

Pemodelan Numerik Perilaku Lentur Dan Defleksi Elemen Balok Ferrogeopolymer

Numerical Modelling Flexural And Deflection Behavior Of Ferrogeopolymer Beam

Bill J Ebenheazar^{1*)}, Remigildus Cornelis², Partogi H Simatupang³

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana, Kupang 65145, Indonesia

² Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana, Kupang 65145, Indonesia

³ Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana, Kupang 65145, Indonesia

Article info:

Kata kunci:

Ferrogeopolymer, Pemodelan Numerik

Keywords:

Ferrogeopolymer, Numerical Modeling

Article history:

Received: 16-01-2021

Accepted: 21-03-2021

^{*}Koresponden email:
billdjubida@gmail.com

Abstrak

Ferrogeopolymer adalah elemen bertulang berinding tipis yang dibuat dari mortar semen geopolymer yang diperkuat dengan lapisan yang rapat dari kawat wiremesh berdiameter kontinu dan berukuran relatif kecil. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui perilaku lentur dan defleksi dari suatu balok secara numerik dan hasilnya dibandingkan dengan hasil eksperimen. Semua sifat-sifat teknis material hasil eksperimen diadopsi untuk *pemodelan numerik*. Balok yang dimodelkan pada penelitian ini ialah Balok *ferrogeopolymer* dengan ukuran 600 x 100 x 100 mm dengan perkuatan wiremesh yang divariasikan lapisannya yaitu 3, 5, 7, 9, dan 11 lapisan wiremesh. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin banyak lapisan wiremesh variasi antara hasil numerik dan eksperimen memiliki perbedaan hasil yang tidak besar. Hasil numerik menunjukkan bahwa semakin banyak jumlah lapisan maka kekuatannya meningkat tetapi tidak signifikan

Abstract

Ferro-geopolymer is a type of thin-wall reinforced element constructed of geopolymer cement mortar reinforced with closely spaced relatively small diameter mesh in layers. In this investigation, the flexural and the deflection behaviour of the ferro-geopolymer beams were determined numerically and the results compared to the experimental values. All the experimental material properties adopted for numerical modelling. The numerical model of all the five beams were of 600 mm effective span, 100 mm width and 100 mm height. Each specimen of beam model having different layers of wire mesh that are 3, 5, 7, 9, and 11. The results showed that the greater the number of layers, the variation between numerical and experimental results follows the same path without much difference. The numerical result showed that the greater the number of layers, the strength was increases but insignificant.

Kutipan: Ebenheazar, Pemodelan Numerik Perilaku Lentur Dan Defleksi Elemen Balok Ferrogeopolymer

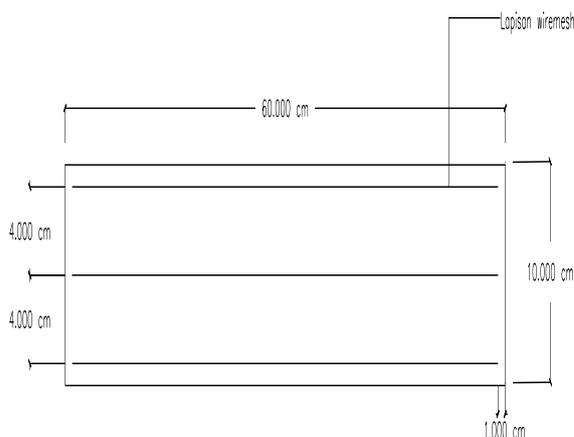
1. Pendahuluan

Pertumbuhan jumlah penduduk Indonesia semakin meningkat dari tahun ke tahun. Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik jumlah penduduk Indonesia pada tahun 2018 telah mencapai 265 juta jiwa. Peningkatan jumlah penduduk ini juga berdampak pada pembangunan infrastruktur, terutama pembangunan perumahan, jalan, jembatan, bandara, dan pelabuhan. Pembangunan infrastruktur yang semakin meningkat tentu berdampak pada permintaan terhadap material pendukung pembangunan infrastruktur salah satunya ialah beton. Peningkatan permintaan kebutuhan akan beton sebagai material pembangunan infrastruktur dapat menimbulkan efek negatif terhadap lingkungan. Terutama penggunaan semen Portland sebagai bahan pengikat beton, karena dalam produksi semen terjadi pelepasan karbon dioksida (CO_2) yang banyak ke atmosfer dapat merusak lapisan atmosfer. Karena itu usaha untuk mendapat material alternatif baru terus dilakukan baik dari material atau bahan penyusunnya. Salah satu material alternatif pengganti beton yang lebih ramah lingkungan ialah FERROGEOPOLYMER.

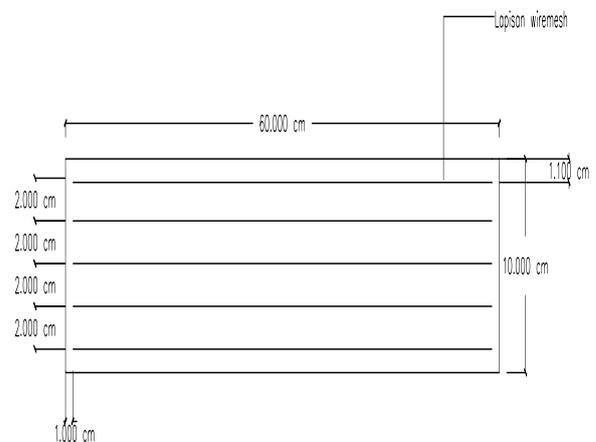
Ferropolymer adalah elemen bertulang berinding tipis yang dibuat dari mortar semen geopolymer yang diperkuat dengan lapisan yang rapat dari kawat wiremesh berdiameter kontinu dan berukuran relatif kecil (*American Concrete Institute Committee 549*). Ferropolymer mempunyai beberapa keunggulan dibandingkan beton bertulang konvensional biasa yaitu lebih tipis, menggunakan semen geopolymer dan dapat dimodelkan dalam berbagai ukuran. Hal ini berbeda dengan beton bertulang konvensional, karena tidak memerlukan kerangka/frame ketika dibentuk, memiliki daktilitas, daya tahan, kekuatan, kemampuan mengalami defleksi besar sebelum runtuh dan daya tahan terhadap retak dibandingkan beton bertulang biasa. Untuk menggunakan ferropolymer sebagai material pengganti beton konvensional maka perlu diketahui perilaku lentur dari ferropolymer, oleh karena itu diperlukan pemodelan atau eksperimen di laboratorium. Beberapa penelitian sebelumnya sudah dilakukan penelitian secara eksperimen, penelitian secara eksperimen sebelumnya sudah dilakukan oleh Petrus Lubalu dan Partogi Simatupang. Namun penelitian studi secara numerik terhadap perilaku mekanik ferropolymer belum banyak dilakukan, sehingga pada penelitian ini dilakukan kajian numerik dan studi parametrik menggunakan bantuan *software ABAQUS*.

2. Bahan dan Metode

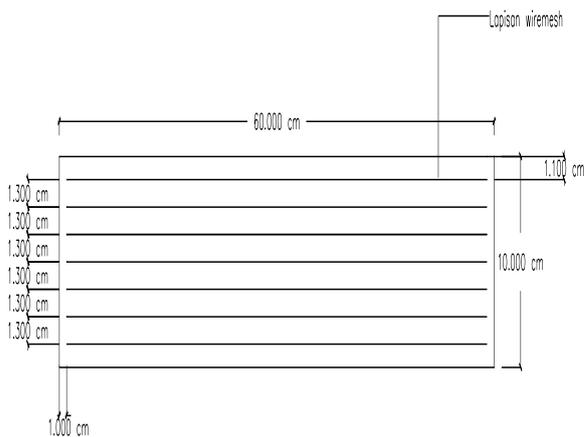
Pada penelitian ini menggunakan data hasil eksperimen yang dilakukan oleh Petrus Lubalu yaitu sebanyak 5 variasi sampel dengan variasi jumlah lapisan wiremesh 3,5,7,9 dan 11 lapisan yang dianalisis menggunakan *software Abaqus*. Balok yang dimodelkan pada *software abaqus* adalah balok dengan perletakan sendi rol dan diberi beban pada tengah bentang atau jarak 300 mm. Adapun detail variasi model dapat dilihat pada gambar 1 sampai gambar 5 dan kode variasi sampel dapat dilihat pada tabel 1



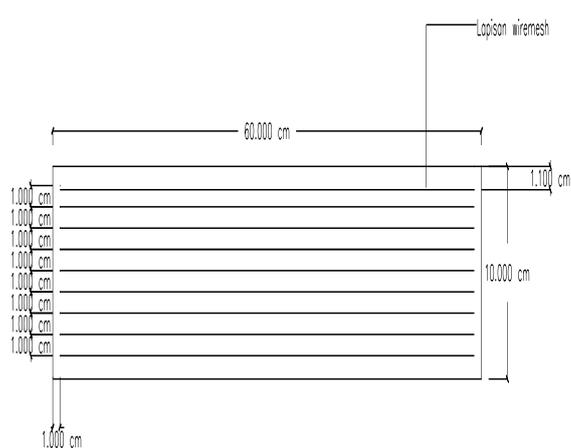
Gambar 1 Detail variasi 3 lapisan wiremesh



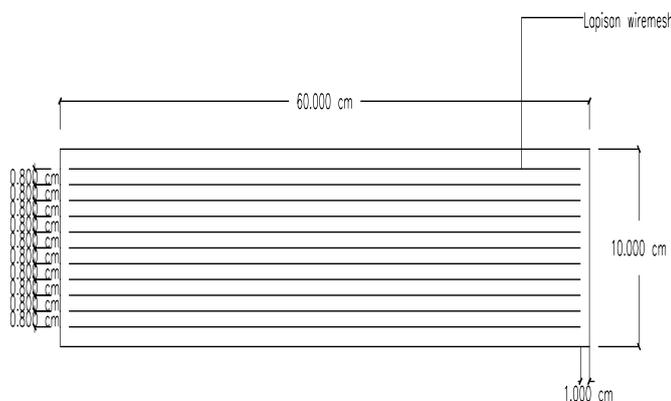
Gambar 2 detail variasi 5 lapisan wiremesh



Gambar 3 Detail variasi 7 lapisan wiremesh



Gambar 4 detail variasi 9 lapisan wiremesh



Gambar 3 detail variasi 11 lapisan wiremesh

Tabel 1 Kode Sampel

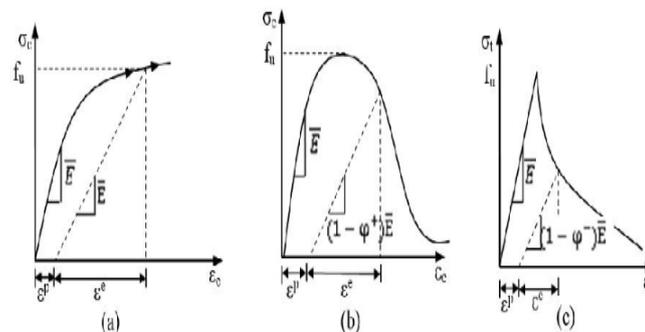
NO	Jenis Variasi	Kode Sampel
1	Hasil eksperimen balok feroeopolymer dengan variasi 3 lapisan wiremesh	HE-VWL3
2	Hasil eksperimen balok feroeopolymer dengan variasi 5 lapisan wiremesh	HE-VWL5
3	Hasil eksperimen balok feroeopolymer dengan variasi 7 lapisan wiremesh	HE-VWL7
4	Hasil eksperimen balok feroeopolymer dengan variasi 11 lapisan wiremesh	HE-VWL11
5	Hasil perhitungan secara numerik balok feroeopolymer dengan variasi 3 lapisan wiremesh	HN-VWL3
6	Hasil perhitungan secara numerik balok feroeopolymer dengan variasi 5 lapisan wiremesh	HN-VWL5

7	Hasil perhitungan secara numerik balok feroeopolymer dengan variasi 7 lapisan wiremesh	HN-VWL7
8	Hasil perhitungan secara numerik balok feroeopolymer dengan variasi 9 lapisan wiremesh	HN-VWL9
9	Hasil perhitungan secara numerik balok feroeopolymer dengan variasi 11 lapisan wiremesh	HN-VWL11

Metode analisis yang digunakan pada penelitian ini dengan menggunakan *Software Abaqus*. Penggunaan *Software* diawali dengan memasukan desain gambar di *module part* sesuai spesifikasi gambar 1 sampai gambar 5. Kemudian dilanjutkan dengan memasukan parameter material yang berupa beton dan baja pada menu *properties*

Software abaqus memberikan kemampuan mensimulasikan kerusakan menggunakan salah satu dari tiga model retak untuk elemen beton bertulang: (1) Model beton retak berlubang, (2) Model beton retak rapuh, dan (3) Model plastisitas beton rusak (CDP) . Dari tiga model retak beton, model plastisitas beton yang rusak dipilih dalam penelitian ini karena teknik ini memiliki potensi untuk mewakili perilaku inelastik lengkap dari beton baik dalam ketegangan dan kompresi termasuk karakteristik kerusakan.

Untuk mensimulasikan perilaku lentur balok ferroeopolymer dengan perkuatan wiremesh secara lengkap pada software abaqus digunakan prinsip *Post failure stress-strain relationship* (Gambar 6) dengan memasukan parameter yang dihitung menggunakan persamaan CEB-FIP 1990 yang dapat dilihat dibawah ini:



Gambar 4 (a) Model elastoplastic hardening damage (b) Model plastic softening damage (c) Plastic softening damage (Voyiadjis2008)

$$\epsilon_0 = (0,71 \times \sigma_{cu} + 2000) \times 10^{-5} \tag{1}$$

Keterangan :

ϵ_0 = Regangan puncak

σ_{cu} = Tegangan puncak

Persamaan 2 untuk mengetahui nilai tegangan tekan pada saat nilai regangan lebih kecil dari nilai regangan puncak

$$\frac{\sigma}{\sigma_{cu}} = 2 \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \times \left(1 - \frac{\epsilon}{2\epsilon_0}\right) \tag{2}$$

Keterangan :

σ_{cu} = Tegangan puncak tekan

σ = Tegangan tekan

ϵ_o = Regangan puncak

ϵ = Regangan

Persamaan 3 untuk mengetahui nilai tegangan tekan pada saat regangan lebih besar dari pada nilai regangan puncak

$$\frac{\sigma}{\sigma_{cu}} = 1 - 0,15 \left(\frac{\epsilon - \epsilon_o}{\epsilon_{cu} - \epsilon_o} \right) \quad (3)$$

Keterangan :

σ_{cu} = Tegangan puncak tekan

σ = Tegangan tekan

ϵ_o = Regangan tekan puncak

ϵ = Regangan tekan

ϵ_{cu} = Regangan tekan *ultimate*

Persamaan 4 untuk mengetahui modulus elastisitas

$$E = \frac{0,5 \times \sigma_{cu}}{\epsilon_{50}} \quad (4)$$

Keterangan :

σ_{cu} = Tegangan puncak tekan

ϵ_{50} = Regangan tekan pada tegangan 50% dari nilai tegangan puncak

E = Modulus elastisitas

Persamaan 5 untuk mengetahui nilai regangan tarik puncak

$$\epsilon_{cr} = \frac{f_{c'}}{E} \quad (5)$$

Keterangan :

$f_{c'}$ = Mutu beton

ϵ_{cr} = Regangan tarik puncak

E = Modulus elastisitas

Persamaan 6 untuk mengetahui tegangan tarik puncak

$$f_t = 0,33 \times \sqrt{f_c} \quad (6)$$

Keterangan :

F_t = Tegangan tarik puncak

Persamaan 7 untuk mengetahui nilai tegangan tarik pada saat regangan tarik lebih besar dari nilai regangan puncak

$$\sigma_t = f_t \times \left(\frac{\epsilon_{cr}}{\epsilon_t} \right)^n \quad (7)$$

Keterangan :

σ_t = Tegangan tarik

f_t = Tegangan tarik puncak

ε_{cr} = Regangan tarik puncak

ε_t = Regangan tarik

n = Koefisien tarik (1, 0,75, 0,5 , 0,4)

Persamaan 8 untuk mengetahui nilai tegangan tarik pada saat regangan tarik lebih kecil dari pada nilai regangan puncak

$$\sigma_t = E \times \varepsilon_t \quad (8)$$

Persamaan 9 untuk mengetahui nilai *damage parameter* tekan

$$D_c = 1 - \frac{\sigma}{\sigma_{cu}} \quad (9)$$

Keterangan :

D_c = Damage parameter tekan

Persamaan 10 untuk mengetahui nilai damage parameter tarik

$$D_t = 1 - \frac{\sigma}{f_t} \quad (10)$$

Keterangan :

D_t = Damage parameter tarik

Persamaan 11 untuk mengetahui nilai regangan plastis tekan

$$\varepsilon_c^{Inelastic} = \varepsilon - \varepsilon_{50} \quad (11)$$

Keterangan :

$\varepsilon_c^{Inelastic}$ = Regangan plastis tekan

ε = Regangan tekan setelah ε_{50}

ε_{50} = Regangan tekan pada tegangan 50% dari nilai tegangan puncak

Persamaan 12 untuk mengetahui nilai regangan plastis tarik

$$\varepsilon_t^{Inelastic} = \varepsilon - \sigma_t / E \quad (12)$$

Keterangan :

$\varepsilon_t^{Inelastic}$ = Regangan plastis tarik

ε = Regangan tarik

E = Modulus elastisitas

Pada material beton digunakan parameter *dilattion angle* sebesar 35, *eccentricity* sebesar 0,1 f_{bo}/f_{co} sebesar 1,16, K sebesar 0,67 dan *viscosity parameter* sebesar 0,007985. Modulus elastisitas pada beton sebesar 1019,92 MPa dan modulus elastisitas wiremesh sebesar 708260,59 MPa dengan *pisson ratio* wiremesh sebesar 0,3. Data perilaku tekan dan tarik beton dapat dilihat pada tabel 2 sedangkan data tegangan regangan wiremesh dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 2 Data input concrete damage plasticity perilaku tekan dan tarik

σ_c	ϵ_c	$\epsilon_c^{inelastic}$	D_c		ϵ_t	$\epsilon_t^{inelastic}$	D_t
6	0.0000	0.0000	0.0000	1.1432	0.0000	0.00000	0.0000
7	0.0071	0.0012	0.0000	0.6432	0.0253	0.02471	0.4374
8	0.0085	0.0026	0.0000	0.4193	0.0449	0.04444	0.6332
9	0.0100	0.0042	0.0000	0.3693	0.0531	0.05277	0.6769
10	0.0119	0.0060	0.0000	0.3193	0.0645	0.06421	0.7207
11	0.0143	0.0084	0.0000	0.2693	0.0810	0.08072	0.7644
11.25	0.0151	0.0092	0.0000	0.2193	0.1065	0.10632	0.8081
12	0.0201	0.0142	0.0000	0.1693	0.1505	0.15035	0.8519
11	0.0311	0.0253	0.0833				
10	0.0422	0.0363	0.1667				
9	0.0533	0.0474	0.2500				

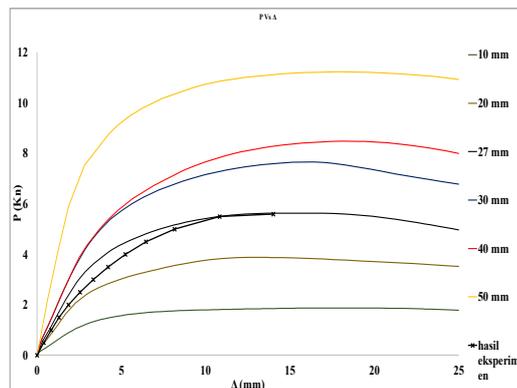
Tabel 3 data tegangan regangan wiremesh

Tegangan (Mpa)	Regangan (mm)
0.00	0.000000
14.56	0.000021
29.12	0.000283
43.68	0.000429
58.23	0.000525
72.79	0.000708
87.35	0.000829
101.91	0.000906
116.47	0.001015
131.03	0.001072
145.59	0.001160
160.15	0.001301
174.70	0.001431

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Pengaruh ukuran mesh pada hasil studi parametrik

Pada analisis ini dicoba ukuran mesh yang mendekati hasil eksperimen. Ukuran mesh yang digunakan 10,20,27,30 , 40 dan 50 mm yang hasilnya dapat dilihat pada Gambar 7.

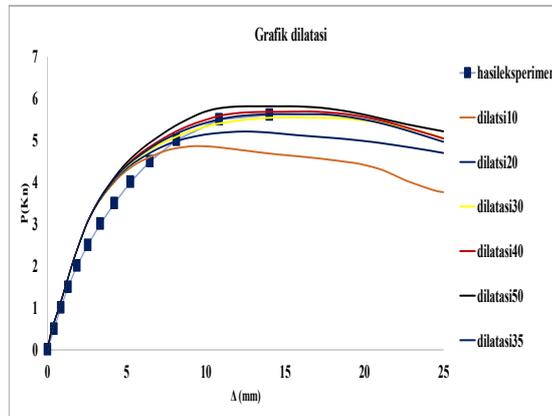


Gambar 5 Hasil analisis pengaruh ukuran mesh

Berdasarkan hasil analisis ukuran mesh yang cocok digunakan pada penelitian ini adalah ukuran mesh 27 mm.

3.2. Pengaruh parameter besar sudut dilatasi pada hasil studi parametrik

Pada analisis ini dicoba besar sudut dilatasi yang mendekati hasil eksperimen. Ukuran besar sudut dilatasi yang digunakan 10,20,30,35,40 dan 50° yang hasilnya dapat dilihat pada Gambar 8.

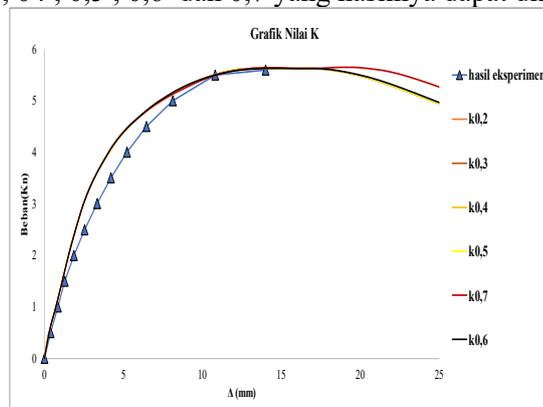


Gambar 6 Hasil analisis pengaruh sudut dilatasi

Berdasarkan hasil analisis ukuran besar sudut dilatasi yang cocok digunakan pada penelitian ini adalah ukuran 35°.

3.3. Pengaruh parameter K pada hasil studi parametrik

Pada analisis ini dicoba besar parameter K yang mendekati hasil eksperimen. Besar parameter K yang digunakan 0,2 , 0,3 , 0,4 , 0,5 , 0,6 dan 0,7 yang hasilnya dapat dilihat pada Gambar 9.

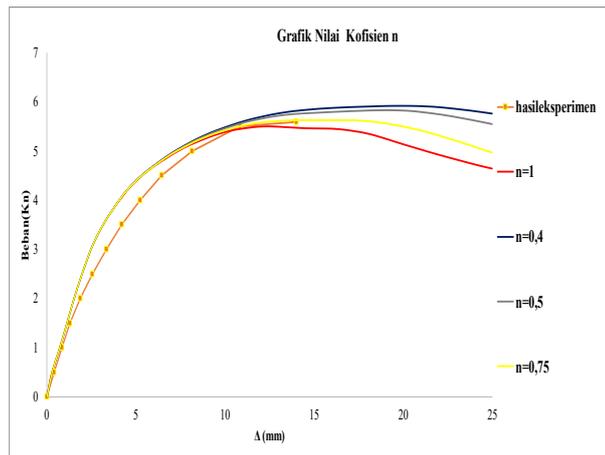


Gambar 7 Hasil analisis pengaruh parameter K

Berdasarkan hasil analisis parameter K yang cocok digunakan pada penelitian ini adalah parameter K dengan nilai 0,6.

3.4. Pengaruh koefisien n pada model persamaan tegangan-regangan Tarik

Pada analisis ini dicoba besar koefisien n pada model persamaan tegangan-regangan tarik yang mendekati hasil eksperimen. Besar koefisien n yang digunakan 0,4, 0,5, 0,75, dan 1 yang hasilnya dapat dilihat pada Gambar 10.

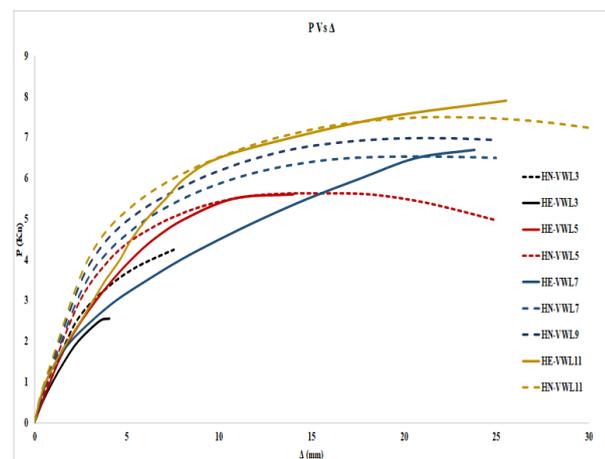


Gambar 8 Hasil analisis pengaruh koefisien n pada model persamaan tegangan-regangan tarik

Berdasarkan hasil analisis nilai koefisien n yang cocok digunakan pada penelitian ini adalah koefisien n dengan nilai 0,75.

3.5. Perbandingan hasil eksperimental dan hasil perhitungan secara numerik

Hasil yang di modelkan menggunakan abaqus kemudian dibandingkan dengan hasil eksperimen untuk melihat perbedaan hasil penelitian secara numerik dan hasil eksperimen, hasil tersebut dapat dilihat pada gambar 11 dan tabel 4 dibawah ini:



Gambar 9 Grafik perbandingan hasil eksperimental dan hasil perhitungan secara numerik

Tabel 4 Perbandingan hasil eksperimen dan hasil perhitungan secara numerik

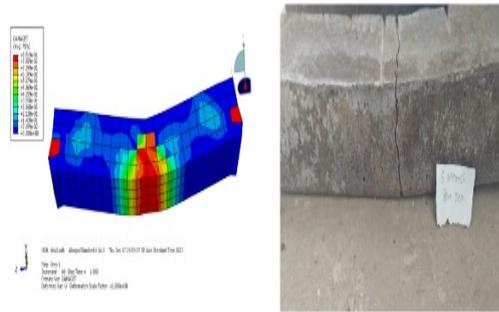
Jumlah lapisan	P Eksperimen (kN)	P Numerik (kN)	Δ maksimum (mm)	% perbedaan hasil eksperimen dan hasil numerik
3	2.56	3.360	4.07	31.26%
5	5.60	5.626	14.02	0.46%
7	6.70	6.510	23.84	2.84%
9	-	6.983	-	-
11	7.90	7.455	25.55	5.64%

Berdasarkan gambar 11 dan tabel 4. diatas dapat dilihat bahwa variasi jumlah lapisan wiremesh pada penelitan secara numerik dan hasil eksperimen berpengaruh terhadap kekuatan balok ferrogeopolymer. Pada balok ferrogeopolymer dengan variasi 3 lapisan wiremesh nilai *displacement* maksimum hasil eksperimen dapat dicapai perhitungan secara numerik sebelum grafik mengalami trend penurunan tetapi pada variasi 5, 7 dan 11 lapisan wiremesh dicapai pada saat

grafik mengalami ternd penurunan. Pada gambar 4.32 dan tabel 4.14 diatas dapat dilihat bahwa peningkatan kekuatan balok ferrogopolymer karena variasi jumlah lapisan wiremesh hasil perhitungan secara numerik dan hasil eksperimen cenderung sama. Kemiringan grafik tangensial awal pada balok ferrogopolymer hasil perhitungan secara numerik dan hasil eksperimen juga cenderung sama. Pada variasi 3 lapisan wiremesh perbedaan antara hasil eksperimen dan hasil perhitungan secara numerik ialah 31,26%, pada variasi 5 lapisan wiremesh sebesar 0,46%, pada variasi 7 lapisan wiremesh sebesar 2,84% dan pada variasi 11 lapisan wiremesh sebesar 5,64%.

3.6. Perbandingan letak keretakan

Jika dibandingkan dengan hasil eksperimen maka pola keretakan pada hasil studi parametrik keretakan terjadi pada tengah bentang balok yang dapat dilihat pada gambar 12 dibawah ini:



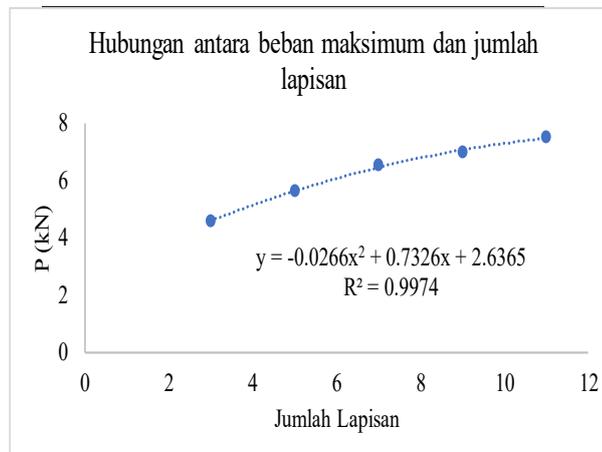
Gambar 10 Perbandingan pola keretakan hasil eksperimen dan hasil perhitungan secara numerik

3.7. Hubungan antara jumlah lapisan dan beban maksimum

Hasil perhitungan secara numerik kemudian diambil beban maksimum lalu dibuat kedalam bentuk grafik dan dibuat persamaan regresinya. Grafik dan tabel hubungan antara jumlah lapis dan beban maksimum dapat dilihat pada gambar 13 dan tabel 5 dibawah ini:

Tabel 5 Hubungan jumlah lapis dan beban makasimum

Jumlah lapisan	P Maksimum (kN)
11	7.503
9	6.983
7	6.529
5	5.628
3	4.586



Gambar 11 Hubungan jumlah lapis dan beban maksimum

Berdasarkan gambar 13 ditunjukkan bahwa semakin banyak jumlah lapisan wiremesh maka semakin meningkat kekuatan balok ferrogopolymer. Model regresi yang di dihasilkan dari grafik

hubungan jumlah lapis dan beban maksimum dengan model regresi polinomial orde 2, persamaannya adalah $y = -0,0266x^2 + 0,7326x + 2,6365$ dengan nilai $R^2 = 0,9974$.

4. Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan hasil perhitungan secara numerik dengan bantuan *software Abaqus* pada balok ferrogopolymer dengan variasi 3,5,7,9,11 lapisan wiremesh dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada variasi 3 lapisan wiremesh balok ferrogopolymer hasil eksperimen dan hasil perhitungan secara numerik mempunyai perbedaan sebesar 31,26%, variasi 5 lapisan wiremesh 0,46%, variasi 7 lapisan wiremesh 2,81% dan pada variasi 11 lapisan wiremesh 5,64%.
2. Semakin banyak jumlah lapisan semakin menambah kekuatan namun peningkatan kekuatan tidak signifikan.
3. Model persamaan yang di hasilkan dari penelitian ini adalah regresi polinomial orde 2, persamaannya adalah $y = -0,0266x^2 + 0,7326x + 2,6365$ dengan nilai $R^2 = 0,9974$.

Dari hasil penelitian ini terdapat beberapa hal yang dapat dijadikan saran antara lain:

1. Bagi peneliti selanjutnya, yang ingin melanjutkan penelitian mengenai ferro-geopolimer balok mortar berbahan dasar *fly ash*, disarankan untuk menambah variasi jumlah tulangan yang digunakan untuk mengetahui batas maksimum nilai kuat lentur yang dicapai pada masing-masing variasi lapisan wiremesh.
2. Dikarenakan program abaqus tidak memiliki satuan awal yang dijadikan acuan dalam memodelkan elemen, maka perlu adanya konsisten dalam memasukan nilai parameter, sehingga pada saat running program, program tidak mengalami kegagalan dalam melakukan analisis.

Ucapan terima kasih

Penulis menyadari bahwa tanpa bimbingan, dorongan, dan bantuan dari berbagai pihak, penelitian ini tidak dapat terselesaikan. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pihak-pihak baik langsung maupun tidak langsung membimbing dan mengarahkan sehingga terselesaikan artikel ini.

Daftar Pustaka

- CEB-FIP. (1990). *Structural concrete. introduction- design proces- materials*, Vol 1 hal 214-252.
- Lubalu, P. s. (2018). *Study kuat lentur balok ferrogopolymer yang di rawat dengan metode curing*. Kupang: Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana.
- Simatupang, P. H. (2017). *Uji eksperimen mortar ferrogopolymer*. Kupang: Researchgate.
- Simatupang, P. H. (2018). *PENGARUH VARIASI PERHITUNGAN TEGANGAN DAN REGANGAN KOLOM BETON BERTULANG TERHADAP DAKTILITAS PENAMPANG TAKTERKEKANG*. Kupang: Jurusan teknik sipil, fakultas sains dan teknik, universitas nusa cendana.
- Simatupang, P. H. (2018). *Stress Intensity Factor of Concrete Elements In Mesoscopic Scale Using 2D Model of Madina*. Kupang : Researchgate.
- Simatupang, Partogi H. (2018). *Saluran Irigasi Pracetak Ferrogopolymer Untuk Mendukung Irigasi Lahan Kering Kepulauan di Provinsi NTT*. Kupang: Kemenristekdikti 112/UN15.19/LT/2018.
- Voyiadjis, G. Z., Taqieddin, Z. N., & Kattan, P. I. (2008). *Int. J. Plast. Anisotropic Damage-Plasticity Model for Concrete*, Vol.24, no.10, hal 1946-1965.

