

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. PERSIAPAN DAN PENGUJIAN MATERIAL

Material – material yang akan digunakan sebagai penyusun beton pada penelitian ini terlebih dahulu harus diteliti untuk mengetahui karakteristik dan unsur penyusun dari material tersebut.

3.1.1. Agregat

Ada 3 jenis agregat yang digunakan di dalam penelitian ini, yaitu :

1. agregat murni $\Phi 10/20$ untuk campuran dalam sampel kubus/silinder beton geopolimer
2. agregat limbah yang dicrushing hingga $\Phi 10/20$, untuk campuran dalam sampel kubus/silinder beton geopolimer
3. agregat murni $\Phi 5/10$ untuk campuran dalam balok beton bertulang geopolimer

Agregat terlebih dahulu harus disaring dan bersih dari kotoran – kotoran. Agregat halus merupakan agregat yang lolos saringan No.4. Agregat kasar $\Phi 5/10$ adalah agregat yang lolos saringan $\frac{1}{2}$ " dan tertahan di saringan No. 4. Sedangkan agregat kasar $\Phi 10/20$ adalah agregat yang lolos saringan 1" dan tertahan di saringan No. 4.

Semua jenis agregat yang digunakan harus memenuhi komposisi *well-graded aggregate* dan digunakan dalam keadaan SSD (*saturated surface dry*). Agregat halus yang digunakan memiliki nilai FM diatas 2.0.

3.1.2. Geopolimer

Bahan geopolimer dalam penelitian ini menggunakan *fly ash* sebagai prekursornya dan campuran larutan sodium hidroksida [NaOH] dan sodium silikat [Na₂Si₃] sebagai *alkali activator*. *Fly ash* yang digunakan di dalam penelitian ini merupakan *fly ash* hasil limbah buangan pembakaran batu bara pada PLTU Suralaya. Sedangkan larutan sodium silikat, atau biasa disebut *waterglass*, dan senyawa NaOH, didapatkan dengan membeli di toko kimia.

Pengujian material geopolimer yang perlu dilakukan adalah hanya untuk bahan prekursor, untuk mengetahui komposisi kandungan unsur – unsur di dalamnya, karena material *fly ash* di beberapa tempat pembangkit listrik mempunyai komposisi yang berbeda.

Pengujian yang dilakukan untuk mengetahui karakteristik *fly ash* adalah uji *X-Ray Fluorescence* (XRF) dan *X-Ray Diffraction* (XRD). Pengujian XRF berfungsi untuk mengetahui persentase komposisi unsur – unsur yang terkandung dalam *fly ash*, dimana diharapkan sebagian besar unsur penyusun dari *fly ash* adalah unsur alumina dan silika. Sedangkan pengujian XRD dilakukan untuk mencari sifat struktur dari *fly ash*.

Pengujian XRF dan XRD akan dilakukan pada Laboratorium Fisika Fakultas MIPA Universitas Indonesia. Hasil pengujian terlampir di lampiran.

3.2. PERHITUNGAN CAMPURAN BETON

Penelitian ini menggunakan metode pendekatan desain beton geopolimer sesuai dengan beton semen konvensional. Hal ini berarti kedua jenis beton tersebut didesain dengan kuat tekan rencana yang sama menurut standar perhitungan beton konvensional. Karena sampai saat ini belum terdapat standar mengenai desain campuran (*mix design*) beton geopolimer, maka untuk mencapai target kuat tekan beton geopolimer tertentu, peran pasta semen pada beton semen diganti dengan pasta geopolimer. Begitupun dengan komposisi agregat murni sesuai dengan uji karakteristiknya, menjadi referensi komposisi agregat limbah beton dalam

penelitian ini. Sehingga dibutuhkan pengujian terhadap beton semen dengan target kuat tekan yang sama, sebagai data pembandingan terhadap beton geopolimer.

3.2.1. Perhitungan Komposisi Pasta Geopolimer

Tahap pertama dalam menentukan campuran beton geopolimer adalah mencari komposisi yang tepat dari material geopolimer itu sendiri, yaitu komposisi perbandingan prekursor dan aktivator.

M. Fajar Hermansyah (2007) memperoleh komposisi pasta geopolimer berbahan dasar *fly ash* dari PLTU Suralaya dengan hasil kuat tekan paling optimal sebesar 45.1 MPa. Dalam komposisi tersebut, rasio *fly ash* : air = 4.44 : 1. Komposisi tersebut diperoleh berdasarkan perhitungan kimia yang didasarkan pada hasil pengujian XRD, XRF, dan kadar kimia Na_2SiO_3 . Dikarenakan bahan material yang digunakan dalam penelitian kali ini relatif sama dengan penelitian yang dilakukan M. Fajar Hermansyah, maka komposisi tersebut merupakan salah satu referensi utama dalam penelitian ini. Tetapi pada saat melakukan penelitian, penulis tetap akan melakukan metode *trial and error*, terlebih dalam variasi rasio H_2O , untuk mendapatkan hasil paling optimal sesuai dengan kondisi lapangan saat melakukan produksi benda uji.

Detail perbandingan komposisi tiap material dan bahan kimia yang digunakan merupakan hak kekayaan intelektual peneliti, sehingga tidak ditampilkan dalam laporan skripsi ini.

3.2.2. Perhitungan *Mix Design* Beton

Desain komposisi beton geopolimer selanjutnya adalah desain campuran material geopolimer dengan agregat (komposisi matriks-inklusi). Pada penelitian ini akan dibandingkan kekuatan beton geopolimer dengan beton semen dimana kedua beton tersebut memiliki perbandingan matriks-inklusi yang sama.

Beton geopolimer dan beton konvensional pada penelitian ini didesain dengan target kuat rencana K400 atau setaraf dengan kuat tekan $f_c' = 40$ MPa. Perhitungan campuran beton geopolimer didesain sesuai dengan perhitungan *mix*

design beton konvensional, menggunakan metode US Bureau, dengan mengganti jumlah pasta semen yang dibutuhkan menjadi pasta geopolimer (*terlampir*).

Tabel 3.1. Desain Kriteria dan Kebutuhan Bahan

K-Beton (Fc')	400.00	kg/cm ²	Kebutuhan Bahan per kg/m ³	
Slump	10.00	mm		
MSA	40.00	mm		
FM Pasir	2.60	kg/L		
γ Semen	3.15	kg/L		
γ Pasir	2.60	kg/L		
γ CA	2.65	kg/L		
S/A (%)	36.00	%		
A (%)	1.20	%		
W (Kg)	165.00	%		
			Agregat Kasar	1037.508
			Agregat Halus	650.809
			<i>Pasta Semen</i>	
			Semen	501.532
			Air	186.960
			<i>Pasta GeoPolimer</i>	
			Fly Ash	369.938
			NaOH	38.011
			NaSil	197.307
			Air	83.236

3.3. PERANCANGAN BALOK BETON BERTULANG GEOPOLIMER

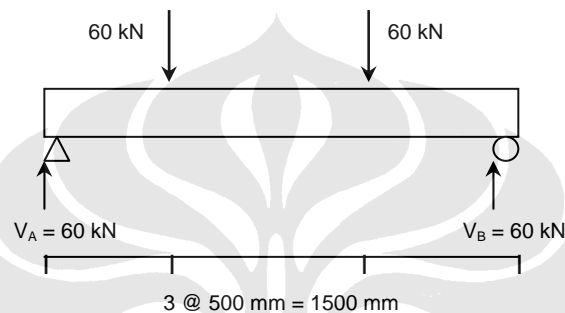
Balok beton bertulang geopolimer dirancang sebagai balok lentur murni dengan konsep jembatan 3 bentang. Untuk penelitian di laboratorium, profil penampang balok didesain $\frac{1}{2}$ kali dari ukuran profil balok struktural sebenarnya, yaitu sebesar $20 \times 30 \times 1500 \text{ mm}^3$. Desain dari tulangan lentur, sengkang, dan selimut beton pun diambil $\frac{1}{2}$ dari ukuran sebenarnya. Hal ini pulalah yang membuat ukuran agregat untuk campuran balok beton bertulang geopolimer menjadi $\frac{1}{2}$ kali lebih kecil, yaitu menggunakan agregat 5/10.

Balok beton bertulang geopolimer ini digunakan untuk pengujian besar lendutan. Penelitian akan menggunakan pembebanan statis dengan variasi beban makin meningkat hingga sampai pada beban ultimit dan terjadi failure pada balok. Untuk setiap variasi beban akan dilakukan 3 kali siklus *loading – unloading*. Oleh karena itu, balok dirancang mencapai momen leleh-nya, dan bahkan melebihi hingga mencapai momen ultimit.

Berdasarkan kemampuan alat pada Laboratorium Struktur dan Material Departemen FTUI, alat pemberi beban (*actuator*) hanya bisa memberikan beban hingga maksimum 100 kN untuk setiap actuator, dengan factor koreksi 60%.

Sehingga dapat disimpulkan bahwa untuk setiap actuator, beban yang mampu diberikan hanya sebesar 60 kN.

Balok beton bertulang geopolimer yang dibuat dalam penelitian ini didesain mengalami 2 fase, yaitu fase elastis dan fase plastis. Oleh karena itu, dari awal perancangan sudah ditentukan terlebih dahulu besar *momen yield* rencana, agar struktur balok mampu diberikan pembebanan hingga mencapai *momen ultimit* dan terjadi *failure*.



Momen Nominal tengah bentang :

$$M = \frac{1}{3}(50)(1,5) = 30 \text{ kN.m}$$

Desain Momen Yield = $1/3 Mn = 10 \text{ kN.m}$

menggunakan :

- Baja tulangan polos dengan diameter 10 → $\phi 10$
- Baja sengkang polos dengan diameter 6 → $\phi 6$
- Selimut Beton = 20 mm
- Kuat tekan beton (f_c) = 40 MPa
- Kuat leleh tulangan(f_y) = 240 MPa

3.3.1. Perencanaan Tulangan Lentur

(1) Tinggi Efektif Penampang

$$\begin{aligned} d &= h - (20 + 1/2 \phi \text{ tulangan} + \phi \text{ sengkang}) \\ &= 300 - (20 + 5 + 6) \\ &= 269 \text{ mm} \end{aligned}$$

(2) Luas Tulangan

$$M_y \text{ rencana} = A_s \cdot f_y \cdot d$$

$$10 \times 10^6 = A_s (240) (269)$$

$$A_s = 154,895 \text{ mm}^2$$

(3) Jumlah Tulangan

$$n = \frac{A_s}{\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \phi^2} = \frac{154,895}{\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 10^2} = 1,97 \approx 2\phi 10$$

$$A_s \text{ terpakai} = 2 \times (\frac{1}{4} \pi 10^2) = 157,08 \text{ mm}^2$$

$$M_{\text{yield}} = A_s \cdot f_y \cdot d = 10,14 \text{ kN.m}$$

(4) Cek Daktilitas

$$\rho = \frac{A_s}{b \cdot d} = \frac{157,08}{200 \cdot 269} = 0,0029$$

$$\rho_b = \frac{0,85 \cdot \beta_1 \cdot f_c'}{f_y} \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) = \frac{0,85 \cdot 0,78 \cdot 40}{240} \left(\frac{600}{840} \right) = 0,0789$$

$$\rho_{\text{max}} = 0,75 \rho_b = 0,0592$$

$$\rho_{\text{min}} = \frac{\sqrt{f_c'}}{4 f_y} < \frac{1,4}{f_y}$$
$$= 0,00395 < 0,0035$$

(5) Spasi Tulangan

$$s = \frac{200 - (2 \cdot 20 + 2 \cdot 6 + 10)}{2 - 1} \geq 25$$
$$138 \geq 25$$

maka digunakan tulangan lentur positif $2 \phi 10 - 138 \text{ mm}$

3.3.2. Perencanaan Tulangan Geser

(1) Kemampuan Geser

$$V_u = 60 \text{ kN}$$

$$V_n = \frac{60}{0,75} = 80 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}
 V_c &= \frac{1}{6} \sqrt{f_c'} \cdot b_w \cdot d \\
 &= \frac{1}{6} \sqrt{40} \cdot 200 \cdot 269 \\
 &= 56,71 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

syarat : karena $V_u \geq \phi V_c$ maka perlu tulangan geser!!

(2) Luas Tulangan Geser

$$V_s = V_n - V_c$$

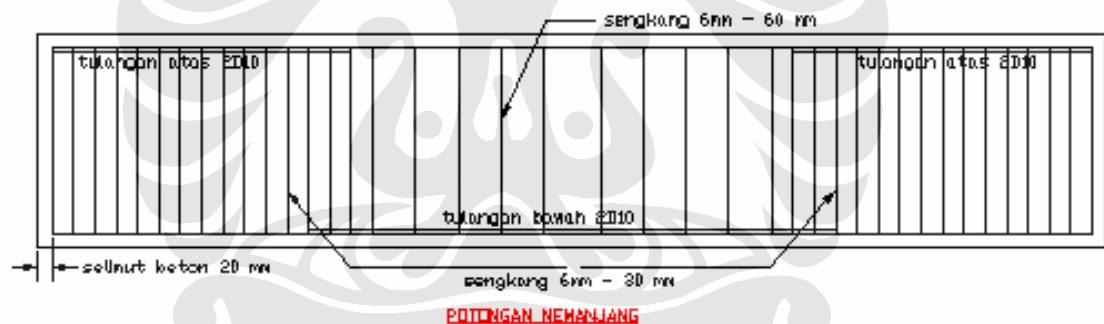
$$V_s = 80 - 56,71 = 23,29 \text{ kN} = 23290 \text{ N}$$

(3) Spasi Tulangan Geser

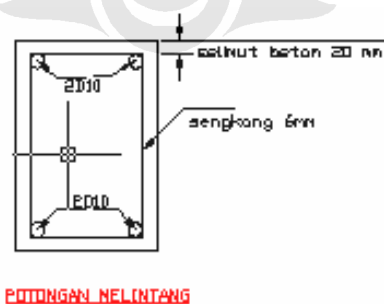
$$s = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{V_s} = \frac{\left(\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 6^2\right) \cdot (240) \cdot (269)}{23290} = 39,32 \text{ mm}$$

maka digunakan sengkang daerah kritis $\phi 6 - 30 \text{ mm}$

sengkang lapangan $\phi 6 - 60 \text{ mm}$



Gambar 3.1. Detail Potongan Memanjang Balok



Gambar 3.2. Detail Potongan Melintang Balok

3.4. PRODUKSI BENDA UJI

Setelah diperoleh perhitungan desain campuran beton geopolimer dan beton konvensional, maka dilakukanlah proses produksi benda uji.

3.4.1. Persiapan

Tahap Persiapan merupakan tahap penunjang di awal proses produksi. Hal-hal yang termasuk di dalamnya diantaranya :

(1) Persiapan Peralatan

- a) *Concrete mixer*, dengan volume *concrete mixer* yang akan dipakai adalah $\pm 1 \text{ m}^3$
- b) Bekisting, sesuai dengan ukuran benda uji yang telah disebutkan di atas. Sebelum pencetakan beton semen, dinding – dinding bekisting diberi pelumas agar mempermudah pembukaan bekisting. Khusus untuk pencetakan beton geopolimer, dinding bekisting harus dilapisi plastik agar mudah dibuka dan mencegah terjadinya korosi pada dinding bekisting.
- c) 1 set peralatan *slump test*
- d) Sendok semen, wadah (baskom), dan peralatan penunjang lainnya

(2) Persiapan Bahan

- a) Prekursor
Bahan prekursor yang digunakan adalah abu terbang (*fly ash*) yang berasal dari PLTU Suralaya. Sebelum digunakan untuk produksi, *fly ash* terlebih dahulu digiling untuk mendapatkan luas permukaan yang besar. Setelah digiling, *fly ash* disaring dengan menggunakan saringan No. 200. Hal ini bertujuan agar reaksi polimerisasi dapat berlangsung dengan baik.
- b) Aktivator alkali
Aktivator yang digunakan pada percobaan ini adalah campuran sodium silikat dengan sodium hidroksida. Sodium hidroksida yang berbentuk pelet dilarutkan dalam sodium silikat yang berbentuk cairan. Komposisi sodium hidroksida dan sodium silikat pada saat pencampuran dihitung agar

didapatkan komposisi larutan dengan molaritas tertentu. Hal ini berpengaruh dalam reaksi polimerisasi yang akan terjadi.

c] Agregat

Agregat mineral yang digunakan berupa agregat kasar dan agregat halus 10/20 untuk benda uji kubus, silinder, dan balok lentur beton geopolimer dan agregat 5/10 untuk benda uji balok beton bertulang geopolimer.

d] Air

Air yang digunakan harus memenuhi syarat untuk bahan beton pada umumnya, yaitu air dengan kualitas air minum.

3.4.2. Pembuatan Campuran Beton (*Mixing*) & Uji Slump Beton

Proses pencampuran dilakukan setelah melakukan proses desain, dimana komposisi berat tiap bahan beton telah ditentukan sesuai dengan kriteria yang diinginkan menurut standart desain beton konvensional. Proses pencampuran meliputi rangkaian kegiatan berikut ini :

- (1) Mencampur agregat kasar dan agregat halus dalam keadaan kering. Masukkan hasil pencampuran ke dalam *concrete mixer*.
- (2) Membuat larutan aktivator alkali dalam wadah. Setelah terjadi reaksi dalam larutan (ditandai dengan kenaikan suhu), masukkan *fly ash* dan air ke dalam larutan kemudian aduk merata, sehingga setiap butiran *fly ash* bersentuhan dengan larutan. Bahan ini merupakan material geopolimer yang berfungsi sebagai matriks (mortar).
- (3) Masukkan mortar dan air ke dalam *concrete mixer* dan aduk sampai mendapatkan kondisi homogen.
- (4) Melakukan tes slump untuk mengetahui besar slump yang didapat.

3.4.3. Pencetakan (*Moulding*)

Metode pencetakan berperan dalam menentukan kepadatan dan homogenitas beton pada saat keras, serta besar pori yang timbul. Proses pencetakan meliputi rangkaian kegiatan berikut ini:

- (1) Pastikan dinding-dinding bekisting telah dilapisi plastik untuk bekisting beton geopolimer dan pelumas untuk dinding bekisting beton semen.
- (2) Beton segar yang telah tercampur dengan baik dimasukkan ke dalam bekisting. Proses pencetakan dibagi menjadi tiga lapisan, tiap lapisan dipadatkan dengan menggunakan batang besi sebanyak 25 kali tusukan. Pada bekisting lentur, banyak tusukan yang diberikan ditentukan sampai kondisi beton terlihat padat.
- (3) Untuk beton geopolimer, setelah bekisting terisi penuh, tutup permukaan beton segar dengan film. Film yang digunakan dapat berupa bahan plastik termoset yang tahan panas 100° - 120° C. Hal ini bertujuan untuk menjaga terlepasnya air melalui proses penguapan. Penguapan air yang berlebihan akan mengganggu proses polimerisasi serta menyebabkan *thermal shrinkage*.

3.4.4. Proses Pengerasan (*Hardening*)

Berbeda dengan material semen yang menghasilkan panas hidrasi tinggi, material geopolimer membutuhkan energi aktivasi tambahan untuk mempercepat proses polimerisasi. Hal ini disebabkan karena panas yang dihasilkan kurang tinggi. Agar proses perkerasan berlangsung cepat, benda uji yang telah dicetak dimasukkan ke dalam oven dengan suhu $\pm 60^{\circ}$ - 80° C selama ± 24 jam sampai mengeras, dimana beton yang telah mengeras diindikasikan dengan kondisi pada saat pelepasan bekisting beton tidak mengalami keruntuhan.

Tetapi untuk struktur balok beton bertulang geopolimer, benda uji tidak bisa dipanaskan dalam oven karena panjang oven tidak cukup. Berdasarkan penelitian Sumajouw (2006) mengenai *Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete : Reinforced Beams and Columns*, metode yang dipakai untuk *hardening* balok geopolimer adalah dengan memberikan panas $\pm 60^{\circ}$ - 80° C secara merata ke seluruh penampang balok dengan menggunakan *blower*¹⁷.

3.4.5. Perawatan (*Curing*)

Proses perawatan beton geopolimer berbeda dengan beton semen, yaitu setelah pembukaan bekisting, sampel uji dibiarkan pada suhu kamar.

Untuk struktur balok, waktu yang dibutuhkan untuk *hardening* kemungkinan tidak cukup hanya 24 jam dengan *blower*, dibutuhkan waktu pemanasan secara menyeluruh yang lebih lama, mengingat balok mempunyai profil penampang yang besar.

Sumajouw (2006), proses *curing* balok beton geopolimer dengan cara membungkus balok dengan plastik tahan panas, seperti keadaan di-*steam*¹⁷.



Gambar 3.3. Metode *Curing* Balok¹⁷

3.5. PENGUJIAN BENDA UJI

Pengujian yang dilakukan secara umum dibagi menjadi 2 bagian besar, yaitu pengujian karakteristik dasar beton geopolimer dan pengujian perilaku mekanik balok beton bertulang geopolimer. Pengujian karakteristik dasar termasuk kuat ikat pasta, kuat tekan, kuat tarik, dan kuat lentur beton geopolimer. Pengujian perilaku mekanik dalam hal ini adalah pengukuran lendutan pada balok akibat diberikan pembebanan statis.

3.5.1. Uji Karakteristik Dasar Beton Geopolimer

Pengujian karakteristik dasar ini bertujuan untuk mencari komposisi yang paling optimal diantara 2 jenis agregat yang digunakan sebagai campuran dalam beton., yaitu agregat murni dan agregat limbah hasil buangan beton semen. Selain itu juga bertujuan untuk mencari metode kerja yang paling optimal dalam proses produksi beton geopolimer.

3.5.1.1. *Kuat Ikat Pasta Geopolimer*

Pengujian kuat ikat pasta geopolimer dilakukan dalam benda uji kubus kecil berukuran $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$. Penelitian akan menguji 3 jenis sampel, yaitu :

- a] Pasta Geopolimer Murni
- b] Mortar Geopolimer + Pasir Murni
- c] Mortar Geopolimer + Pasir Limbah

Pengujian kuat ikat pasta ini juga dimaksudkan untuk mencari metode *hardening & curing* yang paling optimal. Maka dari itu, pengujian kuat ikat pasta dilakukan dalam 2 variasi metode, yaitu :

- a] proses hardening dengan oven $\pm 60^\circ - 80^\circ \text{ C}$ selama ± 24 jam
- b] proses hardening tanpa oven dengan suhu ruangan hingga beton mengeras

3.5.1.2. *Kuat Tekan Beton Geopolimer*

Tes ini didasarkan pada ASTM Designation: C 39 – 94 tahun 1996 (*Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*). Pengujian kuat tekan menggunakan benda uji sampel kubus dan silinder. Untuk sampel kubus, perlu dilakukan pengkonversian benda uji kubus ke dalam silinder agar sesuai standar pengujian ASTM.

Benda uji dibuat dalam 3 jenis variasi untuk mencari komposisi paling optimal dari beton geopolimer dan untuk perbandingan kekuatan dengan beton semen konvensional. Jenis variasi tersebut adalah :

- a] Beton Semen Konvensional
- b] Beton Geopolimer + Agregat Murni
- c] Beton Geopolimer + Agregat Limbah

3.5.1.3. *Kuat Tarik Beton Geopolimer*

Tes ini menggunakan cetakan angka delapan, kemudian benda uji ditarik dengan mesin *direct tension*. Nilai kuat tarik diperoleh hingga sampel beton angka delapan putus. Benda uji merupakan komposisi pasta geopolimer murni saja.

3.5.1.4. Kuat Lentur Beton Geopolimer

Tes ini didasarkan pada Standart ASTM C 78 – 02. Benda uji berupa balok berukuran $15 \times 15 \times 55 \text{ cm}^3$ yang diberikan pembebanan 2 titik di $1/3$ dan $2/3$ bentang. Pengujian merupakan uji lentur murni untuk mencari tegangan lentur.

3.5.2. Uji Perilaku Balok Beton Bertulang Geopolimer

Perilaku yang akan diuji dalam penelitian kali ini adalah lendutan di tengah bentang pada balok. Desain balok adalah balok lentur murni, dengan 2 beban terletak di titik $1/3$ dan $2/3$ bentang. Lendutan diukur dengan menempatkan alat pengukur lendutan LVDT di titik $1/2$ dan $1/4$ bentang.

Alat uji LVDT dihubungkan dengan sistem komputer sehingga hasil pengamatan lendutan diamati melalui software LabVIEW. LVDT mengukur besar lendutan dengan indikator terjadinya perubahan voltase di dalam inti kumparan. Voltase yang dihasilkan oleh LVDT kemudian ditransfer menjadi sinyal elektrik melalui *signal conditioners* yang dihubungkan ke komputer. Sistem komputer menerima sinyal voltase dari LVDT dan dengan bantuan software LabVIEW, besar voltase yang terjadi dapat ditampilkan langsung dalam bentuk grafik dan tersimpan dalam data notepad dengan incremental waktu pengukuran 1/1000 sekon. Hasil data tersebut kemudian dikalibrasi ke dalam satuan lendutan dalam milimeter. Maka dari itu, sebelum dilakukan pengujian lendutan pada balok, terlebih dahulu harus diketahui transfer skala LVDT dari voltase ke milimeter.

Adanya 2 titik pengukuran LVDT, yaitu di jarak $1/2$ dan $1/4$ bentang, dimaksudkan untuk mendapatkan *back up* data, bilamana salah satu alat LVDT tidak berfungsi. Kedua titik pengukuran tersebut pada nantinya akan merujuk pada pengukuran lendutan di titik tengah bentang. Melalui metode pendekatan, hasil yang diperoleh pada LVDT di $1/4$ bentang merupakan $1/2$ kali lendutan di tengah bentang balok.

Pembebanan dilakukan dengan variasi hingga mencapai beban ultimit dimana akan terjadi *failure* pada balok. Variasi yang diambil adalah 5 kN, 10 kN, 20 kN, 30 kN, 40 kN, 50 kN, 60 kN, 80 kN, 100 kN. Untuk setiap variasi pembebanan yang dilakukan dalam penelitian, akan diperoleh hasil lendutan di tengah bentang

balok (dalam mm). Merujuk pada rumus *displacement* ketika masih berada dalam *elastic range* :

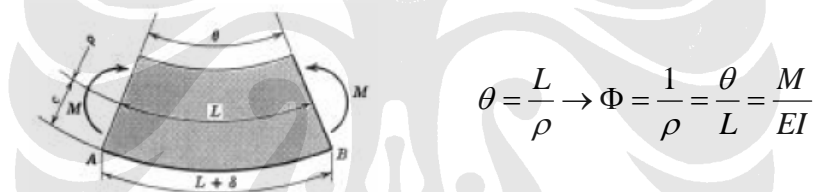
$$P = k \cdot \Delta \quad \text{dengan} \quad P = \text{gaya luar yang diberikan}$$

$$k = \text{kekakuan struktur penampang tersebut}$$

$$\Delta = \text{besar displacement yang terjadi}$$

Maka, dari kedua variabel (beban dan lendutan) akan dibuat grafik P- Δ . Besar kemiringan yang terjadi ketika masih dalam keadaan elastis merupakan besar kekakuan *stiffness* dari penampang struktur tersebut. Perubahan gradien yang besar dengan ditandai adanya titik belok yang tajam pada grafik P- Δ menyatakan bahwa telah terjadi perubahan fase dari elastis menjadi plastis.

Kemudian dari variasi pembebanan yang diberikan, dapat dihitung besar momen yang terjadi di tengah bentang. Untuk sebuah potongan penampang, *curvature* dicari dengan :



Maka untuk setiap variasi momen yang terjadi di tengah bentang, diperoleh pula *curvature* yang terjadi.

Merujuk pada rumus *curvature* yang terjadi pada kondisi *elastic range*, dimana :

$$M = EI \cdot \Phi \quad \text{dengan} \quad M = \text{momen akibat gaya luar yang diberikan}$$

$$EI = (\text{Elastisitas} * \text{Inersia})$$

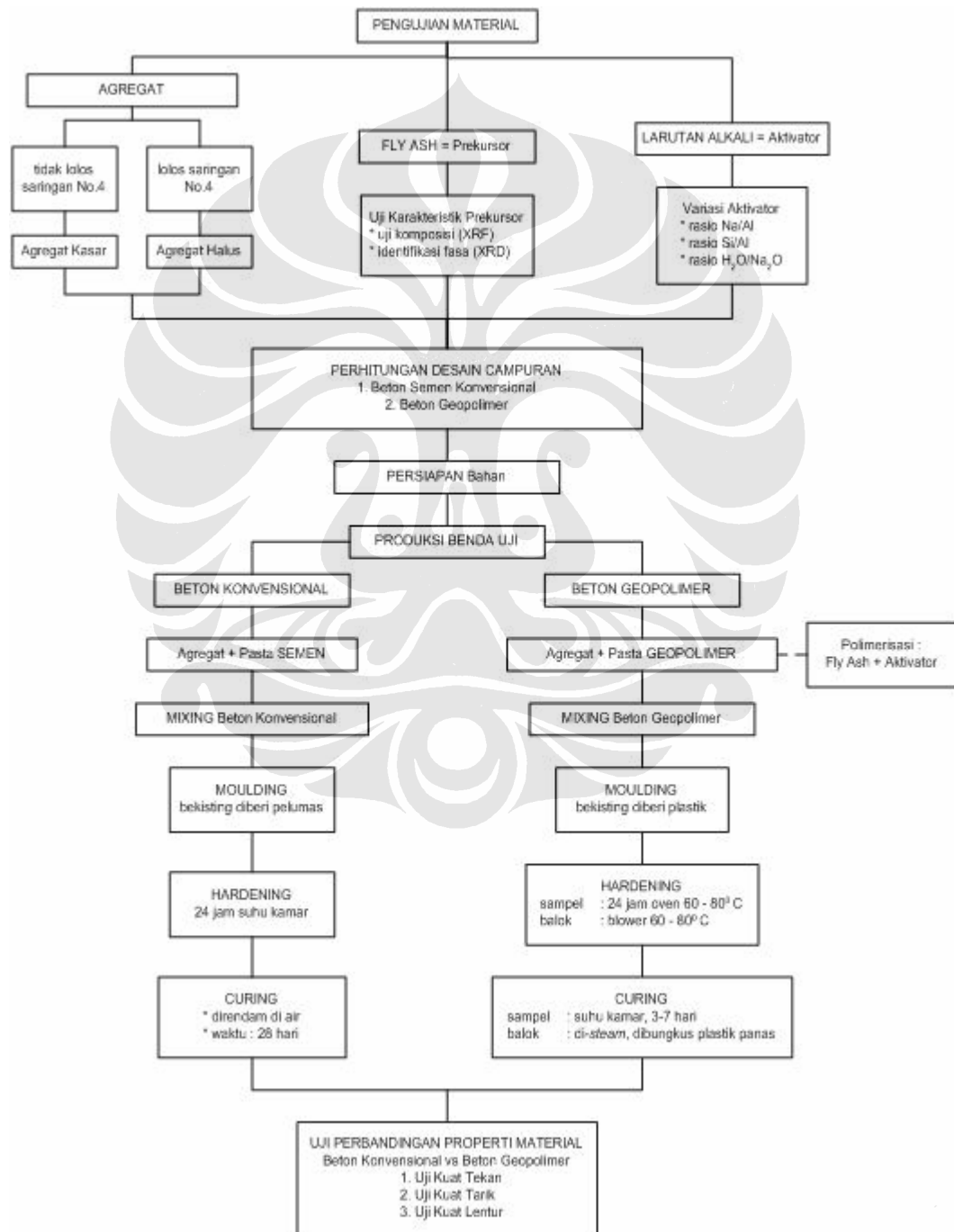
$$\Phi = \text{curvature yang terjadi}$$

Maka, dari kedua variabel (momen dan *curvature*) akan dibuat grafik M- Φ . Besar kemiringan yang terjadi ketika masih dalam keadaan elastis merupakan nilai EI dari penampang struktur tersebut. Titik belok yang terjadi pada grafik M- Φ merupakan titik momen leleh perubahan dari fase elastis menjadi plastis.

Diagram alir metodologi penelitian untuk mengetahui karakteristik dasar beton geopolimer terangkut dalam *flowchart* Grafik 3.1 di bawah.

Sedangkan untuk metodologi pengujian perilaku balok, terangkut dalam *flowchart* Grafik 3.2. *Flowchart* menerangkan mulai dari mendapatkan *input* data – proses pengolahan – hingga *output* seperti apa yang ingin dicapai.

Grafik 3.1. *Flowchart* Metodologi Pengujian Karakteristik Dasar Beton Geopolimer



Grafik 3.2. Flowchart Metodologi Pengujian Perilaku Balok Beton Bertulang Geopolimer

