

BAB IV

ANALISA HASIL PENELITIAN

4.1. HASIL PENGUJIAN MATERIAL

Langkah pertama yang dilakukan sebelum penelitian ini dimulai adalah melakukan pengujian material penyusun geopolimer (precursor & activator) untuk mengetahui komposisi kimia dari unsur-unsur penyusunnya.

4.1.1. Pengujian *Fly Ash* (Abu Terbang)

Material *fly ash* sebagai prekursor diuji dengan Tes XRF (*X-Ray Fluorescence*) dan XRD (*X-Ray Diffraction*) di Laboratorium Fisika MIPA UI. Uji XRF untuk mengetahui persentase komposisi unsur-unsur yang terkandung dalam *fly ash*, dimana diharapkan sebagian besar unsur penyusun dari *fly ash* adalah unsur alumina dan silica. Uji XRD dilakukan untuk mencari sifat struktur dari *fly ash*.

Berdasarkan hasil uji tes XRF yang dilakukan pada tanggal 18 Februari 2008, *fly ash* yang digunakan dalam penelitian ini, yang berasal dari PLTU Suralaya, didominasi oleh unsur silica – besi – dan alumina. Hasil tes uji XRD terlampir di lampiran.

Tabel 4.1 Hasil Tes XRF *Fly Ash*

No	Unsur	Berat dalam Campuran (%)
1	Si	36.9493
2	Fe	29.9807
3	Al	19.6704
4	Ca	7.1182
5	Ti	2.3313
6	Mg	1.6518
7	K	1.3072
8	S	0.4895
9	Sr	0.3280
10	Zr	0.1737

4.1.2. Pengujian Larutan *Waterglass* Na₂SiO₃

Larutan *waterglass* (sodium silikat) yang berperan sebagai aktivator diuji dengan Uji Kadar Kimia di Laboratorium Afiliasi Departemen Kimia Fakultas MIPA UI. Hal ini dilakukan untuk mengetahui kandungan senyawa air dan senyawa lainnya di dalam larutan *waterglass* ini.

Berdasarkan hasil tes yang dilakukan pada tanggal 3 Maret 2008, *waterglass* yang digunakan dalam penelitian ini, yang dibeli dari Toko Kimia BRATAKO, didominasi oleh senyawa silika oksida.

Tabel 4.2 Hasil Uji Kadar Kimia *Waterglass*

No	Unsur	Berat dalam Campuran (%)
1	SiO ₂	42.23
2	H ₂ O	22.84
3	Na ₂ O	0.11

4.2. KARAKTERISTIK DASAR BETON GEOPOLIMER

Penelitian diawali dengan mencari karakteristik dasar dari beton geopolimer. Karakteristik dasar yang dimaksud adalah menyangkut : kuat ikat pasta geopolimer, kuat tekan, kuat tarik, dan kuat lentur beton geopolimer. Karakteristik dasar dari beton sangat tergantung dari material penyusun & komposisi perbandingan antar material.

4.2.1. Kuat Ikat Pasta Geopolimer

Pengujian ini dimaksudkan untuk mencari komposisi yang paling optimal untuk campuran, antara menggunakan agregat murni atau agregat limbah hasil buangan beton semen.

Pengujian pertama dilakukan dengan 3 jenis variasi sampel berdasarkan komposisi, dengan variabel waktu *hardening* dan *curing* yang sama.

Tabel 4.3 Kuat Ikut Pasta Geopolimer dengan Masa *Hardening* 36 Jam

cor	22/02/08				
oven	36 jam				
tes	25/02/08				
No	massa	P	A	F	
	(gr)	(kg)	(cm ²)	(kg/cm ²)	(MPa)
PASTA GEOPOLIMER MURNI					
1.1	193	4700	25	188	18.8
1.2	195	7000	25	280	28.0
1.3	195	3125	25	125	12.5
rata – rata					19.8
MORTAR PASIR MURNI					
2.1	243	3725	25	149	14.9
2.2	225	6100	25	244	24.4
2.3	228	4650	25	186	18.6
rata – rata					19.3
MORTAR PASIR LIMBAH					
3.1	239	5900	25	236	23.6
3.2	237	6125	25	245	24.5
3.3	241	7500	25	300	30.0
rata – rata					26.0

Ketiga jenis variasi sampel menjalani proses *hardening* dengan dioven selama 36 jam pada suhu $\pm 70^{\circ}\text{C}$. Kemudian, proses *curing* didiamkan di suhu ruang dalam waktu 1 hari, dan keesokan harinya dilakukanlah pengujian untuk kekuatan ikat pasta. Hasil yang diperoleh untuk pasta geopolimer saja, kekuatan pada hari ke-3 setelah pengecoran mencapai angka 20 MPa.

Kemudian dalam membandingkan kekuatan optimal antara campuran dengan agregat murni atau agregat limbah, hasil nilai rata – rata kekuatan ikat mortar paling optimal terjadi pada jenis variasi Mortar Geoplimer + Pasir Limbah sebesar 26 MPa pada hari ke-3.

Pengujian selanjutnya masih dengan 3 jenis variasi komposisi, tetapi proses *hardening* dengan pengovenan hanya 3 jam. Masa *curing* yang dijalani lebih lama dan bervariasi, mulai dari 7 hari dan 10 hari. Berikut data hasil yang dicapai.

Tabel 4.4 Kuat Ikat Pasta Geopolimer dengan Masa *Hardening* 3 Jam

cor	22/02/08						
oven	3 jam						
No	massa	P	A	F		tanggal tes	usia beton
	gr	Kg	cm ²	kg/cm ²	MPa		
PASTA GEOPOLIMER MURNI							
1.1	219	6625	25	265	26.5	29/02/08	7 hari
1.2	234	6750	25	270	27.0	29/02/08	7 hari
rata - rata					26.8		
MORTAR PASIR MURNI							
2.1	261	4025	25	161	16.1	29/02/08	7 hari
2.2	262	8250	25	330	33.0	04/03/08	10 hari
rata - rata					24.6		
MORTAR PASIR LIMBAH							
3.1	256	4100	25	164	16.4	29/02/08	7 hari
3.2	256	7000	25	280	28.0	04/03/08	10 hari
rata - rata					22.2		

Dari hasil pengujian ini menunjukkan bahwa proses *hardening* yang hanya memakan waktu 3 jam menghasilkan kekuatan yang rata – rata sebanding (sama) dengan proses *hardening* selama 36 jam. Perbedaannya adalah pada masa *curing*-nya. Masa *curing* untuk pengujian kali ini memakan waktu 7 hari untuk bisa sebanding dengan kekuatan beton dengan oven 36 jam masa *curing* 3 hari. Hasil data juga menunjukkan bahwa ada hubungan yang linier antara peningkatan kekuatan dengan lamanya masa *curing*.

Tetapi masa *curing* 7 hari maupun 10 hari untuk jenis pengujian ini (dimana proses *hardening* hanya 3 jam), menghasilkan kekuatan di dalam range yang sama dengan hasil pengujian untuk proses *hardening* 36 jam, yaitu antara 15 – 30 MPa. Sehingga dapat disimpulkan lamanya waktu proses *hardening* mempercepat tercapainya kekuatan optimal beton geopolimer.



Gambar 4.1 Cetakan dan Peralatan Mix Pasta Geopolimer



Gambar 4.2 Benda Uji Kubus 5x5x5 cm³

4.2.2. Kuat Tekan Beton Geopolimer

Belum ada standar dalam perhitungan mix design beton geopolimer, sehingga perhitungan menggunakan metode perhitungan beton konvensional. Oleh karena itu, penelitian ini juga membuat sampel kubus beton konvensional sebagai pembandingan data.

Desain beton dirancang dengan kekuatan f_c' 40 MPa. Beton konvensional yang dibuat dites tekan pada hari ke-7, kemudian hasil tes dikonversi ke dalam kuat tekan optimal 28 hari, dimana kuat tekan beton umur 7 hari = 0.7 kuat tekan beton umur 28 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kuat tekan beton konvensional mencapai target *strength design* rencana.

Tabel 4.5 Kuat Tekan Beton Konvensional Usia 7 Hari

SAMPel BETON KONVENSIOnAL dengan LIMBAH *hari ke-7*							
No	Tipe	massa	P	A	F (hari ke 7)		F (hari ke 28)
		gr	kg	cm ²	kg/cm ²	MPa	MPa
1	Silinder I	12170	52500	176.625	297.240	29.72	42.46
2	Silinder II	12080	51000	176.625	288.747	28.87	41.25
3	Silinder III	12010	49500	176.625	280.255	28.03	40.04
4	Silinder IV	11885	44500	176.625	251.946	25.19	35.99
5	Kubus I	7407	77000	225	284.044	28.40	40.58
6	Kubus II	7431	79000	225	291.422	29.14	41.63
7	Kubus III	7450	73500	225	271.133	27.11	38.73
rata - rata						28.07	40.10

Untuk sampel beton geopolimer dengan agregat limbah, ternyata hasil kuat tekan yang diperoleh tidak mencapai target *strength design* rencana. Hal ini mematahkan hipotesa bahwa adanya semen yang masih terkandung dalam limbah beton konvensional akan bereaksi positif bila dicampur dengan pasta geopolimer. Hingga 2x pengecoran kubus beton geopolimer agregat limbah, hasil yang dicapai hanya $\frac{3}{4}$ target *strength design*

Tabel 4.6 Kuat Tekan Beton Geopolimer dengan Agregat Limbah Usia 3 Hari

KUBUS GEOPOLIMER AGREGAT LIMBAH					
cor	12/03/08				
tes	14/03/08				
No	massa	P	A	F	
	gr	kg	cm ²	kg/cm ²	MPa
1	7552	50000	225	222.222	22.22
2	7447	44000	225	195.556	19.56
3	7507	49250	225	218.889	21.89
rata - rata					21.22
cor	17/03/08				
tes	19/03/08				
No	massa	P	A	F	
	gr	kg	cm ²	kg/cm ²	MPa
1	7336	62500	225	277.778	27.78
2	7408	62750	225	278.889	27.89
3	7271	73000	225	324.444	32.44
rata - rata					29.37

Sedangkan untuk komposisi beton geopolimer dengan agregat murni, hasil kuat tekan yang dicapai memenuhi target *strength design* 40 MPa. Kekuatan beton geopolimer dalam usia 3 hari ini sebanding dengan kuat tekan beton konvensional 528 hari. Berdasarkan parameter usia beton, beton geopolimer mencapai kekuatan optimal paling cepat.

Tabel 4.7 Kuat Tekan Beton Geopolimer dengan Agregat Murni Usia 3 Hari

KUBUS GEOPOLIMER AGREGAT MURNI					
cor	14/03/08				
tes	18/03/08				
No	massa	P	A	F	
	gr	kg	cm ²	kg/cm ²	MPa
1	7917	88000	225	391.111	39.11
2	7788	90500	225	402.222	40.22
3	7730	85500	225	380.000	38.00
rata - rata					39.11



Gambar 4.3 Pengujian Tes Tekan Kubus



Gambar 4.4 Benda Uji Dengan Lapisan Plastik

4.2.3. Kuat Tarik Pasta Geopolimer

Penelitian ini juga melakukan uji tarik terhadap beton geopolimer. Pengujian menggunakan cetakan angka 8 sebanyak 6 sampel.



Gambar 4.5 Pengujian Tes Tarik



Gambar 4.6 Cetakan Angka 8

Hasil yang diperoleh dari keenam sampel pengujian tarik ternyata kuat tarik beton geopolimer sebesar 2,65 MPa. Bila dibandingkan dengan data hasil kuat tekan beton geopolimer murni sebesar 39,11 MPa, maka perbandingan kuat tarik : kuat

tekan pada beton geopolimer memiliki nilai $= \frac{2,65}{39,11} \times 100\% = 6,78\%$.

Tabel 4.8 Kuat Tarik Beton Geopolimer

TES TARIK PASTA POLIMER								
No	Dimensi penampang (cm)					P	F	
	Lebar			tebal	panjang		kg	kg/cm ²
	atas	tengah	bawah					
1	3.490	2.120	3.775	2.000	6.950	185.00	43.632	4.36
2	3.410	1.960	3.640	2.220	6.620	90.00	20.684	2.07
3	3.340	2.120	3.550	2.030	6.880	145.00	33.693	3.37
4	3.440	2.340	3.430	1.870	6.920	50.00	11.426	1.14

5	3.325	2.245	3.390	1.950	7.000	140.00	31.980	3.20
6	3.460	2.160	3.410	1.340	6.870	51.00	17.620	1.76
rata - rata								2.65

Data penelitian ini bertentangan dengan hasil data penelitian Abdul Hadi (2006) yang menyatakan bahwa kuat tarik beton geopolimer mencapai 2x kuat tekannya. Dalam penelitian ini, persentase kuat tarik beton geopolimer sama seperti pada beton konvensional, yaitu sekitar $\frac{1}{20}$ atau 5% dari kuat tekannya.¹⁸

4.2.4. Kuat Lentur Pasta Geopolimer

Pengujian kuat lentur balok beton geopolimer menggunakan sampel uji balok berukuran 15x15x55 cm³. Pengujian lentur terhadap struktur balok lentur murni, dengan pembebanan 2 titik di 1/3 dan 2/3 bentang balok.

Berdasarkan pengujian 3 buah sampel balok lentur, hasil tegangan lentur beton geopolimer yang diperoleh mencapai 3.37 MPa. Tegangan lentur yang terjadi pada beton konvensional memiliki nilai sebesar $0,7\sqrt{f_c'}$. Berdasarkan *design strength* rencana 40 MPa, maka tegangan lentur beton konvensional teoritis adalah 4.43 MPa. Sehingga hasil pengujian lentur beton geopolimer dalam penelitian ini berada di bawah standar kuat lentur beton konvensional.

Tabel 4.9 Kuat Lentur Beton Geopolimer

TES LENTUR BALOK 45X45X15								
cor	280308							
tes	040408							
No	P	L	b	h	W	M	tegangan lentur	
	kg	cm	cm	cm	cm ³	kg.cm	kg/cm ²	MPa
1	1850	55	15	15	562.5	16958.33	30.15	3.01
2	1950	55	15	15	562.5	17875.00	31.78	3.18
3	2400	55	15	15	562.5	22000.00	39.11	3.91
rata - rata							33.68	3.37



Gambar 4.7 Alat Uji Tes Lentur



Gambar 4.8 Tes Lentur

4.3. PRODUKSI BALOK BETON BERTULANG GEOPOLIMER

Produksi balok beton bertulang geopolimer dibagi menjadi 3x tahapan pengecoran, dikarenakan keterbatasan kapasitas alat *mixer*. Kapasitas alat mixer yang ada di Laboratorium Struktur dan Material Departemen Sipil FTUI hanya 45 L, sedangkan volume balok mencapai 90 L. Adanya 3x tahapan pengecoran balok ini sangat riskan dalam hal *homogenitas* material. Untuk memperkecil risiko tersebut, maka volume pengecoran dibagi berdasarkan 1/3 tinggi balok.

Sebelum dilakukan pengecoran balok, terlebih dahulu dibuat beton tahu geopolimer yang berfungsi untuk menyangga tulangan. Beton tahu merupakan komposisi mortar geopolimer dengan agregat halus, dengan ketebalan beton tahu setebal selimut beton.



Gambar 4.9 Bekisting Balok dengan Tulangan dan Beton Tahu

Proses *hardening* balok beton geopolimer mengambil contoh dari penelitian Sumajouw (2006), dengan membuat ruangan tertutup seukuran balok dengan satu corong sebagai tempat *blower*. *Blower* tersebut akan menyebarkan angin panas dari *heater* dengan suhu $\pm 50^{\circ} - 60^{\circ}$ C. Ternyata pada pelaksanaannya, *heater*

tidak berfungsi dengan baik sehingga angin yang disebarkan tidak berupa angin panas. Dalam keadaan terdesak, penelitian dilanjutkan dengan menggunakan *hair dryer* sebagai sumber angin panas.



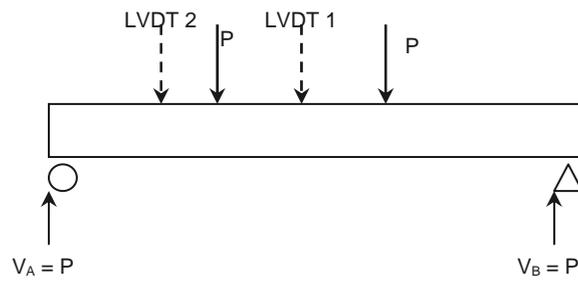
Gambar 4.10 *Blower*



Gambar 4.11 *Hardening* dengan menggunakan *Hair Dryer*

4.4. PERILAKU BALOK BETON BERTULANG GEOPOLIMER

Penelitian dimulai sesuai desain awal, yaitu balok beton bertulang geopolimer didesain sebagai permodelan jembatan 3 bentang. Balok diletakkan di rangka frame, kemudian balok diberikan beban di titik $1/3$ dan $2/3$ bentang. Pengukuran lendutan dilakukan pada titik $1/4$ dan $1/2$ bentang, dengan LVDT 1 terletak di titik $1/2$ bentang dan LVDT 2 terletak di titik $1/4$ bentang. Panjang bentang mengalami perubahan dari desain awal menjadi 1300 mm, dikarenakan kebutuhan jarak perletakan.



Gambar 4.12 Permodelan Struktur Rencana



Gambar 4.13 Balok dengan 2 Actuator Pembebanan

Hal pertama yang dilakukan sebelum memulai penelitian adalah membuat permodelan LabVIEW agar LVDT yang digunakan dapat terbaca voltasenya pada program LabVIEW dan dapat ditampilkan sebagai grafik. Permodelan dibuat dalam bentuk *block diagram* yang ditampilkan dalam *front panel*. Kemudian setelah dipastikan bahwa kedua input voltase LVDT terbaca oleh LabVIEW, dilakukan kalibrasi data dari voltase ke milimeter.

Pembebanan dilakukan secara siklik 3 kali *loading – unloading*, dengan variasi beban meningkat hingga mencapai beban ultimit dan terjadi *failure* pada balok. Pertama – tama pembebanan dimulai dari 5 kN, naik menjadi 10 kN, 15 kN, 20 kN, hingga berhenti di 35 kN. Selama penelitian ini berlangsung, terjadi kebocoran pelumas pada salah satu *actuator* beban. Sehingga penelitian tidak bisa dilanjutkan dengan 2 *actuator* atau dengan 2 titik pembebanan. Oleh karena itu, penelitian dilanjutkan dengan merubah permodelan struktur menjadi struktur balok 2 bentang dengan hanya 1 pembebanan di tangan bentang.



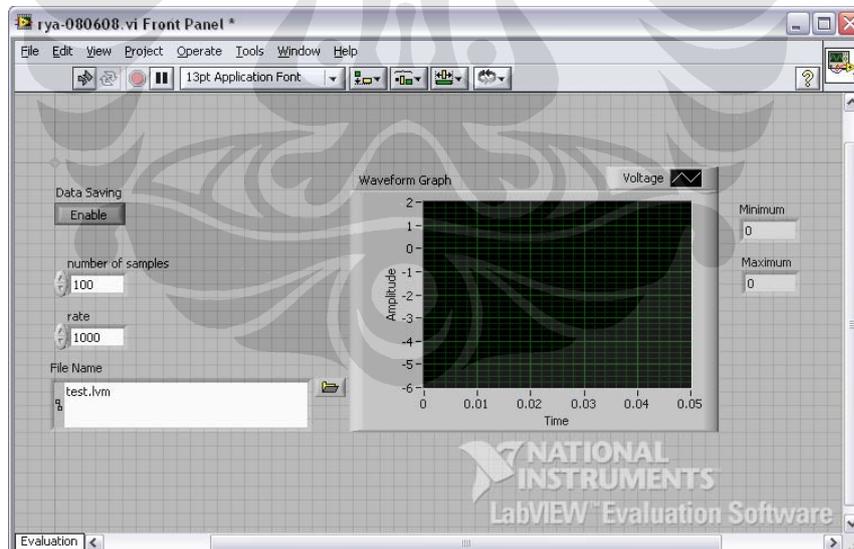
Gambar 4.14 Kebocoran Pelumas pada Actuator



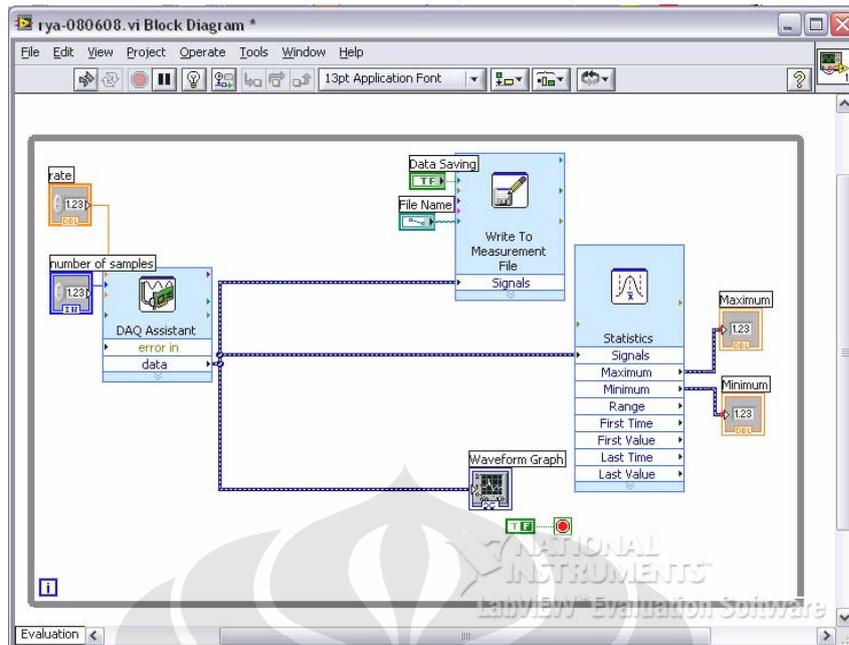
Gambar 4.15 Tetesan Pelumas di Penampang Balok

4.4.1. Permodelan LabVIEW

Front Panel yang akan ditampilkan dalam permodelan LabVIEW penelitian ini seperti gambar di bawah ini. *Waveform Graph* akan menampilkan grafik voltase yang terjadi (terukur) pada kedua LVDT, dengan diketahui nilai maksimum dan minimumnya. Kemudian setiap data grafik akan disimpan dalam 1 file dalam format notepad. Diagram alir proses kerja pembacaan voltase LVDT menjadi bentuk grafik dirumuskan dalam *block diagram* di bawah ini.



Gambar 4.16 Front Panel



Gambar 4.17 Block Diagram

Untuk setiap variasi pembebanan dengan 3x siklus *loading - unloading*, data voltase yang terukur pada kedua LVDT disimpan dalam 1 judul file. Contoh notepad data yang tersimpan sebagai berikut :

```

LabVIEW Measurement
Writer_version 0.92
Reader_version 1
Separator Tab
Multi_Headings No
X_Columns Multi
Time_Pref Absolute
Operator mahasiswa
Date 2008/06/08
Time 12:36:13.186875
***End_of_Header***

Channels 2
Samples 100 100
Date 2008/06/08 2008/06/08
Time 12:36:13.296249 12:36:13.296249
Y_Unit_Label volts volts
X_dimension Time Time
X0 0.0000000000000000E+0 0.0000000000000000E+0
Delta_X 0.001000 0.001000
***End_of_Header***
X_value voltage X_value voltage0 Comment
0.000000 0.463867 0.000000 -1.950684
0.001000 0.458984 0.001000 -2.097168
0.002000 0.412598 0.002000 -2.219238
0.003000 0.336914 0.003000 -2.353516
0.004000 0.251465 0.004000 -2.490234
0.005000 0.112305 0.005000 -2.695312
0.006000 -0.046387 0.006000 -2.875977
0.007000 -0.197754 0.007000 -3.056641
0.008000 -0.319824 0.008000 -3.139648
0.009000 -0.415039 0.009000 -3.225098
0.010000 -0.488281 0.010000 -3.278809
  
```

Gambar 4.18 Contoh Hasil Output Data

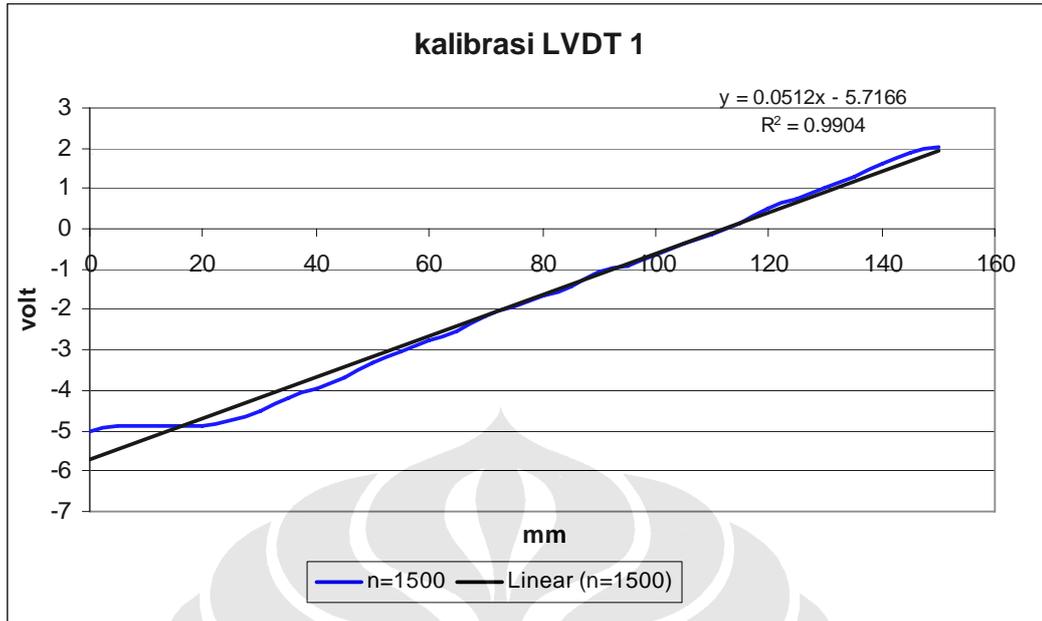
4.4.2. Kalibrasi Alat LVDT

Untuk mencari kalibrasi satuan dari voltase yang terukur oleh LabVIEW menjadi satuan millimeter, LVDT ditarik per 5 mm dan dijaga konstan panjangnya, lalu software LabVIEW dijalankan. Dalam keadaan konstan dimana tidak ada perubahan panjang LVDT, tidak akan terjadi perubahan voltase, maka diperoleh data voltase yang terjadi untuk panjang LVDT 5 mm, dan seterusnya hingga 150 mm. Data-data tersebut diplot dalam bentuk grafik x,y dengan bantuan Ms. Excell kemudian dicari persamaan garis lurus (*trendline*)nya. Persamaan garis itulah yang digunakan sebagai skala kalibrasi voltase ke mm.

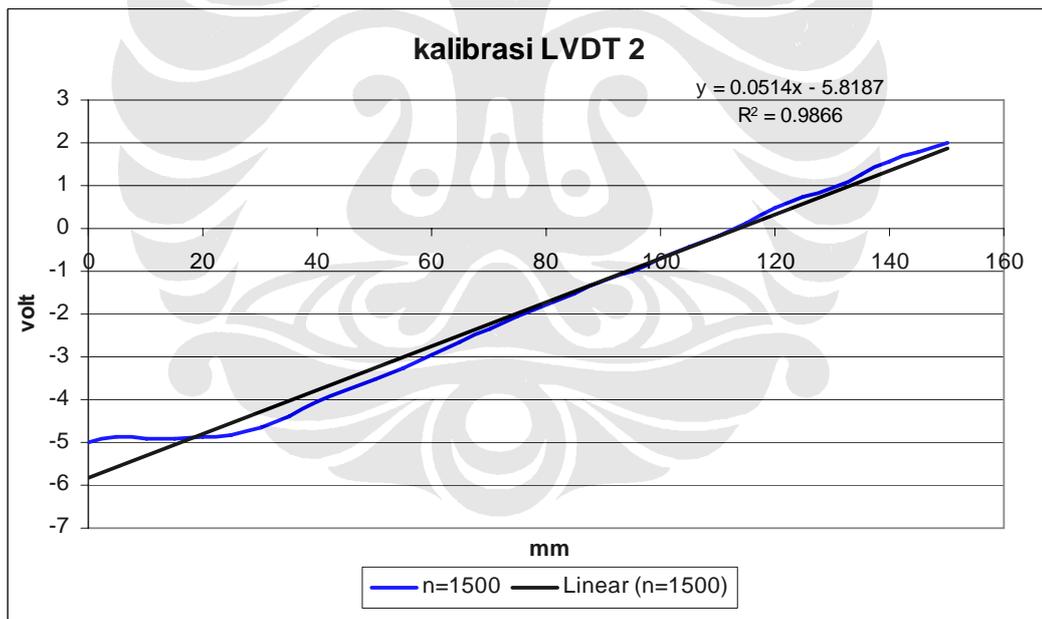
Tabel 4.10 Kalibrasi Alat LVDT

mm	voltage 1	voltage 2		mm	voltage 1	voltage 2
0	-5.0000	-5.0000		75	-1.9274	-2.0579
5	-4.8772	-4.8881		80	-1.6535	-1.7919
10	-4.8929	-4.8995		85	-1.4082	-1.5233
15	-4.8839	-4.9019		90	-1.0688	-1.1985
20	-4.8598	-4.8895		95	-0.9005	-0.9837
25	-4.7329	-4.8121		100	-0.6290	-0.6942
30	-4.5067	-4.6544		105	-0.3709	-0.4417
35	-4.1845	-4.3960		110	-0.1136	-0.1738
40	-3.9584	-4.0265		115	0.1476	0.1227
45	-3.6681	-3.7649		120	0.4915	0.4756
50	-3.3098	-3.5269		125	0.7631	0.7393
55	-3.0591	-3.2694		130	1.0172	0.9778
60	-2.7816	-2.9477		135	1.3168	1.2543
65	-2.5088	-2.6419		140	1.5954	1.5743
70	-2.1680	-2.3531		145	1.8774	1.7794
				150	2.0312	2.0149

Grafik 4.1 Persamaan Kalibrasi LVDT 1



Grafik 4.2 Persamaan Kalibrasi LVDT 2



4.4.3. Hasil Lendutan pada Balok

Setelah mengalami kebocoran pelumas pada salah satu actuator, maka pembebanan pada struktur balok diubah menjadi hanya pembebanan 1 titik di tengah bentang. Pengukuran lendutan tetap di titik $\frac{1}{4}$ dan $\frac{1}{2}$ bentang.



Gambar 4.19 Pembebanan 1 Titik dengan 2 Titik Pengukuran

Sebelum diberikan pembebanan, pada kondisi awal dilakukan pengukuran voltase pada kedua LVDT terlebih dahulu. Hal ini dibutuhkan untuk mengetahui panjang awal LVDT di titik pengukuran sehingga diperoleh titik nol dalam pengukuran lendutan. Berdasarkan persamaan kalibrasi voltase – mm, diperoleh panjang awal LVDT 1 adalah 14,595 mm dan LVDT 2 adalah 16,747 mm (*data perhitungan terlampir*).

Pembebanan dilakukan mulai dari 5 kN dengan 3 kali siklus *loading – unloading*. Selama 1 kali pembebanan memakan waktu sekitar ± 5 menit atau 300 detik. Data yang diukur dalam software LabVIEW adalah setiap 1/1000 detik, sehingga untuk setiap pembebanan diperoleh sekitar 300.000 data. Penulis menggunakan bantuan program MatLab untuk mengolah data yang diperoleh tersebut karena program Ms.Excell tidak mampu mengolah lebih dari 65.000 data. Data voltase pada 5 detik pertama diabaikan karena data tersebut tidak akurat, menimbang bahwa dalam 5 detik pertama setelah terjadi arus, voltase yang terukur masih belum stabil.

Voltase yang diperoleh dirubah menjadi skala milimeter berdasarkan persamaan kalibrasi alat, kemudian hasil kalibrasi dikurangi dengan panjang awal LVDT, maka diperoleh hasil lendutan di titik pengukuran. Lendutan tersebut kemudian diplot menjadi 1 buah grafik. Dikarenakan incremen waktu yang sangat kecil, maka grafik yang terjadi terlihat linear (*grafik terlampir*). Maka dari itu, plotting grafik dipotong dengan hanya mengambil data lendutan per 1/100 detik.

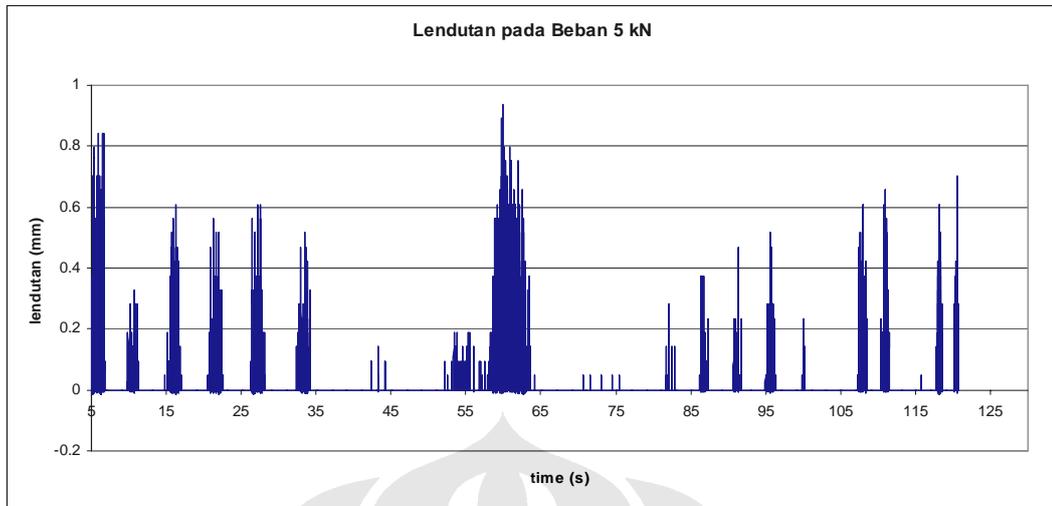
Dari pengolahan data yang dilakukan, ternyata untuk LVDT 1 yang terletak di titik $\frac{1}{2}$ bentang, lendutan yang terjadi adalah nol, atau bisa diartikan bahwa LVDT tidak bergerak. Bila dilihat dari letak LVDT 1, hal tersebut mungkin terjadi karena kurang eratnya lem diantara pelat penahan LVDT dengan balok. Keadaan ini membuat pelat tidak ikut sempurna bergerak melendut ketika balok melendut. Adanya rongga kosong antara pelat dengan balok menyebabkan perubahan *displacement* di pelat tidak terukur.



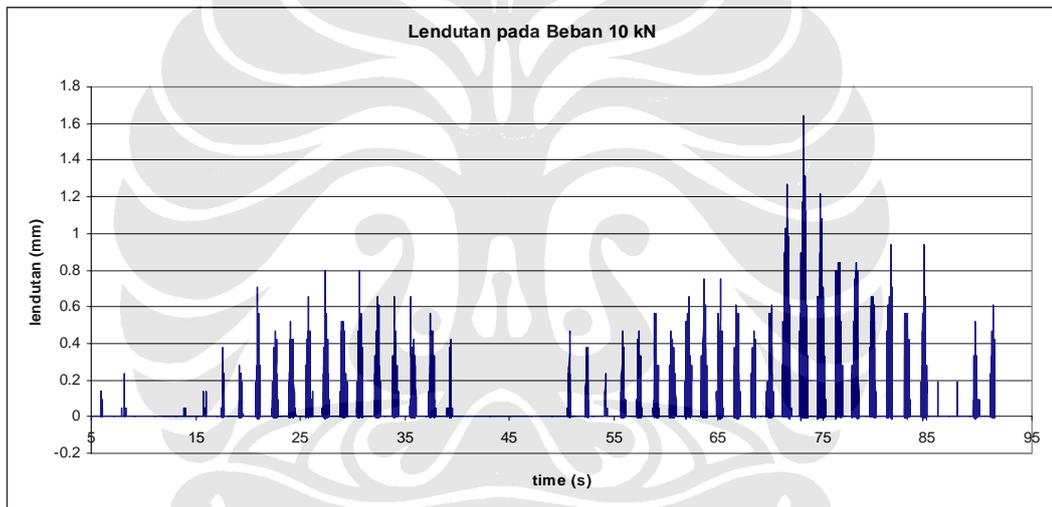
Gambar 4.20 Rongga diantara Pelat Penahan LVDT 1 dan Balok

Oleh sebab itu, lendutan yang terukur dalam penelitian ini hanyalah lendutan di titik $\frac{1}{4}$ bentang. Grafik lendutan yang terjadi di titik ini untuk setiap pembebanan dengan 3x siklus *loading unloading* tercantum dalam Grafik 4.3. hingga Grafik 4.9. di bawah. Pengolahan data dengan bantuan MatLab terlampir.

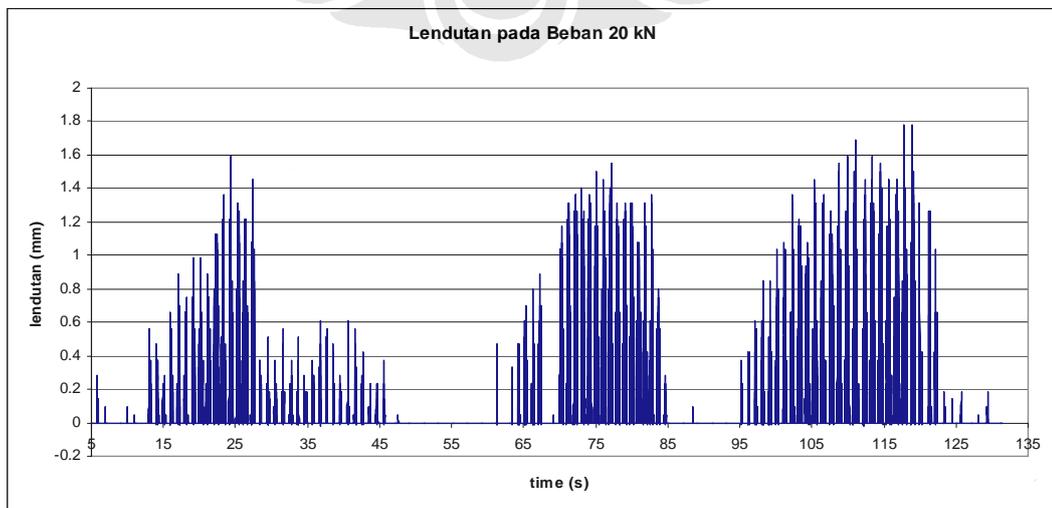
Grafik 4.3. Pengukuran Lendutan pada Beban 5 kN



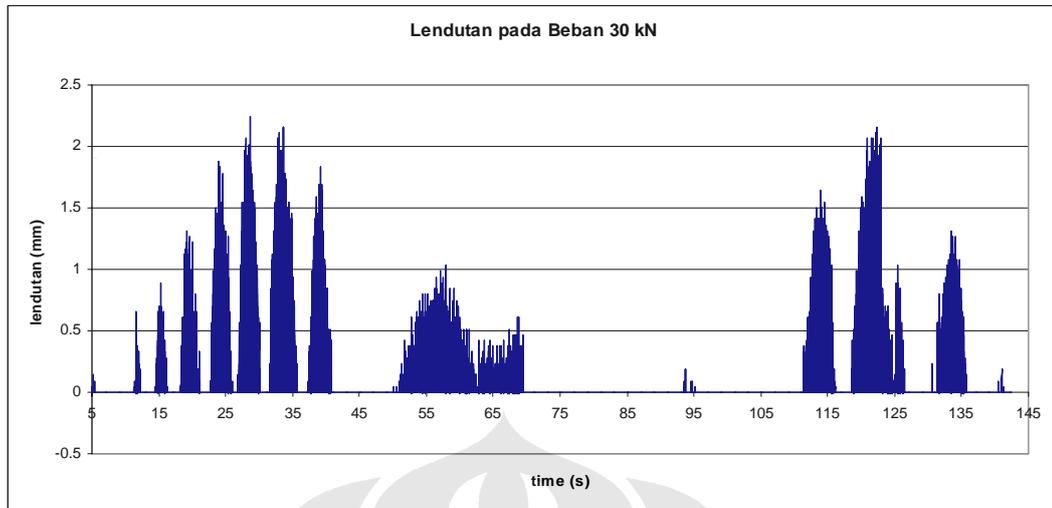
Grafik 4.4. Pengukuran Lendutan pada Beban 10 kN



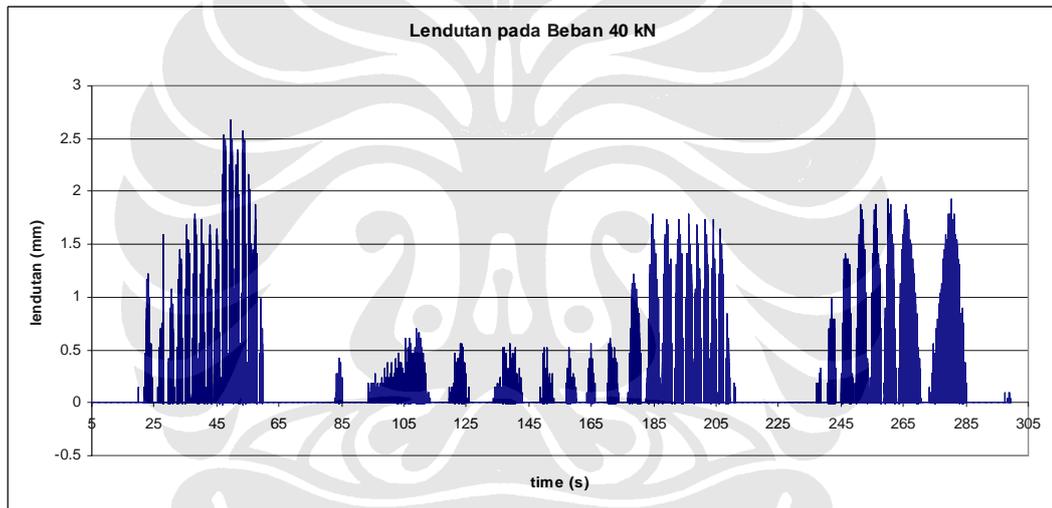
Grafik 4.5. Pengukuran Lendutan pada Beban 20 kN



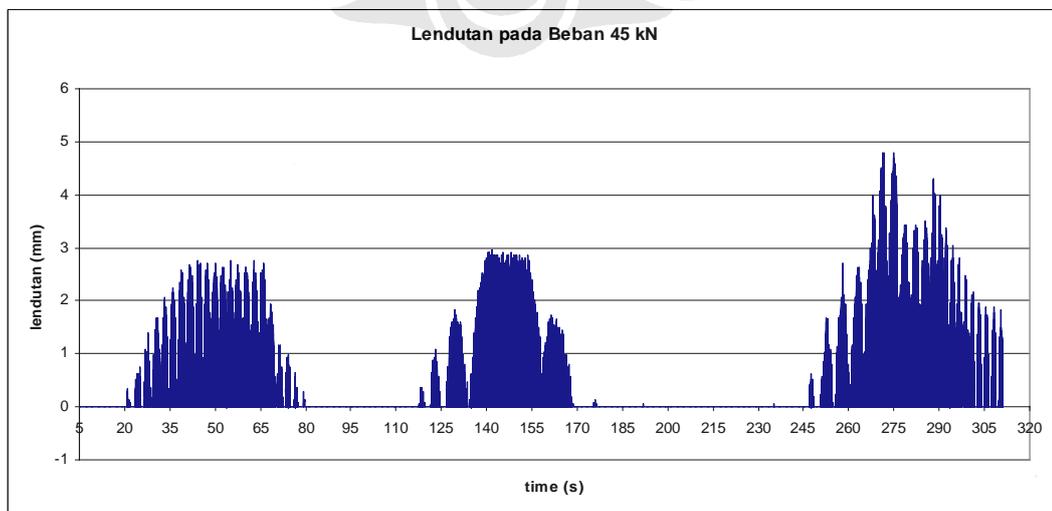
Grafik 4.6. Pengukuran Lendutan pada Beban 30 kN



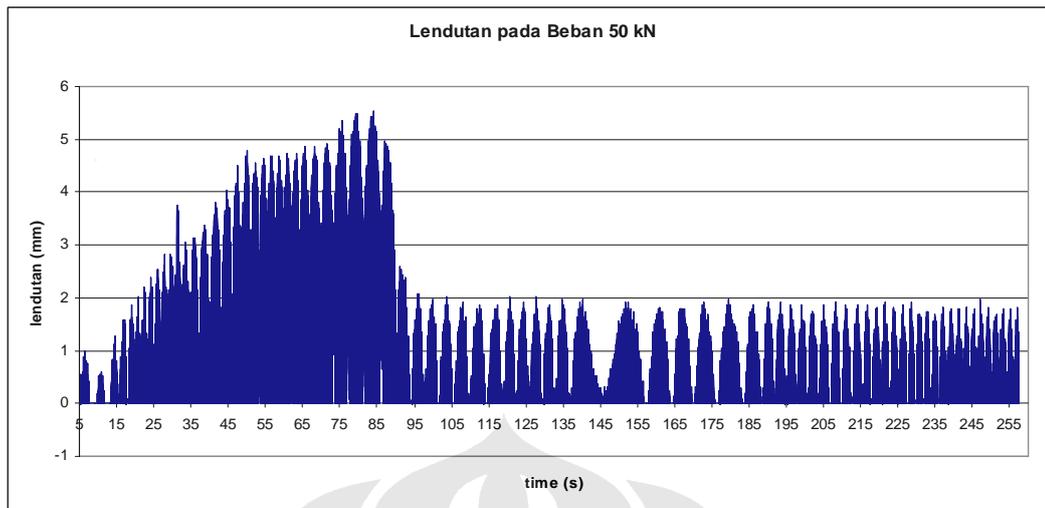
Grafik 4.7. Pengukuran Lendutan pada Beban 40 kN



Grafik 4.8. Pengukuran Lendutan pada Beban 45 kN



Grafik 4.9. Pengukuran Lendutan pada Beban 50 kN



Melihat grafik yang diperoleh, tidak terlihat jelas siklus *loading unloading* yang terjadi. Penyebab utamanya adalah ketika *actuator* pembebanan dijalankan dengan cara pemompaan, pompa melepaskan udara. Karena pengukuran didasarkan pada indikator voltase, maka tingkat sensitivitasnya sangat tinggi. Udara yang dilepaskan oleh pompa ketika masih dalam tahap mencapai titik *loading*, terukur sebagai penurunan voltase.

Tiga titik lendutan terbesar diambil sebagai 3 puncak *loading* yang terjadi pada setiap variasi pembebanan. Bila diperhatikan, data ini pun kurang begitu presisi karena untuk setiap siklus *loading* data lendutan yang diperoleh tidak konstan atau linier menaik, melainkan bervariasi naik turun. Hal ini terjadi karena tidak ada alat kontrol beban ketika penelitian berlangsung, sehingga tidak diketahui dengan pasti berapa besar beban yang terjadi pada 3 titik puncak lendutan. Belum tentu pada 3 titik puncak lendutan itu, pemompaan beban tepat presisi di nilai beban yang dimaksud. Data lendutan yang terjadi untuk setiap variasi pembebanan tercantum dalam tabel di bawah ini. Untuk beban 50 kN, hanya terjadi 1x *loading-unloading* karena balok sudah *failure*.

Tabel 4.11 Nilai Lendutan per siklus *loading* untuk setiap variasi pembebanan

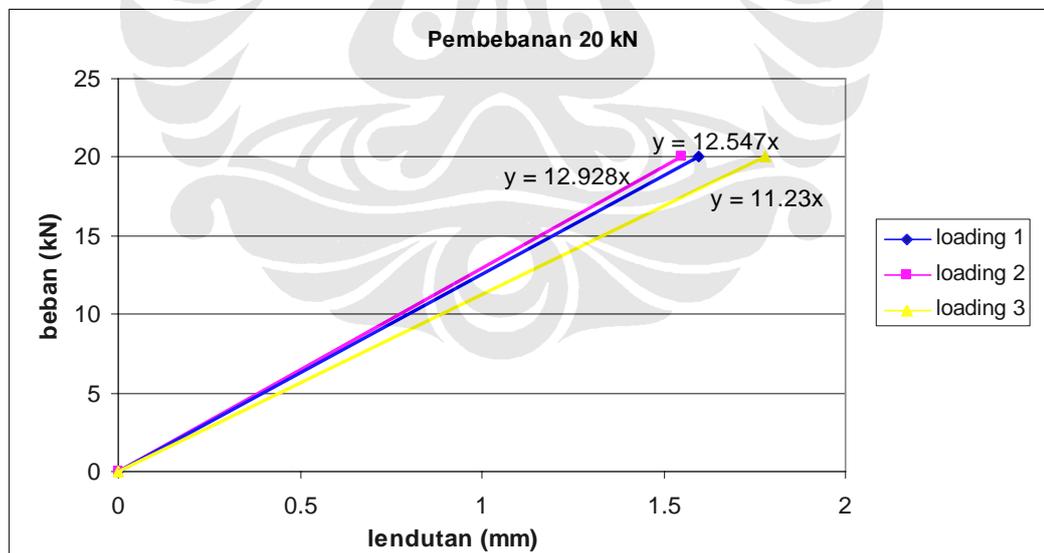
beban (kN)	lendutan (mm) pada <i>loading</i>		
	1	2	3
5	0.844	0.937	0.703
10	0.797	1.640	0.937

20	1.594	1.547	1.781
30	2.250	1.031	2.156
40	2.625	1.781	1.922
45	2.719	2.859	4.781
50	5.531		

Dari data lendutan yang terjadi untuk 3x siklus *loading-unloading*, dibuat grafik P- Δ untuk setiap variasi pembebanan (*terlampir*). Hal ini dimaksudkan untuk melihat pengaruh siklus *loading* terhadap *stiffness* struktur, apakah terjadi *degradation stiffness* pada struktur.

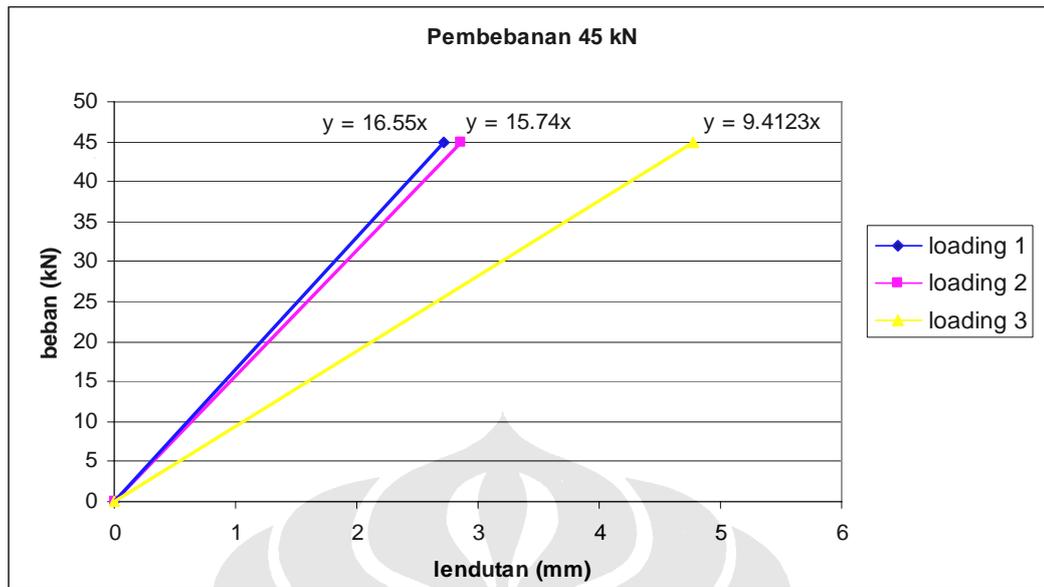
Grafik di bawah ini adalah perilaku *stiffness* struktur pada beban 20 kN. Dapat dilihat bahwa dari *loading 1* ke *loading 2*, gradient kemiringan garis makin besar, dalam artian struktur justru mengalami peningkatan *stiffness*. Tetapi dari *loading 2* ke *loading 3*, gradient kemiringan garis makin kecil, dalam artian struktur mengalami *degradation stiffness*. Tetapi, peningkatan ataupun penurunan kekakuan pada 3x siklus *loading-unloading* pada beban 20 kN ini masih dalam skala kecil, sehingga bisa disimpulkan perilaku struktur masih dalam tahap elastis.

Grafik 4.10. Perilaku *Stiffness* Struktur pada Beban 20 kN



Untuk perilaku struktur pada pembebanan 45 kN, *degradation stiffness* yang terjadi cukup signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa struktur telah mengalami tahap plastis. Pengamatan di Laboratorium pun mencatat bahwa pada beban 45 kN telah terjadi *crack* pada penampang balok.

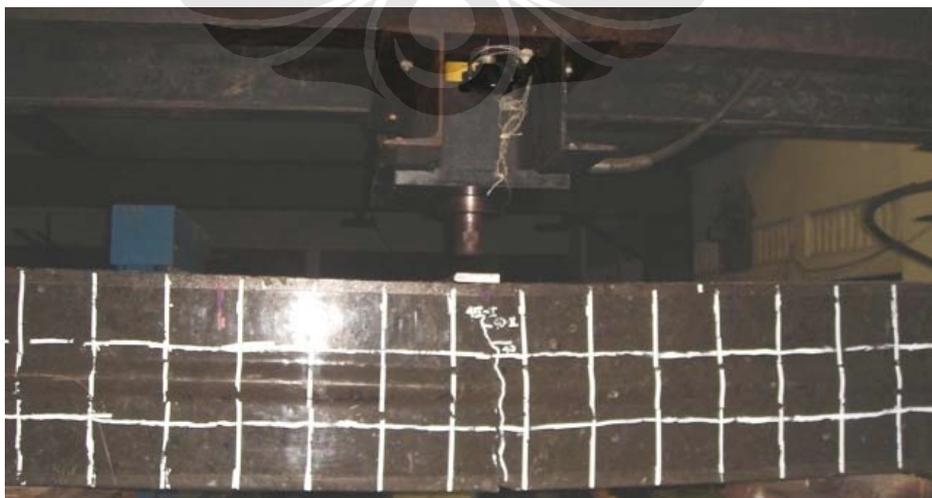
Grafik 4.11. Perilaku *Stiffness* Struktur pada Beban 45 kN



Untuk analisa selanjutnya, nilai lendutan yang diambil untuk setiap pembebanan adalah *peak value* dari 3 nilai lendutan yang terjadi pada setiap siklus *loading-unloading*. Besar nilai lendutan yang terjadi di titik $\frac{1}{4}$ bentang untuk masing-masing pembebanan terangkum dalam tabel di bawah ini.

Tabel 4.12 Nilai Lendutan Maksimum untuk setiap variasi Pembebanan

P (kN)	5	10	20	30	40	45	50
lendutan max (mm)	0.9374	1.6404	1.7811	2.2498	2.6716	4.7807	5.5307

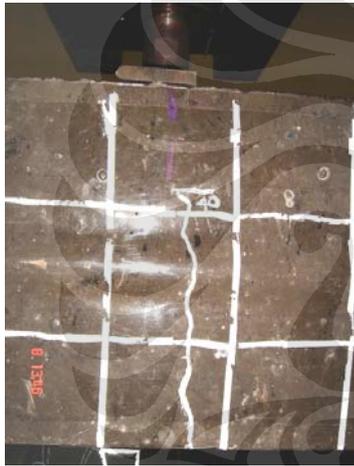


Gambar 4.21 Tampak Muka Lendutan Balok

4.4.4. Pengamatan *Crack* pada Balok

Selama pembebanan berlangsung, dilakukan pengamatan intensif terhadap keadaan penampang balok, apakah sudah terjadi *crack* atau belum. Pada beban 5 kN belum terjadi tanda-tanda keretakan, maka pembebanan dilanjutkan ke 10 kN, 20 kN, 30 kN.

Ketika beban sampai pada nilai 40 kN siklus *loading* 1 terjadilah *crack* pertama. *Crack* pertama terjadi di jarak ± 660 mm, dekat dengan titik $\frac{1}{2}$ bentang, baik di sisi depan maupun belakang dari penampang balok. Hal ini sangatlah wajar menimbang tipe pembebanan adalah beban 1 titik di tengah bentang. Pada siklus *loading* 2 dan 3, retak yang terjadi semakin panjang.



Gambar 4.22 Retak Penampang Balok Depan pada Beban 40 kN *Loading* 1



Gambar 4.23 Retak Penampang Balok Belakang pada Beban 40 kN *Loading* 2



Gambar 4.24 Retak Penampang Balok Depan pada Beban 40 kN *Loading* 2



Gambar 4.25 Retak Penampang Balok Belakang pada Beban 40 kN *Loading* 3

Kemudian pembebanan dinaikkan lagi menjadi 45 kN, hingga berhenti di 50 kN karena balok sudah mengalami *failure*. Pada beban 50 kN, retak balok sudah menerus hingga ke penampang bawah dan besar retak juga sudah semakin lebar ± 3 mm hingga dapat terlihat tulangan bajanya.



Gambar 4.26 Retak Penampang Balok Depan pada Beban 45 kN Loading 1



Gambar 4.27 Lebar Retak Penampang Balok pada Beban 45 kN



Gambar 4.28 Tulangan Baja yang terlihat pada Pembebanan 50 kN



Gambar 4.29 Failure Penampang Balok

Dari penelitian ini, *crack* pertama terjadi pada beban 40 kN. Bila dikembalikan pada rumus mencari momen di tengah bentang, maka *Momen Yield* yang terjadi pada penelitian ini adalah : $M_y \text{ percobaan} = \frac{1}{4} PL = \frac{1}{4} (40)(1,3) = 13 \text{ kN.m}$.

Berdasarkan jumlah tulangan terpakai, M_{yield} balok seharusnya sebesar 10,14 kN.m (lihat Bab III.3), dengan $P_{yield} = 31,2$ kN. Pada realita penelitian, ternyata balok baru mengalami *yield* di momen 13 kN.m. Hal ini dikarenakan rentang variasi pembebanan pada penelitian ini dari 30 kN langsung meningkat ke 40 kN, sehingga perilaku balok yang mungkin terjadi bila diberikan pembebanan di antara *range* tersebut tidak dapat diketahui. Bila dilihat dari panjang retak saat beban 40 kN, kemungkinan besar titik keretakan balok pertama terjadi sebelum mencapai beban 40 kN, yaitu diantara range 30 kN – 40 kN.

Setelah terjadinya *crack* di beban 40 kN, balok sudah berada dalam keadaan plastis, hingga mencapai beban ultimit di 50 kN dengan besar *Momen Ultimit* = 16,25 kN.m. Beban 50 kN disinyalir sebagai beban ultimit dikarenakan ketika *actuator* dipompa ke beban 50 kN, jarum penunjuk besar beban selalu turun dan menolak lebih naik walaupun terus dilakukan pemompaan. Setelah diamati keadaan baloknya, ternyata sudah terjadi *failure* balok dengan ditandai adanya keretakan menerus dari penampang depan – ke bawah – hingga ke penampang belakang balok.

4.4.5. Load – Deflection Relationship

Besar lendutan di titik ¼ bentang untuk masing – masing variasi beban diambil dari *peak value* grafik lendutan vs waktu. Karena data lendutan di titik ½ bentang tidak terukur, maka dengan metode pendekatan diambillah asumsi bahwa :

$$\text{lendutan } \frac{1}{2} \text{ bentang} = 2 * \text{lendutan } \frac{1}{4} \text{ bentang} \rightarrow \Delta_{\frac{1}{2}\text{bentang}} = 2.\Delta_{\frac{1}{4}\text{bentang}}$$

Tabel 4.13 Data Lendutan Percobaan

P kN	lendutan 1/4 bentang mm	lendutan 1/2 bentang mm
5	0.9374	1.8748
10	1.6404	3.2808
20	1.7811	3.5622
30	2.2498	4.4996
40	2.6716	5.3432
45	4.7807	9.5614
50	5.5307	11.0614

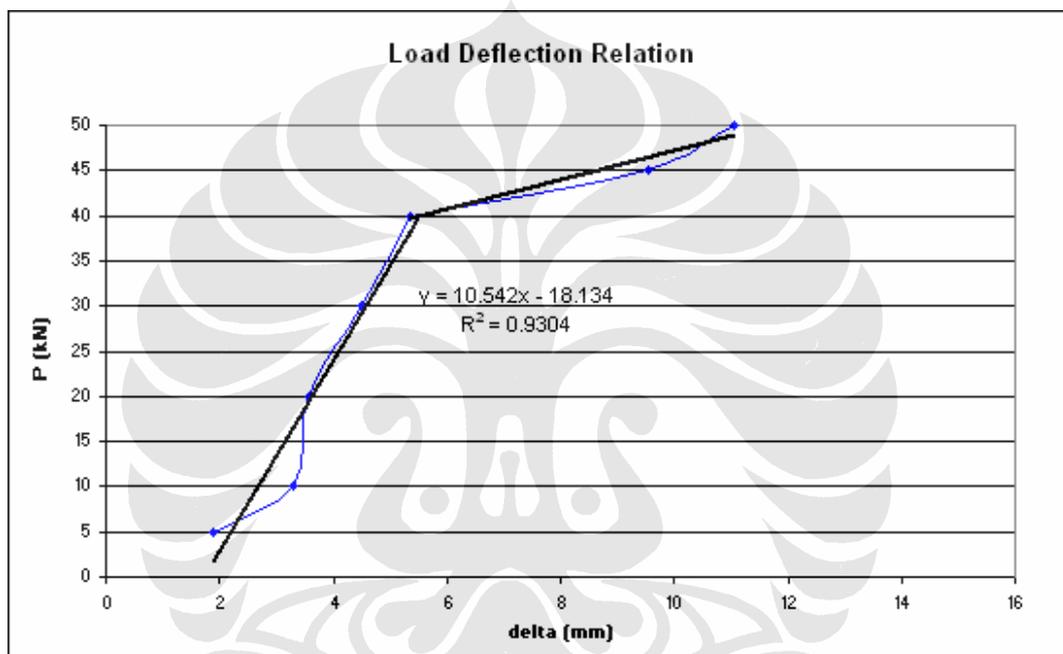
Berdasarkan rumus $P = k \cdot \Delta$, dimana P = gaya (beban luar)

k = *stiffness* material

Δ = *displacement* / lendutan

maka jika data lendutan di setiap variasi pembebanan diplot dalam bentuk grafik P - Δ , kemudian titik – titik data tersebut dibuat persamaan garisnya, maka gradien persamaan garis itu adalah nilai *stiffness* dari material beton geopolimer.

Grafik 4.12. *Load Deflection Relation*



Dari grafik data percobaan, terlihat ada titik belok pada beban 40 kN. Hal ini mengindikasikan terjadinya titik leleh dan struktur balok sudah melewati batas elastis. Persamaan garis lurus yang didapat dari ragam data, menggambarkan bahwa titik belok (titik leleh) terjadi pada beban ± 38 kN. Titik leleh yang diperoleh berdasarkan percobaan cukup jauh berbeda bila dibandingkan dengan kapasitas P_{yield} yang dirancang berdasarkan jumlah tulangan, yaitu 31,2 kN.

Berdasarkan pengamatan laboratorium, *crack* yang terjadi pada beban 40 kN sudah cukup panjang, maka bisa diindikasikan bahwa titik leleh yang terjadi pada percobaan bukan pada beban 40 kN, tetapi diantara *range* beban 30 kN – 40 kN. Tetapi karena penelitian tidak mengukur lendutan pada pembebanan diantara

range 30 kN – 40 kN, maka data yang diperoleh kurang presisi dan menyebabkan perbedaan yang jauh dengan kapasitas P_{yield} yang dirancang.

Persamaan garis yang diperoleh dalam kondisi elastis adalah

$$y = 10,542.x - 18,134$$

↕

$$P = k.\Delta$$

sehingga diperoleh nilai *stiffness* dari material beton geopolimer sebesar :

$$k = 10,542 \text{ kN.mm} = 10542 \text{ N.mm}$$

4.4.6. *Moment – Curvature Relationship*

Dengan tipe pembebanan adalah beban terpusat di tengah bentang, maka dapat dihitung besar momen yang terjadi adalah $M = \frac{1}{4} PL$. Kemudian berdasarkan lendutan yang terjadi di titik $\frac{1}{2}$ bentang, dapat dicari besar putaran sudut yang terjadi di perletakan. Dari data putaran sudut di perletakan itulah, dapat diperoleh *curvature* untuk setiap variasi momen dari rumus :

$$\theta = \frac{L}{\rho} \rightarrow \Phi = \frac{1}{\rho} = \frac{\theta}{L} = \frac{M}{EI}$$

dimana θ = putaran sudut di perletakan akibat lendutan balok $\frac{1}{2}$ bentang

L = panjang balok $\frac{1}{2}$ bentang

Tabel 4.13 Data *Curvature* Percobaan

P	Momen	deflection	slope	curvature
N	kN.mm	mm	radian	1/mm
5	1625	1.8748	0.00288	0.0000044
10	3250	3.2808	0.00505	0.0000078
20	6500	3.5622	0.00548	0.0000084
30	9750	4.4996	0.00692	0.0000107
40	13000	5.3432	0.00822	0.0000126
45	14625	9.5614	0.01471	0.0000226
50	16250	11.0614	0.01702	0.0000262

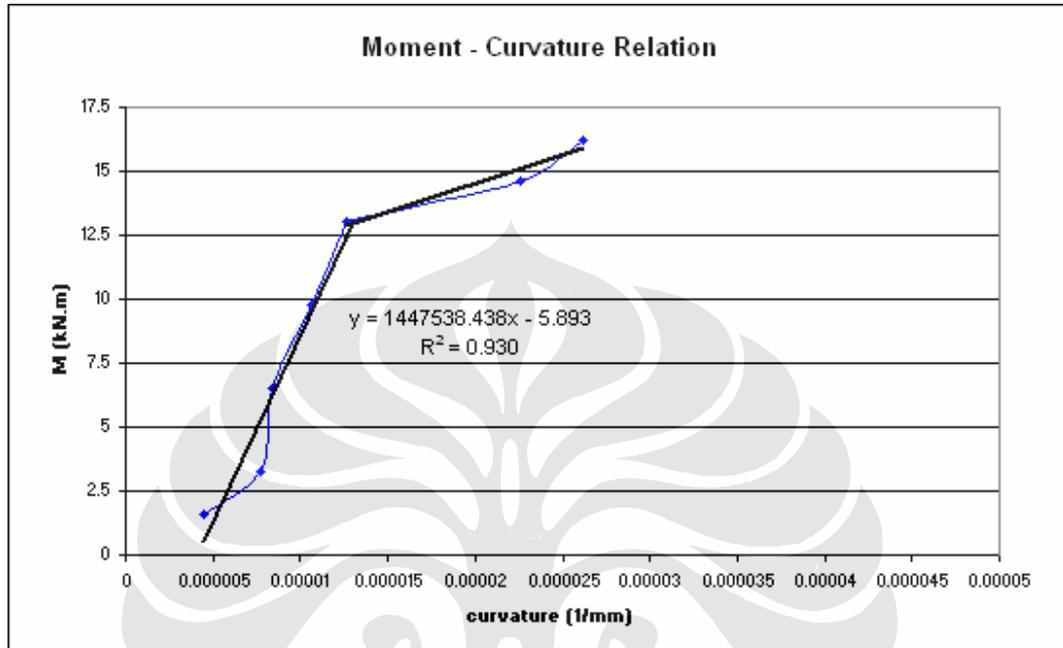
Berdasarkan rumus $M = EI.\Phi$, dimana M = momen yang terjadi

EI = elastisitas material

Φ = *curvature*

maka jika data *curvature* di setiap variasi momen yang terjadi akibat pembebanan diplot dalam bentuk grafik $M-\Phi$, kemudian titik-titik data tersebut dibuat persamaan garisnya, maka gradien persamaan garis itu adalah nilai EI .

Grafik 4.13. *Moment Curvature Relation*



Dari grafik data percobaan, terlihat ada titik belok pada momen 13 kN.m . Hal ini mengindikasikan terjadinya momen leleh pada struktur balok. Persamaan garis linier yang didapat dari ragam data, menggambarkan bahwa titik belok (titik terjadi momen leleh) terjadi pada nilai $\pm 12,5 \text{ kN.m}$.

Angka ini cukup jauh berbeda dengan kapasitas M_{yield} yang dirancang berdasarkan jumlah tulangan terpakai yaitu $10,14 \text{ kN.m}$. Sama seperti analisa pada hasil *Load-Deflection Relation*, hal ini bisa terjadi karena kurang akuratnya pembebanan yang ditinjau dalam penelitian, sehingga perilaku struktur pada *range* beban $30 - 40 \text{ kN}$ atau pada momen $9,75 - 13 \text{ kN.m}$ tidak bisa teramati.