

Analisis Perilaku Geser Balok Beton Bertulang dengan Metode Elemen Hingga Non-Linear

Alfisyahrin¹Mochammad Afifuddin²Rudiansyah Putra³

¹Mahasiswa, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh 23111, Indonesia

^{2,3}Jurusan Teknik Sipil, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh 23111, Indonesia.

email : alfisyahrin1996@gmail.com

Abstract

Shear analysis of a structural element should be given special attention because the shear failure occurs suddenly without warning in advance is in contrast to the collapse due to the bending marked by the melting of the tensile state (under reinforced condition). This research was conducted with the aim to identify the behavior of shear reinforced concrete slab by using ATENA V5 software based on finite element and the result was compared with experimental research. The results of ATENA V5 numerical analysis show values which are close to the experimental results. The ultimate load on BMT Normal HSC beam showed a difference of 3.16% and ultimate deflection of 11.34% while in BK-25 beam, ultimate load showed a difference of 15.88% and ultimate deflection of 19.87%. For the beam BN obtained shear capacity of 226 kN with a deflection of 7.281 mm. The pattern of beam destruction on the numerical model resembles the pattern of destruction of the experimental model. ATENA V5 numerical analysis results show that all the modeled beams fail to shear, as planned.

Keywords: Concrete Reinforced Beam, Shear Capacity, Finite Element Method, ATENA V5

Abstrak

Analisis geser suatu elemen struktural perlu mendapat perhatian khusus dikarenakan keruntuhan akibat geser terjadi secara tiba-tiba tanpa peringatan terlebih dahulu berbeda halnya dengan keruntuhan akibat lentur yang ditandai terlebih dahulu oleh lelehnya tulangan tarik (kondisi under reinforced). Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui perilaku geser balok beton bertulang dengan menggunakan software ATENA V5 yang berbasis elemen hingga dan hasilnya dibandingkan dengan penelitian eksperimental. Hasil analisis numerik ATENA V5 menunjukkan nilai yang mendekati dengan hasil eksperimental. Beban ultimit pada balok BMT Normal HSC menunjukkan perbedaan sebesar 3,16% dan lendutan ultimit sebesar 11,34% sedangkan pada balok BK-25, beban ultimit menunjukkan perbedaan sebesar 15,88% dan lendutan ultimit sebesar 19,87%. Untuk balok BN diperoleh kapasitas geser sebesar 226 kN dengan lendutan sebesar 7,281 mm. Adapun pola kehancuran balok pada model numerik menyerupai pola kehancuran model eksperimental. Hasil analisis numerik ATENA V5 menunjukkan bahwa semua balok yang dimodelkan gagal terhadap geser sesuai dengan yang direncanakan.

Kata Kunci : Balok Beton Bertulang, Kapasitas Geser, Metode Elemen Hingga, ATENA V5

1. Pendahuluan

Sejumlah penelitian terhadap beton telah banyak dilakukan diantaranya penelitian mengenai sifat mekanis beton seperti kuat tekan beton, kuat tarik beton, kuat tarik lentur beton dan analisis perilaku gesernya. Untuk melakukan penelitian tersebut tidak sedikit biaya dan waktu yang dibutuhkan belum lagi ketersediaannya alat dan bahan serta tenaga kerja yang dibutuhkan. Dengan berkembangnya ilmu pengetahuan dan teknologi di bidang *software*, permasalahan tersebut dapat teratasi salah satunya dengan menggunakan *software* ATENA V5 yang berbasis elemen hingga. Metode elemen hingga merupakan prosedur numerik yang bisa dilakukan untuk menyelesaikan berbagai permasalahan fisik dalam bidang *engineering*.

Penelitian ini menggunakan *software* numerik metode elemen hingga ATENA dengan tujuan untuk melihat pola retak serta menganalisis secara mendalam perilaku geser dari balok beton bertulang. Hal ini

dilakukan untuk membandingkan seberapa jauh perbedaan dari hasil yang telah dilakukan secara eksperimental di laboratorium dengan pengujian yang dilakukan secara numerik menggunakan *software* ATENA. Dimana kedepannya diharapkan pengamatan pola retakan pada suatu elemen struktural dapat dilakukan secara numerik tanpa menghabiskan biaya yang besar dan waktu yang banyak untuk pengujian di laboratorium

Hasil analisis numerik ATENA V5 menunjukkan nilai yang tidak jauh berbeda dengan hasil eksperimental. Beban ultimit pada balok BMT Normal HSC menunjukkan perbedaan sebesar 3,16% dan lendutan ultimit sebesar 11,34% sedangkan pada balok BK-25, beban ultimit menunjukkan perbedaan sebesar 15,88% dan lendutan ultimit sebesar 19,87%. Pola kehancuran pun demikian, hasil analisis numerik ATENA V5 memberikan pola kehancuran yang menyerupai dengan pola kehancuran balok model eksperimental. Pada model eksperimental, pola

kehancuran balok yang terjadi adalah balok gagal terhadap geser yang ditandai dengan retak miring curam yang menjalar dari titik tumpuan ke pusat pembebanan. Pola kehancuran yang sama juga ditunjukkan dari hasil simulasi numerik ATENA V5. Kegagalan geser yang terjadi pada balok juga ditunjukkan berdasarkan analisis kapasitas momen lenturnya dimana momen lentur yang didapat dari analisis numerik lebih kecil dari hasil perhitungan teoritis. Untuk balok BN diperoleh kapasitas geser sebesar 226 kN dengan lendutan ultimit sebesar 7,281 mm. Retak pertama terjadi pada beban 49 kN dengan lendutan sebesar 0,397 mm

2. Tinjauan Kepustakaan

2.1 Geser Balok Beton Bertulang

Menurut Nawy[1] perilaku balok beton bertulang pada keadaan runtuh karena geser sangat berbeda dengan keruntuhan karena lentur. Balok yang hancur karena geser kehancurannya secara tiba-tiba (getas) tanpa adanya gejala-gejala proses keruntuhan terlebih dahulu.

Menurut McCormac[2], kekuatan geser nominal (V_n) sebagai jumlah dari kekuatan yang diberikan oleh beton dan tulangan geser dapat dihitung dengan menggunakan persamaan,

$$V_n = V_c + V_s \dots\dots\dots 1)$$

dimana :

- V_n = kekuatan geser (kg/cm²)
- V_c = kekuatan geser akibat beton (kg) ; dan
- V_s = kekuatan geser akibat tegangan geser (kg).

Menurut SNI 2847-2013[3] mengenai persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung, kapasitas kemampuan beton (tanpa penulangan geser) untuk menahan gaya geser dapat dihitung dengan menggunakan persamaan,

$$V_c = 0,17 \lambda \sqrt{f'_c} b_w d \dots\dots\dots 2)$$

dimana :

- V_c = kapasitas geser beton (N) ;
- λ = untuk beton normal diambil 1 ($\lambda=1$) ;
- f'_c = kuat tekan beton (MPa) ;
- b_w = lebar balok (mm) ; dan
- d = tinggi efektif penampang balok(mm).

Untuk menghitung besarnya kapasitas geser yang disediakan oleh tulangan sengkang untuk menahan gaya geser dihitung dengan persamaan,

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{s} \dots\dots\dots (3)$$

dimana :

- V_s = kapasitas geser yang disediakan oleh tulangan sengkang (N) ;
- A_v = luas penampang tulangan sengkang (mm²);
- f_y = kuat luluh tulangan geser (MPa) ;
- d = tinggi efektif penampang balok (mm) ; dan
- s = jarak pusat ke pusat batang tulangan geser (mm)

2.2 Kuat Lentur Balok Beton Bertulang

Nawy[1] menyatakan analisis lentur balok beton bertulang rangkap menyangkut penentuan kuat nominal momen suatu penampang (M_n) dengan nilai $a, b, d, d', A_{s1}, A_{s'}, f'_c$ dan f_y dapat ditulis dengan persamaan,

$$M_{n1} = A_{s1} \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) \dots\dots\dots 4)$$

$$M_{n2} = A_{s'} \cdot f_y \cdot \left(d - d' \right) \dots\dots\dots 5)$$

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} \dots\dots\dots 6)$$

tinggi blok tegangan beton :

$$a = \frac{A_{s1} \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} \dots\dots\dots 7)$$

letak garis netral :

$$c = \frac{\alpha}{\beta} \dots\dots\dots 8)$$

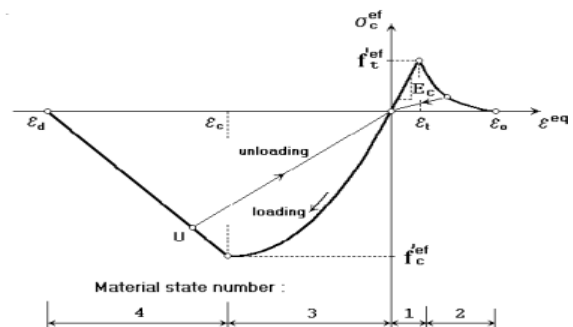
dimana:

- M_n = kuat nominal momen lentur (kg.cm) ;
- a = tinggi balok tegangan beton (cm) ;
- c = letak garis netral (cm) ;
- d = jarak dari serat terluar ke pusat tulangan tarik (cm) ; dan
- d' = jarak dari serat tekan terluar ke pusat tulangan tekan (cm).

2.4 Model Konstitutif Beton

Beton merupakan material yang bersifat non-linier bahkan dalam kondisi beban layan sekalipun. Oleh karena itu model konstitutif khusus untuk analisis elemen hingga struktur beton perlu dikembangkan. Model konstitutif beton dalam ATENA diambil dari model konstitutif SBeta yang dikembangkan oleh pembuat program. Al Faridi[4].

Menurut Cervenka et al[5] perilaku non-linier beton pada tegangan biaksial dideskripsikan dengan tegangan efektif σ_c^{ef} dan regangan uniaksial ekivalen ϵ^{eq} . Pada umumnya tegangan efektif juga merupakan tegangan prinsipal. Regangan uniaksial ekivalen diperkenalkan untuk menghilangkan efek Poisson dalam pernyataan tegangan bidang. Regangan uniaksial ekivalen dapat dianggap sebagai regangan yang akan dihasilkan oleh tegangan σ_{ci} dalam pengujian uniaksial dengan modulus E_{ci} pada arah i . Diagram tegangan-regangan uniaksial ekivalen untuk beton dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Hukum tegangan-regangan uniaksial beton
 Sumber : Cervenka et al [5]

Nilai default parameter-parameter material beton dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter-Parameter Model Konstitutif Sbeta

Parameter	Rumus
Kuat tekan silinder beton	$f_c' = -0,85 f_{cu}'$
Kuat tarik	$f_t = 0,24 f_{cu}'^{\frac{2}{3}}$
Modulus elastisitas awal	$E_c = (6000 - 15,5 f_{cu}') \sqrt{f_{cu}'}$
Rasio Poisson	$\nu = 0,2$
Softening compression	$w_d = 0,0005 \text{ mm}$
Tipe tension softening	1-eksponensial, berdasarkan G_f
Kuat tekan beton retak	$c = 0,8$
Tension stiffening stress	$\sigma_{st} = 0$
Faktor retensi geser	Variabel
Tipe fungsi kegagalan tarik – tekan	linier
Energi fraktur G_f berdasarkan Vos (1983)	$G_f = 0,000025 f_t'^{ef} [\text{MN/m}]$
Faktor orientasi lokalisasi regangan	$\gamma_{\max} = 1,5$

Satuan yang dipakai adalah MPa.
Parameter yang tidak ditulis mempunyai default nol.

Sumber : Cervenka et al [33]

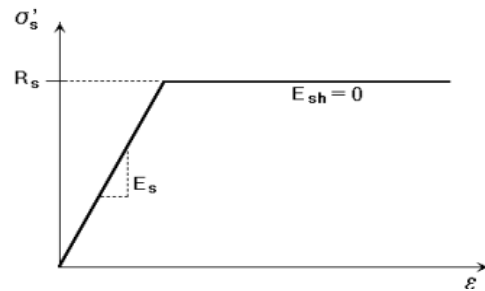
2.5 Model Konstitutif Tulangan

Tulangan dapat dimodelkan dalam dua cara, yaitu diskrit dan *smear*. Tulangan diskrit adalah dalam bentuk batang tulangan dan dimodelkan dengan elemen truss. Tulangan *smear* adalah material komposit dan dapat dianggap sebagai material tunggal (hanya satu konstituen) pada elemen maupun satu atau lebih konstituen. Cervenka et al [7].

Al Faridi [4] menyatakan hubungan tegangan - regangan untuk baja tulangan bisa dimodelkan dalam dua cara, yaitu hukum bilinear dan hukum multi-linier.

2.5.1 Hukum bilinear

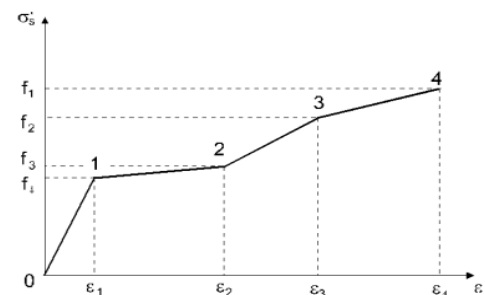
Hubungan tegangan-regangan bilinear dapat dilihat pada Gambar 2. Menurut Cervenka et al [6] bagian elastis mempunyai modulus elastisitas E_s , sedangkan bagian selanjutnya adalah kondisi plastis dengan kemiringan kurva adalah modulus *hardening* E_{sh} . Untuk kondisi plastis sempurna (*perfectly plastic*) nilai $E_{sh} = 0$.



Gambar 2. Hukum tegangan-regangan baja tulangan bilinear
Sumber : Cervenka et al [67]

2.5.2 Hukum multi-linier

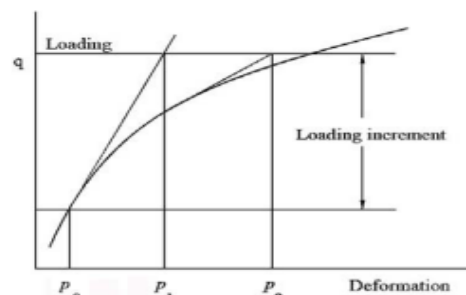
Menurut Cervenka et al [6] hukum multi-linier terdiri dari empat garis, seperti terlihat pada Gambar 3. Hukum ini mewakili empat bagian perilaku baja, yaitu *elastic*, *yield*, *strain hardening*, dan *fracture*. Keempat garis tersebut didefinisikan melalui empat titik yang telah ditentukan.



Gambar 3. Hukum tegangan-regangan baja tulangan multi-linier
Sumber : Cervenka et al [6]

2.6 Iterasi Newton-Rhapson

Konsep solusi persamaan non-linear dengan dengan Metode Newton-Rhapson dapat dilihat pada Gambar 4 berikut.



Gambar 4. Metode Newton-Rhapson
Sumber : Cervenka et al [201]

3. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan perangkat lunak berbasis elemen hingga yaitu ATENA Versi 5 yang mempunyai nomor lisensi No. 250-2016 untuk WR 556 khusus untuk menganalisis beban statik baik secara 2D dan 3D serta dibantu oleh *software* lainnya seperti *Autocad 2007* untuk kebutuhan menggambar dan untuk mendapatkan titik-titik sebagai *input* pada *software*

ATENA V5 dan *Microsoft Excel* 2013 untuk pengolahan dan perhitungan data.


ATENA adalah perangkat lunak yang terdiri dari beberapa paket program. Masing-masing paket program tersebut mempunyai fungsi dan perannya masing-masing dalam hal pemodelan dan analisis balok. Dalam hal ini digunakan perangkat ATENA 3D (PRE) untuk semua hal yang berkaitan dengan pemodelan, ATENA 3D (RUN) untuk *running* program dan hasil analisis dilihat dengan ATENA 3D (POST).

3.1 Pemodelan Balok Beton Bertulang

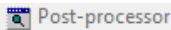
Seluruh operasi pemodelan dilakukan dengan program ATENA 3D (PRE). Program ATENA 3D (PRE) yang digunakan adalah versi 5. Adapun langkah-langkah pemodelan balok adalah sebagai berikut :

- pendefinisian geometri model ;
- input* data material ;
- pemodelan geometri ;
- pendefinisian tumpuan dan pembebanan (*loading*) ;
- meshing* elemen ;
- riwayat pembebanan dan parameter solusi ; dan
- titik monitoring.

3.2 Running Program

Setelah balok selesai dimodelkan maka langkah selanjutnya adalah *running* program (analisis non-linear). Analisis ini dilakukan dengan program ATENA 3D (RUN) melalui ATENA 3D yang dapat diakses dengan cara memilih pada menu bar tombol  yang terletak disudut atas kanan layar.

3.3 Hasil Analisis

Hasil analisis non-linear program ATENA terdiri dari data numeris dan data grafis. Data numeris berupa hasil respon struktur yang dipantau oleh titik monitoring sedangkan data grafis berupa pola retak, tegangan, regangan, dan sebagainya. Untuk membaca data hasil analisis ATENA 3D (RUN) dapat dibuka dengan cara memilih pada menu bar tombol  yang terletak disudut atas kanan layar.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Retak Awal yang Terjadi

Berdasarkan hasil analisis numerik ATENA V5 retak pertama dari balok BMT Normal HSC terjadi pada beban 43 kN dengan lendutan 0,4273 mm, pada balok BK-25 retak pertama terjadi pada beban 18 kN dengan lendutan 0,31 mm, dan untuk balok BN retak pertama terjadi pada beban 49 kN dengan lendutan 0,397 mm. Hasil analisis numerik ATENA V5 menunjukkan nilai yang mendekati dengan hasil eksperimental dimana retak pertama dari balok BMT Normal HSC terjadi pada beban 51,109 kN dengan lendutan 0,40 mm sedangkan balok BK-25 retak pertamanya terjadi pada beban 22,1 kN

dengan lendutan 0,23 mm. Hasil selengkapnya mengenai retak awal yang terjadi untuk ketiga balok dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan Beban dan Lendutan pada Retak Awal

Benda Uji	Beban (kN)		Lendutan (mm)	
	ATENA V5	Eksperimen	ATENA V5	Eksperimen
BMT				
Normal	43	51,109	0,4237	0,4
HSC				
BK-25	18	22,1	0,31	0,23
BN	49	-	0,397	-

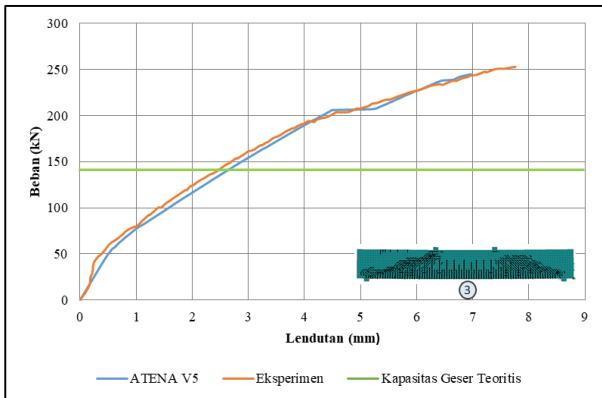
4.2 Beban dan Lendutan

Berdasarkan hasil analisis numerik ATENA V5 menunjukkan lendutan maksimum balok BMT Normal HSC pada LVDT 3 sebesar 6,969 mm, LVDT 1 dan LVDT 2 sebesar 2,999 mm dan 3,098 mm dengan beban maksimum sebesar 245 kN lebih besar dari hasil perhitungan teoritis yaitu 144,494 kN, pada balok BK-25 lendutan maksimum pada LVDT 2 sebesar 10,86 mm, LVDT 1 dan LVDT 3 sebesar 3,97 mm dan 3,83 mm dengan beban maksimum sebesar 142 kN lebih besar dari hasil perhitungan teoritis yaitu 139,662 kN dan untuk balok BN diperoleh lendutan maksimum pada LVDT 4 sebesar 7,281 mm, LVDT 1 dan LVDT 2 sebesar 2,652 dan 2,697 mm dengan beban maksimum 226 kN lebih besar dari hasil perhitungan teoritis yaitu 69,3206 kN.

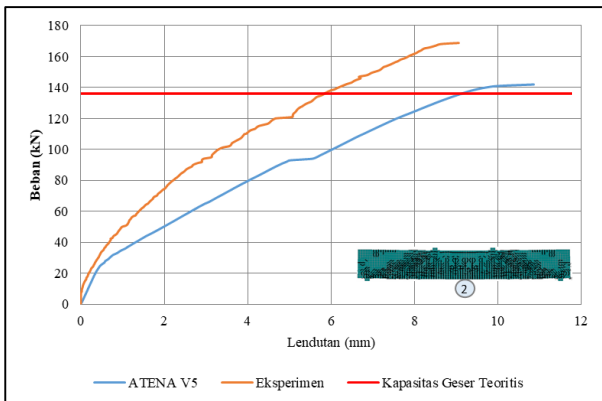
Berdasarkan Gambar 5 dapat dilihat perbedaan beban-lendutan antara hasil analisis numerik ATENA V5 dengan hasil eksperimental balok BMT Normal HSC dimana pada hasil eksperimental menunjukkan lendutan maksimum LVDT 3 sebesar 7,860 mm, lebih besar 11,34% dari hasil analisis numerik ATENA V5. Untuk balok BK-25 dapat dilihat pada Gambar 6, berdasarkan Gambar 6 lendutan maksimum balok BK-25 pada LVDT 2 sebesar 9,06 mm, lebih kecil 19,86% dari hasil analisis numerik ATENA V5. Selengkapnya mengenai persentase perbedaan beban dan lendutan ultimit antara hasil analisis numerik ATENA V5 dengan hasil eksperimental dapat dilihat pada Tabel 3. Grafik hubungan beban-lendutan untuk masing-masing LVDT di tengah bentang balok dari hasil analisis ATENA V5 dan eksperimental balok BMT Normal HSC, BK-25, dan BN dapat dilihat pada gambar 5 sampai 7 berikut. Seperti terlihat pada gambar dibawah, semua kapasitas geser ultimit balok lebih besar dari kapasitas geser teoritis baik dari hasil analisis numerik maupun eksperimental, hal ini menunjukkan bahwa semua balok dalam kondisi gagal terhadap geser.

Tabel 3. Perbandingan Beban dan Lendutan Ultimit

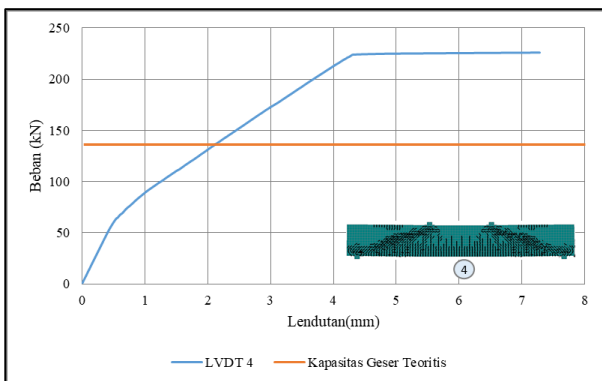
Benda Uji	Beban Ultimit (kN)		Perbedaan (%)	Lendutan Ultimit (mm)		Perbedaan (%)
	ATENA V5	Eksperimen		ATENA V5	Eksperimen	
	BMT Normal	245	252,997	3,16	6,969	7,860
HSC BK-25	142	168,8	15,88	10,86	9,06	19,87
BN	226	-	-	7,281	-	-



Gambar 5. Grafik hubungan beban-lendutan LVDT 3 balok BMT Normal HSC



Gambar 6. Grafik hubungan beban-lendutan LVDT 2 balok BK-25



Gambar 7. Grafik hubungan beban-lendutan LVDT 4 balok BN

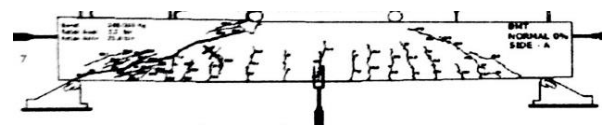
4.3 Pola Kehancuran

Retak pada balok akan terus bermunculan setelah retak awal terjadi sebagai akibat beban yang diberikan secara bertahap. Sejalan dengan penambahan beban yang diberikan, selain terjadi perpanjangan retak pada retak pertama, juga diikuti dengan timbulnya sejumlah retak baru pada daerah lentur dan geser. Adapun pola retak model numerik memiliki kesamaan dengan model eksperimental. Hasil eksperimental menunjukkan balok gagal terhadap geser yang ditandai dengan retak miring curam yang menjalar dari titik tumpuan ke pusat pembebanan. Hasil analisis numerik juga menggambarkan pola retak seperti pola retak hasil eksperimental. Pada Tabel 4 dapat dilihat bahwa hasil analisis numerik ATENA V5 menunjukkan balok mengalami keruntuhan terhadap geser dimana rasio perbandingan kapasitas geser hasil analisis ATENA V5 terhadap kapasitas teoritis semuanya lebih besar dari satu. Untuk momen lentur, rasio perbandingan ultimit terhadap nominal harus dibawah satu jika kategori gagal terhadap geser. Hasil analisis ATENA V5 menunjukkan rasio perbandingan momen ultimit terhadap teoritis juga dibawah satu sehingga dapat disimpulkan kegagalan yang diharapkan pada balok telah sesuai dengan yang direncanakan yaitu balok gagal terhadap geser.

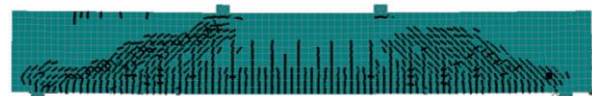
Tabel 4. Perbandingan Hasil Perhitungan Teoritis dengan Hasil Pengujian ATENA V5

Benda Uji	Perbandingan Hasil									Jenis Keruntuhan
	Beban Maksimum (kN)		Momen Lentur (kNm)			Kuat Geser (kN)				
	ATENA Teoritis	ATENA V5	ATENA V5 / Teoritis	ATENA V5 / Teoritis	ATENA V5 / Teoritis	ATENA V5 / Teoritis	ATENA V5 / Teoritis	ATENA V5 / Teoritis		
BMT Normal	144,5	245	1,69	120,76	85,75	0,71	72,25	122,5	1,69	Geser
HSC BK-25	139,6	142	1,02	73,21	49,7	0,68	69,83	71	1,02	Geser
BN	138,9	226	1,63	96,5	79,1	0,82	69,45	113	1,63	Geser

Perbandingan pola retak antara model numerik dengan model eksperimental untuk balok BMT Normal HSC dan BK-25 dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 8. Pola kehancuran balok BMT Normal HSC eksperimen



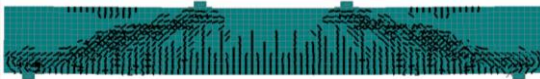
Gambar 9. Pola kehancuran balok BMT Normal HSC ATENA V5



Gambar 10. Pola kehancuran balok BK-25 eksperimen



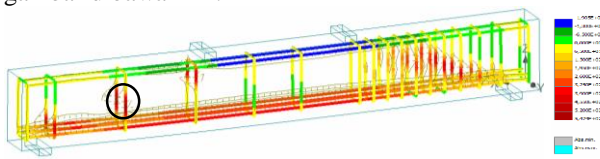
Gambar 11. Pola kehancuran balok BK-25 ATENA V5



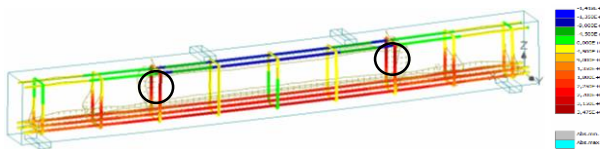
Gambar 12. Pola kehancuran balok BN ATENA V5

4.4 Tegangan dan Regangan

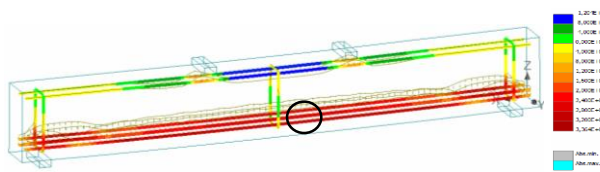
Data grafis berupa tegangan dan regangan balok BMT Normal HSC, BK-25, dan BN dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



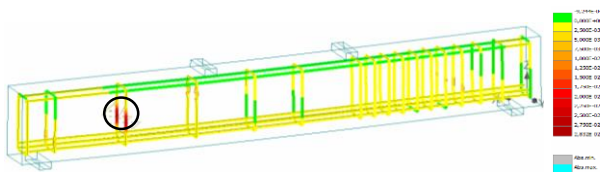
Gambar 13. Tegangan baja balok BMT Normal HSC



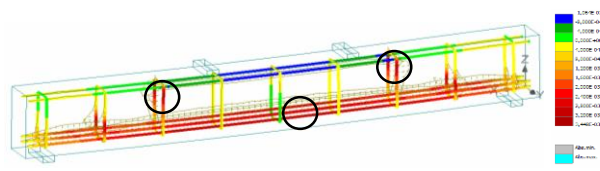
Gambar 14. Tegangan baja balok BK-25



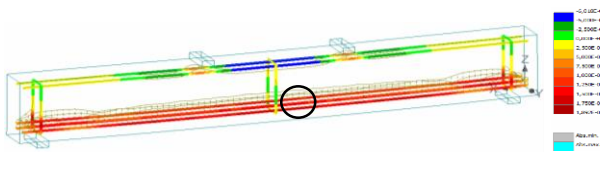
Gambar 15. Tegangan baja balok BN



Gambar 16. Regangan baja balok BMT Normal HSC



Gambar 17. Regangan baja balok BK-25



Gambar 18. Regangan baja balok BN

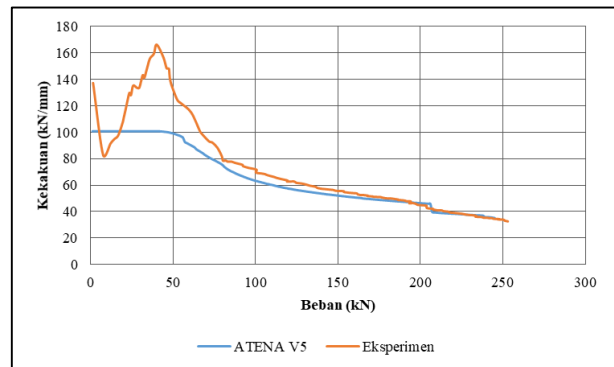
Adapun tegangan dan regangan maksimum baja dari ketiga balok terjadi pada daerah yang dilingkarkan. Untuk besarnya nilai maksimum tegangan dan regangan baja pada ketiga balok tersebut dapat dilihat pada Tabel 5 berikut.

Tabel 5. Tegangan dan Regangan Maksimum

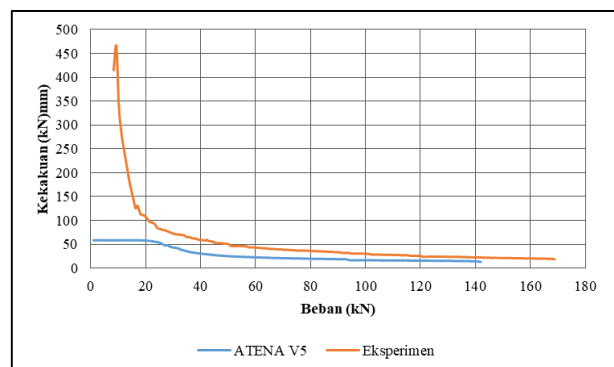
Benda Uji	Tegangan Maksimum (MPa)	Regangan Maksimum
BMT Normal	547,4	0,02832
HSC	347,5	0,003448
BK-25	336,4	0,001892

4.5 Kekakuan

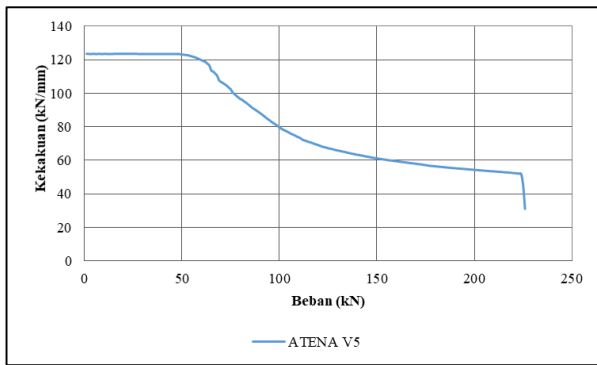
Dari grafik dapat dilihat pada saat tahap awal model eksperimen sudah terjadi penurunan kekakuan yang disebabkan oleh *interlock* antar material pembentuk beton itu sendiri dan rongga akibat tidak sempurnanya pelaksanaan pengecoran. Sukarno [8]. Sedangkan pada hasil numerik (garis mendatar) tampak belum terjadi penurunan kekakuan karena secara teoritis material beton dianggap homogen dan memang belum terjadi retak. Pada tahap berikutnya nilai kekakuan yang terjadi memiliki bentuk yang mirip. Secara eksperimental nilai kekakuannya melebihi nilai hasil numerik. Ini menunjukkan model eksperimen lebih kaku dibandingkan dengan model numerik.



Gambar 19. Kekakuan balok BMT Normal HSC



Gambar 20. Kekakuan balok BK-25



Gambar 21. Kekakuan balok BN

Perilaku yang sama juga ditunjukkan oleh balok BN. Pada tahap awal juga belum terjadi penurunan kekakuan dan setelah retak pertama terjadi kekakuan balok mulai menurun. Berdasarkan hasil perbandingan kekakuan model numerik balok BMT Normal HSC dan BK-25 terhadap model eksperimen diatas, besar kemungkinan kekakuan balok BN hasil pengujian eksperimen nantinya akan lebih besar dari model numerik

4.6 Pembahasan

Perbandingan hasil analisis numerik dengan eksperimental tidak menunjukkan perbedaan yang besar antara dua jenis analisis yaitu retak awal dan kurva hubungan beban dan lendutan. Mengenai kekakuan, hasil simulasi ATENA V5 menunjukkan kekakuan model numerik lebih kecil dibandingkan dengan kekakuan model eksperimental. Seperti yang terlihat pada Gambar 19 dan 20, garis kekakuan model eksperimental berada diatas model numerik. Hal yang sama juga ditunjukkan pada kurva hubungan beban-lendutan, garis hubungan beban-lendutan model eksperimental selalu berada diatas garis hubungan beban-lendutan model numerik. Indikasi ini menunjukkan model eksperimental lebih kaku jika dibandingkan dengan model numerik.

Berdasarkan pola retak yang muncul, dapat diketahui bahwa model numerik menggambar retak secara ideal. Walaupun pada penelitian eksperimen ada retak-retak halus yang tidak tergambar karena tidak kasat mata, pada ATENA justru retak-retak halus tersebut akan tergambar. Analisis numerik tidak memberikan hasil yang sama persis dengan hasil eksperimental. Mengenai perbedaan tersebut, bisa jadi penyebabnya ada pada ikatan antara tulangan dengan beton. Dalam analisis numerik, ikatan perkuatan diambil sempurna secara *default*. Berdasarkan hasil analisis numerik balok BMT Normal HSC dan BK-25 yang telah dibandingkan dengan hasil eksperimental, kemungkinan hasil eksperimental balok BN akan mendekati hasil dari analisis numerik ATENA V5.

5. Kesimpulan

Dari hasil penelitian analisis perilaku geser balok beton bertulang dengan metode elemen hingga non-linear menggunakan program ATENA V5 dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Hasil analisis numerik ATENA V5 menunjukkan semua balok gagal terhadap geser sesuai dengan yang direncanakan.
2. Berdasarkan hasil analisis kekakuan, model eksperimental lebih kaku dibandingkan dengan model numerik.
3. Analisis numerik memberikan hasil hubungan beban-lendutan yang mendekati hasil eksperimental.
4. Bentuk pola retak model analisis numerik menyerupai pola retak eksperimen.
5. ATENA V5 menggambarkan pola retak secara lebih detail. Dalam penelitian eksperimen tidak akan didapati retak-retak halus yang tidak kasat mata sedangkan ATENA V5 akan menampilkan pola retak tersebut
6. Berdasarkan analisis numerik ATENA V5 kegagalan yang diharapkan baik untuk balok BMT Normal HSC, balok BK-25 dan balok BN sudah sesuai dengan yang direncanakan yaitu balok gagal terhadap geser.
7. Hasil yang diperoleh dari simulasi numerik ATENA V5 pada balok BN dapat menjadi referensi dan acuan bagi peneliti yang akan melakukan penelitian di laboratorium.

6. Daftar Kepustakaan

- [1] Nawy, E.G., 1998, Beton Bertulang, Penerbit Erlangga, Bandung.
- [2] McCormac, J.C. ,2001, Desain Beton Bertulang, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- [3] SNI 2847 – 2013 Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- [4] Al Faridi, S. , 2010, Modul Pelatihan Analisis Non-Linier Elemen Hingga Dengan ATENA 2.1.8 Demo, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- [5] Cervenka, J., Prochazkova, Z., dan Tereza Sajdlova, 2016, ATENA Program Documentation Part 4-2-Tutorial for Program ATENA 3D, Prague, Cervenka Consulting s.r.o., Prague.
- [6] Cervenka, V., dan Jan Cervenka , 2016, ATENA Program Documentation Part 2-2-User's Manual for Program ATENA 3D Version 5.4.1, Cervenka Consulting s.r.o., Prague