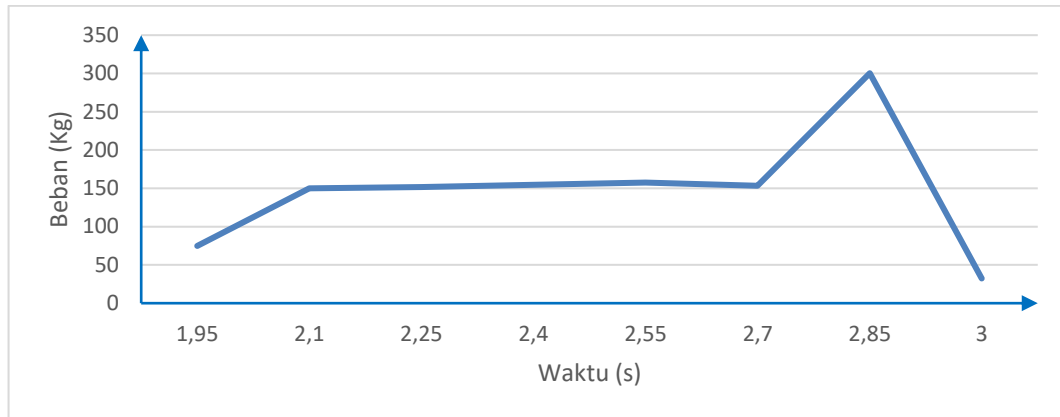


Gambar 4. 15 Distribusi aktual tegangan selama waktu pengujian geser ke-7

4.2.8 Hasil pengujian pada bahan uji percobaan ke-8

Merujuk pada Gambar 4.16 ditunjukkan distribusi beban terhadap waktu selama pengujian geser ke-8. Terlihat bahwa beban mengalami peningkatan seiring waktu hingga mencapai nilai maksimum yang tercatat sebesar 300,3, kemudian menurun drastis yang menandakan terjadinya patahan pada spesimen. Untuk memperjelas bagian utama pengujian, Gambar 4.17 menampilkan distribusi aktual tegangan pada rentang waktu 1,95–3 detik ketika proses geser terjadi secara signifikan.





Gambar 4. 16 Distribusi beban selama waktu pengujian geser ke-8

Merujuk pada gambar 4.16, maka nilai tegangan gesernya dapat diperhitungkan sebagai berikut :

$$A = 9,62 \text{ mm}^2$$

$$F = 300,3 \text{ kg}$$

$$F = 2.945,94 \text{ N}$$

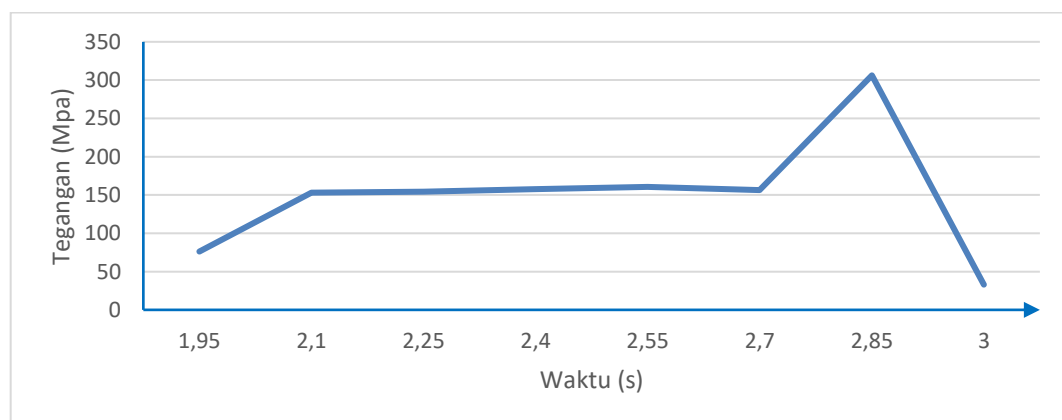
$$\tau = \frac{F}{A}$$

$$\tau = \frac{2.945,94 \text{ N}}{9,62 \text{ mm}^2}$$

$$\tau = 306,23 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau = 306,23 \text{ Mpa}$$

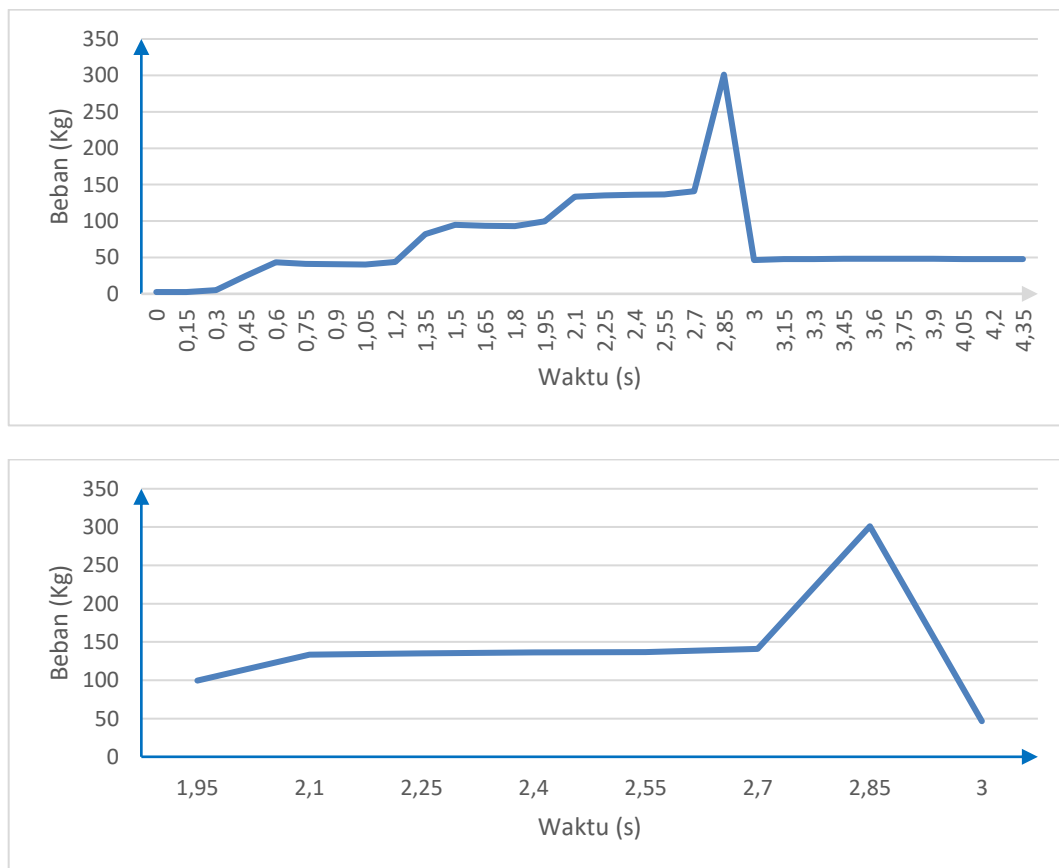
Jadi hasil perhitungan tegangan geser pada material Tembaga percobaan ke-8 sebesar 306,23 Mpa.



Gambar 4. 17 Distribusi aktual tegangan selama waktu pengujian geser ke-8

4.2.9 Hasil pengujian pada bahan uji percobaan ke-9

Merujuk pada Gambar 4.18 ditunjukkan distribusi beban terhadap waktu selama pengujian geser ke-9. Terlihat bahwa beban mengalami peningkatan seiring waktu hingga mencapai nilai maksimum yang tercatat sebesar 301,05, kemudian menurun drastis yang menandakan terjadinya patahan pada spesimen. Untuk memperjelas bagian utama pengujian, Gambar 4.19 menampilkan distribusi aktual tegangan pada rentang waktu 1,95-3 detik ketika proses geser terjadi secara signifikan.



Gambar 4. 18 Distribusi beban selama waktu pengujian geser ke-9

Merujuk pada gambar 4.18, maka nilai tegangan gesernya dapat diperhitungkan sebagai berikut :

$$A = 9,62 \text{ mm}^2$$

$$F = 301,05 \text{ kg}$$

$$F = 2.953,3 \text{ N}$$

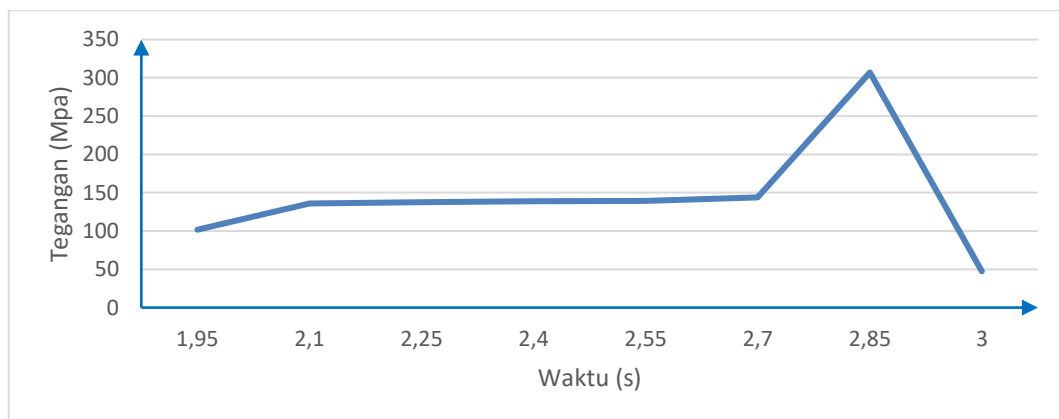
$$\tau = \frac{F}{A}$$

$$\tau = \frac{2.953,3 \text{ N}}{9,62 \text{ mm}^2}$$

$$\tau = 306,99 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau = 306,99 \text{ Mpa}$$

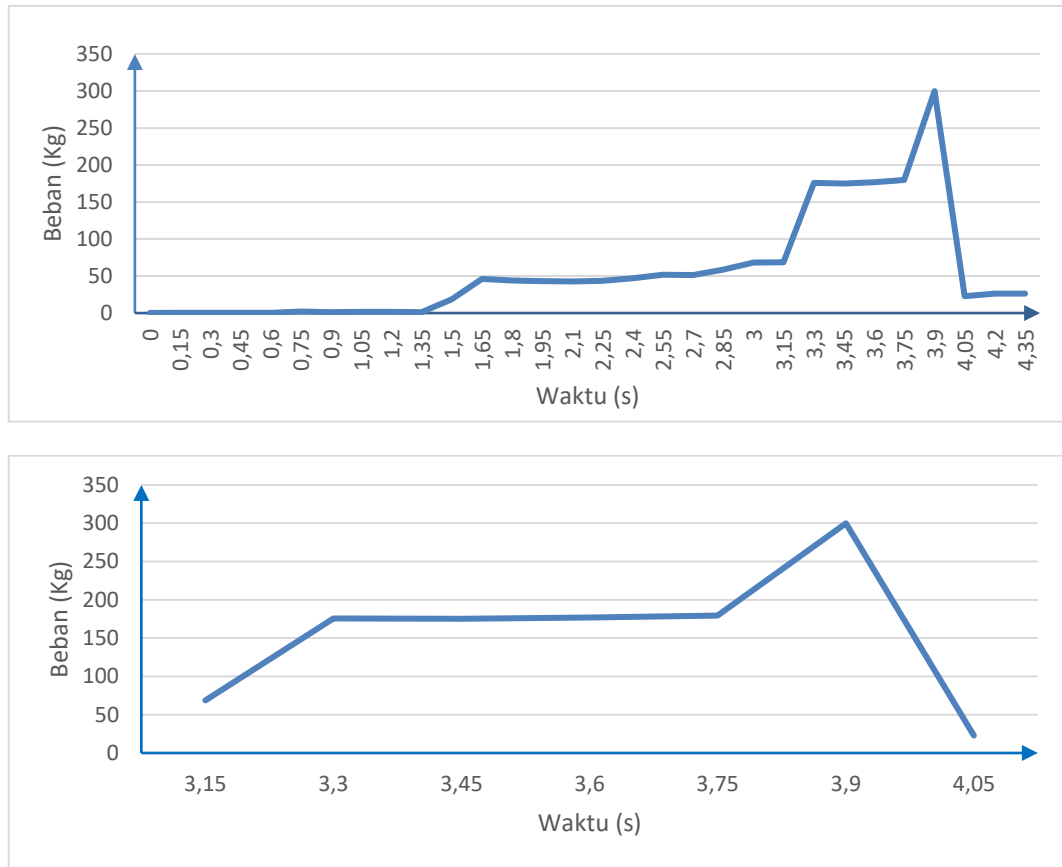
Jadi hasil perhitungan tegangan geser pada material Tembaga percobaan ke-9 sebesar 306,99 Mpa.



Gambar 4. 19 Distribusi aktual tegangan selama waktu pengujian geser ke-9

4.2.10 Hasil pengujian pada bahan uji percobaan ke-10

Merujuk pada Gambar 4.20 ditunjukkan distribusi beban terhadap waktu selama pengujian geser ke-10. Terlihat bahwa beban mengalami peningkatan seiring waktu hingga mencapai nilai maksimum yang tercatat sebesar 299,91, kemudian menurun drastis yang menandakan terjadinya patahan pada spesimen. Untuk memperjelas bagian utama pengujian, Gambar 4.21 menampilkan distribusi aktual tegangan pada rentang waktu 3,15–4,05 detik ketika proses geser terjadi secara signifikan.



Gambar 4. 20 Distribusi beban selama waktu pengujian geser ke-10

Merujuk pada gambar 4.20, maka nilai tegangan gesernya dapat diperhitungkan sebagai berikut :

$$A = 9,62 \text{ mm}^2$$

$$F = 299,91 \text{ kg}$$

$$F = 2.942,11 \text{ N}$$

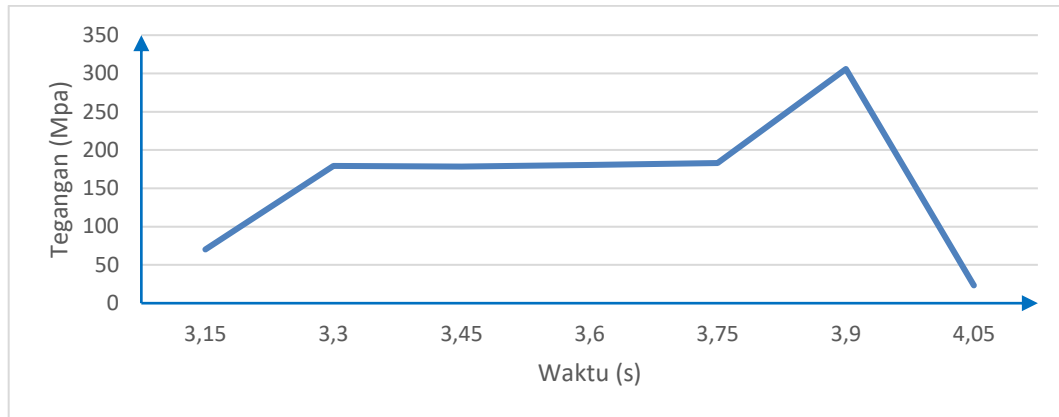
$$\tau = \frac{F}{A}$$

$$\tau = \frac{2.942,11 \text{ N}}{9,62 \text{ mm}^2}$$

$$\tau = 305,83 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau = 305,83 \text{ Mpa}$$

Jadi hasil perhitungan tegangan geser pada material Tembaga percobaan ke-10 sebesar 305,83 Mpa.



Gambar 4. 21 Distribusi aktual tegangan selama waktu pengujian geser ke-10

Tabel 4. 1 Nilai Tekanan Tembaga oleh *Load Cell*

Percobaan Ke-	Gaya (Kg)
1	300,91
2	305,35
3	299,86
4	301,99
5	283,25
6	300,29
7	299,96
8	300,3
9	301,05
10	299,91
Rata-Rata	299,29

Tabel 4. 2 Nilai tegangan geser tembaga

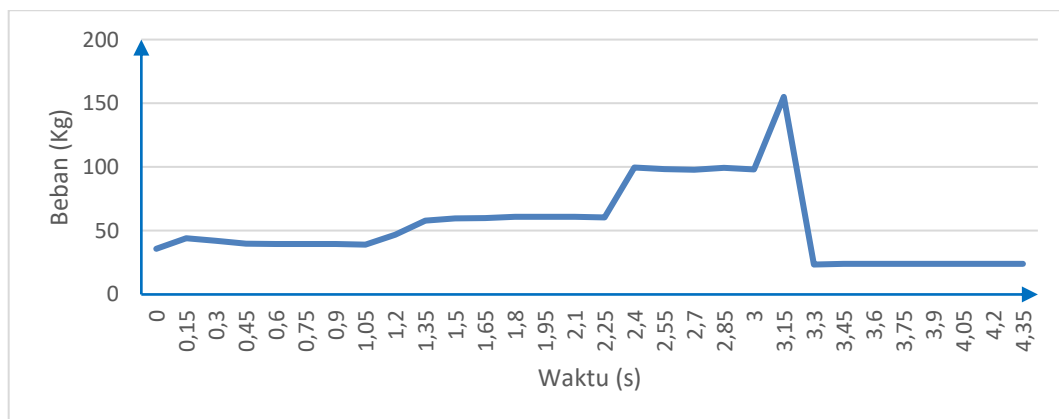
Percobaan Ke-	Tegangan Geser (MPa)
1	306,85
2	311,38
3	305,78
4	307,95
5	288,84
6	306,22
7	305,88
8	306,23
9	306,99
10	305,83
Rata-Rata	305,2

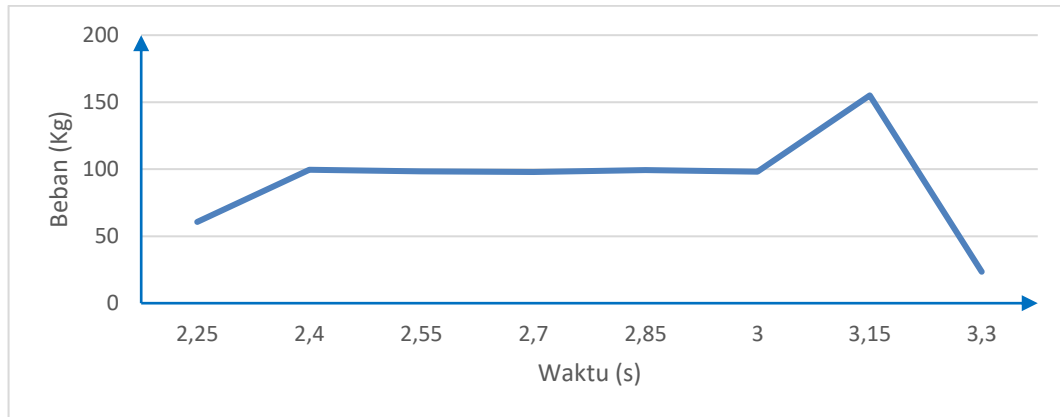
4.3 Pengaruh Perlakuan Panas Pada Material Uji

Perlakuan panas merupakan salah satu metode yang dapat memengaruhi sifat mekanik suatu material, termasuk kekuatan dan ketahanan terhadap beban. Material uji terlebih dahulu diberikan perlakuan panas berupa proses *hardening*, yaitu dengan memanaskan material hingga suhu $\pm 300^{\circ}\text{C}$ kemudian dilakukan pendinginan cepat (*quenching*) menggunakan media oli. Perlakuan ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh perubahan struktur mikro akibat perlakuan panas terhadap kemampuan material dalam menahan gaya geser.

4.3.1 Hasil pengujian pada bahan uji percobaan ke-1

Merujuk pada Gambar 4.22 ditunjukkan distribusi beban terhadap waktu selama pengujian geser ke-1. Terlihat bahwa beban mengalami peningkatan seiring waktu hingga mencapai nilai maksimum yang tercatat sebesar 155,05, kemudian menurun drastis yang menandakan terjadinya patahan pada spesimen. Untuk memperjelas bagian utama pengujian, Gambar 4.23 menampilkan distribusi aktual tegangan pada rentang waktu 2,25–3,3 detik ketika proses geser terjadi secara signifikan.





Gambar 4. 22 Distribusi beban uji geser ke-1 setelah perlakuan panas

Dapat merujuk pada gambar 4.22, maka nilai tegangan gesernya dapat diperhitungkan sebagai berikut :

$$A = 9,62 \text{ mm}^2$$

$$F = 155,05 \text{ kg}$$

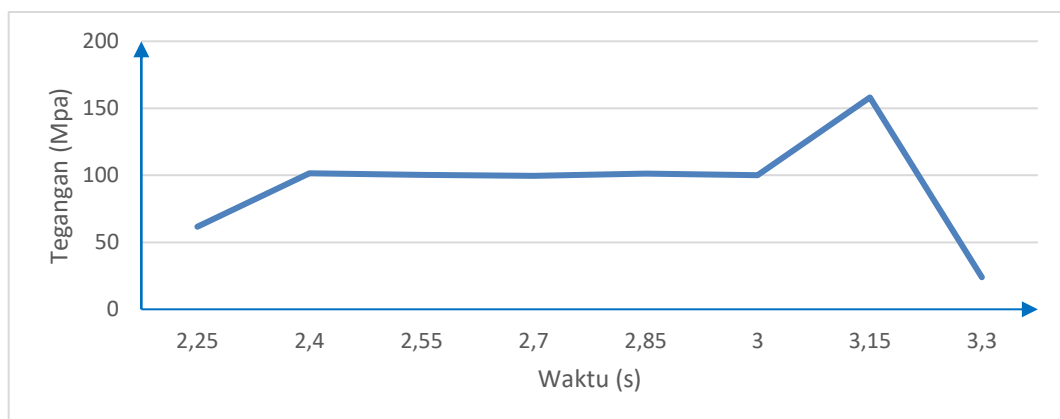
$$F = 1.521,04 \text{ N}$$

$$\tau = \frac{F}{A}$$

$$\tau = \frac{1.521,04 \text{ N}}{9,62 \text{ mm}^2}$$

$$\tau = 158,11 \text{ N/mm}^2$$

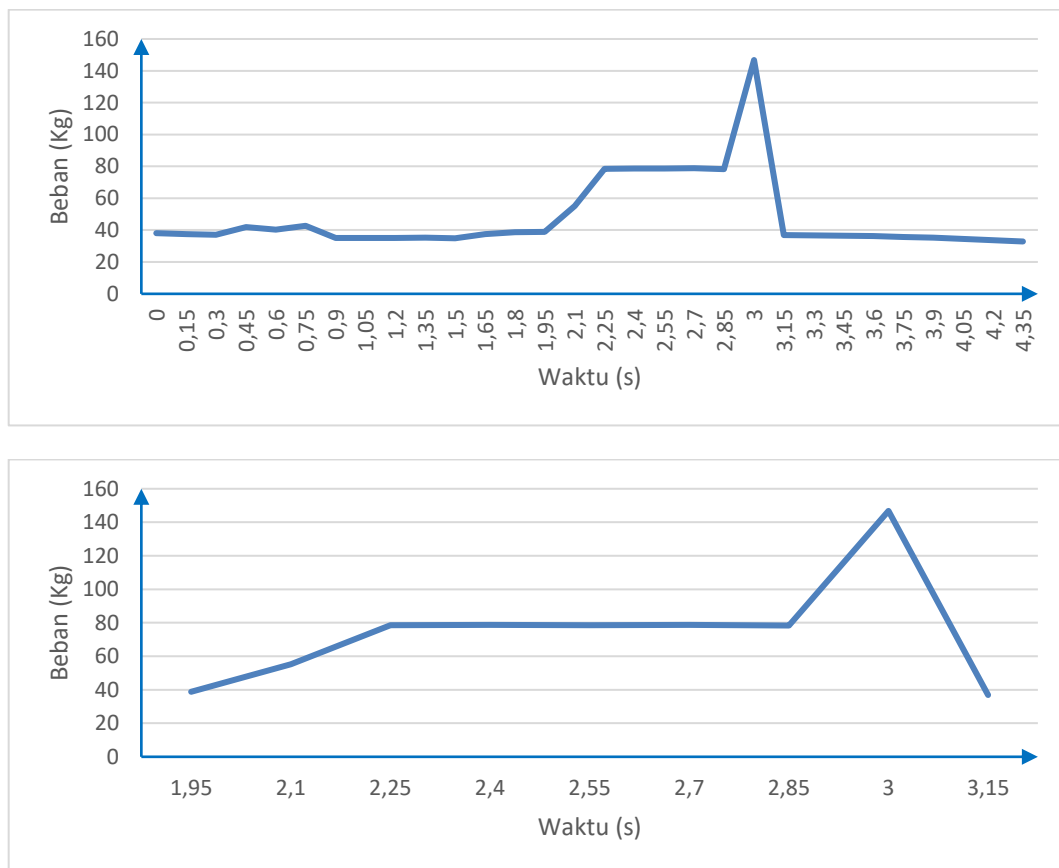
Pada pengujian bahan uji percobaan ke-1 gaya yang tercatat pada *load cell* sebesar 155,05 kg dan tegangan geser sebesar 158,11 N/mm².



Gambar 4. 23 Distribusi aktual tegangan uji geser ke-1 setelah perlakuan panas

4.3.2 Hasil pengujian pada bahan uji percobaan ke-2

Merujuk pada Gambar 4.24 ditunjukkan distribusi beban terhadap waktu selama pengujian geser ke-2. Terlihat bahwa beban mengalami peningkatan seiring waktu hingga mencapai nilai maksimum yang tercatat sebesar 146,79, kemudian menurun drastis yang menandakan terjadinya patahan pada spesimen. Untuk memperjelas bagian utama pengujian, Gambar 4.25 menampilkan distribusi aktual tegangan pada rentang waktu 1,95-3,15 detik ketika proses geser terjadi secara signifikan.



Gambar 4. 24 Distribusi beban uji geser ke-2 setelah perlakuan panas

Merujuk pada gambar 4.24, maka nilai tegangan gesernya dapat diperhitungkan sebagai berikut :

$$A = 9,62 \text{ mm}^2$$

$$F = 146,79 \text{ kg}$$

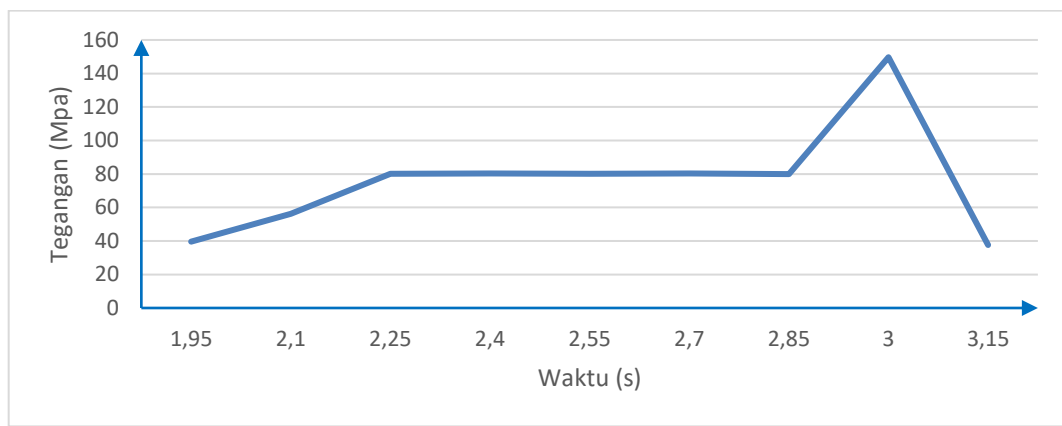
$$F = 1.440,01 \text{ N}$$

$$\tau = \frac{F}{A}$$

$$\tau = \frac{1.440,01 \text{ N}}{9,62 \text{ mm}^2}$$

$$\tau = 149,69 \text{ N/mm}^2$$

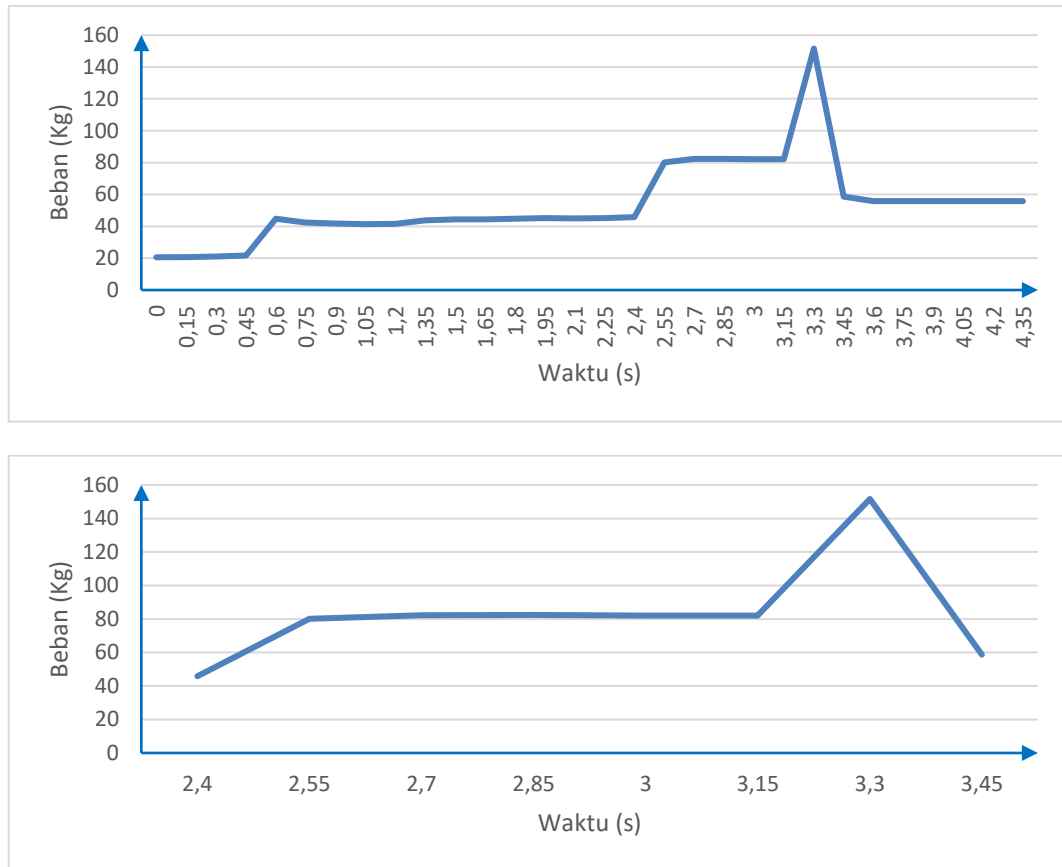
Pada pengujian bahan uji percobaan ke-2 gaya yang tercatat pada *load cell* sebesar 146,79 kg dan tegangan geser sebesar 149,69 N/mm².



Gambar 4. 25 Distribusi aktual tegangan uji geser ke-2 setelah perlakuan panas

4.3.3 Hasil pengujian pada bahan uji percobaan ke-3

Merujuk pada Gambar 4.26 ditunjukkan distribusi beban terhadap waktu selama pengujian geser ke-3. Terlihat bahwa beban mengalami peningkatan seiring waktu hingga mencapai nilai maksimum yang tercatat sebesar 151,62, kemudian menurun drastis yang menandakan terjadinya patahan pada spesimen. Untuk memperjelas bagian utama pengujian, Gambar 4.27 menampilkan distribusi aktual tegangan pada rentang waktu 2,4-3,45 detik ketika proses geser terjadi secara signifikan.



Gambar 4. 26 Distribusi beban uji geser ke-3 setelah perlakuan panas

Merujuk pada gambar 4.26, maka nilai tegangan gesernya dapat diperhitungkan sebagai berikut :

$$A = 9,62 \text{ mm}^2$$

$$F = 151,62 \text{ kg}$$

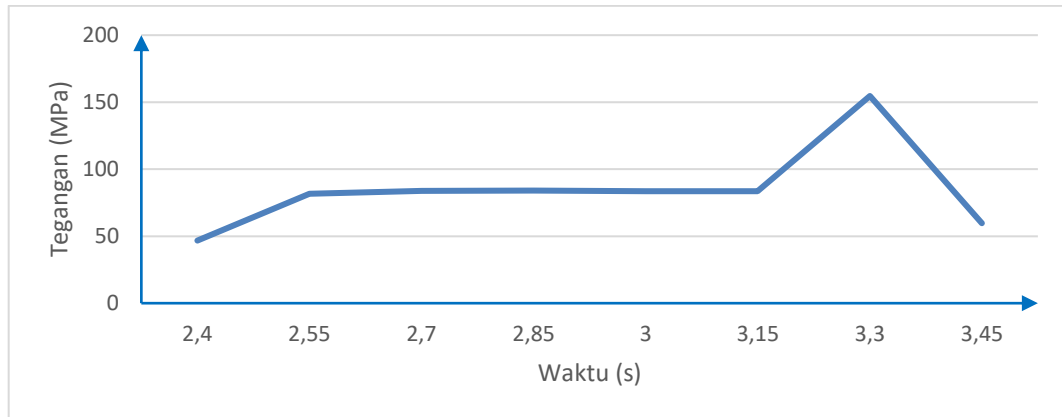
$$F = 1.487,4 \text{ N}$$

$$\tau = \frac{F}{A}$$

$$\tau = \frac{1.487,4 \text{ N}}{9,62 \text{ mm}^2}$$

$$\tau = 154,61 \text{ N/mm}^2$$

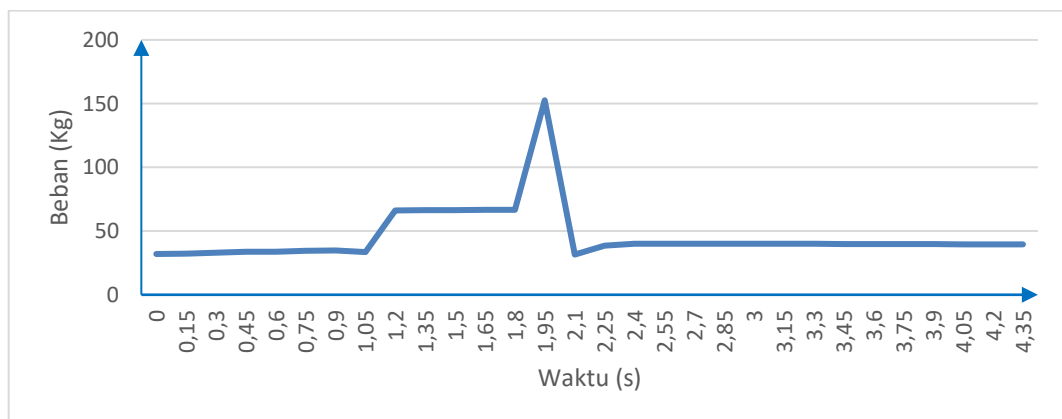
Pada pengujian bahan uji percobaan ke-3 gaya yang tercatat pada *load cell* sebesar 151,62 kg dan tegangan geser sebesar 154,61 N/mm².

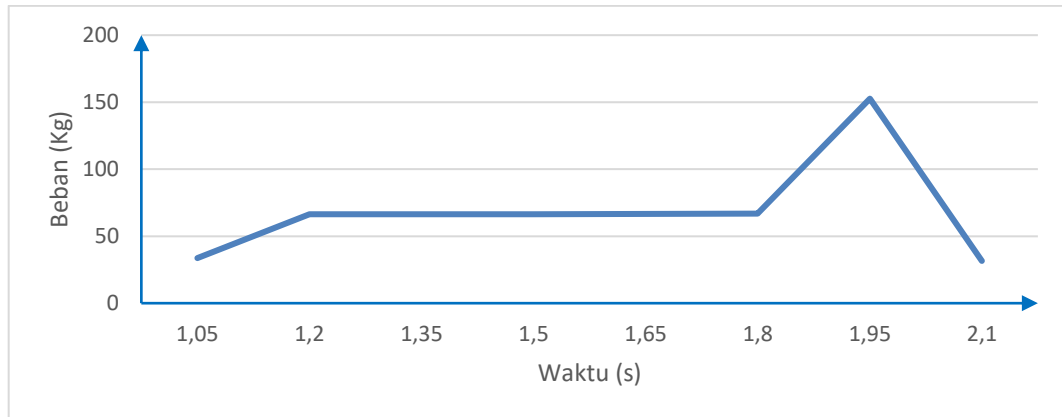


Gambar 4. 27 Distribusi aktual tegangan uji geser ke-3 setelah perlakuan panas

4.3.4 Hasil pengujian pada bahan uji percobaan ke-4

Merujuk pada Gambar 4.28 ditunjukkan distribusi beban terhadap waktu selama pengujian geser ke-4. Terlihat bahwa beban mengalami peningkatan seiring waktu hingga mencapai nilai maksimum yang tercatat sebesar 152,62, kemudian menurun drastis yang menandakan terjadinya patahan pada spesimen. Untuk memperjelas bagian utama pengujian, Gambar 4.29 menampilkan distribusi aktual tegangan pada rentang waktu 1,05-2,1 detik ketika proses geser terjadi secara signifikan.





Gambar 4. 28 Distribusi beban uji geser ke-4 setelah perlakuan panas

Merujuk pada gambar 4.28, maka nilai tegangan gesernya dapat diperhitungkan sebagai berikut :

$$A = 9,62 \text{ mm}^2$$

$$F = 152,62 \text{ kg}$$

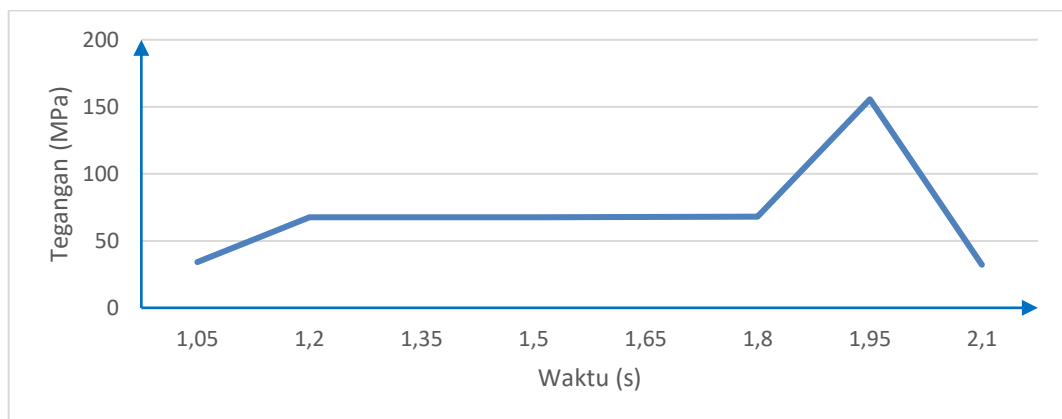
$$F = 1.497,2 \text{ N}$$

$$\tau = \frac{F}{A}$$

$$\tau = \frac{1.497,2 \text{ N}}{9.62 \text{ mm}^2}$$

$$\tau = 155,63 \text{ N/mm}^2$$

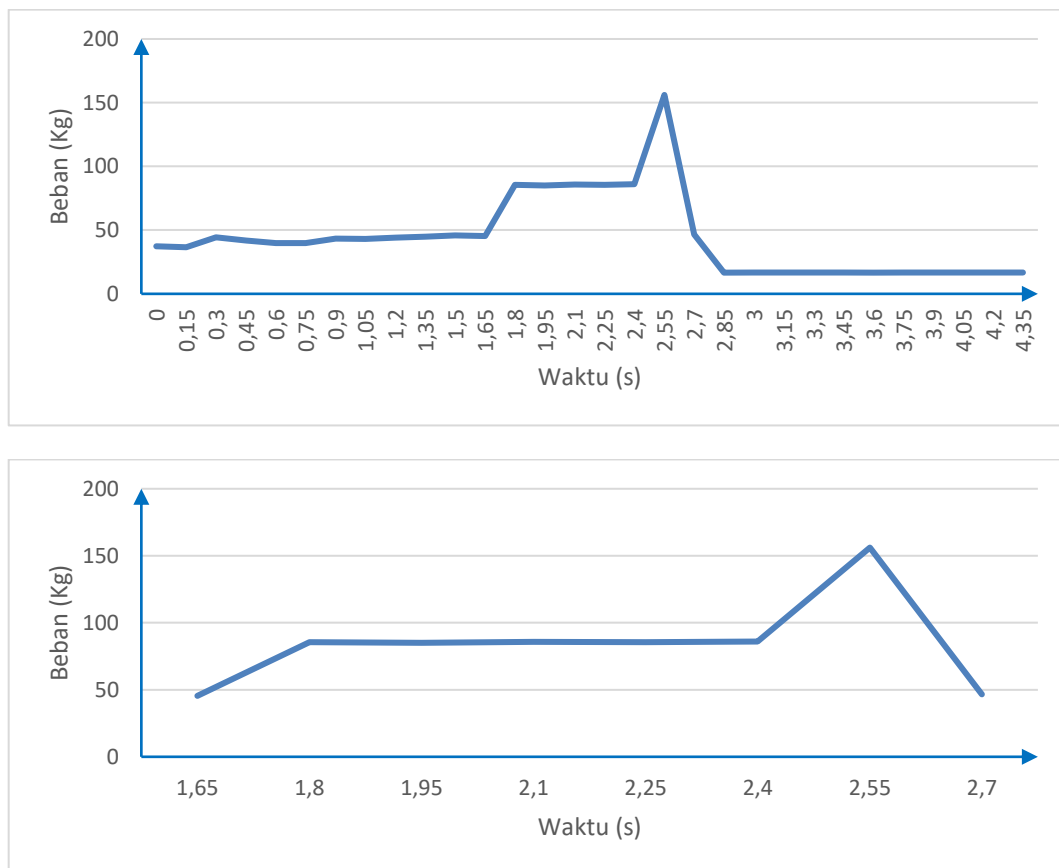
Pada pengujian bahan uji percobaan ke-4 gaya yang tercatat pada *load cell* sebesar 152,62 Kg dan tegangan geser sebesar 155,63 N/mm².



Gambar 4. 29 Distribusi aktual tegangan uji geser ke-4 setelah perlakuan panas

4.3.5 Hasil pengujian pada bahan uji percobaan ke-5

Merujuk pada Gambar 4.30 ditunjukkan distribusi beban terhadap waktu selama pengujian geser ke-5. Terlihat bahwa beban mengalami peningkatan seiring waktu hingga mencapai nilai maksimum yang tercatat sebesar 156,1, kemudian menurun drastis yang menandakan terjadinya patahan pada spesimen. Untuk memperjelas bagian utama pengujian, Gambar 4.31 menampilkan distribusi aktual tegangan pada rentang waktu 1,65-2,7 detik ketika proses geser terjadi secara signifikan.



Gambar 4. 30 Distribusi beban uji geser ke-5 setelah perlakuan panas

Merujuk pada gambar 4.30, maka nilai tegangan gesernya dapat diperhitungkan sebagai berikut :

$$A = 9,62 \text{ mm}^2$$

$$F = 156,1 \text{ kg}$$

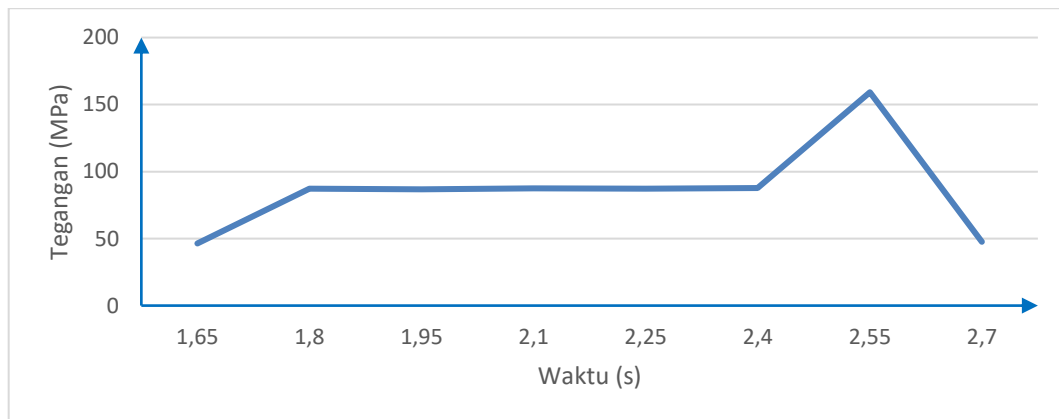
$$F = 1.531,34 \text{ N}$$

$$\tau = \frac{F}{A}$$

$$\tau = \frac{1.531,34 \text{ N}}{9,62 \text{ mm}^2}$$

$$\tau = 159,18 \text{ N/mm}^2$$

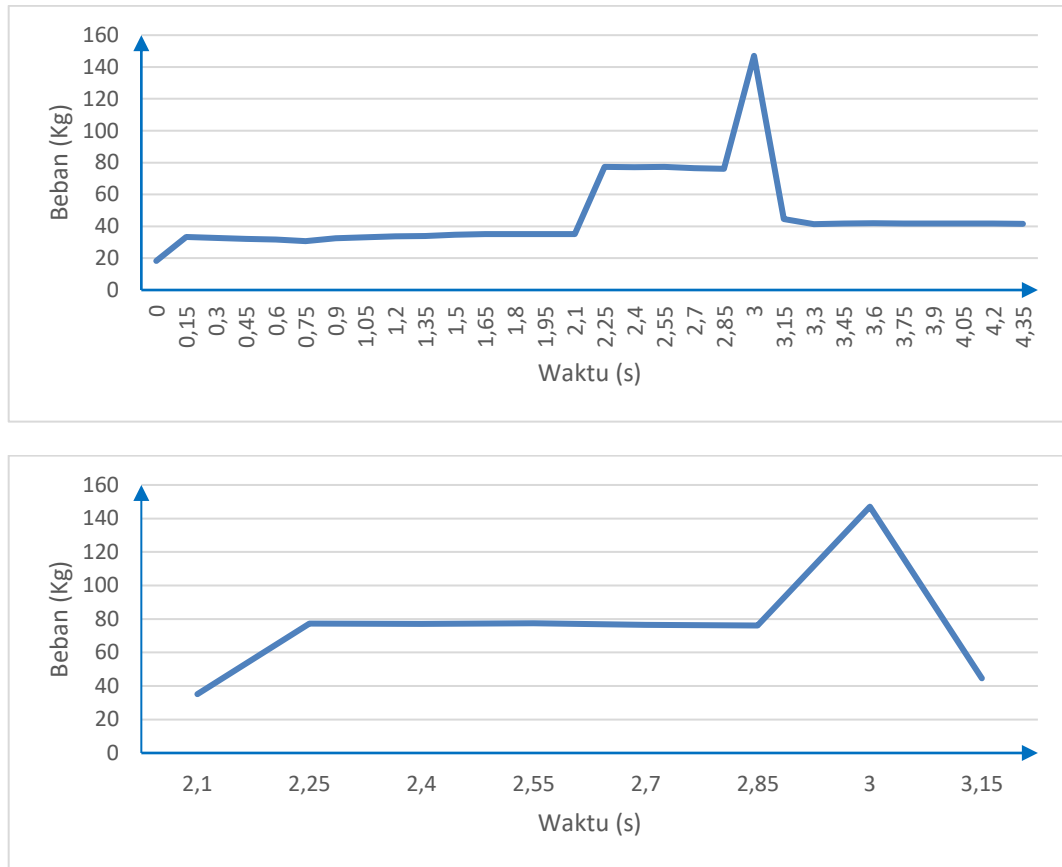
Pada pengujian bahan uji percobaan ke-5 gaya yang tercatat pada *load cell* sebesar 156,1 Kg dan tegangan geser sebesar 159,18 N/mm².



Gambar 4. 31 Distribusi aktual tegangan uji geser ke-5 setelah perlakuan panas

4.3.6 Hasil pengujian pada bahan uji percobaan ke-6

Merujuk pada Gambar 4.32 ditunjukkan distribusi beban terhadap waktu selama pengujian geser ke-6. Terlihat bahwa beban mengalami peningkatan seiring waktu hingga mencapai nilai maksimum yang tercatat sebesar 147,03, kemudian menurun drastis yang menandakan terjadinya patahan pada spesimen. Untuk memperjelas bagian utama pengujian, Gambar 4.33 menampilkan distribusi aktual tegangan pada rentang waktu 2,1-3,15 detik ketika proses geser terjadi secara signifikan.



Gambar 4. 32 Distribusi beban uji geser ke-6 setelah perlakuan panas

Merujuk pada gambar 4.32, maka nilai tegangan gesernya dapat diperhitungkan sebagai berikut :

$$A = 9,62 \text{ mm}^2$$

$$F = 147,03 \text{ kg}$$

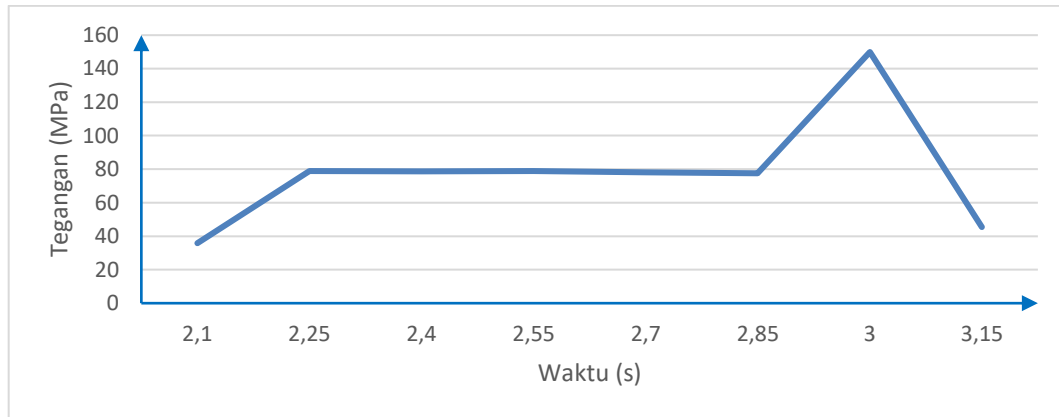
$$F = 1.442,36 \text{ N}$$

$$\tau = \frac{F}{A}$$

$$\tau = \frac{1.442,36 \text{ N}}{9,62 \text{ mm}^2}$$

$$\tau = 149,93 \text{ N/mm}^2$$

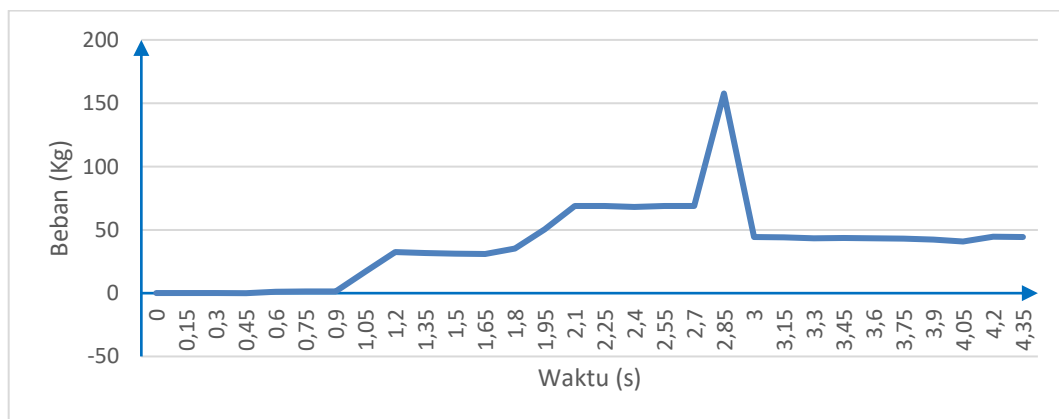
Pada pengujian bahan uji percobaan ke-6 gaya yang tercatat pada *load cell* sebesar 147,03 Kg dan tegangan geser sebesar 149,93 N/mm².

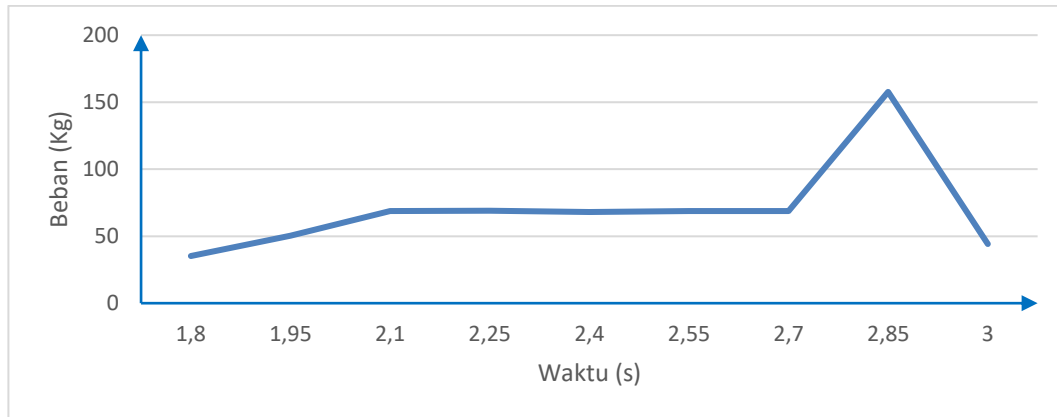


Gambar 4. 33 Distribusi aktual tegangan uji geser ke-6 setelah perlakuan panas

4.3.7 Hasil pengujian pada bahan uji percobaan ke-7

Merujuk pada Gambar 4.34 ditunjukkan distribusi beban terhadap waktu selama pengujian geser ke-7. Terlihat bahwa beban mengalami peningkatan seiring waktu hingga mencapai nilai maksimum yang tercatat sebesar 157,68, kemudian menurun drastis yang menandakan terjadinya patahan pada spesimen. Untuk memperjelas bagian utama pengujian, Gambar 4.35 menampilkan distribusi aktual tegangan pada rentang waktu 1,8–2,7 detik ketika proses geser terjadi secara signifikan.





Gambar 4. 34 Distribusi beban uji geser ke-7 setelah perlakuan panas

Merujuk pada gambar 4.34, maka nilai tegangan gesernya dapat diperhitungkan sebagai berikut :

$$A = 9,62 \text{ mm}^2$$

$$F = 157,68 \text{ kg}$$

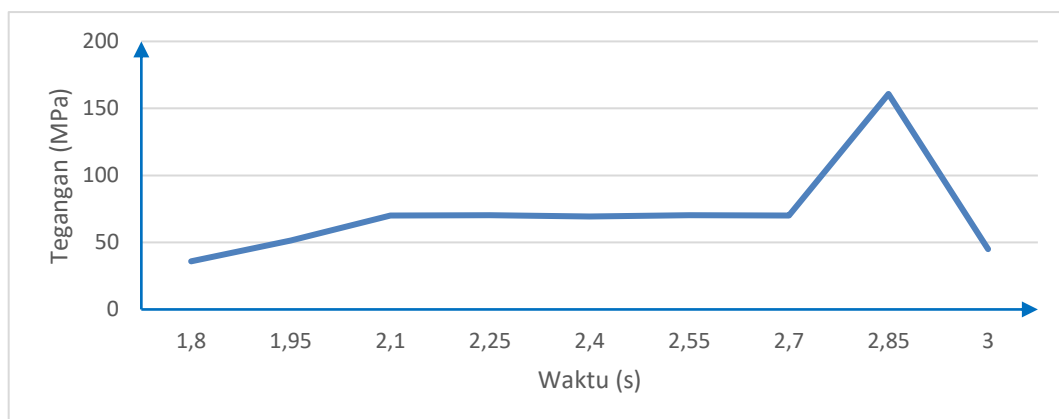
$$F = 1.546,84 \text{ N}$$

$$\tau = \frac{F}{A}$$

$$\tau = \frac{1.546,84 \text{ N}}{9.62 \text{ mm}^2}$$

$$\tau = 160,79 \text{ N/mm}^2$$

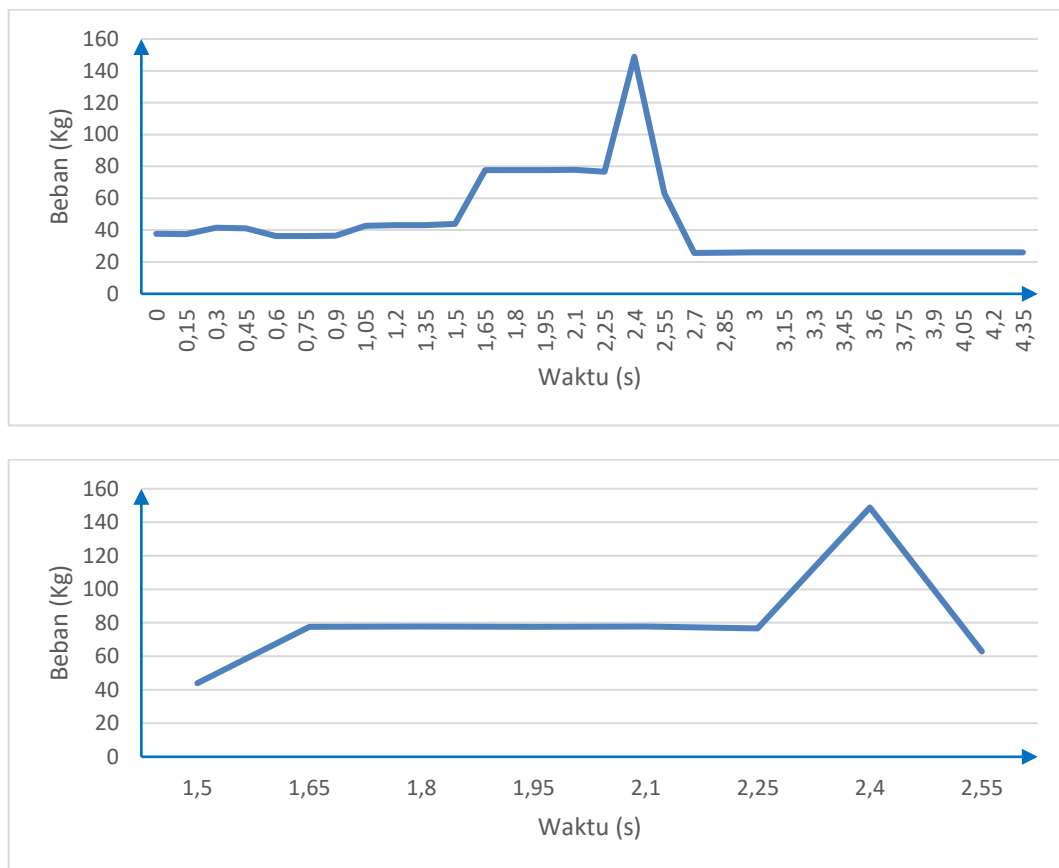
Pada pengujian bahan uji percobaan ke-7 gaya yang tercatat pada *load cell* sebesar 157,68 Kg dan tegangan geser sebesar 160,79 N/mm².



Gambar 4. 35 Distribusi aktual tegangan uji geser ke-7 setelah perlakuan panas

4.3.8 Hasil pengujian pada bahan uji percobaan ke-8

Merujuk pada Gambar 4.36 ditunjukkan distribusi beban terhadap waktu selama pengujian geser ke-8. Terlihat bahwa beban mengalami peningkatan seiring waktu hingga mencapai nilai maksimum yang tercatat sebesar 148,82, kemudian menurun drastis yang menandakan terjadinya patahan pada spesimen. Untuk memperjelas bagian utama pengujian, Gambar 4.37 menampilkan distribusi aktual tegangan pada rentang waktu 1,5-2,55 detik ketika proses geser terjadi secara signifikan.



Gambar 4. 36 Distribusi beban uji geser ke-8 setelah perlakuan panas

Merujuk pada gambar 4.36, maka nilai tegangan gesernya dapat diperhitungkan sebagai berikut :

$$A = 9,62 \text{ mm}^2$$

$$F = 148,82 \text{ kg}$$

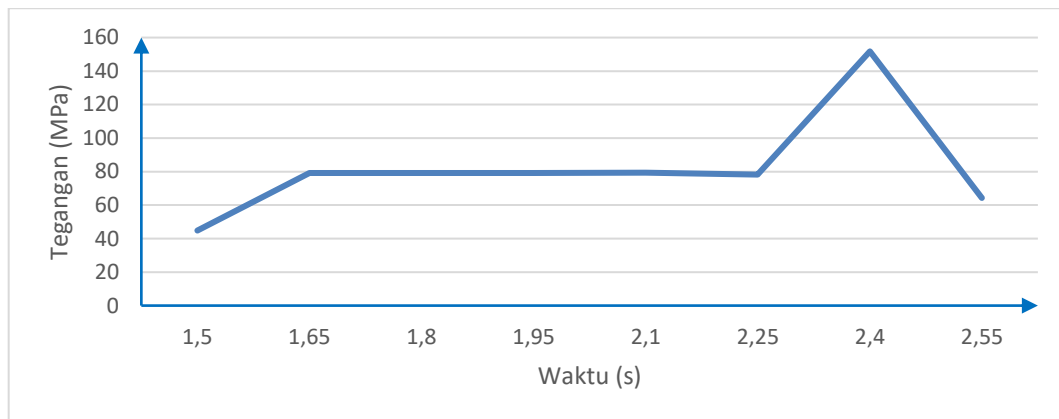
$$F = 1.459,92 \text{ N}$$

$$\tau = \frac{F}{A}$$

$$\tau = \frac{1.459,92 \text{ N}}{9,62 \text{ mm}^2}$$

$$\tau = 151,76 \text{ N/mm}^2$$

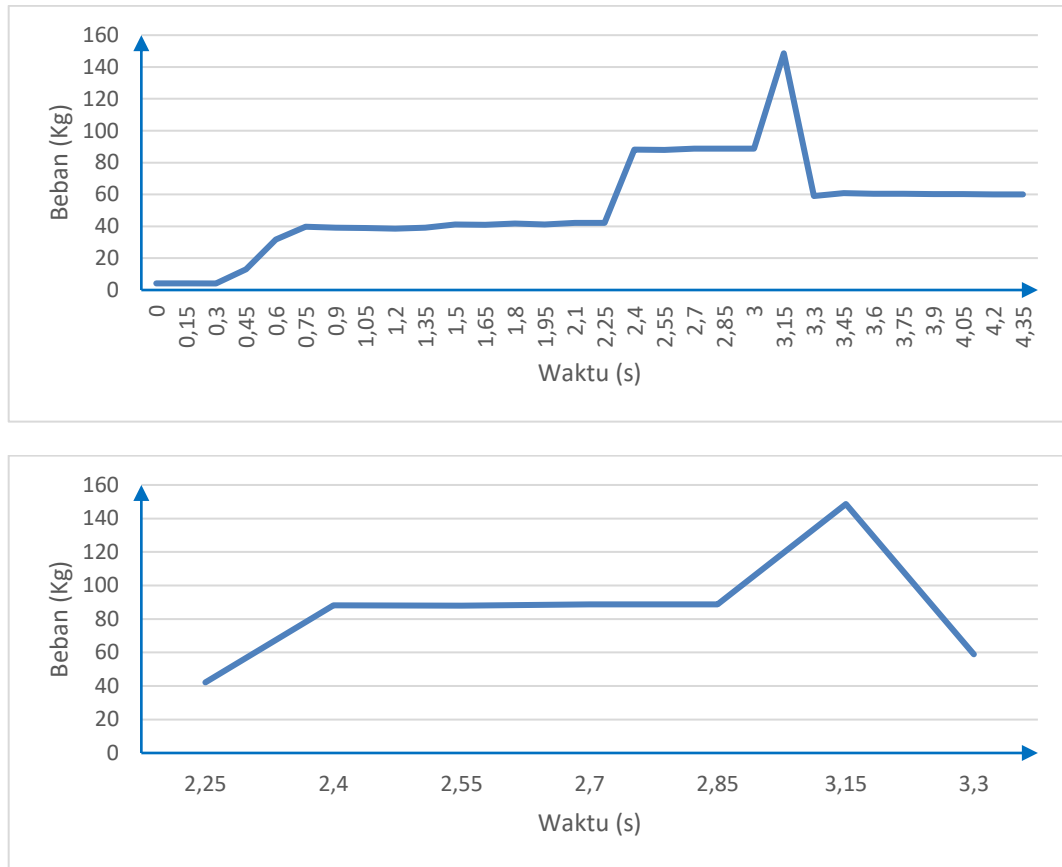
Pada pengujian bahan uji percobaan ke-8 gaya yang tercatat pada *load cell* sebesar 148,82 Kg dan tegangan geser sebesar 151,76 N/mm².



Gambar 4. 37 Distribusi aktual tegangan uji geser ke-8 setelah perlakuan panas

4.3.9 Hasil pengujian pada bahan uji percobaan ke-9

Merujuk pada Gambar 4.38 ditunjukkan distribusi beban terhadap waktu selama pengujian geser ke-9. Terlihat bahwa beban mengalami peningkatan seiring waktu hingga mencapai nilai maksimum yang tercatat sebesar 148,61, kemudian menurun drastis yang menandakan terjadinya patahan pada spesimen. Untuk memperjelas bagian utama pengujian, Gambar 4.39 menampilkan distribusi aktual tegangan pada rentang waktu 2,25-3,3 detik ketika proses geser terjadi secara signifikan.



Gambar 4. 38 Distribusi beban uji geser ke-9 setelah perlakuan panas

Merujuk pada gambar 4.38, maka nilai tegangan gesernya dapat diperhitungkan sebagai berikut :

$$A = 9,62 \text{ mm}^2$$

$$F = 148,61 \text{ kg}$$

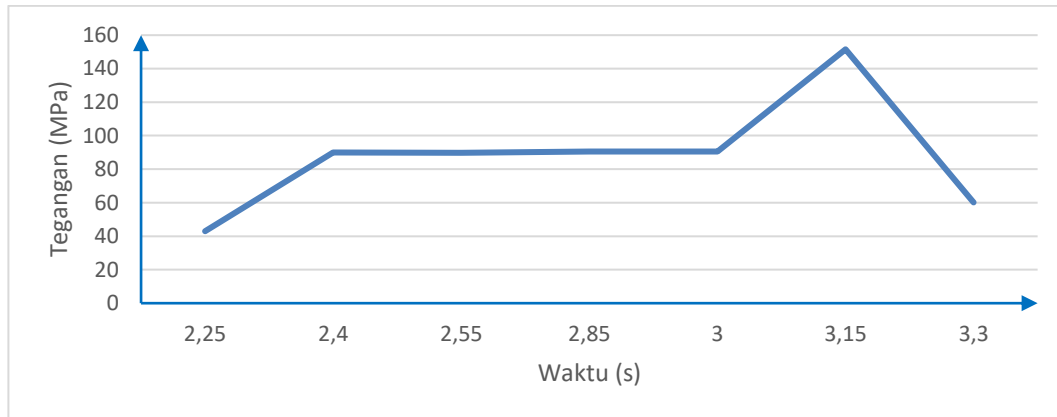
$$F = 1.457,86 \text{ N}$$

$$\tau = \frac{F}{A}$$

$$\tau = \frac{1.457,86 \text{ N}}{9,62 \text{ mm}^2}$$

$$\tau = 151,55 \text{ N/mm}^2$$

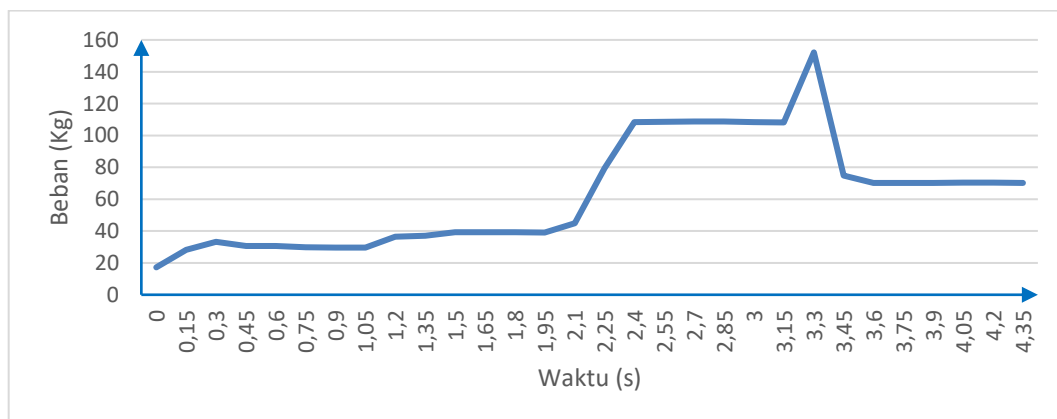
Pada pengujian bahan uji percobaan ke-9 gaya yang tercatat pada *load cell* sebesar 148,61 Kg dan tegangan geser sebesar 151,55 N/mm².

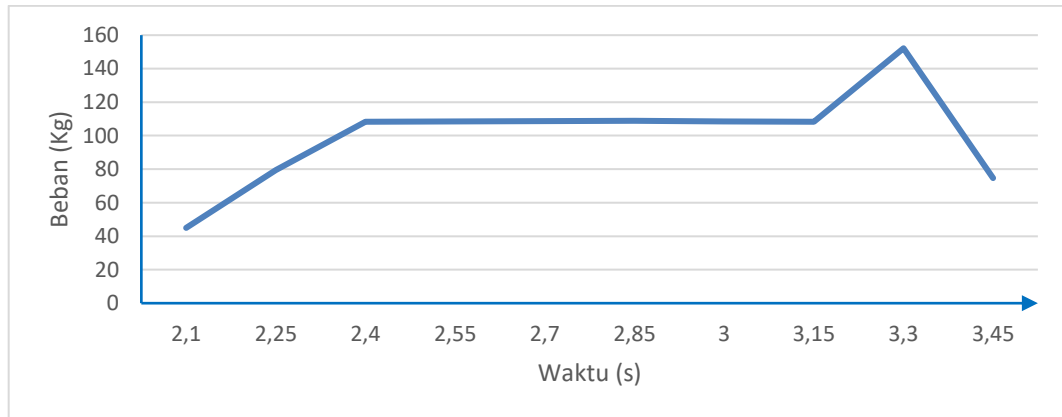


Gambar 4. 39 Distribusi aktual tegangan uji geser ke-9 setelah perlakuan panas

4.3.10 Hasil pengujian pada bahan uji percobaan ke-10

Merujuk pada Gambar 4.40 ditunjukkan distribusi beban terhadap waktu selama pengujian geser ke-10. Terlihat bahwa beban mengalami peningkatan seiring waktu hingga mencapai nilai maksimum yang tercatat sebesar 152,16, kemudian menurun drastis yang menandakan terjadinya patahan pada spesimen. Untuk memperjelas bagian utama pengujian, Gambar 4.41 menampilkan distribusi aktual tegangan pada rentang waktu 2,1-3,45 detik ketika proses geser terjadi secara signifikan.





Gambar 4. 40 Distribusi beban uji geser ke-10 setelah perlakuan panas

Merujuk pada gambar 4.40, maka nilai tegangan gesernya dapat diperhitungkan sebagai berikut :

$$A = 9,62 \text{ mm}^2$$

$$F = 152,16 \text{ kg}$$

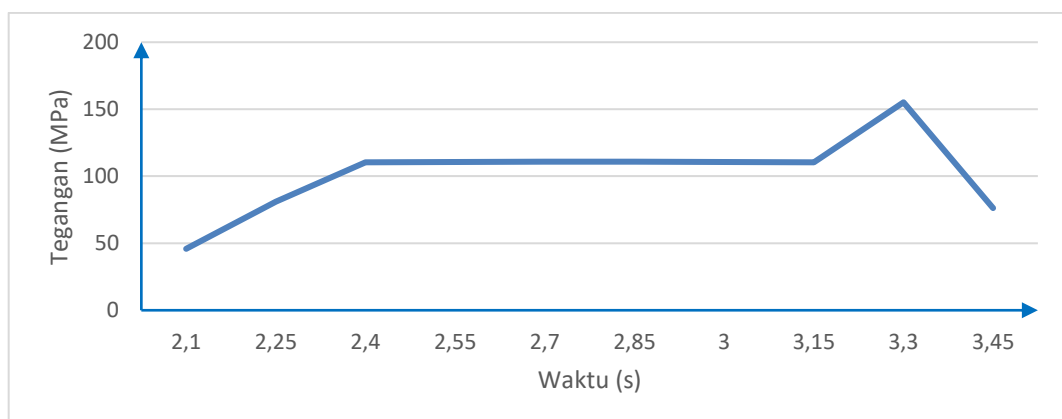
$$F = 1.492,68 \text{ N}$$

$$\tau = \frac{F}{A}$$

$$\tau = \frac{1.492,68 \text{ N}}{9,62 \text{ mm}^2}$$

$$\tau = 155,17 \text{ N/mm}^2$$

Pada pengujian bahan uji percobaan ke-10 gaya yang tercatat pada *load cell* sebesar 152,16 Kg dan tegangan geser sebesar 155,17 N/mm².



Gambar 4. 41 Distribusi aktual tegangan uji geser ke-10 setelah perlakuan panas

Setelah dilakukannya pengujian geser material Tembaga yang telah diberikan perlakuan panas dapat kita lihat pada tabel di bawah. Dimana bahan uji memiliki rata-rata tekanan 151,64 dan nilai tegangan rata-rata 154,64 pada diameter 3,5 mm. Data perhitungannya sebagai berikut :

Tabel 4. 3 Nilai tekanan tembaga oleh *load cell* yang sudah dipanaskan

Percobaan Ke-	Gaya (Kg)
1	155,05
2	146,79
3	151,62
4	152,62
5	156,1
6	147,03
7	157,68
8	148,82
9	148,61
10	152,16
Rata-Rata	151,64

Tabel 4. 4 Nilai tegangan geser tembaga yang sudah dipanaskan

Percobaan Ke-	Tegangan Geser (MPa)
1	158,11
2	149,69
3	154,61
4	155,63
5	159,18
6	149,93
7	160,79
8	151,76
9	151,55
10	155,17
Rata-Rata	154,64

4.4 Perbandingan Hasil Uji Tegangan Geser Material

Pengujian dilakukan terhadap material Tembaga dalam dua kondisi, yaitu tanpa perlakuan panas (kondisi awal) dan setelah diberi perlakuan panas pada suhu $\pm 300^{\circ}\text{C}$. Perlakuan panas ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh suhu terhadap kekuatan geser

material tersebut. Berdasarkan hasil uji yang telah dilakukan menggunakan alat uji geser berbasis sistem hidrolik dan Arduino, diperoleh nilai tegangan geser rata-rata sebagai berikut :

Tabel 4. 5 Rata-rata tegangan geser

Tembaga	Nilai Rata-rata Tegangan Geser (MPa)
Normal atau belum diberikan perlakuan	305,2
Dipanaskan sampai suhu $\pm 300^{\circ}$	154,64

Dari data di atas, menunjukkan bahwa terjadi penurunan tegangan geser sekitar 49,3% setelah perlakuan panas pada suhu antara $\pm 300^{\circ}\text{C}$. Penurunan ini menunjukkan bahwa pemanasan memengaruhi struktur mikro material.

Hasil ini didukung oleh penelitian Dong et al. (2023), yang menunjukkan bahwa pada suhu $\pm 300^{\circ}\text{C}$, proses rekristalisasi awal mulai terjadi pada tembaga hasil pengerjaan dingin, yang menyebabkan penurunan kekuatan tarik (UTS) dan kekuatan luluh (*yield strength*) secara bertahap. Pada suhu 300°C , UTS tembaga menurun drastis hingga $\pm 49\%$, dari 305,2 MPa menjadi 154,64 MPa,

Dengan meningkatnya suhu annealing, volume fraksi butir rekristalisasi dan ukuran butir bertambah. Fenomena ini memperbesar kemungkinan deformasi plastis dini di bawah beban tarik maupun geser, seiring melemahnya efek penguatan struktur mikro.

Maka dapat disimpulkan bahwa perlakuan panas pada suhu $\pm 300^{\circ}\text{C}$ sudah cukup menurunkan kekuatan mekanik tembaga secara signifikan, walaupun belum. Efek ini penting untuk dipertimbangkan dalam desain material tembaga yang memerlukan kekuatan mekanik tinggi namun tetap konduktif secara elektrik.