

BAB III

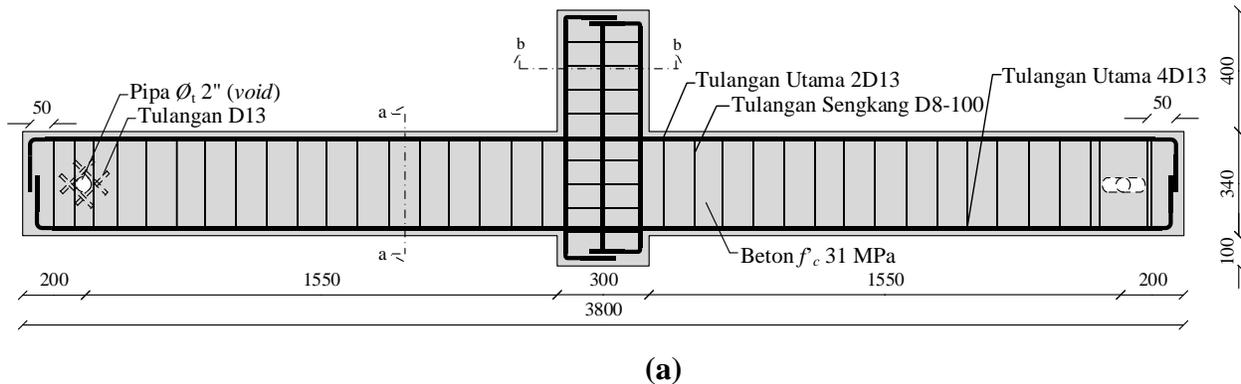
PENGUJIAN EKSPERIMENTAL

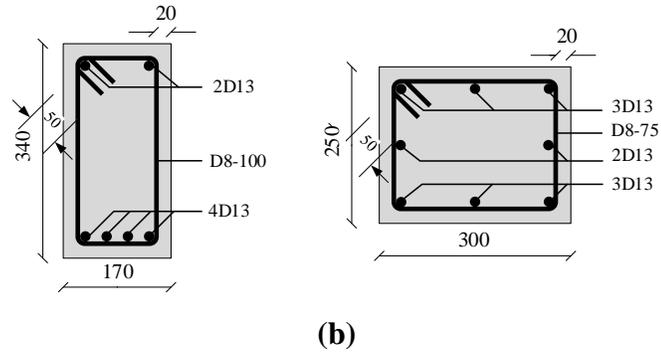
3.1. Metode Penelitian

Penelitian disertasi ini mengedepankan inovasi berupa solusi teknis penanganan perkuatan (*strengthening*) balok di muka kolom berupa balok *haunch* yang terbuat dari beton geopolimer yang dapat memadat sendiri (*self compacting geopolymer concrete – SCGC*). Pendekatan analisa dilakukan melalui uji eksperimental skala penuh (*full scale*) di laboratorium, dan permodelan elemen hingga, untuk menjelaskan aspek-aspek mikro sebagai pelengkap pengujian. Data yang digunakan untuk analisis berupa data primer yang diperoleh dari hasil pengukuran dan perekaman dalam eksperimen yang dilakukan, serta pengamatan model elemen hingga.

Penelitian ini diawali dari uji material bahan penyusun benda uji berupa uji tarik besi tulangan. Untuk beton konvensional maupun beton geopolimer akan dilakukan uji kuat tekan, uji kuat tarik belah, uji kuat tarik lentur, uji modulus elastisitas dan *poisson ratio* beton. Data tersebut di atas digunakan untuk *input* model numeris.

Selanjutnya dilakukan pembuatan benda uji balok beton prismatis mutu $f'_c=31$ MPa dengan dimensi panjang balok 3800 mm, penampang balok dengan lebar 170 mm dan tinggi 340 mm serta konfigurasi penulangan dengan kaidah *under reinforced* seperti pada Gambar 3. 1.



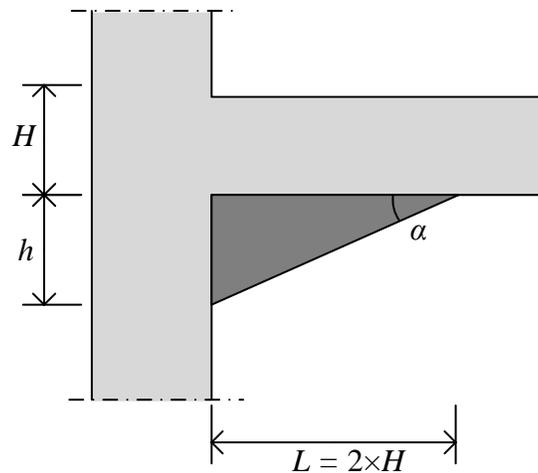


Gambar 3. 1. (a) Balok uji prismatis beton konvensional (b) Penampang dan penulangan balok dan kolom

Balok *haunch* mempunyai variabel tetap yaitu dimensi panjang balok *haunch*: $L=2\times H$ (berdasar Code SNI-2847-2019 pasal 18.4.2.4. dan ACI 318M-14 ch.18.6.4.) dan variabel Bergeraknya adalah tinggi balok *haunch* (h) dengan perincian seperti pada Tabel 3. 1. dan notasi dimensi balok *haunch* seperti pada Gambar 3. 2.

Tabel 3. 1. Jenis benda uji balok uji lentur

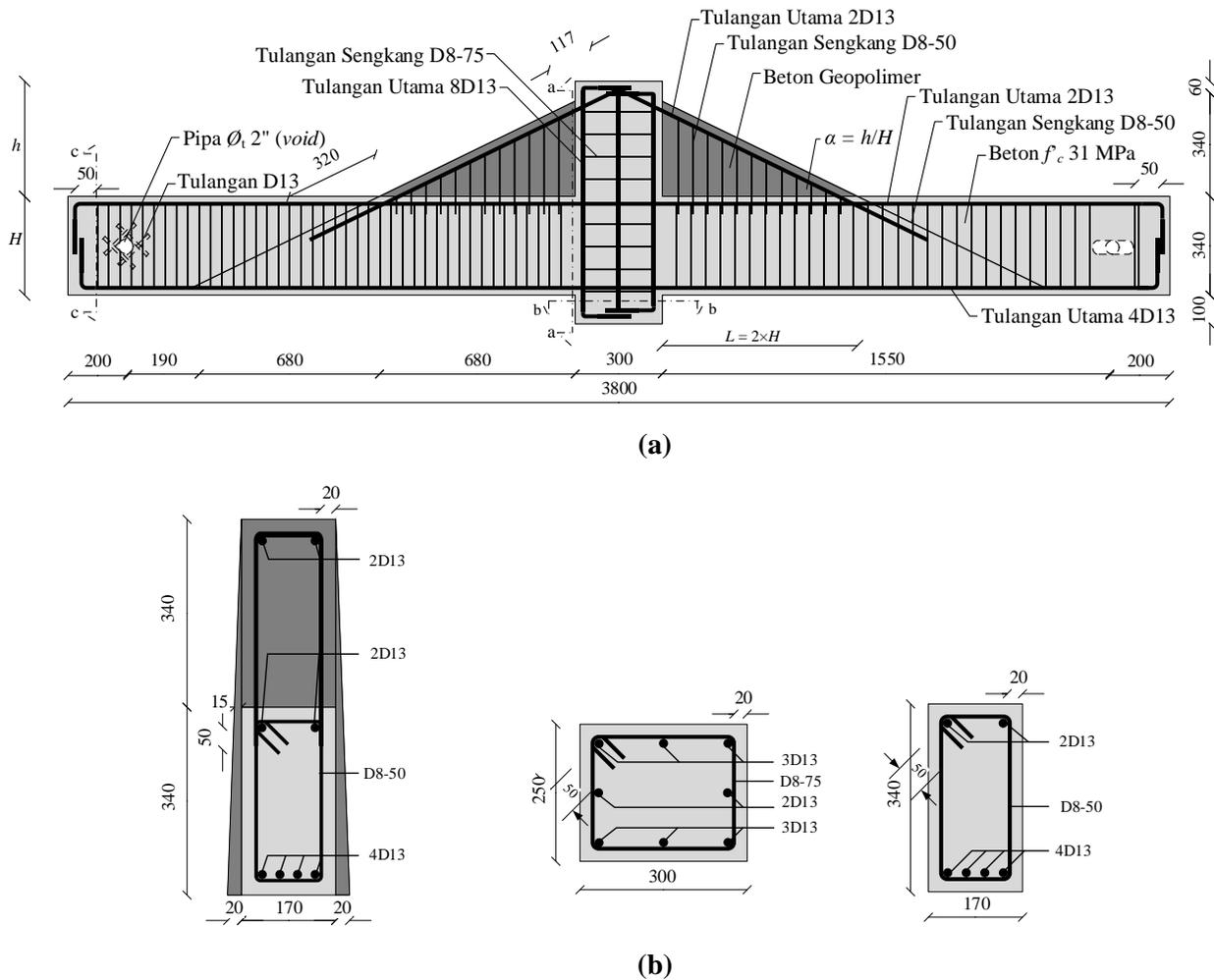
Kode Benda Uji	Tinggi <i>Haunch</i>	Jumlah	α <i>Haunch</i>	Keterangan
BC	$h/H = 0.00$	2	$\alpha = 0^\circ$	Balok prismatis
BG-0.5	$h/H = 0.50$	2	$\alpha = 14.04^\circ$	Balok <i>haunch</i> geopolimer $0.5\times H$
BG-1.0	$h/H = 1.00$	2	$\alpha = 26.56^\circ$	Balok <i>haunch</i> geopolimer $1.0\times H$
BK-1.0	$h/H = 1.00$	2	$\alpha = 26.56^\circ$	Balok <i>haunch</i> konvensional $1.0\times H$



Gambar 3. 2. Notasi dimensi balok *haunch*

Proses pembuatan benda uji balok *haunch* diawali dengan pengecoran balok prismatis terlebih dahulu. Setelah beton balok prismatis mencapai 28 hari, dilanjutkan pengecoran balok *haunch*. Menunggu umur balok *haunch* minimal 28 hari dilanjutkan pengujian balok lentur di laboratorium.

Untuk detail dimensi panjang, lebar dan tinggi balok *haunch* serta konfigurasi penulangan longitudinal maupun sengkang seperti pada Gambar 3. 3.

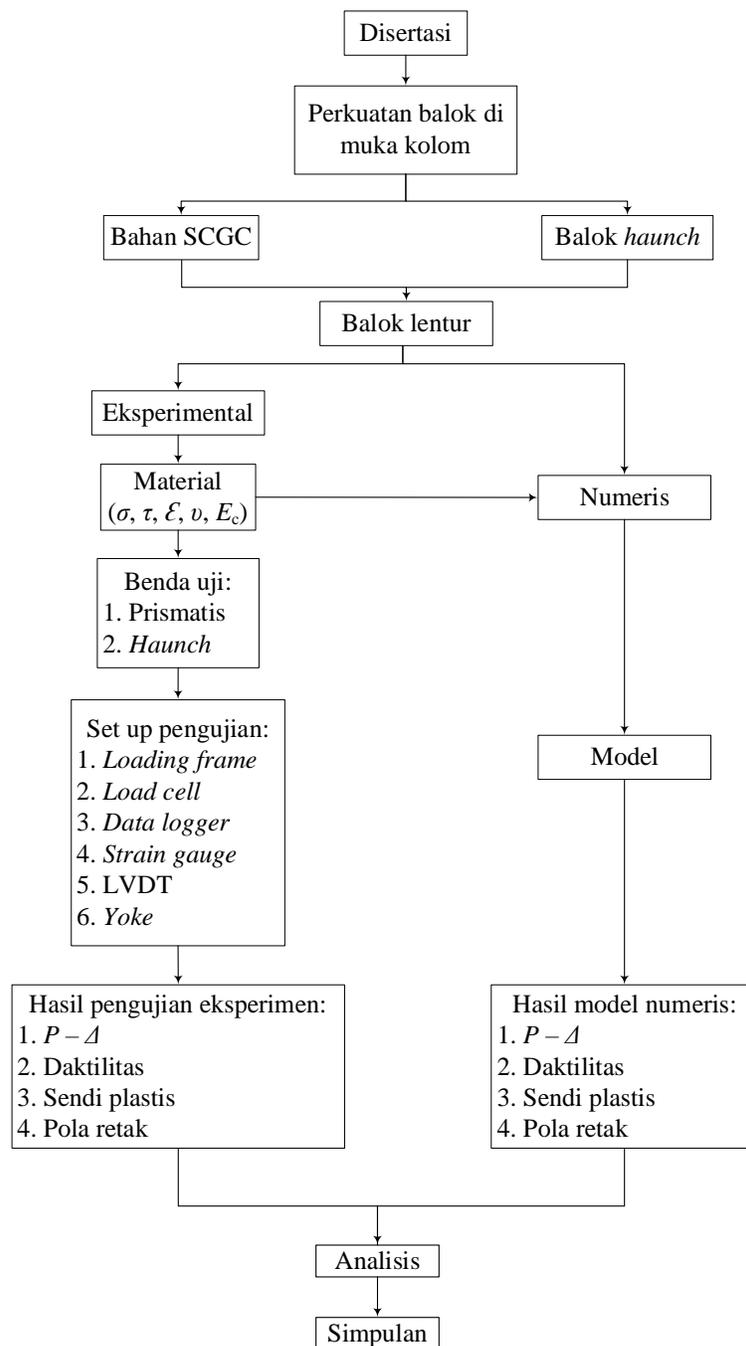


Gambar 3. 3. (a) Balok uji *haunch* beton konvensional/geopolimer (b) Penampang dan penulangan balok dan kolom

Komponen pendukung *set up* pengujian yaitu: *loading frame*, *load cell* kapasitas 500 kN, *data logger* dengan 30 *channel*, pompa hidrolik, beberapa *strain gauge* yang dipasang di besi

tulangan dan permukaan beton, beberapa *linear variable displacement transducer* (LVDT) dan *yoke*.

Dari hasil uji balok lentur beban monotonik baik balok prismatis maupun balok *haunch* didapatkan perilaku beban – lendutan, momen – kurvatur, daktilitas, lokasi terjadinya sendi plastis dan perilaku pola retak balok uji.



Gambar 3. 4. Bagan alir proses riset

3.2. Penelitian Dasar

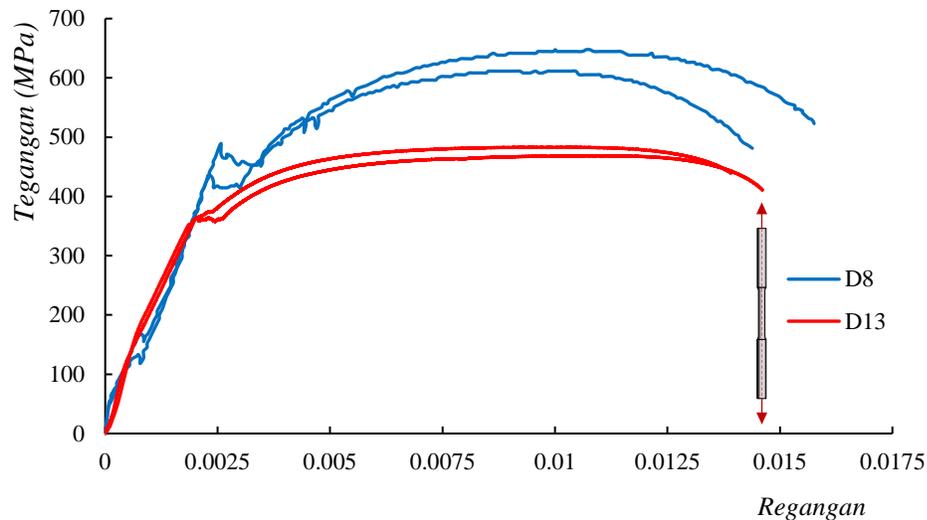
Penelitian dasar sebagai pendukung uji skala penuh ini mencakup uji mekanik material, uji perilaku geser beton konvensional dan beton geopolimer (SCGC) serta pengamatan efek *bond* pada tulangan dan *interlocking*.

3.2.1. Uji mekanik material

Data sifat mekanik material bahan penyusun beton bertulang untuk beberapa benda uji didapat dengan cara uji material terhadap besi tulangan dan beton konvensional maupun beton geopolimer SCGC.

3.2.1.1. Besi tulangan

Besi tulangan, baik tulangan longitudinal (D13) maupun sengkang (D8) diuji tarik menggunakan alat *Universal Testing Machine* berdasarkan standar. Hasil pengujian sifat mekanik besi tulangan adalah data *yield strength* (f_y), *yield strain* (ϵ_y), *ultimate strength* (f_u) serta *ultimate strain* (ϵ_u) besi tulangan. Kualitas besi tulangan yang digunakan memenuhi syarat standar besi untuk keperluan beton bertulang (ASTM, 2009).



Gambar 3. 5. Grafik hubungan *stress – strain* besi tulangan D8 dan D13

Tabel 3. 2. Data hasil uji tarik besi tulangan

Benda uji	f_y (MPa)	ϵ_y	f_u (MPa)	ϵ_u
D8-1	435.874	0.00229	611.435	0.01046
D8-2	483.446	0.00258	647.635	0.01078
D13-1	363.430	0.00205	468.503	0.01087
D13-2	364.334	0.00207	483.019	0.00990

3.2.1.2. Beton konvensional dan beton geopolimer

Untuk mendapatkan mutu beton yang digunakan dalam penelitian disertasi ini dilakukan *job mix design*. Tujuan *job mix design* untuk menentukan proporsi campuran bahan penyusun beton yang terdiri dari *fly ash*, *alkaline activator*, agregat halus (pasir), agregat kasar (*split*), *extra cement*, *extra water*, dan bahan *additive* (*superplasticizer*) agar memenuhi mutu beton normal yang direncanakan yaitu $f'_c = 31$ MPa. Semua bahan material penyusun beton yang dipergunakan pada penelitian disertasi ini merupakan material lokal yang memenuhi persyaratan sebagai material penyusun beton.

Tabel 3. 3. Mix design beton geopolimer SCGC

Beton Geopolimer SCGC	Komposisi
Agregat : Binder (<i>Fly Ash + Alkaline Activator</i>)	70% : 30%
Agregat kasar : Agregat halus	60% : 40%
<i>Fly Ash</i> (FA) : <i>Alkaline Activator</i> (AA)	65% : 35%
Na_2SiO_3 Be-52 : NaOH (12 Molar)	2.5 : 1.0
<i>Extra water</i> (sebagai <i>trigger</i>)	$11.70\% \times \text{Binder (Fly Ash+AA)}$
<i>Extra cement</i> (sebagai <i>trigger</i>)	$5.63\% \times \text{Binder (Fly Ash+AA)}$
<i>Superplasticizer</i>	$2.00\% \times \text{Fly Ash}$

Tabel 3. 4. Mix design beton konvensional

Beton Konvensional	Komposisi
Agregat : Pasta (Semen + Air)	70% : 30%
Agregat kasar : Agregat halus	60% : 40%
Semen : Air	65% : 35%

Proporsi *mix design* beton konvensional (BK) dan beton geopolimer yang dapat memadat sendiri (*self compacting geopolymer concrete* - SCGC) dalam satu (1) kubik beton dapat diuraikan seperti Tabel 3. 5 :

Tabel 3. 5. Mix design BK dan SCGC dalam 1 kubik beton

Beton Konvensional (BK) (kg)	Beton Geopolimer (SCGC) (kg)
Semen : 30%×65%=19.5% 561.60	<i>Binder</i> (FA) : 30%×65%=19.5% 561.60
Air : 30%×35%=10.5% 302.40	<i>Alkaline activator</i> : 30%×35%=10.5% NaOH =1/3.5×302.40 = 86.40 Na ₂ SiO ₃ =2.5/3.5×302.40 = 216.00 302.40
<i>Split</i> : 70%×60%=42.0% 1209.60	<i>Split</i> : 70%×60%=42.0% 1209.60
Pasir : 70%×40%=28.0% 806.40	Pasir : 70%×40%=28.0% 806.40
SP 2% = 2%×561.60 11.23	SP 2% = 2%×561.60 11.23
	<i>Extra water</i> 11.70%×561.60 65.71
	<i>Extra cement</i> 5.63%×561.60 31.62

*SP = *Superplasticizer*

3.2.1.2.1. Uji kuat tekan beton

Pengujian kuat tekan beton dilakukan setelah umur beton 28 hari, dimana kuat tekan didapat dari beban maksimal yang diterima beton dibagi dengan luas penampang benda uji silinder. Hasil pengujian kuat tekan silinder beton konvensional sebesar $f_c = 31.11$ MPa dan kuat tekan silinder beton geopolimer SCGC sebesar $f_c = 31.49$ MPa dengan data lengkap seperti dilihat pada Tabel 3. 6.

Tabel 3. 6. Hasil pengujian kuat tekan beton

No.	Diameter D_{cl} (mm)	Tinggi h_{cl} (mm)	Luas penampang A_{cl} (mm ²)	Beban <i>Max</i> P (N)	Kuat tekan f_c (MPa)	f_c Rata- rata (MPa)	Keterangan
BK1	150	300	17678.6	550000	31.11	31.11	Beton Konvensional
BK2	150	300	17678.6	500000	28.28		
BK3	150	300	17678.6	600000	33.94		

No.	Diameter D_{cl} (mm)	Tinggi h_{cl} (mm)	Luas penampang A_{cl} (mm ²)	Beban Max P (N)	Kuat tekan f_c (MPa)	f_c Rata- rata (MPa)	Keterangan
BG1	150	300	17678.6	560000	31.68	31.49	Beton Geopolimer
BG2	150	300	17678.6	570000	32.24		
BG3	150	300	17678.6	540000	30.55		

Kuat tekan rata-rata beton yang dihasilkan dari pengujian di Laboratorium sudah memenuhi rencana beton mutu sedang (normal) menurut Pd T-07-2005-B (DPU, 2005) yaitu antara 20 - 35 MPa.

3.2.1.2.2. Uji kuat tarik beton

Kuat tarik beton diperoleh melalui uji kuat tarik langsung (ASTM, 2003), uji kuat tarik tidak langsung/uji lentur murni (BSN, 2014) dan *pull off test* (ASTM, 2020). Hasil pengujian kuat tarik beton dengan berbagai cara dapat dilihat pada Tabel 3. 7.

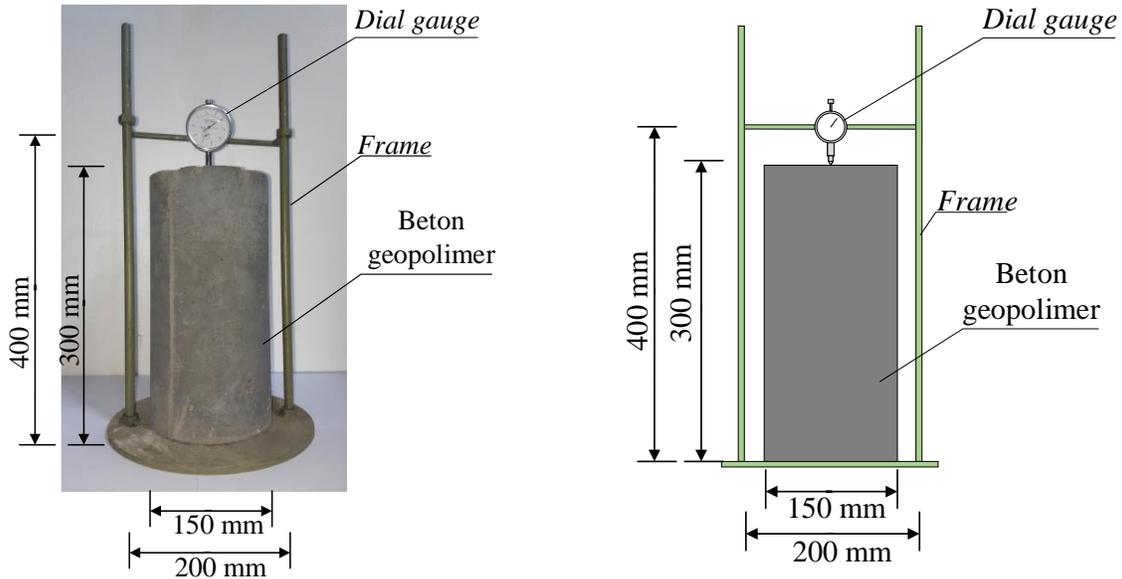
Tabel 3. 7. Hasil pengujian kuat tarik beton

No.	Item	Beton Konvensional	Beton Geopolimer	Tipe Pengujian	Standard/ Code
1	Kuat Tarik langsung (MPa)	1.59	2.38	Uji tarik langsung	ASTM C307-03 (ASTM, 2003)
2	Kuat Tarik tidak langsung (MPa)	2.76	4.56	Uji lentur murni (<i>Flexural test</i>)	SNI 03-4154-2014 (BSN, 2014)
3	Kuat Tarik cabut (MPa)	0.99	1.62	<i>Pull off test</i>	ASTM C 1583 (ASTM, 2020)

3.2.2. Perilaku material beton komposit konvensional - geopolimer

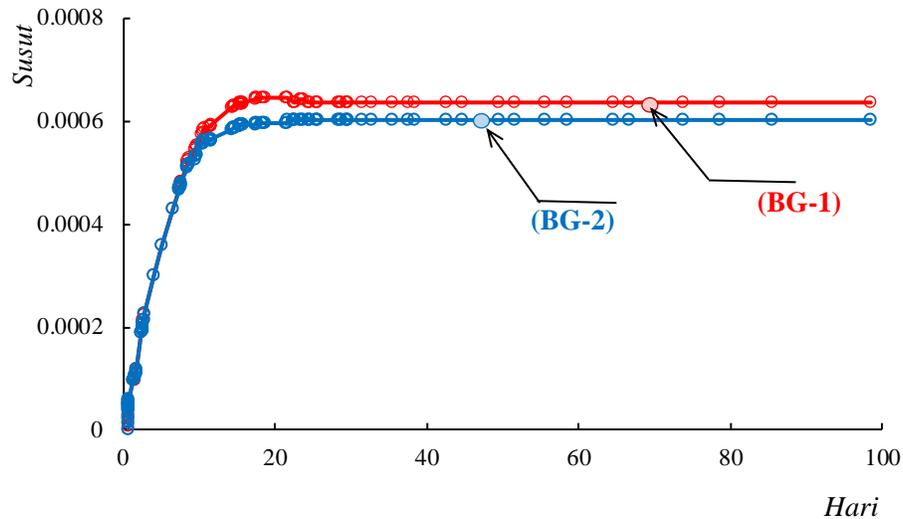
Perilaku material beton komposit antara beton konvensional dan beton geopolimer SCGC perlu diamati dan dipertimbangkan terutama perilaku susut betonnya. Perilaku susut beton geopolimer perlu diteliti lebih lanjut karena proses pengerasan beton geopolimer tidak sama dengan beton konvensional, hal ini dikarenakan beton geopolimer tidak mengandung semen. Pada penelitian ini telah dilakukan pengamatan proses susut beton geopolimer dengan metode pengamatan secara berkala dengan *set up* pengujian seperti Gambar 3. 6. dengan *curing* benda uji dilakukan dalam suhu ruang kering udara. Pengamatan proses susut

beton geopolimer dilakukan setiap 15 menit pada 2 jam pertama setelah pengecoran, selanjutnya diamati setiap 30 menit pada jam berikutnya sampai umur beton mencapai 56 hari.



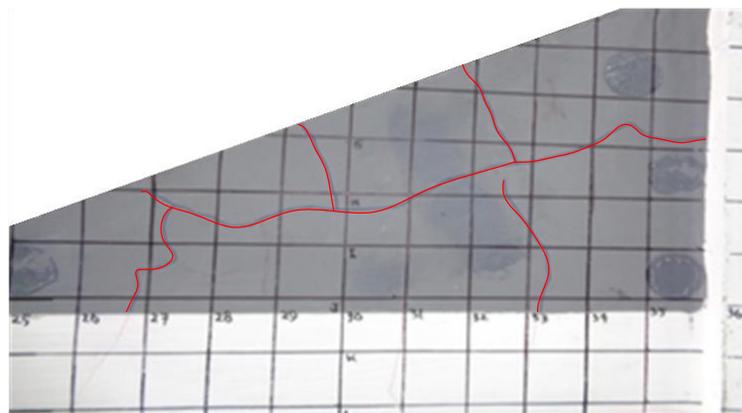
Gambar 3. 6. Set up pengujian susut beton geopolimer

Data pengamatan susut beton geopolimer diperoleh hasil bahwa besarnya susut beton pada proses pengerasan beton didapat nilai susut lebih kecil dari 0.2 milimeter ($0.2/300 = 0.067 \text{ mm/mm} = 667 \mu\epsilon$). Hal ini menunjukkan bahwa susut beton geopolimer sebesar $667 \mu\epsilon$ relatif lebih besar (66.75 %) jika dibandingkan dengan susut beton konvensional ($400 \mu\epsilon$). Dari hasil pengamatan dan perhitungan susut beton geopolimer didapatkan susut maksimum sebesar $667 \mu\epsilon$.

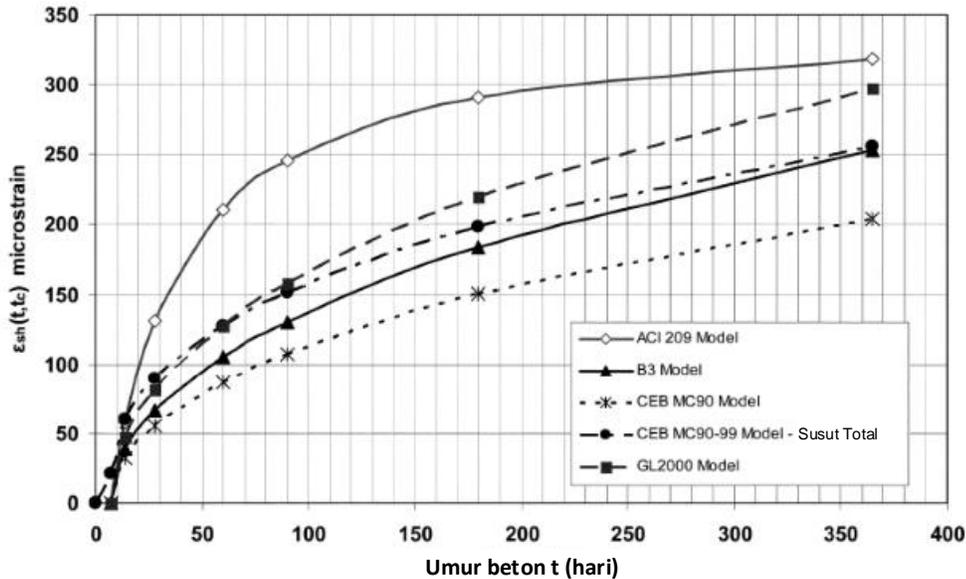


Gambar 3. 7. Hasil pengamatan susut beton geopolimer

Jika mengacu pada Code ACI 209.2R-08 “*Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete*” (ACI, 2008), besarnya nilai susut (*shrinkage*) beton konvensional pada umur 56 hari sebesar 200 *micro strain* (200 $\mu\epsilon$) dan pada umur 365 hari sebesar 320 *micro strain* (320 $\mu\epsilon$) serta berdasarkan PCA (*Portland Cement Associations*) maksimum 400 *millionths* (400 $\mu\epsilon$). Dari data hasil pengujian susut terhadap beton geopolimer yang memadat sendiri (*self compacting geopolymer concrete – SCGC*) sebesar 667 $\mu\epsilon$ lebih besar dari 200 $\mu\epsilon$ (ACI, 2008) dan 400 $\mu\epsilon$ (PCA).



Gambar 3. 8. Initial crack pada balok haunch SCGC



Gambar 3. 9. Kurva prediksi susut beton konvensional (ACI, 2008)

3.2.3. Perilaku geser beton konvensional dan beton geopolimer SCGC

Data kuat lekat (*bond strength*) antara beton lama dan beton baru sangat penting untuk diketahui agar terjamin bekerja secara monolit (Santos dan Júlio, 2011). Pada bidang pertemuan kedua jenis beton dengan perbedaan karakteristik fisik dan mekanis timbul beberapa respons jenis tegangan yaitu tegangan tarik, tegangan tekan, tegangan geser atau kombinasi dari tegangan tersebut. *Bond strength* pada *interface* adalah faktor sangat penting dalam menciptakan integritas dan kompatibilitas *strengthening*. Adanya kepastian *bond strength* pada *interface* yang baik maka transfer tegangan dari struktur eksisting ke elemen perkuatan akan bekerja sempurna. Dengan demikian uji kapasitas geser pada *interface* sangat penting.

Tabel 3. 8. Hasil pengujian kuat geser beton

No	Item	Beton Konvensional	Beton Geopolimer	Tipe Pengujian	Standard/Code
1	Kuat Geser (MPa)	0.52	0.54	<i>Push-off test</i> (<i>L-shaped test</i>)	ACI 318-14 (ACI, 2014), AASHTO (2014)

3.3. Self Compacting Geopolymer Concrete (SCGC)

Proses perjalanan diperolehnya formulasi SCGC, berawal dilakukannya penelitian beton geopolimer dengan perbandingan agregat 70% dan binder (*Fly Ash + Alkaline Activator*) 30%,

proporsi agregat halus 40% dan agregat kasar 60%. Binder merupakan bahan pengikat pada beton geopolimer dengan bahan dasar *fly ash* kelas F dan *alkaline activator* dengan perbandingan 65% : 35%. Mutu beton geopolimer yang diperoleh tidak seragam dan fluktuatif karena tingkat workabilitas yang sangat rendah.

Untuk meningkatkan tingkat workabilitas beton geopolimer maka dilanjutkan penelitian beton geopolimer dengan penambahan *extra cement* (OPC), *extra water*, dan penggunaan *superplasticizer* (SP) dengan komposisi sesuai dengan *mix design* beton geopolimer. Dari hasil penelitian beton geopolimer didapatkan hasil *mix design* beton geopolimer yang workable (*workable geopolymer concrete* – WGC) dengan hasil kuat tekan $f'_c \geq 25$ MPa dan nilai *slump* ≥ 300 mm. Untuk hasil penelitian *mix design* beton geopolimer lengkap dapat dilihat pada Lampiran C.

Selanjutnya untuk menciptakan beton geopolimer yang dapat memadat sendiri maka dilakukan inovasi *mix design* dari formulasi WGC ditingkatkan menjadi *self compacting geopolymer concrete-SCGC* dengan mengubah jenis natrium silikat (Na_2SiO_3 Be-58) menjadi Na_2SiO_3 Be-52. Diharapkan mutu beton geopolimer yang didapat tekan $f'_c \geq 30$ MPa dan nilai *slump* ≥ 550 mm.

Self compacting geopolymer concrete (SCGC) adalah beton geopolimer dapat memadat sendiri yang terbuat dari bahan *fly ash* kelas F yang dikombinasikan dengan *alkaline activator* (AA), agregat kasar, agregat halus, *superplasticizer*, *extra water* dan *extra cement*. Beton geopolimer yang dapat memadat sendiri ini harus memiliki kriteria kemampuan kerja beton yang baik (tingkat workabilitas baik). Untuk mendapatkan kemampuan kerja *self compacting concrete* maka *extra cement*, *extra water* dan *superplasticizer* diperlukan untuk campuran beton geopolimer. Penambahan *extra cement*, *extra water* dan *superplasticizer* pada *geopolymer concrete* memiliki pengaruh sangat signifikan terhadap nilai *horizontal slump flow*. Berdasarkan EFNARC 2005 “*The European Guidelines for Self-Compacting Concrete* EFNARC” United Kingdom (EFNARC, 2005), untuk SCGC maka komposisi optimal yang disyaratkan yaitu nilai *slump flow by Abrams cone* antara 550-800 mm dengan penggunaan rasio *extra water* berbanding *fly ash* sebesar 0.30 (Gumalang *et al.*, 2016; Gupta *et al.*, 2021; C. J. Reddy dan Elavenil, 2019).

3.3.1. Bahan material penyusun SCGC

Bahan material penyusun beton geopolimer yang memadat sendiri (*self compacting geopolymer concrete* – SCGC) terdiri dari agregat halus (pasir) dan agregat kasar berupa batu pecah mesin diameter maksimum 10 mm, binder (*fly ash* kelas F dan *extra cement*), *alkaline activator* (NaOH 12 Molar dan Na₂SiO₃ Be-52) dan *superplasticizer* serta *extra water* dengan proporsi *mix design* yang tepat. Proporsi campuran terdiri dari agregat kasar dan halus dengan binder *fly ash* kelas F dan *alkaline activator* (NaOH 12 Molar + Na₂SiO₃ Be-52), sebagai pembentuk SCGC ditambahkan semen Portland (*extra cement*) dan ekstra air (*extra water*) dengan jumlah tertentu, serta bahan tambahan (*additives*) berupa *superplasticizer*. Molaritas optimal sebesar 12 molar telah dibuktikan melalui percobaan dalam *prior art* (Ekaputri *et al.*, 2007; Hardjito, 2005; Hardjito *et al.*, 2005b, 2005a; Hardjito dan Rangan, 2005; Nuruddin *et al.*, 2011; Purwanto *et al.*, 2018).

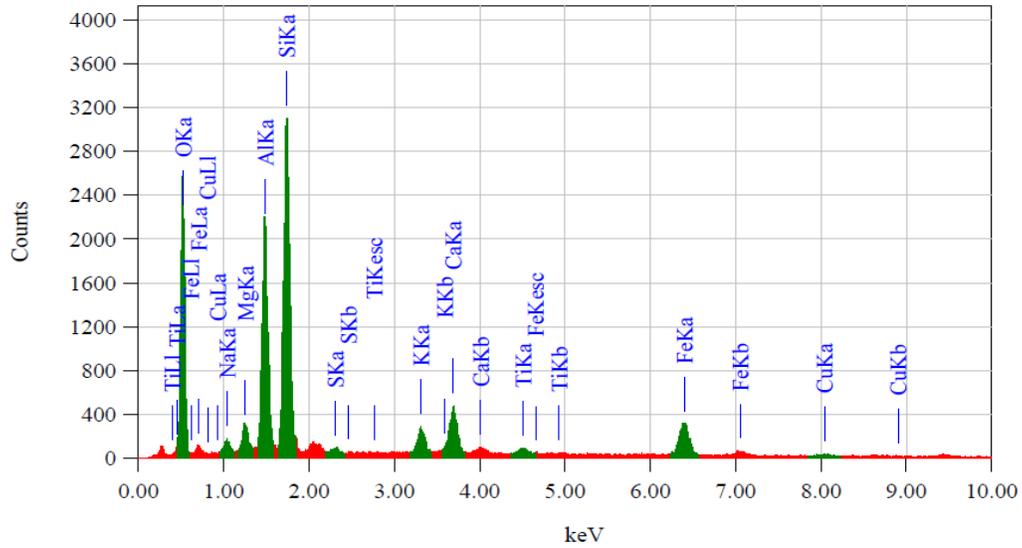
3.3.1.1. Binder

Pada campuran beton geopolimer sebagai bahan pengikat adalah *binder* yang tersusun dari *fly ash* kelas F dan *alkaline activator* (AA). *Alkaline activator* terdiri dari sodium silikat (Na₂SiO₃ Be-52) dan sodium hidroksida (NaOH). *Fly ash* adalah limbah yang berasal dari sisa pembakaran batu bara. Material ini mempunyai kadar bahan semen yang tinggi dan mempunyai sifat *pozzolanic* yaitu dapat bereaksi dengan kapur bebas yang dilepaskan semen saat proses hidrasi dan membentuk senyawa yang bersifat mengikat pada temperatur normal.

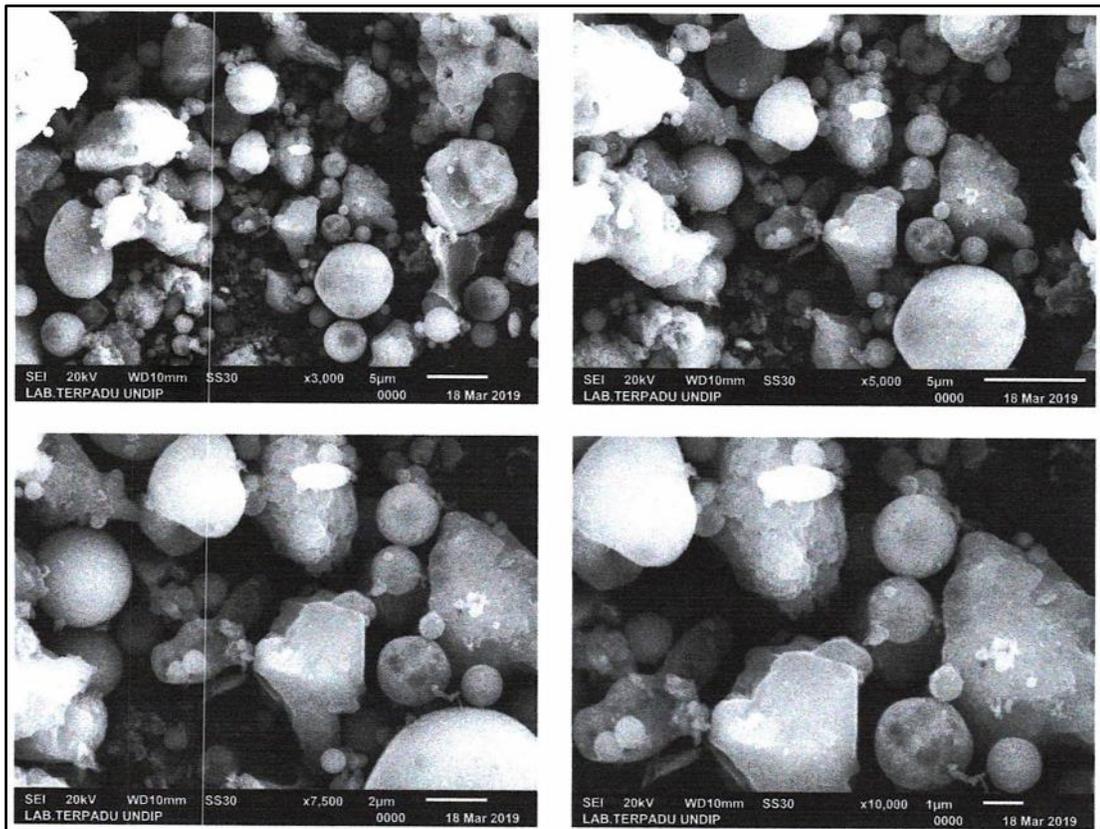
3.3.1.1.1. Fly ash

Fly ash merupakan limbah hasil pembakaran batu bara pada tungku pembangkit listrik tenaga uap yang berbentuk halus, bundar dan bersifat *pozzolanic* dan dapat digunakan sebagai bahan campuran beton. *Fly ash* mempunyai butiran yang cukup halus yaitu lolos ayakan no. 325 (45 µm) sebesar 5% sampai 27% dengan *specific gravity* antara 2.15 sampai 2.60 dan berwarna abu-abu kehitaman. Sifat proses *pozzolanic* dari *fly ash* mirip dengan bahan *pozzolan* lainnya (ACI, 1988). *Fly ash* yang berfungsi sebagai pengganti semen dalam beton geopolimer perlu dilakukan pengujian dengan menggunakan metode SEM-EDX (Gambar 3. 10 dan Gambar 3. 11) dan XRF. *Fly ash* yang digunakan pada penelitian ini adalah *fly ash* berasal dari PLTU Tanjung – Jati B Jepara. Hasil pengujian komposisi kimia

material *fly ash* dari PLTU Tanjung – Jati B Jepara dapat dilihat pada Gambar 3. 10. dan Tabel 3. 9.



Gambar 3. 10. Analisis EDX *fly ash* PLTU Tanjung – Jati B Jepara



Gambar 3. 11. Scanning electron microscopy (SEM) *fly ash* dari Tanjung Jati B Jepara

Karakterisasi *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dilakukan untuk memperoleh gambaran mengenai keadaan morfologi dan bagaimana ikatan *fly ash* yang digunakan sebagai bahan dasar dalam menyintesis beton geopolimer yang diaktivasi dengan larutan *alkaline activator* (H_2O , sodium silikat dan $NaOH$). Dari hasil uji SEM seperti Gambar 3. 11, terlihat bahwa partikel *fly ash* berbentuk bola bulat (*spherical*) berukuran kurang dari $45\mu m$. Selain itu, data morfologi bentuk partikel dapat digunakan untuk memprediksi sifat mekanik dan fisik bahan. *Fly ash* yang diperoleh dari pembangkit listrik PLTU Tanjung – Jati B Jepara memiliki pola bentuk yang tidak beraturan (*bulky*). Bentuk bulatan *fly ash* tampak heterogen dan memiliki jarak antar partikel yang bervariasi karena perbedaan diameter partikel yang besar.

Tabel 3. 9. Komposisi kimia metode EDX *fly ash* PLTU Tanjung – Jati B Jepara

Komposisi	Persentase (%)
SiO_2	46.52
Al_2O_3	24.95
FeO	11.81
CaO	5.89
MgO	2.86
K_2O	2.77
TiO_2	1.36
CuO	1.12
Na_2O	1.59
SO_3	1.13
LOI	0.00

Pengujian XRF adalah teknik analisa yang mengidentifikasi dan menentukan konsentrasi elemen padatan, bubuk, atau cair. Pengujian XRF untuk *fly ash* dari Tanjung Jati B Jepara dilakukan di Sucofindo Surabaya dengan hasil pengujian seperti Tabel 3. 10.

Tabel 3. 10. Hasil XRF *fly ash* PLTU Tanjung – Jati B Jepara

Komposisi	Persentase (%)
SiO ₂	50.38
Al ₂ O ₃	24.88
Fe ₂ O ₃	9.43
CaO	4.21
MgO	2.67
K ₂ O	2.31
TiO ₂	2.42
CuO	0.00
Na ₂ O	1.71
SO ₃	0.28
LOI Content	1.71

3.3.1.1.2. Alkaline activator (sodium silikat dan sodium hidroksida)

Alkaline activator yang digunakan adalah sodium silikat (Na₂SiO₃) dan sodium hidroksida (NaOH) dimana sodium silikat berfungsi untuk mempercepat reaksi polimerisasi, sedangkan sodium hidroksida berfungsi untuk mereaksi unsur-unsur Al (alumina) dan Si (silika) yang terkandung dalam *fly ash* sehingga dapat menghasilkan ikatan polimer yang kuat. Penggunaan *alkaline activator* dalam pembuatan geopolimer memiliki peranan penting sebagai salah satu bahan pengikat unsur alumina dan silika yang terkandung dalam *fly ash* sehingga terbentuk suatu ikatan polimerisasi dan mempercepat reaksi yang terjadi.

3.3.1.1.2.1. Sodium hidroksida (NaOH)

Sodium hidroksida berfungsi untuk mereaksi unsur-unsur Al dan Si yang terkandung dalam *fly ash* sehingga dapat menghasilkan ikatan polimer yang kuat. Dalam campuran *fly ash* dan hidroksida yang diamati dalam ukuran mikrometer, terlihat adanya ikatan yang kurang kuat tetapi lebih padat dan tidak ada retakan seperti pada campuran sodium silikat dan *fly ash*.

Untuk membuat satu (1) liter larutan NaOH 12 M dapat dilakukan langkah sebagai berikut : Menghitung kebutuhan NaOH yang digunakan

$$\text{Jumlah mol zat terlarut : } n = M_1 \times V = 12 \text{ mol/liter} \times 1 \text{ liter} = 12 \text{ M.}$$

Perhitungan M_r (molekul relatif: total masa atom penyusun molekulnya) dapat dijelaskan sebagai berikut :

$$M_{r\text{NaOH}} = 40 \text{ gram/mol}$$

Jumlah molekul relatif (M_r) : Na = 23, O = 16 dan H = 1

dimana :

n : jumlah mol zat terlarut

M_1 : kemolaran larutan

V : volume larutan

M_r : molekul relatif (total massa atom penyusun molekulnya)

Massa NaOH = $n \times M_r = 12 \text{ mol} \times 40 \text{ gram/mol} = 480 \text{ gram}$

Setelah itu menimbang kristal padat NaOH sebesar 480 gram dan tambahkan air bersih hingga volume 1 liter dan aduk hingga larut. Reaksi pengenceran NaOH melepaskan panas, untuk menghindari penguapan tutup wadah yang berisi larutan dan diamkan sampai larutan dingin.

3.3.1.1.2.2. Sodium silikat (Na_2SiO_3 Be 52)

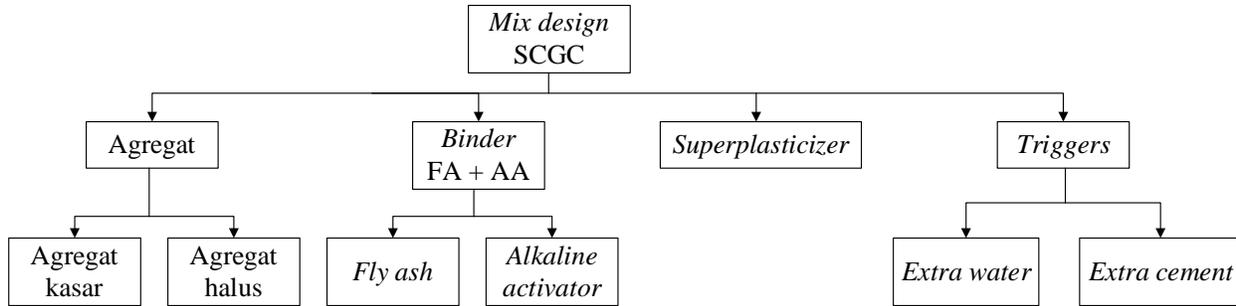
Sodium silikat dapat dibuat dengan dua (2) proses yaitu proses kering dan proses basah. Pada proses kering, pasir silika (SiO_2) dicampur dengan sodium karbonat (Na_2CO_3) atau dengan potasium karbonat (K_2CO_3) pada temperatur 1100 - 1200°C. Hasil reaksi tersebut menghasilkan kaca (*cutlets*) yang dilarutkan ke dalam air dengan tekanan tinggi menjadi cairan yang bening dan agak kental. Sedangkan dalam proses pembuatan basah, pasir silika (SiO_2) dicampur dengan *sodium hidroxide* (NaOH) melalui proses filtrasi akan menghasilkan sodium silikat yang murni. Sodium silikat mempunyai wujud dua bentuk yaitu padatan dan larutan, dimana untuk campuran beton lebih banyak digunakan bentuk larutan. Sodium silikat (*water glass*) pada mulanya digunakan untuk membuat campuran sabun. Tetapi dalam perkembangannya sodium silikat dapat digunakan untuk berbagai macam keperluan, antara lain untuk bahan campuran semen, pengikat keramik, *coating*, campuran cat serta dalam beberapa keperluan industri seperti kertas, serat, dan tekstil. Beberapa penelitian dapat membuktikan bahwa sodium silikat dapat digunakan untuk bahan campuran beton (Li *et al.*, 2020). Dalam penelitian ini, sodium silikat digunakan sebagai salah satu bahan dari *alkaline activator*.

Pada penelitian ini digunakan larutan *alkaline activator* dari campuran larutan NaOH 12 M dan Natrium Silikat (Na_2SiO_3) tipe Be52. Na_2SiO_3 Be52 mengandung Na_2O 14.55%, SiO_2 33.76%, dimana dalam proses pembentukan garamnya (kristalisasi) menggunakan konsentrasi sebesar 52° Be. Notasi Be merupakan derajat pada skala pengukuran dengan menggunakan *baumometer*. Na_2SiO_3 Be52 mempunyai sifat fisik lebih cair dibandingkan Na_2SiO_3 Be58, karena dalam pembuatan Na_2SiO_3 Be52 menggunakan larutan NaOH lebih banyak. Dengan sifat fisik yang lebih cair diharapkan menghasilkan campuran beton geopolimer dengan nilai *slump flow* yang tinggi. Pada penelitian ini nilai rasio perbandingan NaOH 12 M dan Na_2SiO_3 Be52 yang digunakan adalah 1 : 2.5 (Ekaputri dan Triwulan, 2013).

3.3.1.2. Agregat halus dan agregat kasar

Agregat adalah butiran mineral alam dimana fungsinya sebagai bahan pengisi dalam campuran beton atau mortar. Agregat dalam campuran beton menempati sebanyak kurang lebih 70 % dari volume beton atau mortar. Agregat pada beton terdiri dari agregat kasar (batu pecah/*split*) dan agregat halus (pasir). Beton geopolimer terbuat dari campuran *fly ash*, agregat kasar dengan diameter maksimum 10 mm, agregat halus, dan larutan *alkaline activator*. Jika diperlukan diberi material campuran tambahan (*admixture*) untuk mengubah sifat tertentu dari beton tersebut. Agregat halus adalah pasir alam yang secara alami berasal dari batu-batuan atau berupa pasir buatan yang dihasilkan oleh alat pemecah batu yang mempunyai ukuran terbesar 5.0 mm (BSN, 2000). Agregat harus terdiri dari butir-butir yang tajam dan keras, tidak boleh mengandung lumpur, bahan-bahan organis yang terlalu banyak. Agregat kasar adalah kerikil sebagai hasil alami dari batu atau batu pecah (*split*) yang diperoleh dari alat pemecah batu dan mempunyai ukuran butir antara 5 mm – 10 mm (BSN, 2000). Agregat kasar memiliki peranan yang penting dalam suatu beton untuk penentu kekuatan suatu beton.

Kerangka teori *mix design* beton tampak pada Gambar 3. 12. berikut :



Gambar 3. 12. Kerangka *mix design* SCGC

3.3.2. Metode campuran SCGC

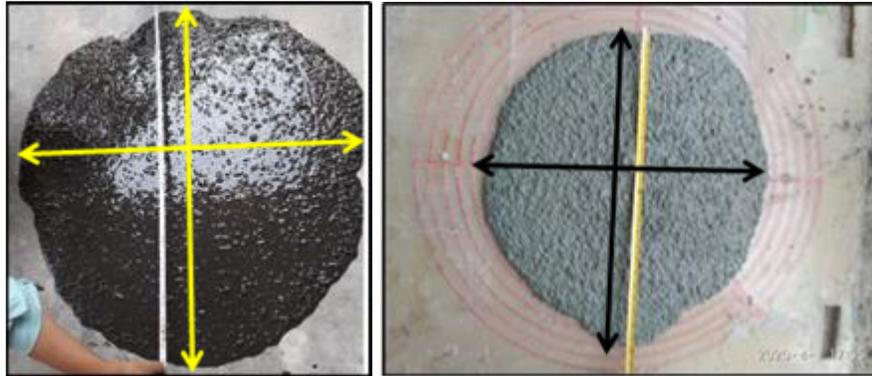
Metode pencampuran beton geopolimer SCGC dalam penelitian ini meliputi langkah-langkah sebagai berikut:

1. Pencampuran kering agregat kasar (batu pecah/*split*) dan binder geopolimer (*fly ash* dengan penambahan *extra cement* sebagai pemicu kinerja *additive*) hingga tercampur secara merata.
2. Penuangan larutan *alkaline activator*, *extra water* dan *superplasticizer* pada campuran agregat kasar dan binder. *Alkaline activator* merupakan reagen *fly ash*, sedangkan *extra water* merupakan reagen semen. Semen dan *extra water* akan mengaktifkan kinerja *superplasticizer* dalam meningkatkan kelecakan beton.
3. Proses ditunda beberapa menit sehingga semua komponen terlapisi *alkaline activator* dan adonan terlihat mengkilap.
4. Penambahan agregat halus (pasir) secara bertahap dan diikuti pengadukan hingga merata (homogen).

SCGC yang dihasilkan dari komposisi dan metode pembuatan yang benar, akan menghasilkan beton dengan kuat tekan yang memadai sebagai elemen struktur dengan nilai *slump flow horizontal* antara 550 mm sampai dengan 800 mm dan *flow time* saat mencapai diameter 50 cm (T50) tidak lebih dari 6 detik (EFNARC, 2005).

Adapun nilai kelecakan *slump* diukur dari rata-rata kedua diameter lingkaran dalam arah vertikal dan horizontal sebagai:

$$\text{Nilai}_{slump} = \frac{d_1+d_2}{2} \dots\dots\dots (3-1)$$



(a)

Sedang *time flow* yang diperlukan *flowing* mencapai diameter 50 cm harus kurang dari 6 detik.



(b)

Gambar 3. 13. (a) *Horizontal slump flow SCGC* (b) *Slump flow time (T50)*

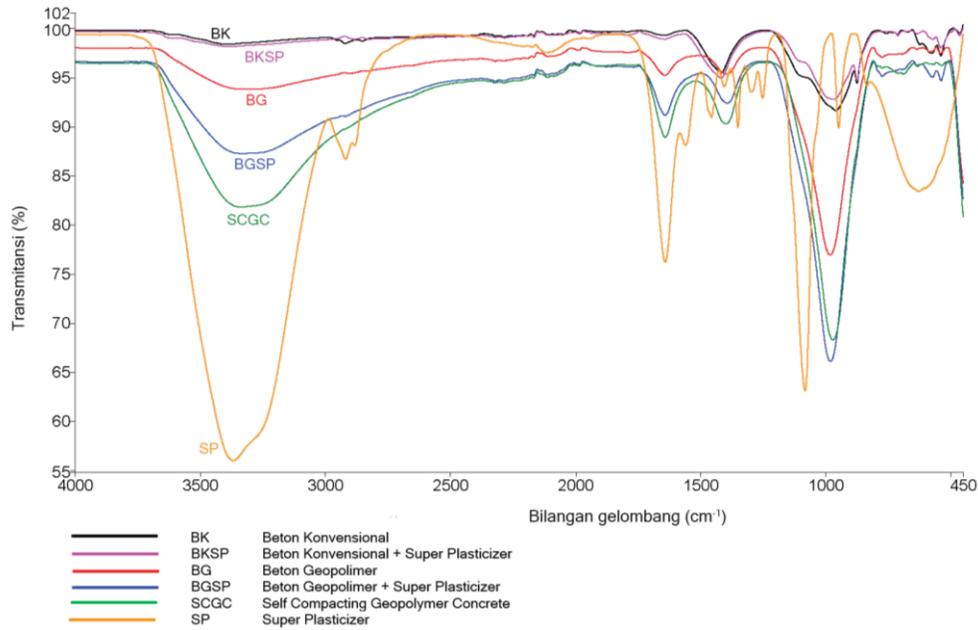
3.3.3. FT-IR (*Fourier Transform Infrared*)

Spektrofotometer adalah alat untuk mengukur transmittan atau absorban suatu benda uji sebagai fungsi panjang gelombang (Basset, 1994). Teknik spektroskopi *infrared* (IR) digunakan untuk mengetahui gugus fungsional identifikasi senyawa, menentukan struktur molekul, mengetahui kemurnian dan mempelajari reaksi yang sedang berjalan. Senyawa yang dianalisis berupa senyawa organik maupun anorganik. Hampir semua senyawa dapat menyerap radiasi inframerah (Shriner *et al.*, 2004). Spektrometri *infrared* (IR) memberikan

informasi tambahan tentang struktur suatu senyawa. Dalam spektrometri, hubungan antara karbon (C) dan hidrogen (H) ditentukan. Spektrometri IR membantu mengidentifikasi gugus fungsi. Spektrum IR dapat dibagi menjadi tiga (3) wilayah utama :

1. Daerah gugus fungsi ($1600 - 4000 \text{ cm}^{-1}$) adalah daerah yang paling banyak menyerap gugus fungsi. Sebagian besar serapan ini setidaknya dalam intensitas sedang sampai dengan intensitas banyak yang cukup kuat. Ahli kimia organik jarang sekali melaporkan absorbansi atau transmisi spektrum IR secara kuantitatif. Benda uji hanya diidentifikasi sebagai kuat (s - *strong*), sedang (m - *medium*), atau lemah (w - *weak*).
2. Daerah sidik jari ($1000 - 1600 \text{ cm}^{-1}$) seringkali cukup rumit. Wilayah ini sering digunakan untuk perbandingan *band-by-band* dari spektrum senyawa yang diketahui dengan spektrum senyawa yang tidak diketahui untuk mengidentifikasi senyawa. Hanya pita kuat yang terkait dengan peregangan C-O alkohol, ester, dan molekul lain yang mengandung oksigen yang mudah ditetapkan.
3. Daerah aromatik ($675 - 900 \text{ cm}^{-1}$) berguna untuk mengidentifikasi jumlah dan posisi relatif gugus pada cincin benzena. Ikatan C-H di luar bidang terjadi di wilayah ini.

Dari uji spektroskopi FT-IR dengan 6 buah benda uji yaitu benda uji beton konvensional (BK), beton konvensional + *superplasticizer* (BKSP), beton geopolimer (BG), beton geopolimer + *superplasticizer* (BGSP), *self compacting geopolymer concrete* (SCGC) dan *superplasticizer* (SP) didapatkan spektrum *infrared* seperti yang tampak pada Gambar 3. 14.



Gambar 3. 14. Hasil Uji FT-IR terhadap 6 jenis benda uji

Dari hasil uji FT-IR terhadap enam (6) benda uji seperti tertera pada Gambar 3. 14. di atas dapat diperoleh informasi sebagai berikut :

1. Informasi terbentuknya puncak (*peak*) yang direpresentasikan pada hubungan antara bilangan gelombang (*wavenumber*) (cm^{-1}) dengan transmittansi maupun absorbansi (%) melalui wilayah penyerapan maupun transmisi sinar *infrared* yang diradiasikan pada benda uji.
2. Di daerah gugus fungsi antara $3000 - 3700 \text{ cm}^{-1}$ diperoleh informasi bahwa urutan tingkat keenceran (*workabilitas*) dari enam (6) benda uji dimulai dari jenis benda uji yang paling tidak encer adalah :
 - a. Beton konvensional (BK)
 - b. Beton konvensional + *superplasticizer* (BKSP)
 - c. Beton geopolimer (BG)
 - d. Beton geopolimer + *superplasticizer* (BGSP)
 - e. *Self compacting geopolymer concrete* (SCGC)
 - f. *Superplasticizer* (SP).

Sehingga terbukti bahwa *self compacting geopolymer concrete* (SCGC) adalah jenis beton geopolimer yang paling encer dibanding dengan BK, BKSP, BG dan BGSP.

3.4. Desain Penelitian

Metode penelitian pada disertasi ini dilakukan dengan metode eksperimental sebagai metode utama. Pengujian dilakukan terhadap benda uji berupa balok lentur prismatis dan *haunch* yang telah direncanakan dan dianalisis secara numeris sebelum dilakukan pengujian eksperimental. Tahapan riset adalah sebagai berikut:

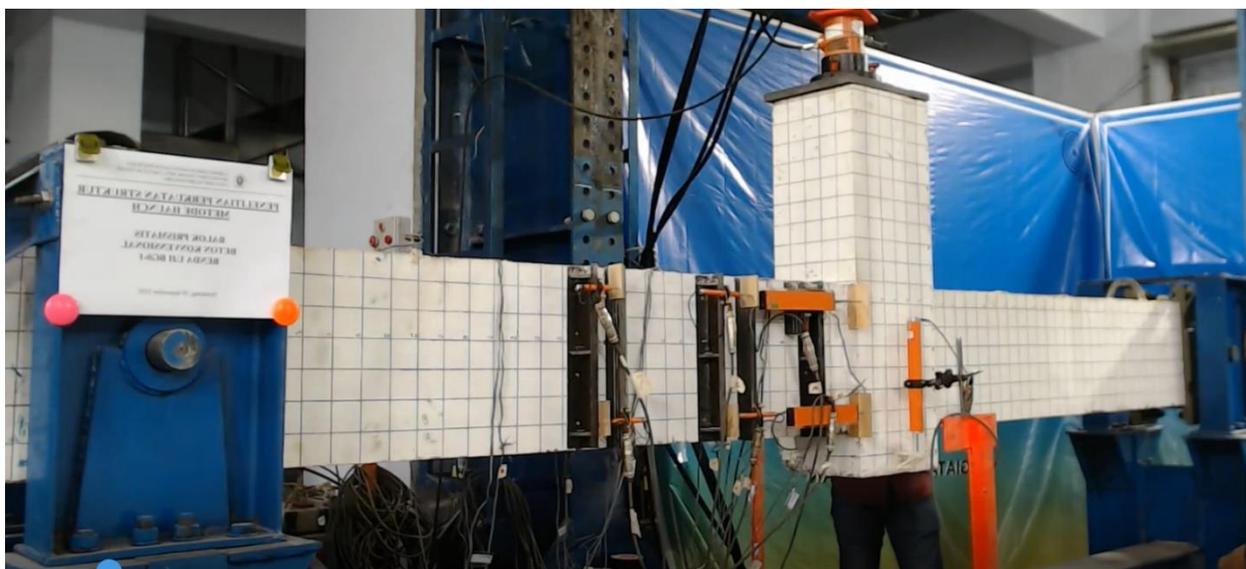
1. **Studi pustaka dan pengembangan teori:** tahap ini dilakukan untuk penggalan dan penajaman konsep mengenai kapasitas penampang balok dan peningkatan kapasitas penampang balok *haunch* dari penelitian-penelitian terdahulu serta resume dari hasil yang didapat.
2. **Penyelarasan ide dan konsep:** pada tahap ini dilakukan penyelarasan antara ide penanganan kapasitas penampang balok lentur dengan pembesaran penampang balok beton (balok *haunch*) di muka kolom untuk mengarah pada konsep utama yaitu meningkatkan kapasitas elemen balok terhadap beban monotonik.
3. **Uji eksperimen:** tahap ini merupakan transisi dari konsep ke tahap eksperimental. Tahap ini mencakup analisis penampang serta desain elemen balok maupun penyesuaian kapasitas alat yang dipergunakan. Analisis penampang balok dimaksudkan untuk mendapatkan prediksi peningkatan kapasitas penampang balok.
4. **Uji sifat-sifat mekanik:** dalam tahap ini dilakukan uji terhadap sifat-sifat mekanik beton dan baja yang dipergunakan dalam penelitian.
5. **Uji daktilitas, kapasitas momen:** model balok prismatis maupun balok *haunch* diuji dengan pembebanan monotonik. Pada pengujian ini diperoleh data regangan baik pada beton maupun baja pada kondisi leleh hingga kondisi *ultimate*, *displacement* vertikal balok serta kapasitas beban maksimum. Seluruh data pengujian tersebut diperoleh dari *strain gauge*, *linear variable displacement transducer* (LVDT), *load cell*, serta alat pembaca *data logger*. Selain data yang diperoleh dari alat-alat tersebut maka dilakukan pengamatan secara langsung untuk mengetahui pola retak pada saat pembebanan berlangsung dengan menandai permukaan balok beton yang sudah diberi petak-petak kontur di sepanjang balok uji.

6. **Tahap analisis:** Ada dua analisis yang dilakukan yaitu analisis kuantitatif dan analisis statistik. Analisis kuantitatif dilakukan dengan menghitung daktilitas dan kapasitas momen lentur balok yang terjadi akibat pembebanan. Analisis statistik dilakukan untuk menguji hipotesis bahwa terdapat peningkatan daktilitas maupun kapasitas rotasi dari elemen balok *haunch* terhadap balok prismatis.
7. **Simpulan dan rekomendasi:** pada tahap ini dilakukan pengintegrasian hasil luaran ke dalam suatu temuan dan kesimpulan, menghasilkan model alternatif yang efektif, dalam meningkatkan daktilitas serta kapasitas rotasi pada balok.

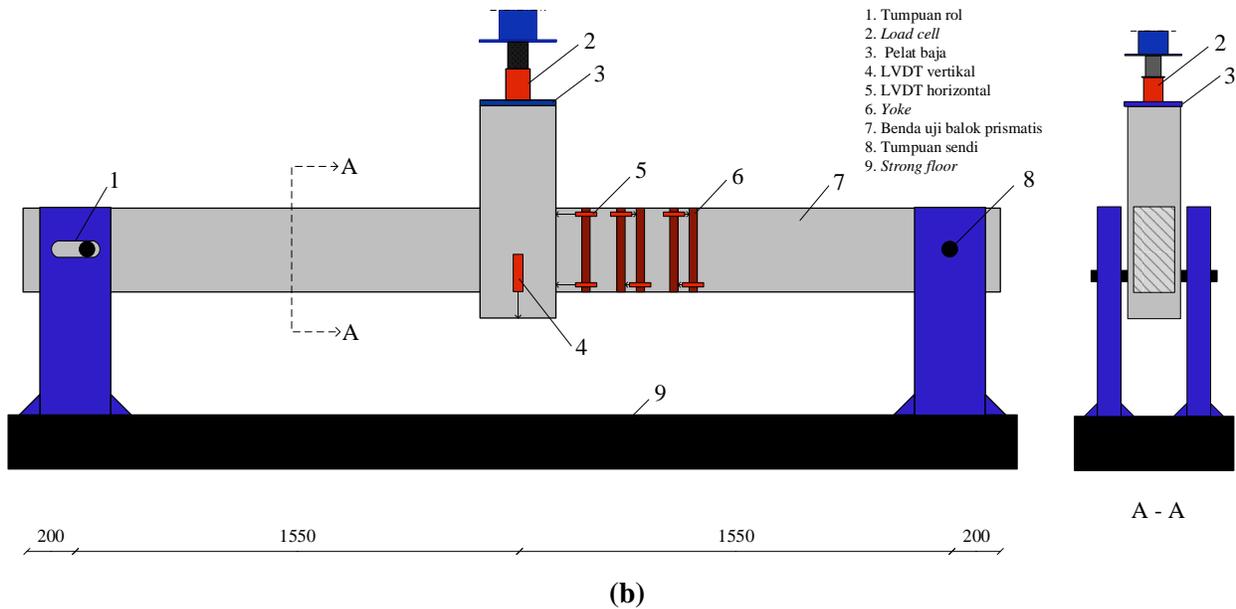
3.4.1. Pengujian balok lentur (balok prismatis)

Sebelum dilakukan pengujian, balok uji baik prismatis maupun *haunch* dilengkapi *marking* berupa garis kotak-kotak berjarak 50 mm ke arah vertikal maupun horizontal dengan tujuan untuk memudahkan pengamatan dan penggambaran pola retak. Benda uji kemudian diletakkan pada *loading frame* dengan sistem tumpuan sendi dan rol. Baja pejal dengan diameter 2” digunakan sebagai sumbu/poros tumpuan. Sebuah *hydraulic jack* dan *load cell* berkapasitas 500 kN digunakan untuk memberikan beban terpusat di tengah bentang balok. *Set up* pengujian balok prismatis terlihat pada Gambar 3. 15.

Pengujian benda uji BC-1 dan BC-2 dilakukan dengan pembebanan monotonik di tengah bentang sebagai beban terpusat dengan sistem *displacement control* hingga tercapai kondisi beban maksimum (*ultimate*).



(a)

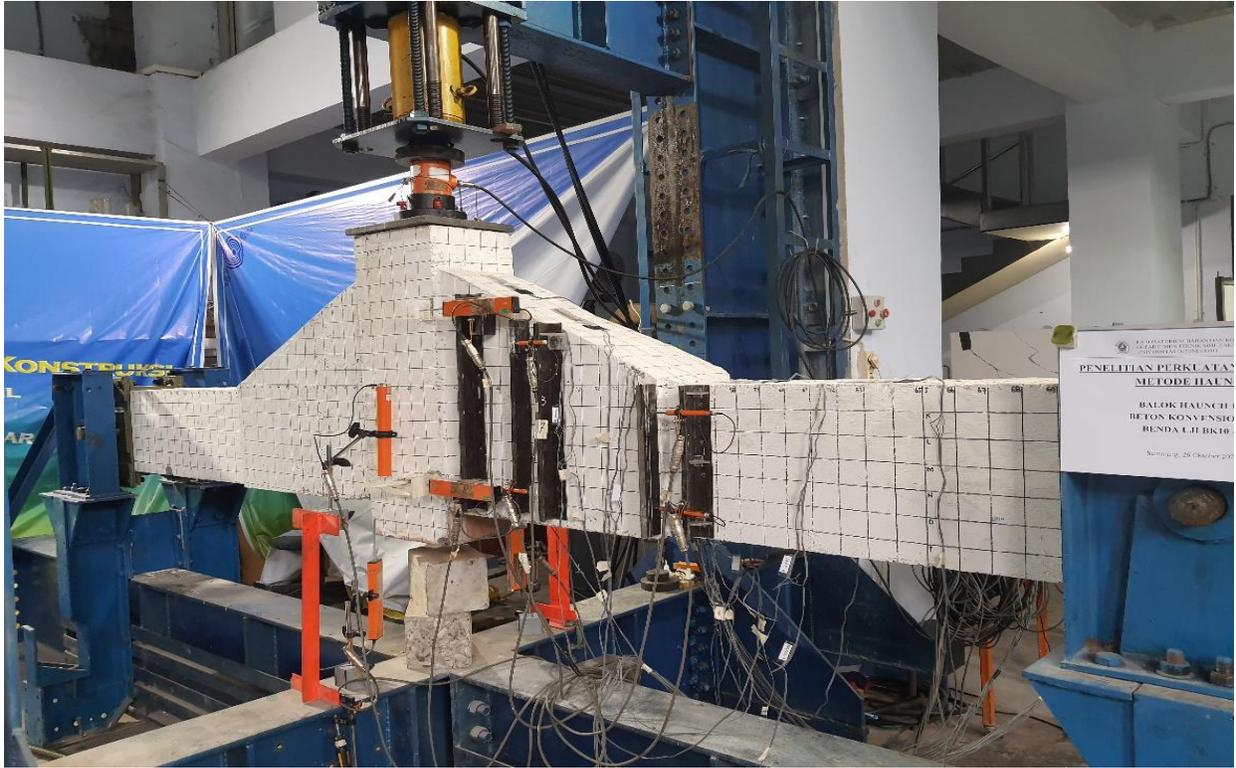


Gambar 3. 15. (a) Pengujian balok prismatis (b) *Set up* pengujian balok prismatis

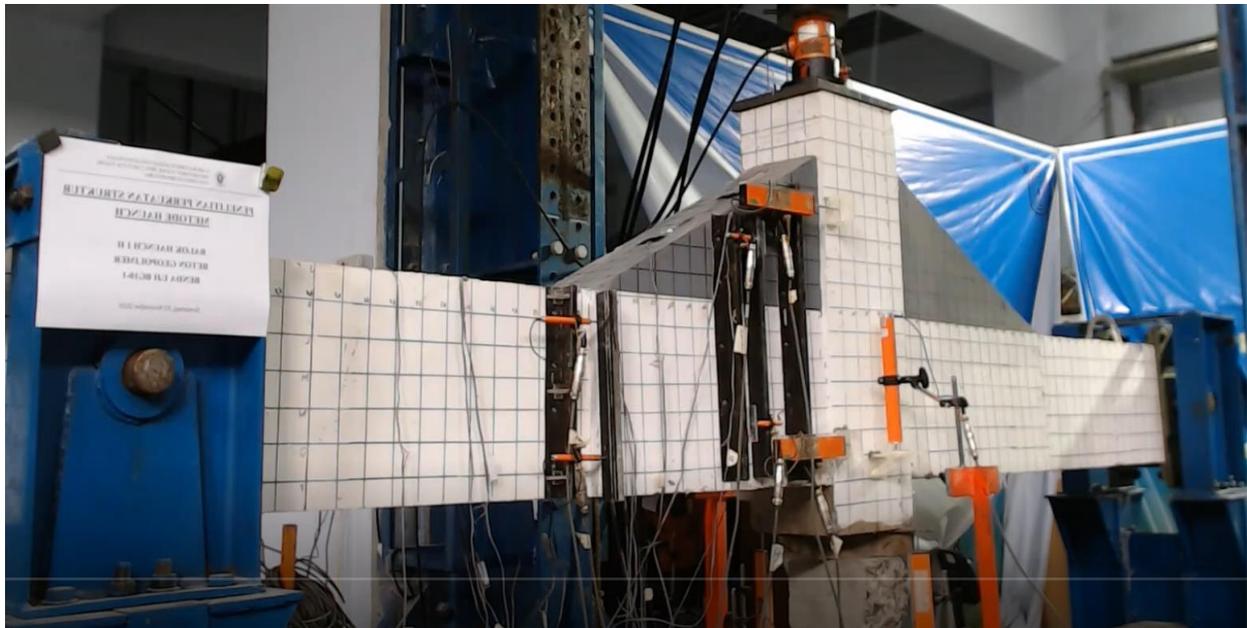
3.4.2. Pengujian balok lentur (balok *haunch*)

Bagian beton geopolimer diwarnai berbeda dengan balok prismatis agar pengamatan perilaku kedua elemen dapat dilakukan dengan mudah. *Set up* pengujian untuk balok *haunch* terlihat pada Gambar 3. 16.

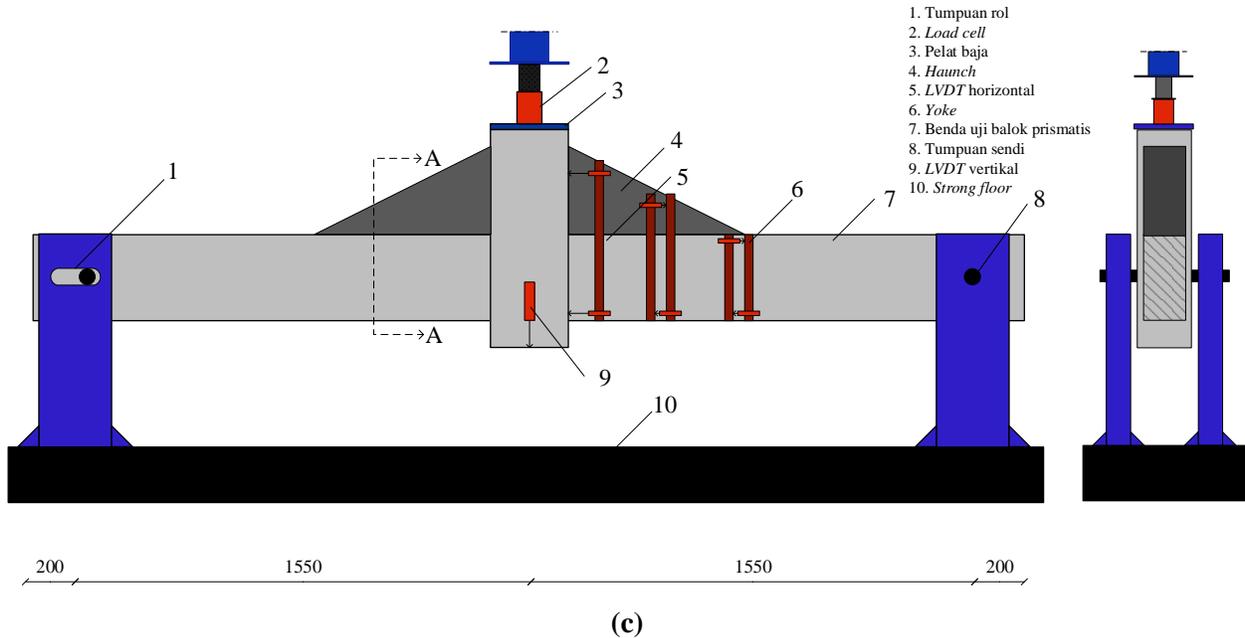
Pengujian benda uji BG0.5-1, BG0.5-2, BG1.0-1, BG1.0-2, BK1.0-1 dan BK1.0-2 dilakukan dengan pembebanan monotonik di tengah bentang sebagai beban terpusat.



(a)



(b)



Gambar 3. 16. (a) Pengujian balok haunch (beton konvensional) (b) Pengujian balok haunch (beton geopolimer) (c) Set up pengujian balok haunch

3.5. Evaluasi terhadap Metode Uji, Dampak dan Perbaikannya

Untuk mengetahui tingkat keakuratan hasil uji eksperimental maka perlu dilakukan evaluasi terhadap metode uji penelitian ini. Evaluasi metode uji dilakukan di awal konsep penelitian dengan memperhatikan beberapa tahapan termasuk dampak dan perbaikannya.

3.5.1. Penyimpangan metode pengujian terhadap kaidah Teoritis

Beberapa aspek ketidaktepatan dan deviasi adalah: ketidakteraturan properti material, properti beton konvensional dan beton geopolimer SCGC yang tidak identik, dimensi balok yang kurang akurat dan presisi, konfigurasi dan posisi letak pemasangan tulangan longitudinal dan sengkang yang tidak tepat, sistem pengecoran dengan tingkat kepadatan yang kurang seragam, dan sistem tumpuan sendi dan rol yang kurang presisi. Untuk mengoreksi pengaruh penyimpangan-penyimpangan ini terhadap hasil uji maka dilakukan beberapa tindakan-tindakan teknis sebagai berikut :

1. Usaha menstandarisasi properti material.
2. Melakukan perencanaan campuran mutu beton (*mix design of concrete*) yang teliti disertai *trial-mix* untuk memastikan hasil akhir kuat tekan beton geopolimer SCGC dan beton konvensional yang relatif sama.

3. Menggunakan bekisting dari bahan yang stabil, kuat, rata dan tidak menyerap air dan tidak mengalami kembang susut. Sistem sambungan dan perkuatan bekisting direncanakan sehingga hasil akhir memiliki tingkat presisi yang tinggi.
4. Montase dan perakitan tulangan menitikberatkan ketelitian diameter, penempatan, jarak antar tulangan dan mutu yang sesuai dengan perencanaan analitis.
5. Perencanaan dan pendetailan sistem tumpuan sendi dan rol yang benar sehingga dapat berfungsi sesuai dengan kerangka dasar perencanaan.

3.5.2. Tinjauan pengaruh ketidaksempurnaan benda uji terhadap hasil.

Meski telah dilakukan antisipasi meminimalkan ketidaksempurnaan benda uji, namun kenyataannya masih ada beberapa hal yang tetap harus dikaji. Salah satu ketidaksempurnaan yang terjadi adalah penebalan balok *haunch* ke arah lebar balok dan fenomena susut yang terjadi pada balok *haunch* beton geopolimer SCGC. Untuk memvalidasi data hasil uji eksperimental ini maka dilakukan komparasi dengan hasil analisis penampang dan validasi dengan hasil model numeris.

3.6. Pemodelan Balok Benda Uji

3.6.1. Perilaku material

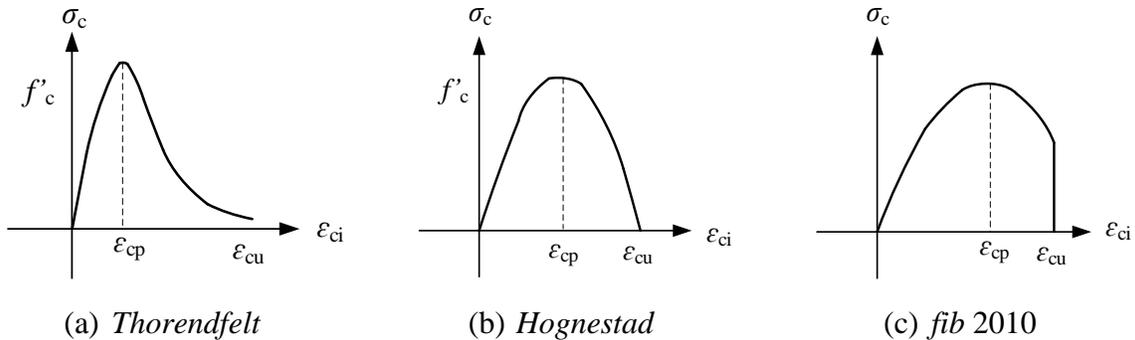
Perilaku material adalah respons material berupa deformasi pada saat diberi beban. Perilaku material sering dinyatakan dalam hubungan tegangan – regangan dalam permodelan. Material yang digunakan pada model adalah beton konvensional, beton geopolimer dan baja tulangan. Material beton memiliki dua grafik tegangan – regangan yaitu kondisi tarik dan kondisi tekan. Material baja memiliki satu hubungan tegangan – regangan yaitu kondisi tarik.

3.6.1.1. Perilaku beton

Material beton didefinisikan dengan dua grafik tegangan – regangan yang berbeda yaitu kondisi tarik dan kondisi tekan. Grafik tegangan – regangan didapatkan baik dari eksperimen atau dengan menggunakan persamaan matematis, atau sering disebut model tegangan – regangan. Model tegangan – regangan dapat disusun dengan mengetahui beberapa parameter pengujian beton seperti kuat tekan dan kuat tarik.

3.6.1.1.1. Model tegangan – regangan tekan

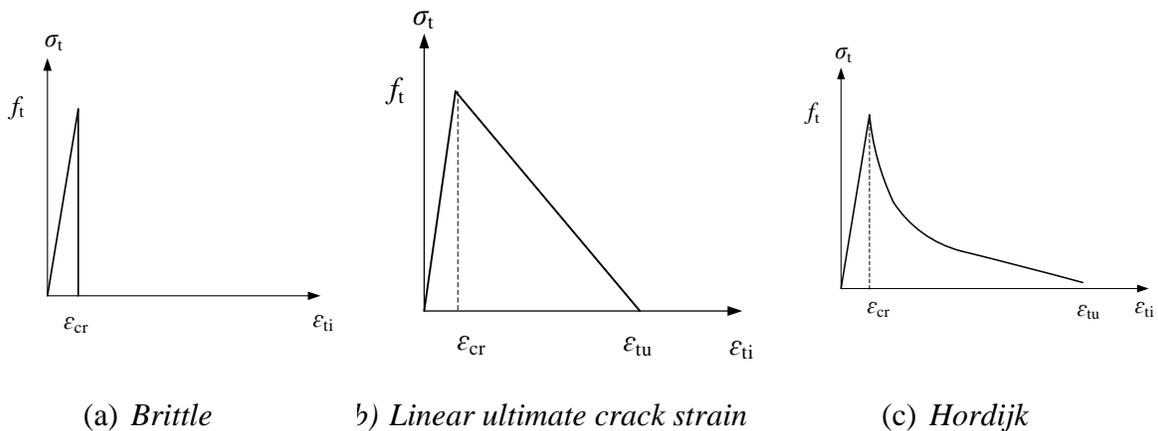
Model material beton tekan yang umum digunakan beberapa di antaranya adalah:



Gambar 3. 17. Model tegangan – regangan beton tekan

3.6.1.1.2. Model tegangan – regangan tarik

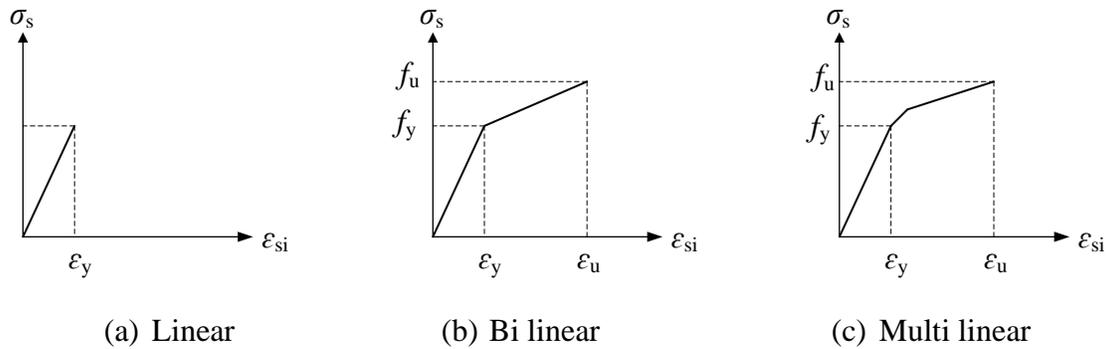
Model material beton tarik yang umum digunakan beberapa di antaranya adalah:



Gambar 3. 18. Model tegangan – regangan beton tarik

3.6.1.2. Perilaku baja tulangan

Perilaku baja tulangan dimodelkan berdasarkan dari hasil pengujian tarik baja. Hubungan tegangan – regangan yang digunakan umumnya disederhanakan menjadi kurva linear tunggal atau multi linear. Beberapa model hubungan tegangan – regangan baja tulangan adalah sebagai berikut.



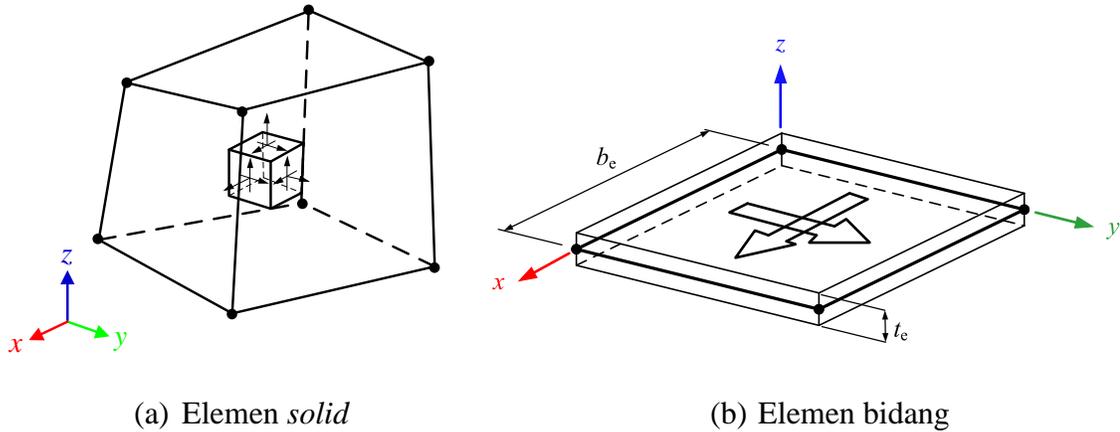
Gambar 3. 19. Model tegangan – regangan tulangan

3.6.1.3. Perilaku interaksi antara dua elemen

Interaksi antara dua elemen perlu didefinisikan dalam pemodelan. Interaksi antara dua elemen umumnya dapat didefinisikan menjadi dua tipe, yaitu *embedded interface* dan *bond slip interface*. *Embedded interface* merupakan kondisi dimana tidak terjadi slip atau perbedaan regangan pada kedua elemen yang saling bertemu. *Bond slip interface* merupakan kondisi dimana mungkin terjadi slip atau perbedaan regangan pada pertemuan kedua elemen. *Interface* yang terjadi pada pengujian balok adalah hubungan antara tulangan baja dengan beton dan hubungan antara beton lama dengan beton baru.

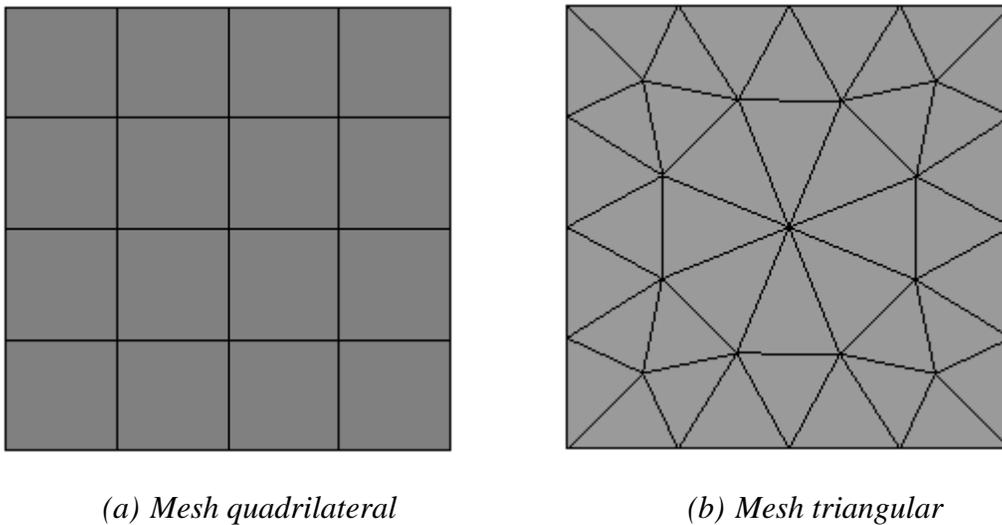
3.6.2. Elemen

Pemodelan fisik dari benda uji dapat dinyatakan baik dalam 3D maupun 2D. Model dalam 3D umumnya menggunakan elemen solid. Model dalam 2D umumnya menggunakan elemen bidang. Elemen yang digunakan pada model benda uji balok adalah elemen bidang (*plane stress*) untuk pemodelan beton dan elemen garis (*line element, 1D*) untuk pemodelan tulangan baja.



Gambar 3. 20. Tipe elemen dalam FEA

Parameter penting dalam elemen adalah *mesh* yang digunakan. *Mesh* yang dapat digunakan pada model umumnya terdiri dari dua tipe yaitu *triangular* (segitiga) dan *quadrilateral* (segi empat). *Mesh quadrilateral* lebih sering digunakan untuk memodelkan bentuk yang relatif teratur, sedangkan *mesh triangular* pada bentuk yang kurang teratur. Hasil dari model dipengaruhi dari *mesh*, baik dari tipe *mesh*, ukuran *mesh*, dan titik sampel (*Gauss point*) yang digunakan pada *mesh*.



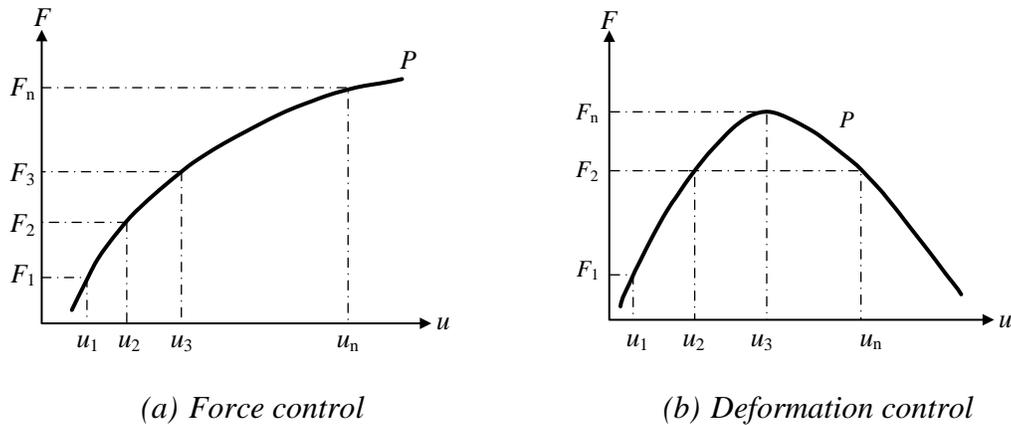
Gambar 3. 21. Tipe *mesh* dalam FEA

3.6.3. *Constraints* dan beban

Constraints atau kondisi batas adalah penentuan elemen yang akan diasumsikan tidak mengalami perpindahan atau rotasi. Kondisi batas diperlukan dalam model sehingga analisis

struktur mungkin untuk diselesaikan. Kondisi batas dapat dinyatakan pada arah sumbu tertentu di antara sumbu x , y , dan/atau z baik perpindahan atau rotasi.

Beban pada model umumnya dapat dibagi menjadi dua yaitu pembebanan terkontrol gaya dan terkontrol deformasi. Dua tipe pembebanan tersebut akan diberikan secara bertahap (inkremen) mengikuti pengujian eksperimen.

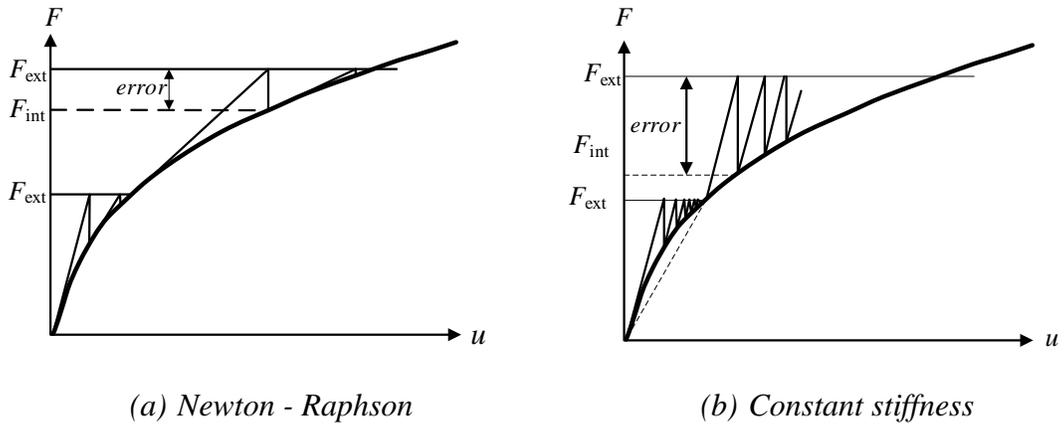


Gambar 3. 22. Tipe pembebanan dalam FEA

3.6.4. Analisis

Analisis dapat dibagi menjadi dua yaitu analisis linear dan non linear. Analisis linear dapat digunakan untuk elemen dengan deformasi kecil, umumnya pada kasus struktur hanya mencapai *yield*. Analisis non linear digunakan pada struktur yang mengalami deformasi besar, umumnya digunakan pada struktur yang sampai mengalami keruntuhan. Perbedaan pada kedua tipe analisis tersebut adalah pada fungsi tegangan – regangan material, dimana pada analisis non linear lebih merepresentasikan kondisi material sesungguhnya.

Analisis non linear akan dilakukan secara iterasi hingga mencapai nilai konvergensi yang ditetapkan. Beberapa metode dapat dilakukan untuk mencari konvergensi, dua yang umum digunakan adalah Newton – Raphson dan *constant stiffness*. Metode Newton – Raphson memberikan konvergensi yang lebih cepat namun relatif tidak stabil, sedangkan *constant stiffness* memerlukan waktu lebih namun lebih stabil.



Gambar 3. 23. Solusi konvergensi dalam iterasi

Konvergensi dapat didefinisikan dari beberapa kriteria. Kriteria yang umum digunakan untuk menentukan konvergensi adalah deformasi, gaya, dan energi. Nilai toleransi dapat ditentukan sesuai dengan nilai yang dikehendaki.