

BAB IV

ANALISA NUMERIK

4.1. ANALISA FIBER MODEL

Analisa numerik pada percobaan ini dilakukan dengan menggunakan permodelan *fiber model*. Analisa numerik dilakukan untuk memprediksi hasil percobaan yang dilakukan berdasarkan percobaan laboratorium. Pada skripsi ini, analisa *fiber model* diselesaikan secara numerik dengan menggunakan program komputer bahasa pemrograman *Matlab*.

Percobaan yang akan dianalisa merupakan balok beton geopolimer dengan tulangan ganda. Analisa *fiber model* ini dilakukan berdasarkan asumsi-asumsi yang telah dijelaskan sebelumnya pada sub-bab 2.4. Proses analisa *fiber model* memiliki ide dasar dengan membagi penampang balok menjadi beberapa bagian serat-serat dan memberikan sifat non-linier material pada masing-masing serat tersebut. Sifat non-linier material tersebut didapat dari kurva hubungan tegangan-regangan material yang dipakai. Kurva hubungan tegangan-regangan beton geopolimer diasumsikan sama dengan kurva hubungan tegangan-regangan beton konvensional. Sedangkan kurva hubungan tegangan-regangan tulangan baja menggunakan kurva bilinear.

Selanjutnya akan dijelaskan permodelan dari sifat material beton dan baja secara numerik, tahap-tahap perhitungan pada analisa *fiber model*, diagram alur pemrograman komputer serta penerapannya sehingga didapat hasil penyelesaian berdasarkan analisa numerik.

4.1.1. Permodelan Sifat Material Beton

Model beton yang digunakan dalam analisa ini merupakan kurva hubungan tegangan-regangan Desayi dan Krishnan yang ditunjukkan oleh gambar 4.4. Kurva ini mempunyai bentuk menyerupai kurva parabolik dimana titik puncaknya merupakan tegangan maksimum (f_c') pada regangan maksimum (ϵ_0). Pada kurva permodelan ini, diasumsikan regangan beton maksimum yang terjadi sebesar 0,002.

Karakteristik kurva tersebut adalah sebagai berikut :

$$\sigma = \frac{E\epsilon}{1 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^2}$$

Dimana :

ϵ = regangan

ϵ_0 = regangan maksimum

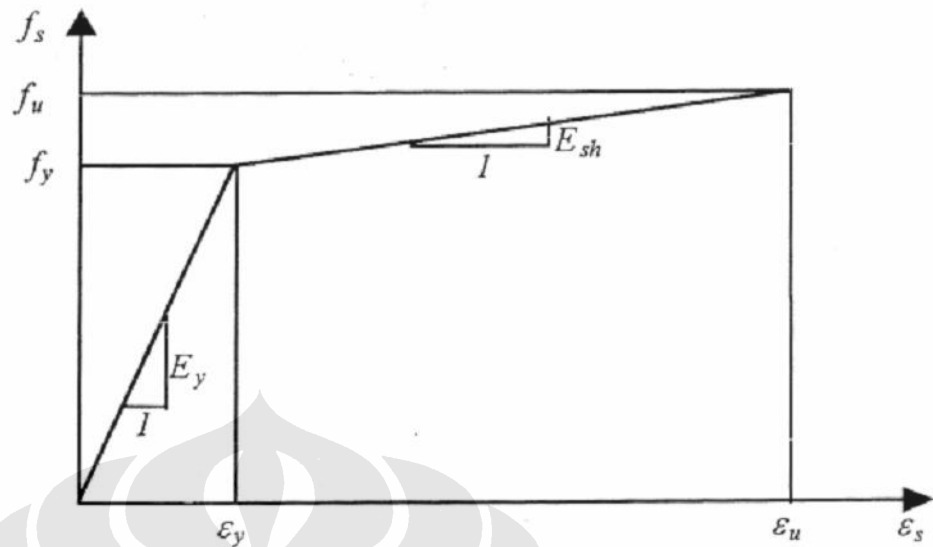
σ = tegangan

E = Modulus tangensial

$$E = \frac{2\sigma_{\max}}{\epsilon_0}$$

4.1.2. Pemodelan Sifat Material Baja

Model baja yang digunakan dalam analisa ini berupa kurva hubungan tegangan-regangan *bilinear* yang merupakan penyederhanaan sebagai dua garis lurus sebagaimana ditunjukkan pada gambar 4.1. Kurva ini diterapkan untuk dalam memperhitungkan perilaku serat tulangan longitudinal balok.



Gambar 4.1. Kurva tegangan-regangan baja

Karakteristik kurva tersebut adalah sebagai berikut :

Daerah AB : $0 \leq e_s \leq e_y$

$$f_s = E \cdot \varepsilon_s \dots \dots \dots (4.1)$$

Dimana :

f_s = tegangan baja

e_s = regangan baja

e_y = regangan leleh baja

E = modulus elastisitas baja

Daerah BC : $e_y \leq e_c \leq e_u$

$$f_s = (E_y - E_{sh}) \varepsilon_y + (E_{sh} \cdot \varepsilon_s) \dots \dots \dots (4.2)$$

Dimana :

E_{sh} = modulus strain hardening baja

Daerah CD : $e_s \geq e_c$

$$f_s = 0 \dots \dots \dots (4.3)$$

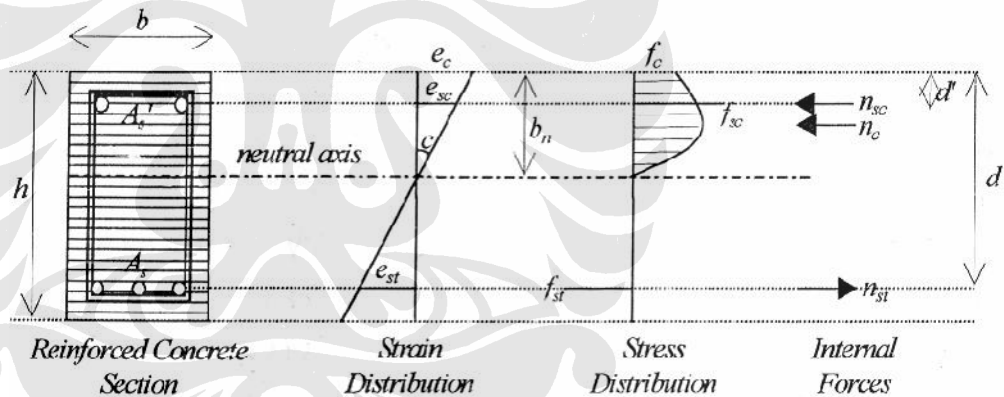
4.1.3. Tahap-tahap Perhitungan Analisa Numerik

4.1.3.1. Kurva Momen-Kurvatur

Kurva momen-kekurvatur merupakan salah satu hasil yang akan diselesaikan dengan analisa numerik. Untuk bisa mendapatkan kurva momen-kekurvatur, terdapat beberapa tahapan pengerjaan. Dalam menganalisa, terdapat a sumsi dasar seperti yang telah dijelaskan sebelumnya pada sub-bab 2.4, yaitu sebagai berikut :

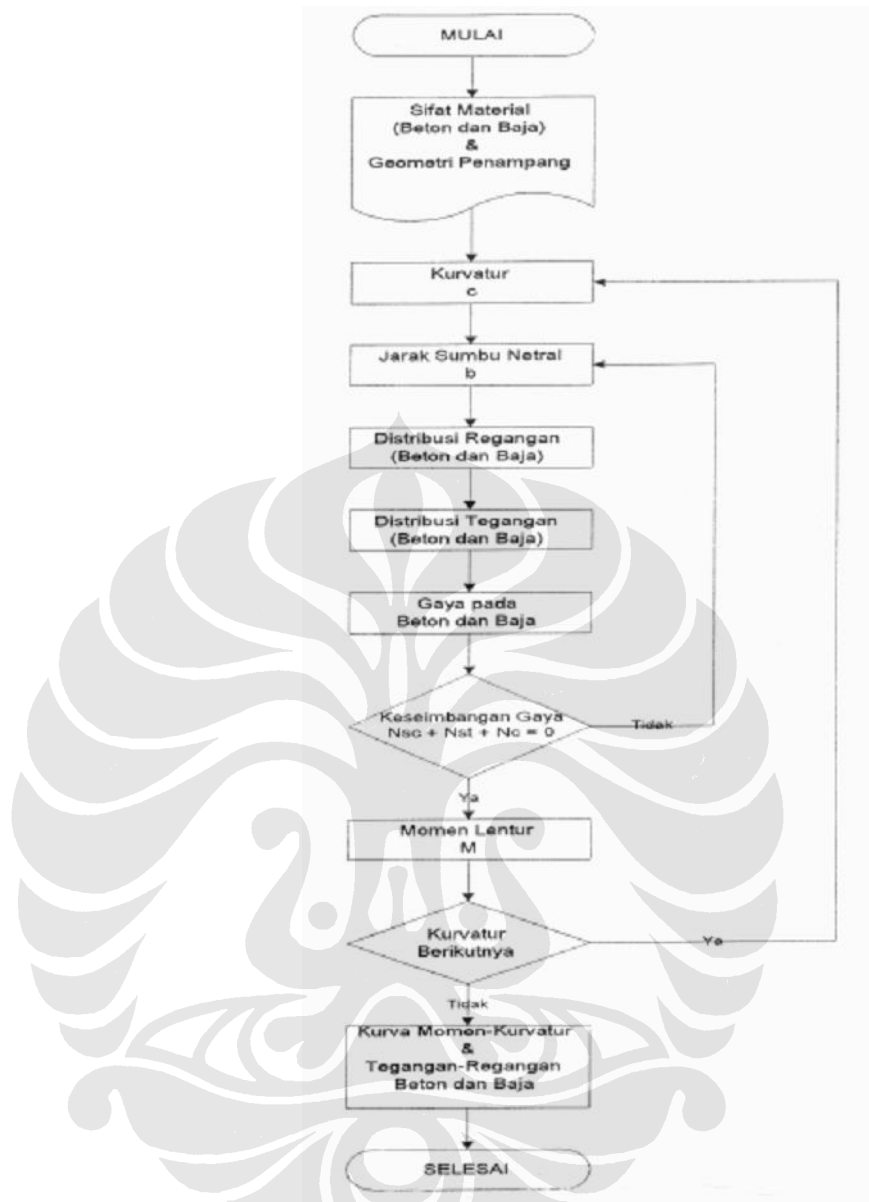
- Penampang datar sebelum mengalami lentur dan akan tetap datar setelah mengalami lentur (Teori Bernoulli).
- Kurva tegangan-regangan baja diketahui
- Kuat tarik beton diasumsikan sebesar 10% dari kuat tekan beton.
- Kurva tegangan-regangan beton diketahui.

Pada analisa *fiber model* ini, penampang balok beton geopolimer bertulang dibagi ke dalam serat-serat. Serat-serat tersebut ibarat lapisan-lapisan yang paralel terhadap sumbu momen lentur seperti ditunjukkan pada gambar 4.2.



Gambar 4.2. Permodelan analisa *fiber model*

Tahapan perhitungan analisa *fiber model* untuk mendapatkan kurva momen-kekurvatur ini dapat dilihat dalam diagram alur seperti pada gambar 4.3.



Gambar 4.3. Diagram alur analisa *fiber model*

Dalam pengerjaannya diperlukan beberapa *input* sebagai berikut :

- Sifat-sifat material beton antara lain regangan beton (ϵ_c), tegangan tekan beton (f_c'), regangan maksimum beton, modulus elastisitas beton.
- Sifat-sifat material baja tarik antara lain tegangan leleh (f_{yt}), tegangan ultimit (f_{ut}), regangan pada saat tegangan leleh (ϵ_{yt}), regangan pada saat tegangan ultimit (ϵ_{ut}), modulus elastisitas baja (E_t), modulus *strain hardening* (E_{sht}).

- c. Sifat-sifat material baja tekan antara lain tegangan leleh (f_{yc}), tegangan ultimit (f_{uc}), regangan pada saat tegangan leleh (ϵ_{yc}), regangan pada saat tegangan ultimit (ϵ_{uc}), modulus elastisitas baja (E_c), modulus *strain hardening* (E_{shc}).
- d. Geometri penampang balok beton, antara lain lebar penampang (b), tinggi penampang (h), luas tulangan tekan (A_s), luas tulangan tarik (A_s'), jarak tulangan tekan dari serat atas balok (d), jarak tulangan tarik dari serat tekan atas balok (d').

Pada tahapan paling awal adalah mencari besarnya regangan pada tiap-tiap material. Regangan tersebut didapat pada nilai kurvatur c_0 dengan asumsi jarak sumbu netral dari serat atas balok adalah b_0 . Berdasarkan Teori Bernoulli, distribusi tegangan dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut :

$$\S \text{ Regangan beton } (e_c) = c_0 \cdot b_0 \dots \dots \dots (4.4)$$

$$\S \text{ Regangan baja tarik } (e_{st}) = c_0 (d - b_0) \dots \dots \dots (4.5)$$

$$\S \text{ Regangan baja tekan } (e_{sc}) = c_0 (b_0 - d) \dots \dots \dots (4.6)$$

Bahasa numerik untuk menghitung besarnya regangan tersebut adalah sebagai berikut :

Untuk menghitung besarnya regangan beton digunakan *function*

```
function [strain]= fungsi (c0,b0)
[strain]=(c0)*(b0);
end
```

Untuk menghitung besarnya regangan baja tarik digunakan *function*

```
function [strain]= baja (c0,b0)
[strain]=c0*(d-(b0));
end
```

Untuk menghitung besarnya regangan baja tekan digunakan *function*

```
function [strain]= baja (c0,b0)
[strain]=c0*(b0-d1);
end
```

Dengan mengetahui besarnya regangan pada nilai kurvatur c_0 dan asumsi jarak sumbu netral dari serat atas balok b_0 . Maka dapat diketahui distribusi tegangan pada tiap-tiap material tersebut. Tegangan diketahui setelah memasukkan nilai regangan pada kurva hubungan tegangan-regangan. Untuk itu

maka perlu dibuat persamaan tegangan berdasarkan kurva hubungan tegangan-regangan seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya.

$$\S \text{ Tegangan beton } (f_c) = \frac{E\varepsilon}{1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2} \dots\dots\dots(4.7)$$

Untuk menghitung besarnya tegangan beton, digunakan *function* sebagai berikut :

```
function [fc]=beton (c0,b0)
%E= modulus elastisitas (Mpa)
E=40000;
e0=0.002;
ec=strainC(c0,b0);
[fc]=(E*ec)./(1+((ec).^2)/e0^2));
end
```

§ Tegangan tulangan baja tarik :

Jika $0 \leq e_{st} \leq e_{yt}$ maka $f_{st} = E_t \varepsilon_{st} \dots\dots\dots(4.8)$

Jika $e_{yt} \leq e_{st} \leq e_{ut}$ maka $f_{st} = (E_t - E_{sht}) \varepsilon_{yt} + (E_{sht} \varepsilon_{st}) \dots\dots(4.9)$

Jika $e_{st} \geq e_{ut}$ maka $f_{st} = 0 \dots\dots\dots(4.10)$

Untuk menghitung besarnya tegangan tulangan baja tarik, digunakan *function* sebagai berikut :

```
function [fst]= baja (c0,b0)
%eyt=regangan leleh baja
%Et=modulus elastisitas
%Esht=modulus strain hardening baja
et=est(c0,b0);
Et=210000;
Esht=420;
eyt=0.0011487;
eut=0.29;
if et>=0 & et<=eyt
fst=(Et*et);
elseif et>=eyt & et<=eut
fst=((Et-Esht)*eyt)+(Esht*et));
elseif et>eut
fst=0;
end
end
```

§ Tegangan tulangan baja tekan :

Jika $0 \leq e_{sc} \leq e_{yc}$ maka $f_{sc} = E_c \varepsilon_{sc} \dots\dots\dots(4.11)$

Jika $e_{yc} \leq e_{sc} \leq e_{uc}$ maka $f_{sc} = (E_c - E_{shc}) \varepsilon_{yc} + (E_{shc} \varepsilon_{sc}) \dots\dots(4.12)$

Jika $e_{sc} \geq e_{uc}$ maka $f_{sc} = 0$ (4.13)

Untuk menghitung besarnya tegangan tulangan baja tekan, digunakan *function* sebagai berikut :

```
function [fsc]=baja (c0,b0)
%eyc = regangan leleh baja
%Et=modulus elastisitas
%Esht=modulus strain hardening baja
ec=esc(c0,b0);
Ec=210000;
Eshc=420;
eyc=0.0011487;
euc=0.29;

if ec>=0 & ec<=eyc
    fsc=Ec*ec;
elseif ec>=eyc & ec<=euc
    fsc=((Ec-Eshc)*eyc)+((ec).*Eshc);
elseif ec>euc
    fsc=0;
end

end
```

Berdasarkan distribusi tegangan tiap-tiap material, maka dapat diketahui besarnya gaya-gaya dalam yang bekerja pada penampang balok beton bertulang geopolimer ini.

Besarnya gaya dalam beton dapat dicari dengan mengintegalkan persamaan tegangan beton sepanjang daerah tekan pada penampang balok beton atau jarak dari serat atas balok beton sampai ke garis netral.

Gaya tekan beton :

$$n_c = b \int_0^{b_0} f_c dx \dots\dots\dots(4.14)$$

Integral dapat juga berarti jumlah luasan daerah yang berada di bawah garis persamaan tegangan beton. Sebagai penyelesaiannya dengan numerik, digunakan aturan trapesium sebagai metodenya. Bentuk *function* untuk menyelesaikannya adalah

```
function [luasan]=trapzdl(a,b,n,c0)
%n= pembagian segmen
h=(b-a)/n;
x=a+h;
jum=0;
L=200;
for j=1 : n-1
```



```

        jum=jum + tekanC(c0,x);
        x=x+h;
end
luas=(h.*((tekanC(c0,a))+(2*jum)+tekanC(c0,(b)))/2)*L;

end

```

Terlihat pada *function* di atas, luasan daerah yang terdapat di bawah garis persamaan tegangan beton dihitung seperti menghitung luas trapesium. Agar hasil menjadi akurat, maka pada daerah yang akan dihitung luasannya dibagi menjadi beberapa segmen (n). Segmen-segmen tersebut memiliki bentuk seperti trapesium.

Besarnya gaya tarik beton, seperti sudah dijelaskan sebelumnya dalam asumsi dasar, hanya sebesar 10% dari kuat tekannya.

Untuk gaya dalam baik tulangan baja tarik maupun tulangan baja tekan, setelah didapatkan besarnya tegangan yang bekerja pada tulangan maka dapat dihitung besarnya gaya dalam tulangan.

Gaya tulangan tarik :

$$n_{st} = A_s \cdot f_{st} \dots\dots\dots (4.15)$$

Bentuk *function* untuk menyelesaikannya adalah

```

function [nst]=baja (asT,c0,b0)
%asT=luas tulangan tarik
ft=tarikB (c0,b0);

nst=asT*ft;

end

```

Gaya tulangan tekan :

$$n_{sc} = A_s' \cdot f_{sc} \dots\dots\dots (4.16)$$

Bentuk *function* untuk menyelesaikannya adalah

```

function [nsc]=baja (asC,c0,b0)
%asC=luas tulangan tekan
fc = tekanB (c0,b0)

nsc=fc*asC;

end

```

Setelah didapatkan besarnya gaya dalam masing-masing material, jumlah dari gaya-gaya dalam tersebut harus nol. Memenuhi persamaan kesetimbangan gaya.

Kondisi kesetimbangan gaya :

$$n_c + ns_c - ns_t - (0,1.n_c) = 0 \dots\dots\dots(4.17)$$

Jika kondisi kesetimbangan tersebut tidak tercapai maka perhitungan hingga didapat gaya-gaya dalam untuk kurvatur $c0$, harus diulang dengan menggunakan asumsi jarak garis netral dari serat atas balok ($b0$) yang berbeda. Jarak garis netral tersebut dapat bertambah ataupun juga berkurang. Perhitungan terus diulang hingga didapat jarak garis netral yang menghasilkan gaya-gaya dalam yang memenuhi kondisi kesetimbangan gaya.

Apabila telah didapat gaya-gaya dalam yang memenuhi kondisi kesetimbangan gaya, selanjutnya kita dapat menghitung besarnya momen yang terjadi. Momen tersebut merupakan perkalian dari masing-masing gaya dalam terhadap letaknya ke garis netral.

Momen tekan beton :

$$M_c = b \int_0^{b0} f_c \cdot x \cdot dx \dots\dots\dots(4.18)$$

Bentuk *function* untuk mennyelesaikannya adalah

```
function [luasanm]=trapzd2(a,b,n,c0)
%n= pembagian segmen
h=(b-a)/n;
x=a+h;
jum=0;
L=200;
for j=1 : n-1
    jum=jum + Mc(c0,x);
    x=x+h;
end
luasanm=(h*(Mc(c0,a)+(2*jum)+ Mc(c0,b))/2)*L;
end
```

dimana fungsi M_c yang digunakan dalam *function* di atas adalah sebagai berikut

```
function [mc]=beton (c0,b0)
%E= modulus elastisitas (Mpa)
E=40000;
e0=0.002;
ec=strainC(c0,b0);
[mc]=(b0)*((E*ec)./(1+(((ec).^2)/e0^2)));
```

Momen tulangan tarik baja :

$$M_{s_t} = n s_t (d - b_0) \dots \dots \dots (4.19)$$

Bentuk *function* untuk menyelesaikannya adalah

```
function [Mst]=baja(asT,c0,b0)
%d=jarak tulangan tarik ke serat atas
d=269;
Mst=(FtarikB(asT,c0,b0))*(d-(b0));
end
```

Momen tulangan tekan baja :

$$M_{s_c} = n s_c (b_0 - d') \dots \dots \dots (4.20)$$

Bentuk *function* untuk menyelesaikannya adalah

```
function [Msc]=baja(asC,c0,b0)
%d1=jarak tulangan tekan ke serat atas
Msc=(FtekanB(asC,c0,b0))*(b0-d1);
end
```

Momen total yang terjadi adalah :

$$M = M_c + M_{s_t} + M_{s_c} + (0,1.M_c) \dots \dots \dots (4.21)$$

Bentuk *function* untuk menyelesaikan persamaan kondisi kesetimbangan dan besarnya momen yang terjadi adalah sebagai berikut

```
function [gaya]=total (a,b,n,c0)
%asT = luas tulangan tarik yang digunakan
%asC = luas tulangan tekan yang digunakan
asT=157.08;
asC=6.2832;
k=FtarikB(asT,c0,b)
l=FtekanB(asC,c0,b)
m=trapzd1(a,b,n,c0)
o=trapzd2(a,b,n,c0)
p=MtarikB(asT,c0,b)
q=MtekanB(asC,c0,b)
s=(0.1)*o;
Momen = o + p + q + s
gaya=l-k+m-(0.1*m);
end
```

Dari *function* di atas, sebagai jawaban (*ans*) yang dihasilkan adalah kesetimbangan gaya. Namun juga diketahui besarnya momen yang terjadi. Sehingga ketika diketahui jarak garis netral yang memenuhi kondisi kesetimbangan gaya, momen akibat gaya-gaya dalam tersebut juga diketahui.

Sebagai salah satu cara penyelesaian untuk mendapatkan letak garis netral adalah menggunakan metode numerik bagi-dua (*bisection*). Metode *bisection* sudah dijelaskan pada sub-bab 3.8.

Berikut adalah *function bisection* untuk mencari jarak garis netral yang memenuhi kondisi kesetimbangan.

```
function akar = bisection (a,n,c0, xl, xu, es, maxit)
%bisection
iter = 0;
xr = xl;
while (1)
    xrold = xr;
    xr = (xl + xu)/2;
    iter = iter + 1;
    if xr~=0,ea = abs ((xr - xrold)/xr)* 100; end
    test = (sigmaF (a, xl, n, c0)) * (sigmaF (a, xr, n,
c0));
    if test < 0
        xu = xr;
    elseif test > 0
        xl = xr;
    else ea = 0;
    end
    if ea <= es
        iter >= maxit, break, end
end
sigmagaya = sigmaF(a, xr, n, c0)
akar = xr;
end
```

Perhitungan yang sama dilakukan untuk iterasi kurvatur berikutnya dan jarak garis netral yang memenuhi. Berdasarkan perhitungan-perhitungan tersebut, didapatkan momen lentur untuk setiap nilai kurvatur hingga kurvatur maksimum. Nilai-nilai kurvatur dan momen yang didapat kemudian diplot sehingga didapatkan kurva momen-kurvatur.

4.2. STUDI KASUS PADA BALOK BETON BERTULANG GEOPOLIMER

4.2.1. Balok Beton Geopolimer

Balok beton geopolimer merupakan balok beton yang menggunakan geopolimer sebagai bahan utamanya. Pengujian balok beton geopolimer belum pernah dilakukan sebelumnya. Sehingga belum diketahui karakteristik strukturnya secara pasti. Namun berdasarkan pengujian-pengujian kuat tekan maupun kuat tarik, beton geopolimer memiliki karakteristik seperti beton konvensional. Karena itu, dalam penyelesaian analisa numerik ini sebagai input digunakan beberapa karakteristik beton konvensional yang diasumsikan sama dengan beton geopolimer. Beberapa kelebihan material beton geopolimer sudah dijelaskan pada sub-bab 2.2.

4.2.2. Spesifikasi Balok

Penelitian yang dilakukan di laboratorium menggunakan satu balok beton geopolimer dengan tulangan ganda. Namun dalam analisa numerik, dianalisa balok beton geopolimer dengan variasi tulangan. Tujuannya adalah untuk mengetahui besarnya peranan tulangan dalam menahan momen lentur.

Berikut adalah tabel spesifikasi balok beton geopolimer yang diuji di laboratorium dan balok beton geopolimer pembanding yang di analisa secara numerik.

Tabel 4.1. Spesifikasi Balok

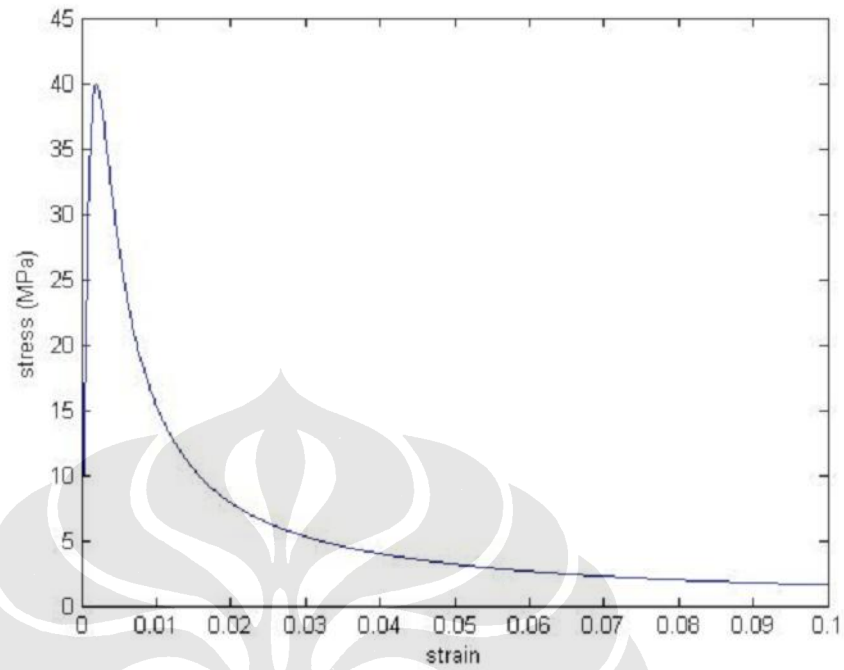
No	Keterangan	Balok diuji	Balok Pembanding 1	Balok Pembanding 2
1	f_c' (N/mm ²)	40	40	20
2	Tinggi balok (mm)	300	300	300
3	Lebar balok (mm)	200	200	200
4	Selimit beton (mm)	20	20	20
5	Tulangan Tarik :			
	Diameter (mm)	10	10	10
	Jumlah	2	2	2
	f_y (N/mm ²)	240	240	240
	f_u (N/mm ²)	400	400	400
6	Tulangan Tekan			
	Diameter (mm)	10	2	10
	Jumlah	2	2	2
	f_y (N/mm ²)	240	240	240
	f_u (N/mm ²)	400	400	400
7	Tulangan sengkang :			
	Diameter (mm)	6	6	6
	f_y (N/mm ²)	240	240	240
	f_u (N/mm ²)	400	400	400

4.2.3. Sistem Pembebanan

Peralatan yang dipakai adalah *HI-Plan Magnus* yang dijalankan secara manual dengan menggunakan pompa hidrolis yang memiliki kuat tekan maksimum 50 kN. Beban diletakkan ditengah bentang. Beban diberikan dengan kenaikan bertahap tiap 5 kN. Beban diberhentikan ketika balok beton sudah patah atau sudah tidak memberi tahanan lagi.

4.2.4. Kurva Tegangan-Regangan

Seperti sudah dijelaskan sebelumnya, sebagai input beberapa karakteristik beton geopolimer diasumsikan sama dengan beton konvensional. Salah satunya adalah kurva tegangan-regangan beton seperti yang terlihat pada gambar 4.4.



Gambar 4.4. Kurva Tegangan-Regangan Beton

Pada kurva tegangan-regangan tersebut, tegangan maksimum terjadi pada saat regangan maksimum yaitu 0,002. Tegangan yang terjadi sebesar 40 Mpa.

BAB V

ANALISA HASIL PERCOBAAN

5.1. ANALISA HASIL PENGUJIAN LABORATORIUM

5.1.1. Pengujian *Fly Ash*

Fly ash, material yang digunakan sebagai prekursor dalam campuran geopolimer, harus diuji dengan Tes XRF (*X-Ray Fluorescence*). Pengujian bertujuan untuk mengetahui besarnya persentase komposisi unsur-unsur yang terkandung dalam *fly ash* tersebut terutama kandungan unsur Alumina dan Silica. Pengujian dilakukan di Laboratorium Fisika MIPA UI.

Berdasarkan hasil tes 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 pengujian dapat dilihat pada lampiran.

Tabel 5.1 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

5.1.2. Pengujian Larutan *Waterglass* Na_2SiO_3

Larutan *waterglass* (sodium silikat), merupakan material yang berperan sebagai activator, diuji dengan Uji Kadar Kimia di Laboratorium Afilisasi 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 5.2 Hasil Uji Kadar Kimia *Waterglass*

No	Unsur	Berat dalam Campuran (%)
1	SiO_2	42.23
2	H_2O	22.84
3	Na_2O	0.11

5.1.3. Karakteristik Dasar Beton Geopolimer

Penelitian diawali dengan pengujian laboratorium untuk mengetahui karakteristik dasar dari beton geopolimer. Karakteristik dasar yang dimaksud antara lain adalah : kuat ikat pasta geopolimer, kuat tekan beton geopolimer, kuat tarik beton geopolimer, dan kuat lentur beton geopolimer. Karakteristik dasar ini sangat bergantung dari material penyusun yang digunakan dan juga komposisi material penyusunnya. Karakteristik dasar ini berperan besar dalam mendesain balok beton geopolimer yang akan diuji.

5.1.4. Kuat Tekan Pasta Geopolimer

Pengujian kuat ikat pasta geopolimer bertujuan untuk mencari komposisi material penyusun pasta yang paling optimal. Variasi material penyusun pasta geopolimer ini adalah penggunaan agregat baru atau agregat daur ulang dari limbah beton semen. Pengujian pertama kali dilakukan dengan 3 variasi sampel berdasarkan komposisi material penyusun. Perlakuan variasi tersebut terhadap *hardening* dan *curing* sama.

Tabel 5.3. Hasil pengujian kuat tekan pasta geopolimer pertama

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

Proses *hardening* ketiga variasi sampel tidak berbeda. Ketiganya dioven selama 36 jam pada suhu $\pm 70^{\circ}\text{C}$. Ketika sudah 36 jam, sampel dikeluarkan dari oven untuk didiamkan dalam suhu ruang. Hal ini juga merupakan proses *curing*. Proses *curing* dilakukan selama 1 hari. Setelah itu baru dilakukan pengujian untuk mengetahui kekuatan ikat pasta. Hasil yang diperoleh dapat terlihat pada tabel 5.3.

Terlihat juga pada tabel 5.3 dimana hasil paling baik diperoleh adalah sampel dengan campuran geopolimer-pasir limbah. Rata-rata kuat tekan sampel tersebut sebesar 26 Mpa.

Pengujian kemudian dilanjutkan dengan variasi sampel yang sama. Perbedaan dengan pengujian sebelumnya adalah lama proses *hardening*. Pada pengujian kedua ini sampel dioven selama 3 jam. Hal ini dikarenakan pada pengujian yang pertama terlihat retakan pada bagian atas balok yang kemungkinan dikarenakan kandungan air dalam pasta terlalu banyak yang menguap. Pada pengujian kedua ini, lamanya proses *curing* juga divariasikan yaitu 7 dan 10 hari. Berikut adalah hasil yang didapat dari pengujian ke dua.

Tabel 5.4. Hasil pengujian kuat ikat pasta geopolimer kedua

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*.

Terlihat dari masa *curing* 7 hari maupun 10 hari untuk jenis pengujian ini (dimana proses *hardening* hanya 3 jam), hasil kekuatan yang dihasilkan berbeda. Dimana pasta dengan proses *hardening* lebih lama menghasilkan kekuatan yang lebih besar. Sehingga dapat disimpulkan lamanya waktu proses *hardening* mempercepat tercapainya kekuatan optimal beton geopolimer.

5.1.5. Kuat Tarik Pasta Geopolimer

Tabel 5.5. Hasil pengujian kuat tarik pasta 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

Dari tabel 5.5 terlihat bahwa rata-rata hasil pengujian kuat tarik pasta geopolimer adalah sebesar 2,65 Mpa. Kuat tarik ini sangat kecil bila dibandingkan dengan kuat tekan rata-rata beton geopolimer sebesar 39,11Mpa. Hasil perbandingan kuat tarik dengan kuat tekan adalah sebagai berikut :

$$\frac{\text{kuat tarik}}{\text{kuat tekan}} \times 100\% = \frac{2,65}{39,11} \times 100\% = 6,78\%$$

Perbandingan tersebut menyerupai karakteristik beton konvensional. Hal ini bertentangan dengan hasil penelitian Abdul Hadi (2006) yang menyatakan bahwa kuat tarik beton geopolimer 2x lebih besar dari kuat tekannya.

5.1.6. Kuat Tekan Beton Geopolimer

Pengujian kuat tekan dilakukan beberapa kali dengan beberapa variasi penyusunnya. Termasuk membuat sample pengujian kubus beton konvensional. Tujuannya adalah untuk mengetahui perbedaan karakteristik antara beton geopolimer dengan beton konvensional.

Variasi material penyusun beton geopolimer yaitu beton geopolimer dengan agregat yang berasal dari limbah dengan beton geopolimer dengan agregat bukan limbah (murni) bertujuan untuk mengetahui material penyusun yang mempunyai kuat tekan paling baik. Berikut adalah hasil-hasil pengujian kuat tekan yang dilakukan di laboratorium.

Tabel 5.6. Hasil pengujian tes tekan beton konvensional dengan limbah

SAMPLE 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

Tabel 5.7. Hasil pengujian tes tekan kubus bervariasi

KUBUS GEOPOLIMER 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

KUBUS GEOPOLIMER LIMBAH					
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

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

Desain kuat tekan beton dari tiap-tiap variasi adalah 40 Mpa. Pada pengujian terhadap beton konvensional dengan menggunakan limbah beton, hasil yang didapat rata-ratanya adalah 40,1 Mpa. Hasil tersebut sesuai dengan desain. Hasil yang lain didapat pada sample beton geopolimer dengan menggunakan limbah beton. Hasil yang didapat rata-ratanya adalah 21,22 Mpa. Hasil ini sangat jauh dengan kuat tekan desain, sehingga dilakukan pengujian ulang. Hasil kuat tekan rata-rata pengujian kedua sample kubus geopolimer dengan menggunakan limbah beton adalah 29,37 Mpa. Hasil mengalamikan peningkatan namun masih tidak sesuai dengan kuat tekan desain.

Hasil berbeda didapat dari sample kubus beton geopolimer dengan menggunakan agregat murni. Hasil kuat tekan rata-ratanya adalah 39,11 Mpa. Hasil tersebut mendekati kuat tekan desain. Selanjutnya dalam penelitian ini yaitu balok beton geopolimer menggunakan agregat murni.

5.1.7. Kuat Lentur Balok Geopolimer

Kuat lentur balok geopolimer menggunakan agregat murni berdasarkan hasil yang didapat dari pengujian kuat tekan. Berikut adalah hasil pengujian kuat lentur balok geopolimer :

Tabel 5.8. Hasil pengujian kuat lentur balok

TES LENTUR BALOK 45X45X15									
cor	280308								
tes									
No	P kg	L Cm	b cm	h cm	W cm ³	M kg.cm	tegangan lentur kg/cm ² MPa		
1	1850	55	15	15	562.5	16958.333	30.15	3.01	
2	1950	55	15	15	562.5	17875	31.78	3.18	
3	2400	55	15	15	562.5	22000	39.11	3.91	
rata - rata							33.68	3.37	

5.2. ANALISA HASIL PERHITUNGAN NUMERIK

Sesuai dengan penjelasan pada bab sebelumnya mengenai tahapan dalam melakukan analisa numerik, berikut adalah hasil-hasil yang didapat. Hasil-hasil tersebut adalah :

- a. Kurva gaya dalam-kurvatur penampang balok beton beton bertulang geopolimer

- b. Kurva momen-kurvatur penampang balok beton bertulang geopolimer
- c. Kurva lendutan balok beton bertulang geopolimer.

Analisa numerik dilakukan terhadap satu sampel balok beton yang dilakukan pengujian di laboratorium dan sampel lainnya yang dijadikan sebagai pembanding dalam menganalisa. Melalui analisa numerik ini dapat diketahui dan diprediksi perilaku balok beton sebelum dilakukan pengujian di laboratorium. Perilaku tersebut antara lain momen lentur yang terjadi pada saat kondisi leleh dan juga besarnya lendutan yang terjadi.

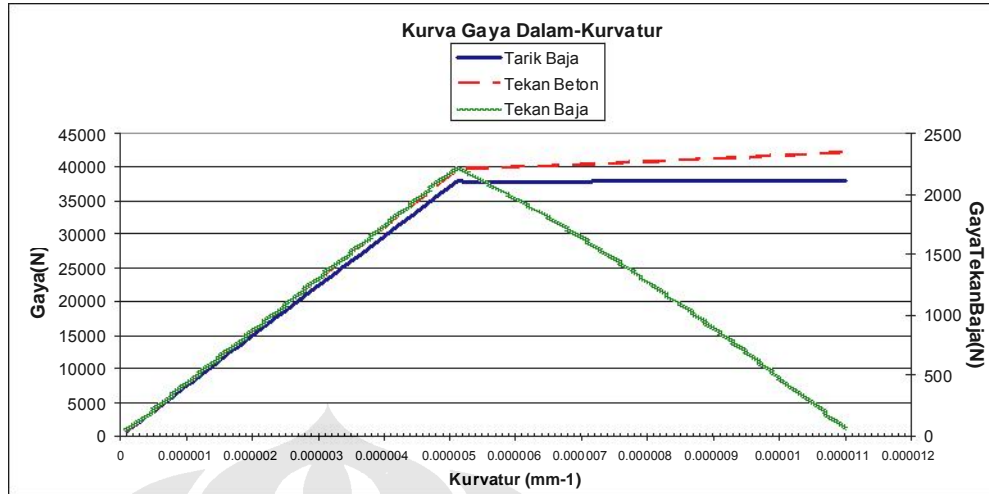
5.2.1. Balok Pengujian

Balok yang dilakukan pengujian memiliki spesifikasi seperti terlihat pada tabel 4.1.

5.2.1.1. Karakteristik Kurva Gaya Dalam-Kurvatur

Sebagai salah satu *output* penyelesaian secara numerik adalah dapat diketahui besarnya gaya dalam yang bekerja pada masing-masing material pada setiap variasi kurvatur seperti terlihat pada gambar 5.1. Dari gambar tersebut dapat diketahui tulangan tarik leleh ketika mencapai gaya dalam sekitar 4000 N. Selain itu juga terlihat bahwa tulangan tekan memberikan peranan yang sangat kecil.

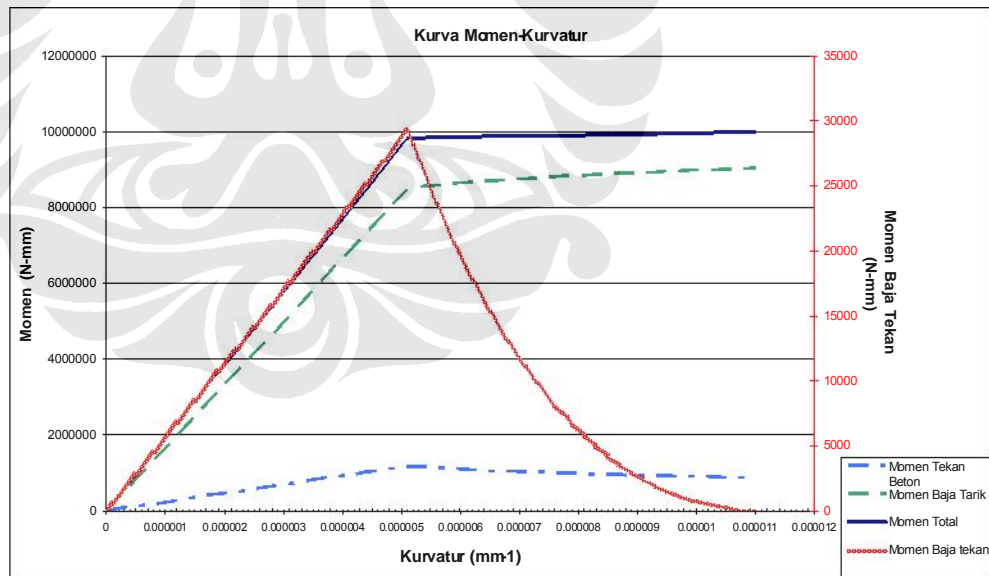
Namun hal terpenting yang dapat diketahui berdasarkan kurva tersebut adalah beton memberikan peranan yang sangat besar untuk mendapatkan kondisi kesetimbangan gaya. Terlihat bahwa gaya tekan beton lebih besar dibanding dengan gaya dari tulangan tarik.



Gambar 5.1. Kurva hubungan gaya dalam-kurvatur balok pengujian

5.2.1.2. *Karakteristik Kurva Momen-Kurvatur*

Pada gambar 5.2 diperlihatkan kurva momen-kurvatur dari balok yang diuji di laboratorium. Dari kurva tersebut dapat diketahui hubungan momen-kurvatur pada daerah elastis hingga daerah plastis. Perilaku elastis dipengaruhi oleh tulangan baja tarik.



Gambar 5.2. Kurva hubungan momen-kurvatur balok pengujian

Terlihat bahwa tulangan tarik menjadi material yang paling dominan dalam menghasilkan momen. Hal ini dikarenakan jarak garis netral yang dekat dengan serat atas balok. Seperti yang terlihat pada kurva gaya dalam-kurvatur,

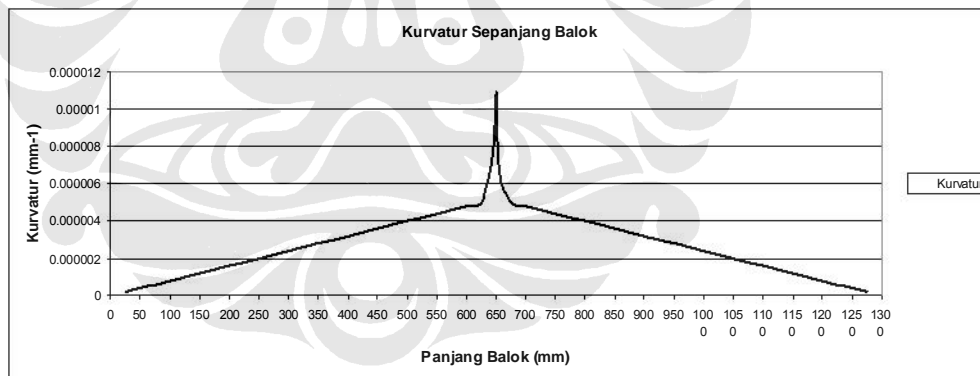
beton merupakan material yang memberikan gaya dalam yang paling besar sehingga garis netral naik mendekati serat atas balok.

Berdasarkan gambar 5.2 juga dapat diketahui besarnya momen ketika balok mencapai titik lelehnya. Berdasarkan perhitungan analisa numerik, diketahui besarnya momen leleh adalah 9,8 kNm.

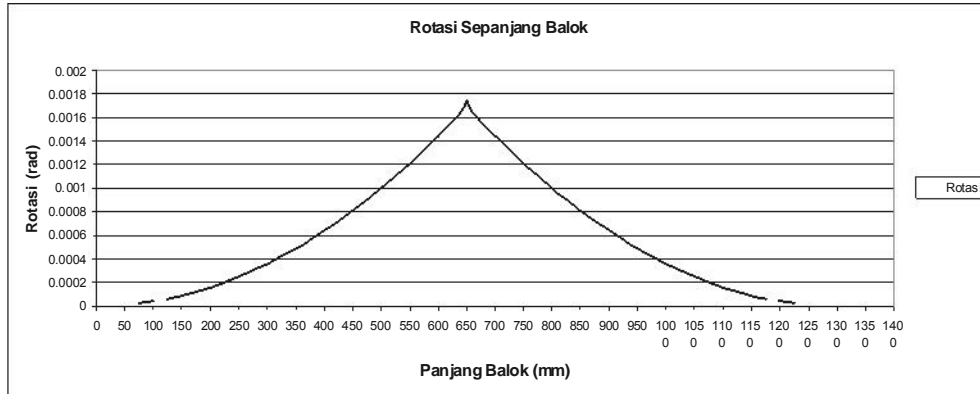
5.2.1.3. Karakteristik Kurva Lendutan

Ketika diketahui besarnya momen dari kurva momen-kurvatur, maka dapat diketahui pula besarnya lendutan yang akan terjadi. Lendutan sepanjang balok dapat diketahui apabila diketahui distribusi momen sepanjang balok.

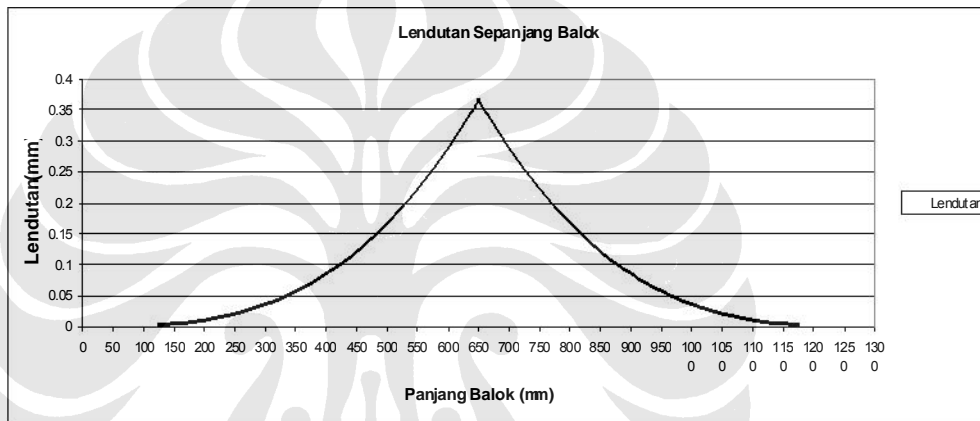
Dari distribusi momen sepanjang balok, dapat diketahui besarnya kurvatur sepanjang balok berdasarkan kurva hubungan momen-kurvatur. Kurvatur pada sepanjang balok tersebut diintegrasikan sehingga didapatkan rotasi sepanjang balok. Dengan mengintegrasikan rotasi sepanjang balok maka akan didapatkan lendutan pada sepanjang balok. Berikut adalah lendutan sepanjang balok ketika balok dibebani beban terpusat di tengah bentang sebesar 30,75 kN.



Gambar 5.3. Kurva kurvatur sepanjang balok pengujian



Gambar 5.4. Kurva rotasi sepanjang balok pengujian



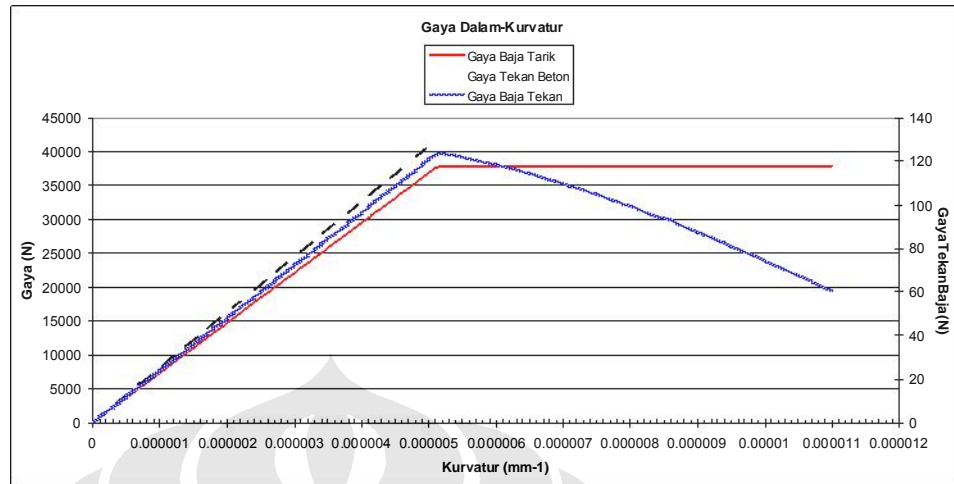
Gambar 5.5. Kurva lendutan sepanjang balok

Pada gambar 5.5 Terlihat besarnya lendutan yang terjadi pada tengah bentang terjadi ketika balok dalam kondisi sudah plastis. Lendutan maksimum yang terjadi dengan beban 30,75 kN adalah 0,38 mm. Sedangkan lendutan yang terjadi pada balok dalam kondisi elastis maksimum adalah 0,3 mm.

5.2.2. Balok Pembanding 1

Balok pembanding ini tidak dilakukan pengujian di laboratorium, namun hanya untuk mengetahui pengaruh dari perbedaan penggunaan material berdasarkan analisa numerik. Pada balok ini digunakan tulangan tekan yang lebih kecil.

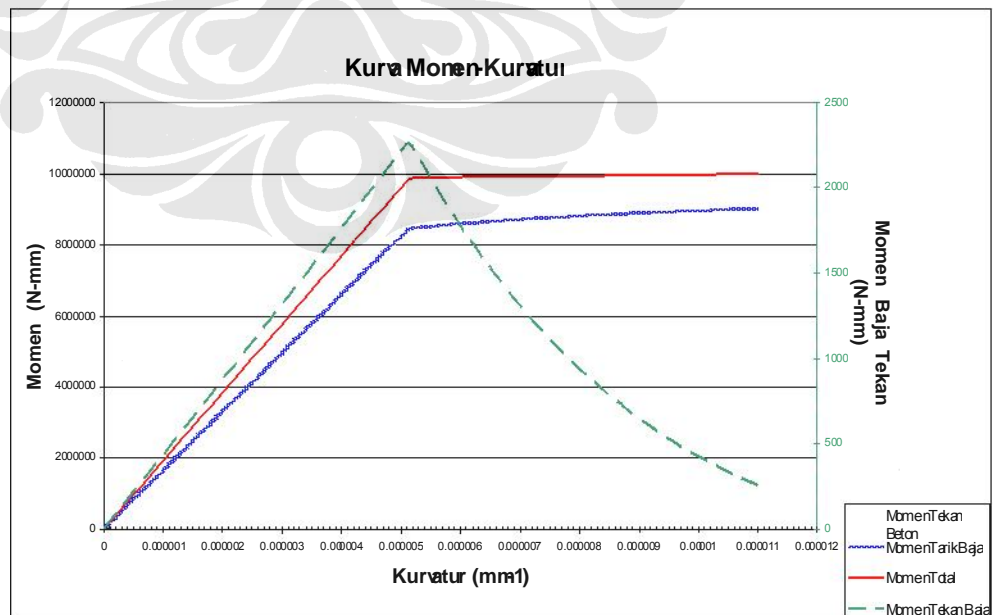
5.2.2.1. Karakteristik Kurva Gaya Dalam-Kurvatur



Gambar 5.6. Kurva hubungan gaya dalam-kurvatur balok pembanding 1

Terlihat pada gambar 5.6 bahwa perilaku gaya dalam pada balok ini tidak jauh berbeda dengan perilaku balok yang pertama. Sehingga dapat disimpulkan bahwa tulangan tekan tidak memberikan pengaruh besar dalam mencapai kondisi kesetimbangan gaya. Gaya tekan pada balok lebih banyak disumbangkan oleh beton.

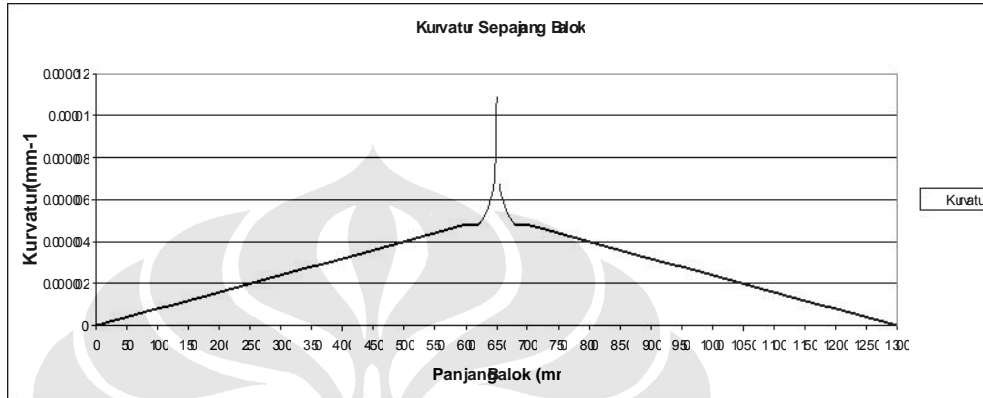
5.2.2.2. Karakteristik Kurva Momen-Kurvatur



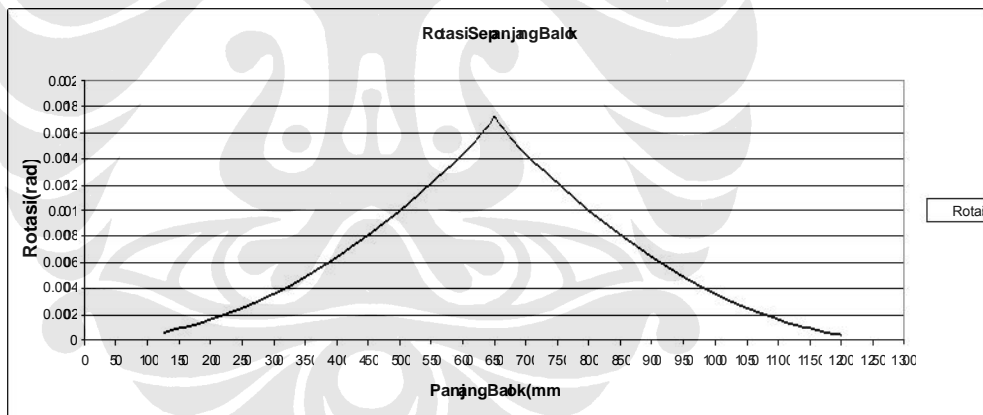
Gambar 5.7. Kurva hubungan momen-kurvatur balok pembanding 1

Pada gambar 5.7 juga terlihat tidak adanya perubahan perilaku yang jauh dengan perilaku balok yang pertama. Hal ini dikarenakan gaya dalam yang disumbangkan oleh tulangan tekan sangat kecil sehingga momen yang dihasilkan juga sangat kecil.

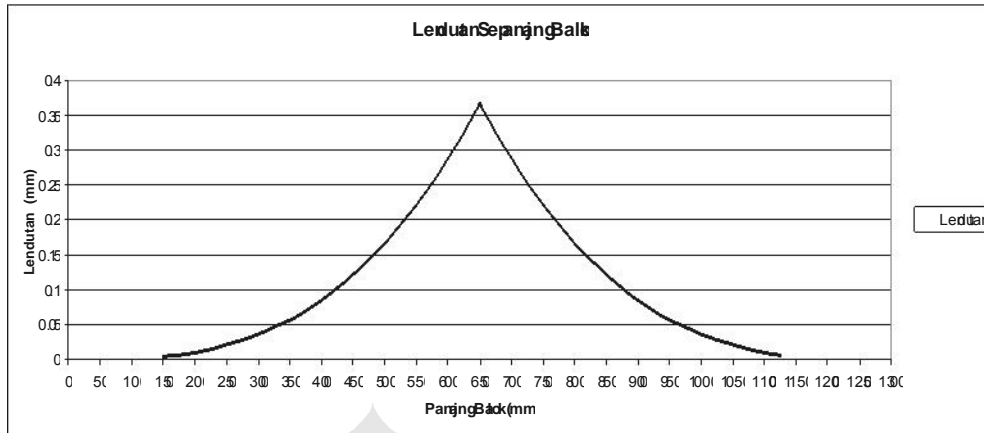
5.2.2.3. Karakteristik Kurva Lendutan



Gambar 5.8. Kurva kurvatur sepanjang balok pembeding 1



Gambar 5.9. Kurva rotasi sepanjang balok pembeding 1



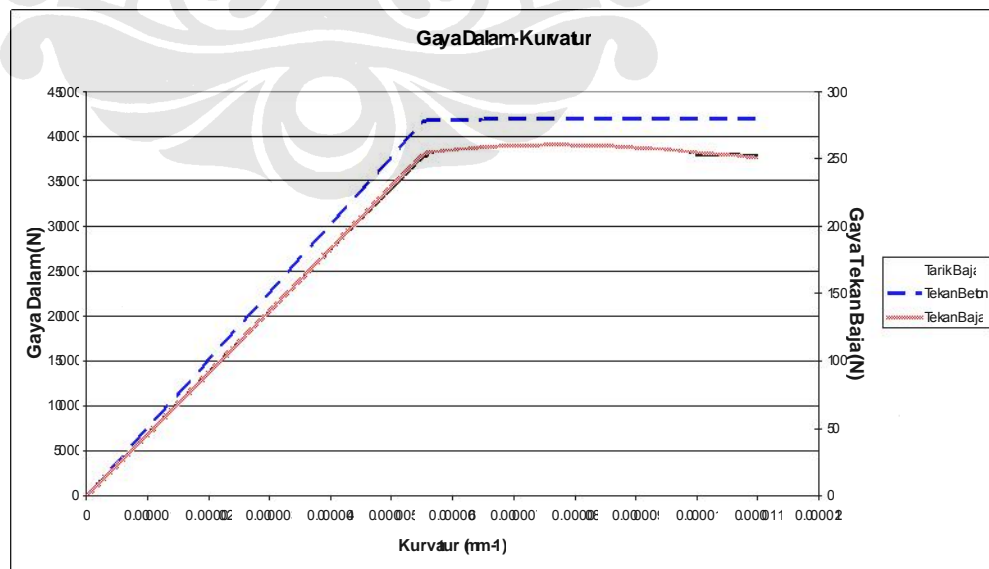
Gambar 5.10. Kurva lendutan sepanjang balok pembanding 1

Hal yang sama juga terlihat berdasarkan gambar 5.10 dimana lendutan yang terjadi tidak jauh berbeda dengan lendutan pada balok yang pertama.

5.2.3. Balok Pembanding 2

Balok pembanding ini juga tidak dilakukan pengujian di laboratorium, namun hanya untuk mengetahui pengaruh dari perbedaan penggunaan material berdasarkan analisa numerik. Pada balok ini digunakan digunakan beton dengan kuat tekan (f_c') yang lebih kecil.

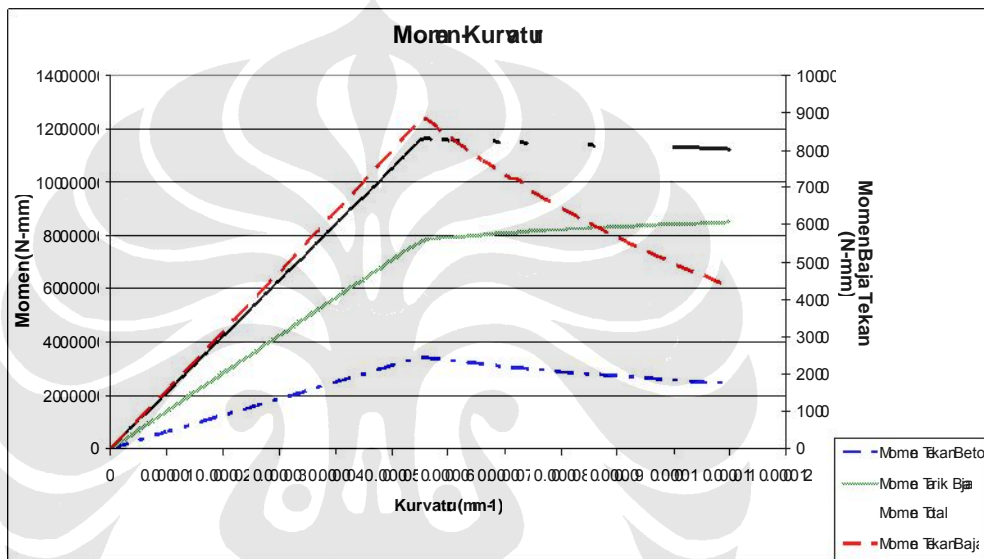
5.2.3.1. Karakteristik Kurva Gaya Dalam-Kurvatur



Gambar 5.11. Kurva hubungan gaya dalam-kurvatur balok pembanding 2

Terlihat pada gambar 5.11 bahwa pengurangan kuat tekan beton (f_c') menyebabkan perubahan kondisi kesetimbangan gaya. Garis netral menjadi turun. Namun terlihat juga bahwa gaya dalam tekan beton beton masih lebih besar dibandingkan gaya dalam tulangan tarik. Sehingga dapat disimpulkan beton memiliki peranan yang besar dalam mencari kondisi kesetimbangan gaya.

5.2.3.2. Karakteristik Kurva Momen-Kurvatur

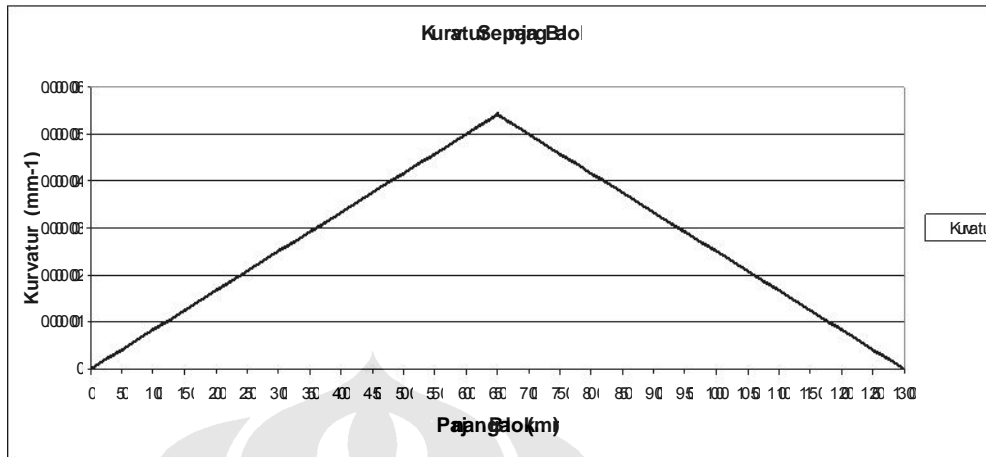


Gambar 5.12. Kurva hubungan momen-kurvatur balok pembeding 2

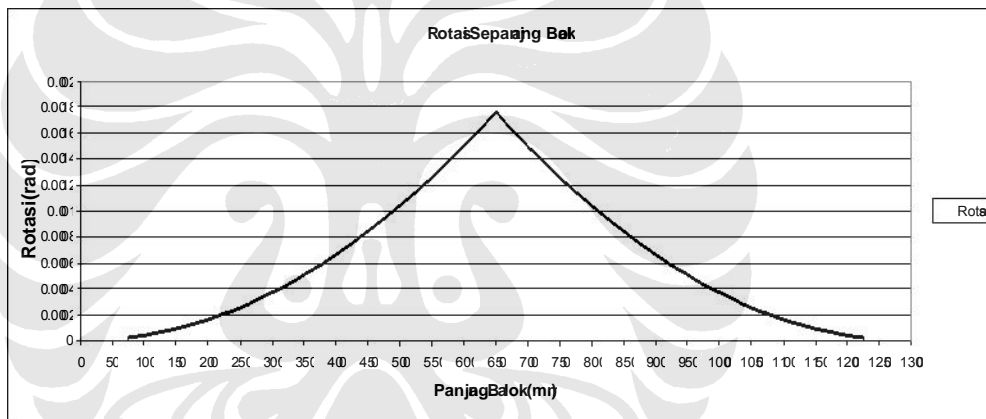
Pengurangan kuat tekan beton (f_c') dapat dilihat pengaruhnya dalam menciptakan kondisi kesetimbangan gaya. Hal tersebut mempengaruhi momen yang dihasilkan.

Pada gambar 5.12 terlihat adanya perubahan momen yang terjadi bila dibandingkan dengan balok yang pertama. Momen yang dihasilkan dari gaya dalam tekan beton menjadi semakin besar namun momen yang dihasilkan oleh tulangan tarik menjadi lebih kecil. Besarnya momen balok ketika leleh menjadi 11,5 kNm.

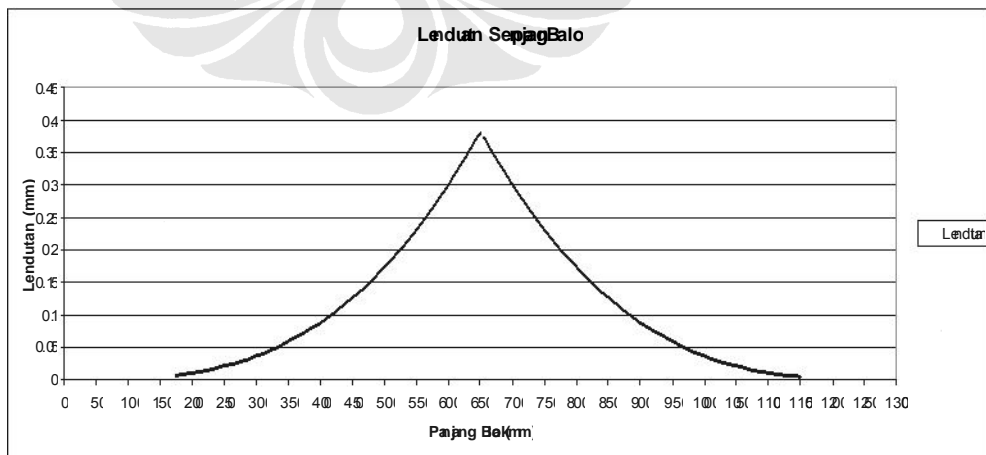
5.2.3.3. Karakteristik Kurva Lendutan



Gambar 5.13. Kurva kurvatur sepanjang balok pembanding 2



Gambar 5.14. Kurva rotasi sepanjang balok pembanding 2



Gambar 5.15. Kurva lendutan sepanjang balok pembanding 2

Lendutan seperti yang terlihat pada gambar 5.13 adalah lendutan ketika balok dibebani dengan beban terpusat pada tengah bentang sebesar 35 kN. Pada beban tersebut balok tersebut masih dalam kondisi elastis. Lendutan maksimum pada tengah bentang yang terjadi akibat beban tersebut adalah 0,38 mm.

