

2.2.3. Beton geopolimer	27
2.3. Perkuatan (<i>Strengthening</i>) Lentur dengan SNI–2847-2019	30
2.3.1. Balok beton bertulang	30
2.3.2. Balok beton bertulang penampang prismatis	31
2.3.3. Balok beton bertulang dengan balok <i>haunch</i>	32
2.4. Perilaku Momen – Kurvatur Balok	33
2.5. Hipotesis	34
2.6. Pemodelan Balok Lentur	36
BAB III PENGUJIAN EKSPERIMENTAL	37
3.1. Metode Penelitian	37
3.2. Penelitian Dasar	41
3.2.1. Uji mekanik material	41
3.2.2. Perilaku material beton komposit konvensional - geopolimer	44
3.2.3. Perilaku geser beton konvensional dan beton geopolimer SCGC	47
3.3. <i>Self Compacting Geopolymer Concrete</i> (SCGC)	47
3.3.1. Bahan material penyusun SCGC	49
3.3.2. Metode campuran SCGC	55
3.3.3. FT-IR (<i>Fourier Transform Infrared</i>)	56
3.4. Desain Penelitian	59
3.4.1. Pengujian balok lentur (balok prismatis)	60
3.4.2. Pengujian balok lentur (balok <i>haunch</i>)	61
3.5. Evaluasi terhadap Metode Uji, Dampak dan Perbaikannya	63
3.5.1. Penyimpangan metode pengujian terhadap kaidah Teoritis	63
3.5.2. Tinjauan pengaruh ketidaksempurnaan benda uji terhadap hasil.	64
3.6. Pemodelan Balok Benda Uji	64

3.6.1. Perilaku material	64
3.6.2. Elemen	66
3.6.3. <i>Constraints</i> dan beban.....	67
3.6.4. Analisis	68
BAB IV HASIL DAN ANALISIS DATA	70
4.1. Hasil dan Evaluasi Data Uji Balok Lentur.....	70
4.1.1. Balok prismatis	71
4.1.2. Balok <i>haunch</i>	80
4.2. Pemodelan Balok Prismatis dan Balok <i>Haunch</i> dengan Program DIANA FEA 10.3.....	92
4.2.1. Perilaku material	92
4.2.2. Pemodelan balok.....	95
4.3. Komparasi Hasil Eksperimental dan Model	98
4.3.1. Komparasi beban-lendutan	99
4.3.2. Perilaku momen–kurvatur balok uji.....	100
4.3.3. Komparasi pola retak (<i>crack pattern</i>).....	103
4.3.4. Komparasi sendi plastis	105
BAB V PEMBAHASAN HASIL PENELITIAN.....	107
5.1. Pengaruh Perkuatan (<i>strengthening</i>) Balok di Muka Kolom dengan Balok <i>haunch</i>	107
5.1.1. Peningkatan kapasitas beban.....	108
5.1.2. Peningkatan daktilitas	110
5.1.3. Perbandingan pola retak (<i>crack pattern</i>).....	113
5.1.4. Pergeseran sendi plastis	116
5.2. Pengaruh Tinggi Balok <i>Haunch</i>	118
5.3. Pengaruh Panjang Efektif Balok Lentur akibat Adanya Perkuatan Balok <i>Haunch</i>	124
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	127

6.1. Kesimpulan	127
6.2. Saran	128
DAFTAR PUSTAKA.....	129
LAMPIRAN.....	139

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1. Mekanisme Plastifikasi Rangka Kaku: (a) <i>Beam Sway</i> (b) <i>Soft Storey</i>	2
Gambar 1. 2. Detail penulangan sengkang di daerah sendi plastis	3
Gambar 1. 3. Detail penulangan balok di muka kolom	3
Gambar 1. 4. Balok <i>haunch</i> dari beton bertulang	4
Gambar 1. 5. Detail metode pelaksanaan perkuatan balok di muka kolom dengan SCGC	11
Gambar 2. 1. Model balok <i>haunch</i> yang diajukan oleh peneliti terdahulu	19
Gambar 2. 2. Kurva beban - lendutan dari peneliti terdahulu.....	21
Gambar 2. 3. Variasi sudut <i>haunch</i> (α) peneliti terdahulu	23
Gambar 2. 4. Detail balok <i>haunch</i> baja.....	24
Gambar 2. 5. Balok <i>haunch</i> dari beton konvensional	25
Gambar 2. 6. Detail <i>cross section</i> balok yang di <i>jacketting</i> dengan <i>wire mesh</i> dan <i>grout</i>	26
Gambar 2. 7. Prosedur pengencangan dari kawat las yang dilas ke muka balok	26
Gambar 2. 8. Tampilan <i>fastened wired meshed</i> yang diangkur sebelum <i>jacketting</i>	27
Gambar 2. 9. Penampang beton bertulang dengan tulangan rangkap momen positif.....	31
Gambar 2. 10. Potongan memanjang balok prismatis	31
Gambar 2. 11. Potongan memanjang balok dengan balok <i>haunch</i>	32
Gambar 2. 12. Penampang balok <i>haunch</i> beton tulangan rangkap momen negatif.....	32
Gambar 2. 13. Kurvatur sepanjang balok prismatis dan balok <i>haunch</i> akibat beban gravitasi	33
Gambar 2. 14. Momen–kurvatur balok prismatis dan balok <i>haunch</i>	34
Gambar 2. 15. Analisis teknis zona observasi balok lentur	35
Gambar 2. 16. (a) <i>Cross section</i> balok prismatis (b) <i>Cross section</i> balok <i>haunch</i>	36
Gambar 3. 1. Balok uji prismatis beton konvensional	38
Gambar 3. 2. Notasi dimensi balok <i>haunch</i>	38
Gambar 3. 3. (a) Balok uji <i>haunch</i> beton (b) Penampang dan penulangan balok dan kolom	39
Gambar 3. 4. Bagan alir proses riset	40
Gambar 3. 5. Grafik hubungan <i>stress – strain</i> besi tulangan D8 dan D13	41
Gambar 3. 6. <i>Set up</i> pengujian susut beton geopolimer.....	45
Gambar 3. 7. Hasil pengamatan susut beton geopolimer.....	46
Gambar 3. 8. <i>Initial crack</i> pada balok <i>haunch</i> SCGC	46

Gambar 3. 9. Kurva prediksi susut beton konvensional (ACI, 2008).....	47
Gambar 3. 10. Analisis <i>EDX fly ash</i> PLTU Tanjung – Jati B Jepra	50
Gambar 3. 11. <i>Scanning electron microscopy (SEM) fly ash</i> dari Tanjung Jati B Jepra	50
Gambar 3. 12. Kerangka <i>mix design</i> SCGC	55
Gambar 3. 13. <i>Horizontal slump flow</i> SCGC (b) <i>Slump flow time</i> (T50).....	56
Gambar 3. 14. Hasil Uji FT-IR terhadap 6 jenis benda uji	58
Gambar 3. 15. (a) Pengujian balok prismatis (b) <i>Set up</i> pengujian balok prismatis.....	61
Gambar 3. 16. <i>Set up</i> pengujian balok	63
Gambar 3. 17. Model tegangan – regangan beton tekan.....	65
Gambar 3. 18. Model tegangan – regangan beton tarik	65
Gambar 3. 19. Model tegangan – regangan tulangan	66
Gambar 3. 20. Tipe elemen dalam FEA	67
Gambar 3. 21. Tipe <i>mesh</i> dalam FEA.....	67
Gambar 3. 22. Tipe pembebanan dalam FEA.....	68
Gambar 3. 23. Solusi konvergensi dalam iterasi.....	69
Gambar 4. 1. Pola retak balok.....	71
Gambar 4. 2. Kurva hubungan beban – lendutan balok prismatis (BC).....	72
Gambar 4. 3. Kurva momen–kurvatur balok prismatis (eksperimental)	74
Gambar 4. 4. Konfigurasi pemasangan LVDT horizontal pada balok	75
Gambar 4. 5. Pola retak balok prismatis	76
Gambar 4. 6. Perilaku regangan balok prismatis (BC)	80
Gambar 4. 7. Kurva hubungan beban – lendutan balok <i>haunch</i>	82
Gambar 4. 8. Kurva momen-kurvatur balok <i>haunch</i>	84
Gambar 4. 9. Konfigurasi pemasangan LVDT horizontal pada balok <i>haunch</i>	84
Gambar 4. 10. Pola retak balok <i>haunch</i> BK 1.0 (a) <i>first crack</i> (b) <i>yield</i> (c) <i>ultimate</i>	86
Gambar 4. 11. Pola retak balok <i>haunch</i> BG 1.0 (a) <i>first crack</i> (b) <i>yield</i> (c) <i>ultimate</i>	87
Gambar 4. 12. Pola retak balok <i>haunch</i> BG0.5 (a) <i>first crack</i> (b) <i>yield</i> (c) <i>ultimate</i>	87
Gambar 4. 13. Distribusi regangan tulangan tarik BK1.0 kondisi leleh (Eksperimen)	91
Gambar 4. 14. Distribusi regangan tulangan tarik BG1.0 kondisi leleh (Eksperimen)	92
Gambar 4. 15. Distribusi regangan tulangan tarik pada BG0.5 kondisi leleh (Eksperimen).....	92
Gambar 4. 16. Kurva <i>stress-strain</i> beton tekan dan beton tarik	94

Gambar 4. 17. <i>Input stress-strain</i> tulangan besi longitudinal.....	95
Gambar 4. 18. Geometri model balok prismatis (BC).....	96
Gambar 4. 19. Geometri model balok <i>haunch</i> (BG0.5).....	96
Gambar 4. 20. Geometri model balok <i>haunch</i> (BK1.0 dan BG1.0).....	96
Gambar 4. 21. <i>Mesh quadrilateral</i> yang digunakan pada model.....	97
Gambar 4. 22. <i>Mesh</i> pada balok prismatis (BC).....	97
Gambar 4. 23. <i>Mesh</i> pada balok <i>haunch</i> (BG0.5).....	97
Gambar 4. 24. <i>Mesh</i> pada balok <i>haunch</i> (BK1.0 dan BG1.0).....	98
Gambar 4. 25. Hubungan beban – lendutan ($P-\Delta$) balok prismatis (BC).....	99
Gambar 4. 26. Hubungan beban – lendutan ($P-\Delta$) balok <i>haunch</i> (BK1.0).....	99
Gambar 4. 27. Hubungan beban – lendutan ($P-\Delta$) balok <i>haunch</i> (BG1.0).....	100
Gambar 4. 28. Hubungan beban – lendutan ($P-\Delta$) balok <i>haunch</i> (BG0.5).....	100
Gambar 4. 29. Kurva momen–kurvatur balok BC, BG0.5, BG1.0, dan BK1.0.....	102
Gambar 4. 30. Komparasi pola retak balok prismatis (BC).....	103
Gambar 4. 31. Komparasi pola retak balok <i>haunch</i> geopolimer (BG0.5).....	104
Gambar 4. 32. Komparasi pola retak balok <i>haunch</i> konvensional (BK1.0).....	104
Gambar 4. 33. Komparasi pola retak balok <i>haunch</i> geopolimer (BG1.0).....	105
Gambar 4. 34. Perilaku regangan pada semua balok uji.....	106
Gambar 5. 1. Grafik beban – lendutan ($P-\Delta$) untuk semua benda uji.....	107
Gambar 5. 2. Grafik normalisasi beban – lendutan ($P-\Delta$) untuk semua benda uji.....	108
Gambar 5. 3. Pola retak balok (a) BC (b) BG0.5 (c) BK1.0 (d) BG1.0.....	115
Gambar 5. 4. Proses terjadinya sendi plastis.....	116
Gambar 5. 5. Perilaku regangan pada semua balok uji.....	117
Gambar 5. 6. Posisi titik tinjau X_1, X_2, X_3 balok (a) BC (b) BG0.5 (c) BK1.0 (d) BG1.0.....	121
Gambar 5. 7. Distribusi regangan pada tulangan tarik sepanjang jarak x dari muka kolom.....	121
Gambar 5. 8. Grafik sudut <i>haunch</i> vs gradien regangan.....	122
Gambar 5. 9. Dimensi balok <i>haunch</i>	123
Gambar 5. 10. Hasil regangan dengan tinggi <i>haunch</i> , $h = 0.7 \times H$	124
Gambar 5. 11 Perubahan gaya geser akibat adanya <i>haunch</i>	125
Gambar 5. 12. Estimasi panjang efektif balok akibat adanya perkuatan balok <i>haunch</i>	125

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1 <i>State of the Art</i> penelitian yang terkait dan kebaruan (<i>novelty</i>) penelitian	6
Tabel 3. 1. Jenis benda uji balok uji lentur	38
Tabel 3. 2. Data hasil uji tarik besi tulangan.....	42
Tabel 3. 3. <i>Mix design</i> beton geopolimer SCGC	42
Tabel 3. 4. <i>Mix design</i> beton konvensional.....	42
Tabel 3. 5. <i>Mix design</i> BK dan SCGC dalam 1 kubik beton	43
Tabel 3. 6. Hasil pengujian kuat tekan beton.....	43
Tabel 3. 7. Hasil pengujian kuat tarik beton	44
Tabel 3. 8. Hasil pengujian kuat geser beton	47
Tabel 3. 9. Komposisi kimia metode EDX <i>fly ash</i> PLTU Tanjung – Jati B Jepra.....	51
Tabel 3. 10. Hasil XRF <i>fly ash</i> PLTU Tanjung – Jati B Jepra	52
Tabel 4. 1. Hasil pengujian $P-\Delta$ balok prismatis (BC)	73
Tabel 4. 2. Data hasil uji eksperimental momen-kurvatur	75
Tabel 4. 3. Perhitungan daktilitas <i>displacement</i> balok prismatis BC	78
Tabel 4. 4. Data hasil uji eksperimental momen-kurvatur	79
Tabel 4. 5. Hasil pengujian $P-\Delta$ balok <i>haunch</i> (BK 1.0)	82
Tabel 4. 6. Hasil pengujian $P-\Delta$ balok <i>haunch</i> (BG 1.0)	82
Tabel 4. 7. Hasil pengujian $P-\Delta$ balok <i>haunch</i> (BG 0.5)	83
Tabel 4. 8. Perhitungan daktilitas <i>displacement</i> balok <i>haunch</i> BK1.0	88
Tabel 4. 9. Perhitungan daktilitas <i>displacement</i> balok <i>haunch</i> BG1.0	88
Tabel 4. 10. Perhitungan daktilitas <i>displacement</i> balok <i>haunch</i> BG0.5	88
Tabel 4. 11. Data hasil uji eksperimental momen-kurvatur BK1.0	89
Tabel 4. 12. Data hasil uji eksperimental momen-kurvatur BG1.0	89
Tabel 4. 13. Data hasil uji eksperimental momen-kurvatur BG0.5	90
Tabel 4. 14. Rekapitulasi momen-kurvatur semua benda uji.....	103
Tabel 5. 1. Hasil pengujian $P-\Delta$ balok prismatis (BC)	109
Tabel 5. 2. Hasil pengujian $P-\Delta$ balok <i>haunch</i> (BK 1.0)	109
Tabel 5. 3. Hasil pengujian $P-\Delta$ balok <i>haunch</i> (BG 1.0)	109
Tabel 5. 4. Hasil pengujian $P-\Delta$ balok <i>haunch</i> (BG0.5)	109

Tabel 5. 5. Daktilitas <i>displacement</i> balok uji.....	111
Tabel 5. 6. Daktilitas kurvatur balok uji	112
Tabel 5. 7. Perbandingan daktilitas kurvatur dan daktilitas <i>displacement</i>	113
Tabel 5. 8. Komparasi regangan (<i>strain</i>) dari eksperimental dan model.....	117
Tabel 5. 9. Jenis benda uji balok uji lentur	118
Tabel 5. 10. Regangan tulangan tarik pada wilayah <i>haunch</i>	119
Tabel 5. 11. Gradien pada setiap tipe balok.....	122
Tabel 5. 12. Perhitungan estimasi panjang efektif balok akibat adanya <i>haunch</i>	126

DAFTAR SIMBOL

a	=	Tinggi <i>stress block</i> ekuivalen
A_{cl}	=	Luas penampang benda uji kuat tekan silinder
A_s	=	Luas tulangan tarik
A_s'	=	Luas tulangan tekan
A_v	=	Luas tulangan geser
b	=	Lebar penampang balok
b_e	=	Lebar elemen
C	=	Garis netral
C_c	=	Gaya tekan beton
C_s	=	Gaya tekan tulangan
d	=	Tinggi efektif penampang
D	=	Diameter tulangan longitudinal
d'	=	Selisih tinggi balok dan tinggi efektif penampang
d_1	=	Diameter uji <i>slump flow</i> benda uji 1
d_2	=	Diameter uji <i>slump flow</i> benda uji 2
D_{cl}	=	Diameter benda uji kuat tekan silinder
D_t	=	Diameter sengkang tertutup
E_c	=	Modulus elastisitas beton
E_{c0}	=	Modulus elastisitas dasar beton (<i>fib</i>)
E_{cp}	=	Modulus sekan saat tegangan puncak
E_s	=	Modulus elastisitas tulangan
f_c	=	Kuat tekan beton
F_{ext}	=	Gaya eksternal
F_h	=	Gaya horizontal
F_{int}	=	Gaya internal
F_n	=	Gaya ke - n
f_s	=	Tegangan tulangan sebelum leleh
f_s'	=	Tegangan tulangan tekan sebelum leleh
f_u	=	Tegangan <i>ultimate</i> tulangan
f_y	=	Tegangan leleh tulangan
H	=	Tinggi balok prismatis
h	=	Tinggi balok <i>haunch</i>
h_c	=	Tinggi kolom
h_{cl}	=	Tinggi benda uji kuat tekan silinder
H_{tot}	=	Tinggi total balok <i>haunch</i>

I	=	Momen inersia penampang
I_{cr}	=	Momen inersia penampang saat retak pertama
I_{haunch}	=	Momen inersia balok <i>haunch</i>
$I_{prismatis}$	=	Momen inersia balok prismatis
k	=	Konstanta kekasaran
k_f	=	Indeks plastisitas
L	=	Panjang <i>haunch</i>
L_{eff}	=	Panjang efektif balok
M	=	Momen
M_1	=	Kemolaran larutan
M_{he}	=	Momen elastis tahanan penampang <i>haunch</i>
M_n	=	Momen nominal balok
M_r	=	Molekul relatif senyawa
M_{rNaOH}	=	Molekul relatif NaOH
M_s	=	Momen elastis tahanan penampang baja
M_{tki}	=	Momen probabel pada penampang balok sisi kiri
M_{tka}	=	Momen probabel pada penampang balok sisi kanan
M_u	=	Momen <i>ultimate</i>
M_y	=	Momen saat tulangan tarik leleh
n	=	Jumlah mol zat terlarut
n_{eq}	=	Nilai ekuivalensi material baja terhadap material beton
\emptyset	=	Diameter tulangan polos
\emptyset_t	=	Diameter pipa di tumpuan balok
P	=	Beban
p	=	Selimut beton
P_{cr}	=	Beban saat <i>first crack</i>
P_{haunch}	=	Beban balok <i>haunch</i>
$P_{prismatis}$	=	Beban balok prismatis
P_u	=	Beban <i>ultimate</i>
P_y	=	Beban saat tulangan tarik leleh
t_e	=	Tebal elemen
T_s	=	Gaya tarik tulangan
T_{s1}	=	Gaya tarik tulangan lapisan kedua
u_n	=	<i>Displacement</i> ke – n
V	=	Volume larutan
x	=	Sumbu x
X_1	=	Posisi sendi plastis 1
X_2	=	Posisi sendi plastis 2

X_3	=	Posisi sendi plastis 3
y	=	Sumbu y
z	=	Sumbu z
α	=	Sudut <i>haunch</i>
α_E	=	Konstanta material untuk agregat
β_1	=	Faktor ekuivalensi <i>stress block</i> beton
Δ	=	<i>Displacement</i>
Δ_u	=	<i>Displacement ultimate</i>
Δ_y	=	<i>Displacement</i> saat tulangan tarik leleh
ε	=	Regangan hasil eksperimen
ε_c	=	Regangan tekan beton
ε_{ci}	=	Regangan beton tekan ke – i
ε_c'	=	Regangan tarik beton
ε_{cr}	=	Regangan retak beton tarik
ε_{cu}	=	Regangan <i>ultimate</i> tekan beton
ε_s	=	Regangan tarik tulangan
ε_{si}	=	Regangan tulangan ke – i
ε_s'	=	Regangan tekan tulangan
ε_{ti}	=	Regangan beton tarik ke – i
ε_{tu}	=	Regangan <i>ultimate</i> tarik beton
ε_u	=	Regangan <i>ultimate</i> tulangan
ε_y	=	Regangan leleh tulangan
λ	=	Faktor koreksi berat beton
μ_d	=	Daktilitas <i>displacement</i>
μ_{dBC}	=	Rata – rata daktilitas <i>displacement</i> benda uji BC
$\mu_{dBG0.5}$	=	Rata – rata daktilitas <i>displacement</i> benda uji BG0.5
$\mu_{dBG1.0}$	=	Rata – rata daktilitas <i>displacement</i> benda uji BG1
$\mu_{dBK1.0}$	=	Rata – rata daktilitas <i>displacement</i> benda uji BK1
$\mu_d \text{ rata}$	=	Rata – rata daktilitas <i>displacement</i>
μ_ϕ	=	Daktilitas kurvatur
ρ	=	Rasio tulangan tarik
ρ'	=	Rasio tulangan tekan
σ	=	Tegangan hasil eksperimen
σ_c	=	Tegangan tekan saat regangan tertentu
σ_t	=	Tegangan tarik saat regangan tertentu
τ	=	Tegangan geser hasil eksperimen
ν	=	Rasio <i>poisson</i>
V_{grav}	=	Gaya geser akibat beban gravitasi pada balok

- V_{sway} = Gaya geser akibat momen probabel penampang balok
 φ = Kurvatur
 φ_u = Kurvatur *ultimate*
 φ_y = Kurvatur saat tulangan tarik leleh