

ANALISIS PERKUATAN LENTUR BALOK BETON BERTULANG DENGAN LAPISAN SEMEN *GROUTING* PADA DAERAH TEKAN MENGGUNAKAN *SOFTWARE ATHENA*

Barkhia Yunas *¹
Mutia Alius ²
Yuni Purnama Syafri ³

^{1,2,3} Universitas Adzkie

*e-mail: barkhiayunas@adzkie.ac.id¹, mutiaalius.ti@adzkie.ac.id², yunimarsyaf884@gmail.com³

Abstrak

Beton bertulang adalah material komposit yang menggabungkan kekuatan tekan beton dengan kekuatan tarik baja tulangan, namun dapat mengalami penurunan kualitas akibat beban berlebih, kondisi lingkungan ekstrem, dan penuaan. Balok beton bertulang sering mengalami kerusakan seperti retakan dan korosi tulangan, yang dapat menurunkan kapasitas lentur. Semen grouting adalah metode perbaikan dengan menginjeksi campuran semen cair ke dalam retakan atau rongga beton untuk meningkatkan kekuatan dan kekakuan struktur. Metode ini efektif untuk perbaikan jembatan, terowongan, dan bangunan bertingkat. Penggunaan semen grouting pada daerah tekan balok bertulang berpotensi meningkatkan kapasitas beban lentur. Analisis menggunakan software ATHENA memungkinkan penilaian akurat mengenai pengaruh semen grouting terhadap perilaku balok beton bertulang, seperti distribusi tegangan, defleksi, dan kapasitas beban maksimum. Dengan demikian, metode penguatan ini dapat meningkatkan kapasitas lentur dan integritas struktural balok beton bertulang.

Kata kunci: Beton bertulang, kapasitas lentur, semen grouting, perbaikan struktur, ATHENA, balok beton, peningkatan kekuatan

Abstract

Reinforced concrete is a composite material that combines the compressive strength of concrete with the tensile strength of steel reinforcement. However, it can degrade over time due to excessive loads, extreme environmental conditions, and aging. Common damages include cracks, rebar corrosion, and decreased material strength. Reinforced concrete beams, widely used in construction, have flexural capacity that determines structural strength and durability. Cement grouting is a repair method involving the injection of liquid cement mixture into cracks or voids in concrete to enhance structural strength and stiffness. This method is effective for repairing bridges, tunnels, and high-rise buildings. Applying cement grouting to the compression zones of reinforced concrete beams has the potential to significantly increase their flexural capacity. Analysis using ATHENA software allows for accurate assessment of the impact of cement grouting on the behavior of reinforced concrete beams under flexural loads, including stress distribution, deflection, and maximum load capacity. Thus, this reinforcement method can improve the flexural capacity and structural integrity of reinforced concrete beams.

Keywords: Reinforced concrete, flexural capacity, cement grouting, structural repair, ATHENA, concrete beams, strength enhancement.

PENDAHULUAN

Beton bertulang adalah material komposit yang menggabungkan kekuatan tekan beton dengan kekuatan tarik baja tulangan. Namun, seperti semua material konstruksi, beton bertulang dapat mengalami penurunan kualitas dan kerusakan seiring waktu akibat berbagai faktor, seperti beban berlebih, kondisi lingkungan yang ekstrem, dan proses penuaan material. Kerusakan ini dapat berupa retakan, korosi tulangan, dan penurunan kekuatan material. Balok beton bertulang merupakan salah satu komponen struktur yang paling banyak digunakan dalam konstruksi bangunan. Kapasitas lentur dari balok beton bertulang menjadi parameter penting yang menentukan kekuatan dan ketahanan struktur terhadap beban yang bekerja. Semen grouting adalah metode perbaikan dan penguatan struktur beton yang melibatkan injeksi campuran semen cair ke dalam retakan, celah, atau rongga dalam beton untuk meningkatkan kekuatan dan

kekakuan struktur (Amri, 2015). Teknik ini telah digunakan secara luas dalam berbagai aplikasi konstruksi, termasuk perbaikan jembatan, terowongan, bangunan bertingkat, dan infrastruktur lainnya

Semen grouting menawarkan solusi efektif untuk masalah ini dengan cara mengisi dan menyegel retakan serta rongga, sehingga mengembalikan integritas struktural dan meningkatkan kapasitas beban. Selain itu, semen grouting juga dapat digunakan untuk memperkuat daerah tekan dalam elemen beton bertulang, seperti balok dan kolom, yang sering kali menjadi titik kritis dalam desain struktural (PU, 2002).

Dalam konteks analisis kapasitas lentur balok beton bertulang, penggunaan semen grouting pada daerah tekan memiliki potensi untuk secara signifikan meningkatkan kapasitas beban lentur. Daerah tekan pada balok beton bertulang adalah area yang mengalami tegangan tekan terbesar, dan dengan memperkuat daerah ini menggunakan semen grouting, diharapkan kapasitas lentur balok dapat ditingkatkan (Dipohusodo, 1994). Penggunaan software seperti ATHENA untuk simulasi dan analisis memungkinkan penilaian yang akurat mengenai pengaruh semen grouting terhadap perilaku balok beton bertulang di bawah beban lentur. Melalui simulasi ini, dapat dipelajari bagaimana peningkatan kekuatan dan kekakuan akibat semen grouting mempengaruhi distribusi tegangan, defleksi, dan kapasitas beban maksimum balok.

Dalam usaha meningkatkan kapasitas lentur, berbagai metode penguatan telah dikembangkan, salah satunya adalah penggunaan lapisan semen *grouting* pada daerah tekan balok. Penggunaan lapisan semen *grouting* pada daerah tekan balok diharapkan dapat meningkatkan kapasitas lentur balok beton bertulang. Kemudian analisis mengenai penelitian ini dapat dilakukan penggunaan *software ATHENA* sebagai alat bantu dalam menganalisis untuk memberikan gambaran yang lebih detail dan akurat tentang besarnya kapasitas lentur balok beton bertulang serta perilaku balok beton bertulang yang diperkuat dengan lapisan semen *grouting* (Dipohusodo, 1994).

Selanjutnya untuk mengetahui pengaruh pemasangan *semen grouting* dan variasi jumlah tulangan terhadap kapasitas lentur balok beton bertulang pada daerah tekan menggunakan *software ATHENA* dilakukan beberapa desain uji untuk memperoleh hasil yang komprehensif mengenai peningkatan kapasitas lentur akibat penggunaan teknik tersebut. Adapun penelitian yang disimulasikan ini mempunyai ruang lingkup seperti (Amri, 2015): 1) pemodelan balok persegi tumpuan sendi-rol dengan ukuran 125 mm x 250 mm x 2300 mm dan tidak ada sengkang dibagian tengah balok dan sengkang D-10-100 dibagian tumpuan, 2) Balok beton bertulang dengan dipasangkan lapisan semen *grouting* pada daerah tekannya, 3) memvariasikan model simulasi sebanyak 6 buah sampel dengan 4 buah diantaranya dengan perkuatan lapisan semen *grouting* dan 2 buah tanpa perkuatan lapisan semen dibagian tekannya, 4) semen *Grouting* yang dimodelkan diproduksi oleh Sika Indonesia, 5) Analisis pengaruh ketebalan lapisan *semen grouting* terhadap kapasitas lentur balok beton bertulang pada daerah tekannya, 6) simulasi perhitungan menggunakan analisis *software* dari *Athena*.

METODE PENELITIAN

Jenis Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan analisis *Software Athena 2D* dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh pemasangan semen *grouting* dan variasi jumlah tulangan terhadap kapasitas lentur yang ditambahkan pada permukaan beton bertulang yang diletakkan pada daerah tekannya (Cristian Sabau, Cosmin Popescu, Gabriel Sas, Jacob Wittrup Schmid, Thomas Blankvard, 2018). Metode yang digunakan yaitu dengan memodelkan pemasangan semen *grouting* pada daerah tekan balok dengan memvariasikan ketebalan semen *grouting*. Benda uji ini dimodelkan sebanyak 6 balok berpenampang persegi dengan menggunakan tumpuan sendi dan tumpuan rol yang terdiri dari 2 balok tanpa perkuatan dan 4 balok dengan perkuatan. Masing-masing balok tersebut memiliki ukuran penampang 125mm x 250mm x 2300mm yang dibebani

simetris dengan dua buah gaya terpusat sejauh 800 mm dari masing-masing tumpuan dan jarak antara kedua beban terpusat sebesar 400 mm.

Model uji yang digunakan berjumlah 6 balok dengan menggunakan sengkang D10-100 yang divariasikan berdasarkan ketebalan pemasangan semen *grouting* dan jumlah tulangan tarik baja yang digunakan diantaranya sebagai berikut (Debataraja, 2019):

1. BLC-02 (Tulangan 3D13 tanpa perkuatan semen *grouting*)
2. BLC-03 (Tulangan 5D13 tanpa perkuatan semen *grouting*)
3. BSC02-2 (Tulangan 3D13 menggunakan perkuatan semen *grouting* dengan tebal 80mm)
4. BSC02-3 (Tulangan 5D13 menggunakan perkuatan semen *grouting* dengan tebal 80mm)
5. BSC03-2 (Tulangan 3D13 menggunakan perkuatan semen *grouting* dengan tebal 120mm)
6. BSC03-3 (Tulangan 5D13 menggunakan perkuatan semen *grouting* dengan tebal 120mm)

Data yang diperoleh dari hasil analisis *software Athena* adalah grafik beban dan lendutan. Selanjutnya dianalisis untuk mengetahui pengaruh pemasangan lapisan semen *grouting* pada daerah tekan dan variasi jumlah tulangan terhadap kapasitas lentur balok beton bertulang. Oleh karena itu pengamatan juga dilakukan secara visual untuk mengamati pola retak serta menganalisis kapasitas lentur balok dengan analisis lentur SNI 03-2847-2013, uji eksperimental dan analisis *Software Atena 2D*.

Pembuatan Model/Desain Balok Beton Bertulang

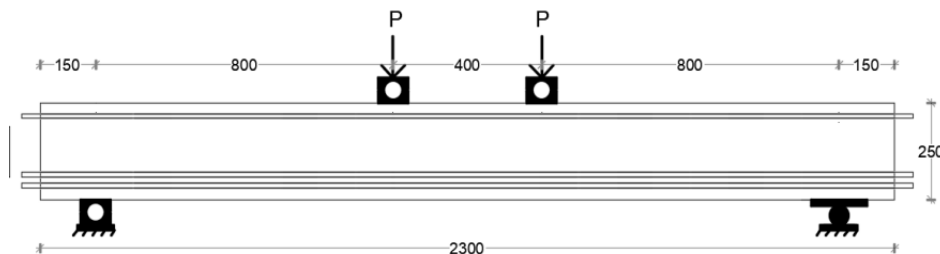
Model/Desain Balok Beton Bertulang:

Penelitian ini menggunakan model balok persegi dengan menggunakan tulangan baja sesuai SNI 2047-2013 dengan memvariasikan semen *grouting* sebagai perkuatan pada daerah tekannya. Model balok yang digunakan dapat dilihat pada tabel 3.1 dibawah ini :

Tabel 1. Ragam benda uji yang digunakan

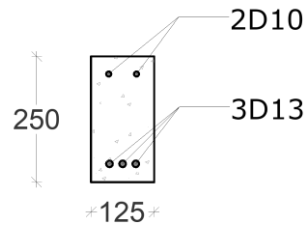
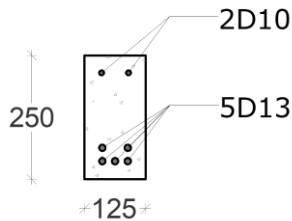
Kode Benda Uji	Dimensi Balok (mm)	Jumlah Tulangan	Posisi Tulangan	Tebal Perkuatan	
				80 mm	120 mm
BLK-02	125 x 250x 2300	Balok Kontrol Lentur		-	
BLK-03					
BSG 2-02		3D13	Bawah	v	-
BSG 2-03		5D13	Bawah	v	-
BSG 3-02		3D13	Bawah	-	v
BSG 3-03		5D13	Bawah	-	v

Benda uji tanpa sengkang tanpa penambahan semen *grouting* dinamakan dengan BLK-02, dan BLK-03. Berikut profil memanjang balok yang dapat dilihat pada **gambar 3.1** di bawah ini:

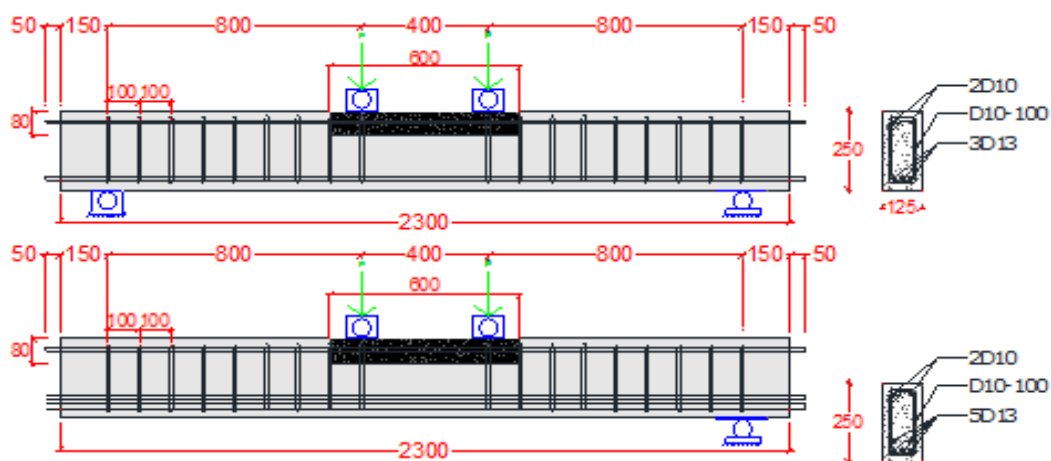
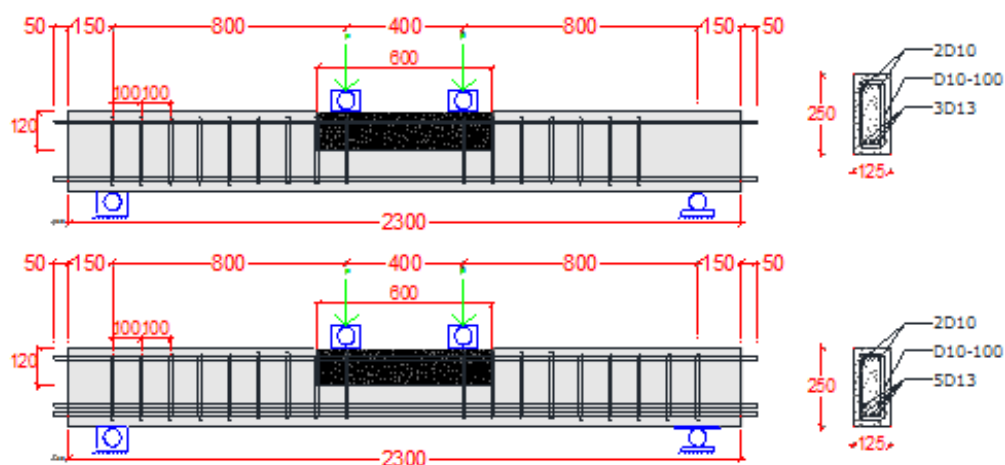


Gambar 3. Model simulasi Tanpa Penambahan lapisan semen *grouting*

Profil penampang balok BLK-02, dan BLK-03 dapat dilihat pada gambar 3 di bawah ini:

**Gambar 4.** Penampang Balok BLC-02**Gambar 5.** Penampang Balok BLC-03

Benda uji balok beton bertulang sengkang dengan penambahan semen *grouting* yang akan diamati dinamakan dengan BSG2-(02,03), dan BSG3-(02,03). Berikut profil balok beton bertulang dengan penambahan semen *grouting* yang dapat dilihat pada gambar di bawah ini

**Gambar 6.** Model simulasi BSG2 (02,03) dengan pemasangan lapisan semen grouting lapisan 80 mm**Gambar 7.** Model simulasi BSG 3 (02,03) dengan penambahan lapisan semen grouting 120 mm

Dari uraian model benda uji di atas, dilihat benda uji yang digunakan berdimensi (125x250x2300) mm dengan tumpuan sederhana (*simple beam*) yang dibebani simetris dengan dua buah gaya P sejauh a sebesar 600 mm dari masing-masing tumpuan dan jarak antara kedua beban P sebesar 400 mm. Dimensi tulangan longitudinal, jumlah serta spasi tulangan transversal sama, namun yang membedakan adalah jumlah tulangan longitudinal pada masing-masing model uji (Fikri Alami, 2014).

Penambahan Lapisan Semen Grouting

- Menentukan ketebalan dan material lapisan semen grouting yang akan diterapkan pada daerah tekan balok.
- Mengaplikasikan lapisan semen grouting pada model balok beton bertulang yang sudah didesain. lapisan semen grouting pada model balok beton bertulang yang sudah didesain.

Simulasi model Balok Beton Bertulang dengan software Athena

Pemodelan Digital Balok Beton Bertulang

- Menggunakan software ATHENA untuk membuat model digital balok beton bertulang.
- Memasukkan data material (beton, baja tulangan, dan semen grouting) ke dalam software sesuai dengan spesifikasi yang telah ditentukan

Pengaturan Kondisi Batas dan Pembebanan:

- Menentukan kondisi batas (*boundary conditions*) balok, seperti penumpuan sederhana atau jepit.
- Menentukan jenis dan besar beban lentur yang akan diterapkan pada balok dalam simulasi.

Simulasi Beban Lentur

- Melakukan simulasi pembebanan lentur pada balok beton bertulang tanpa lapisan semen grouting.
- Melakukan simulasi beban lentur pada balok beton bertulang dengan lapisan semen grouting.

Analisis Data menggunakan software Athena:

Pengumpulan data dari hasil simulasi software Athena

- Mengumpulkan data hasil simulasi berupa tegangan, regangan, dan defleksi pada balok beton bertulang.
- Membandingkan hasil simulasi antara balok dengan dan tanpa lapisan semen grouting

Perhitungan Kapasitas Lentur dari analisis Athena

- Menghitung kapasitas lentur balok beton bertulang berdasarkan data tegangan dan regangan yang diperoleh dari hasil simulasi.
- Membandingkan peningkatan kapasitas lentur pada balok dengan lapisan semen grouting terhadap balok tanpa lapisan semen *grouting*.

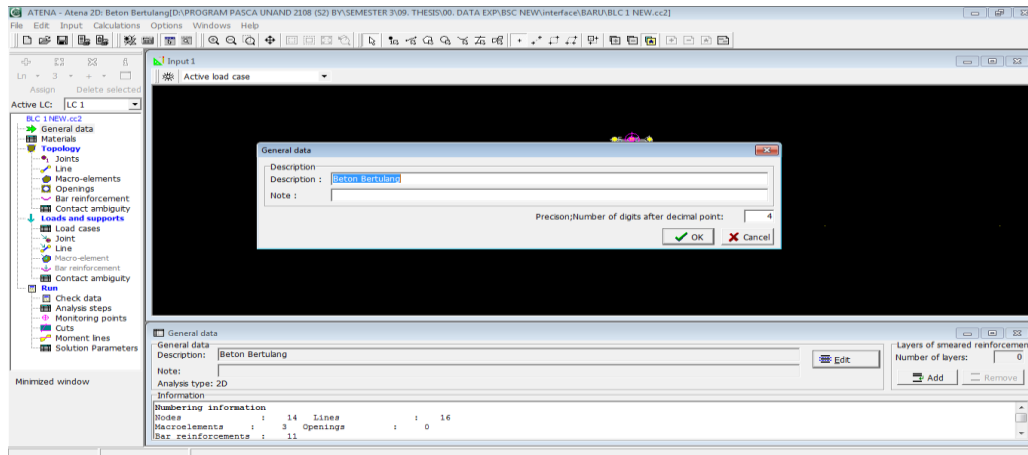
Proses Analisis ATENA 2D V5

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 2D (PRE) untuk semua hal yang berkaitan dengan pemodelan, Atena 2D (RUN) untuk *running* program dan hasil analisis dilihat dengan Atena 2D (POST) (MacGregor, 1997).

Pemodelan Balok Beton Bertulang ATENA 2D V5

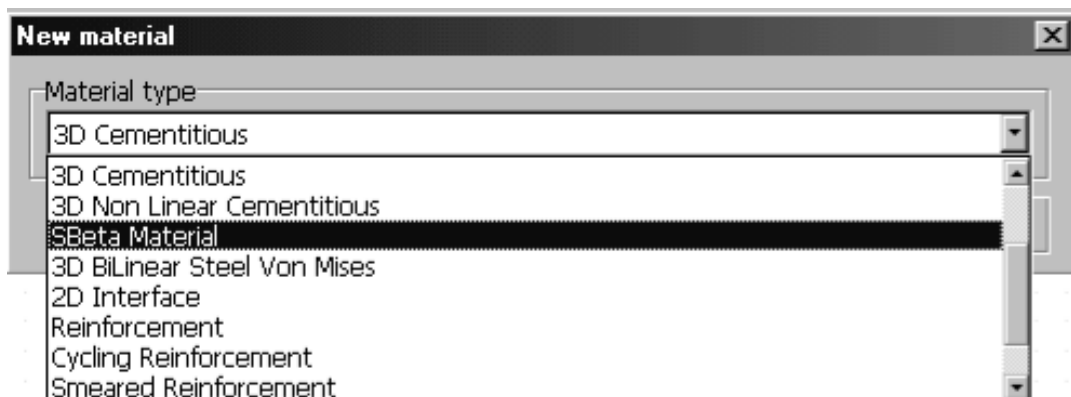
Program Atena 2D (PRE) yang digunakan adalah versi 5. Adapun langkah –langkah pemodelan balok adalah sebagai berikut :

- a. Pendefinisian model geometri;
Model geometri adalah untuk menggambarkan geometri struktur, sifat material dan kondisi batasnya. Model analitik untuk analisis elemen hingga akan dibuat selama pra-pemrosesan dengan bantuan sepenuhnya generator mesh otomatis.

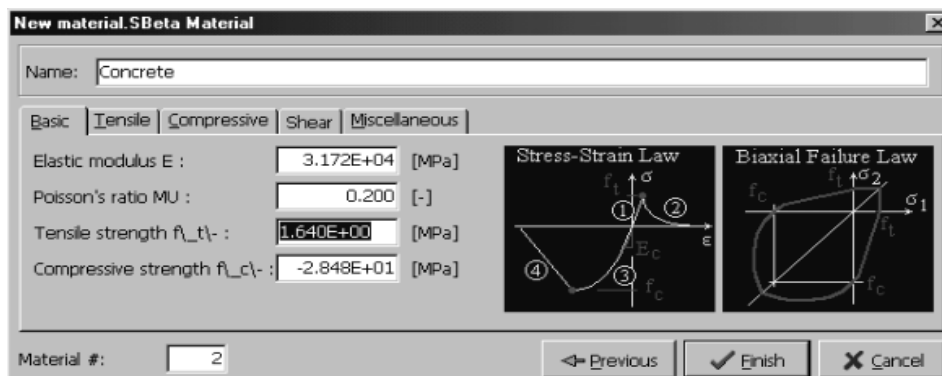


Gambar 8. Model Geometric

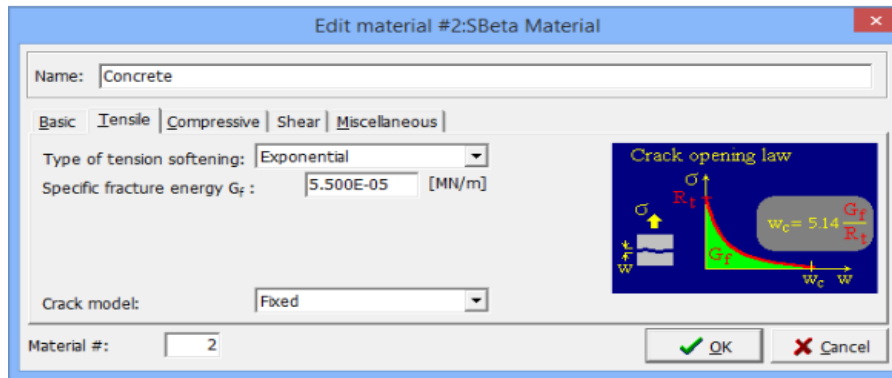
- b. Input data material
Untuk meentukan tiga jenis material suatu bidang elastis tegangan bahan untuk pelat baja pada titik dukungan dan pemuatan, bahan beton untuk balok dan bahan penguat



Gambar 9. Input material



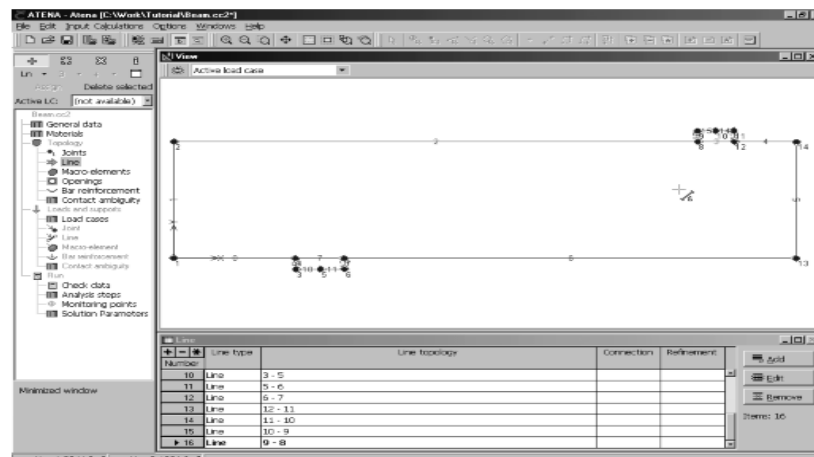
Gambar 10. Jendela dialog untuk definisi properti dasar untuk bahan SBETA.



Gambar 11. Properti tarik untuk bahan SBETA.

c. Pemodelan geometri ;

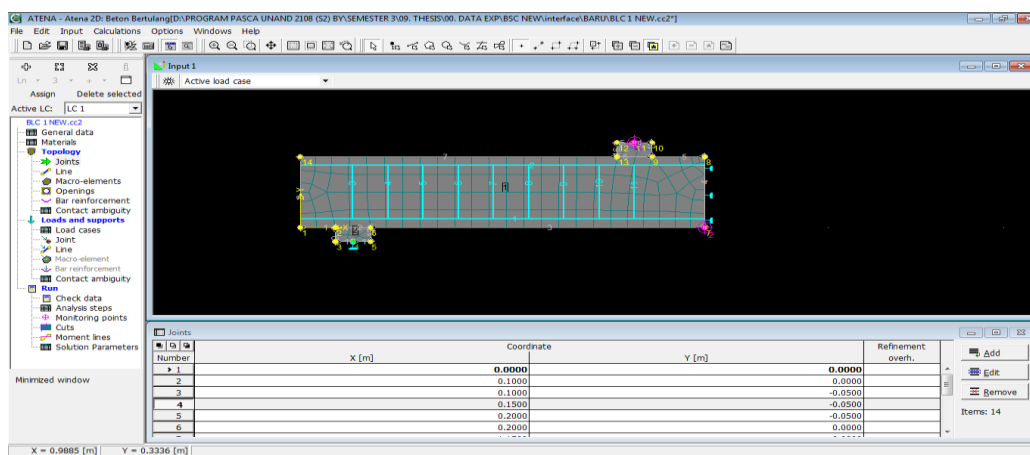
Pemilihan model material SBETA untuk balok beton. Model SBETA sesuai dengan formulasi bahan, yang diimplementasikan dalam program SBETA. Pemilihan model bahan SBETA untuk balok beton. Model SBETA sesuai dengan formulasi materi, yang diimplementasikan dalam program SBETA.



Gambar 12 Model a. geometrical joint dan b. geometrical line

d. Pendefinisian tumpuan dan pembebanan (Support and Action) ;

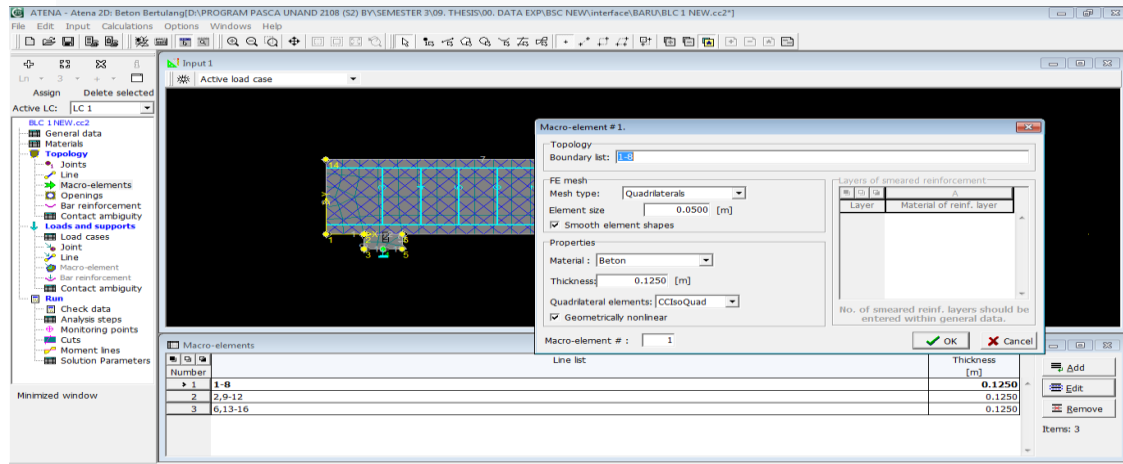
Pendefinisian tumpuan dilakukan sesuai dengan tumpuan benda uji dengan memberikan jenis tumpuan sendi, rol dan juga kentilever



Gambar 13. Tumpuan dan pembebanan

e. *Meshing* elemen ;

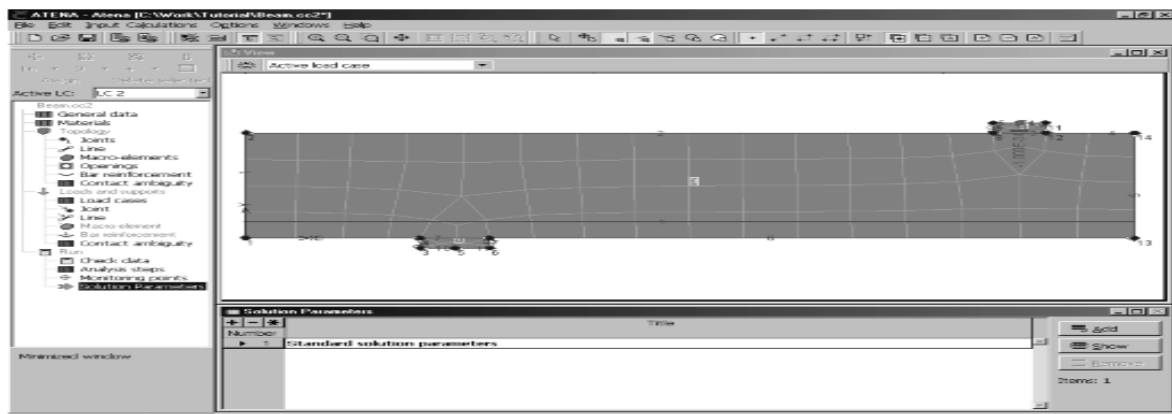
Berdasarkan ukuran elemen yang ditentukan untuk setiap elemen makro, elemen elemen hingga dihasilkan secara otomatis. Yang dibuat ukuran mesh dapat dikontrol oleh perbaikan lokal di sekitar garis geometris dan sambungan.



Gambar 14. Makro elemen

f. Riwayat pembebanan dan parameter solusi ;

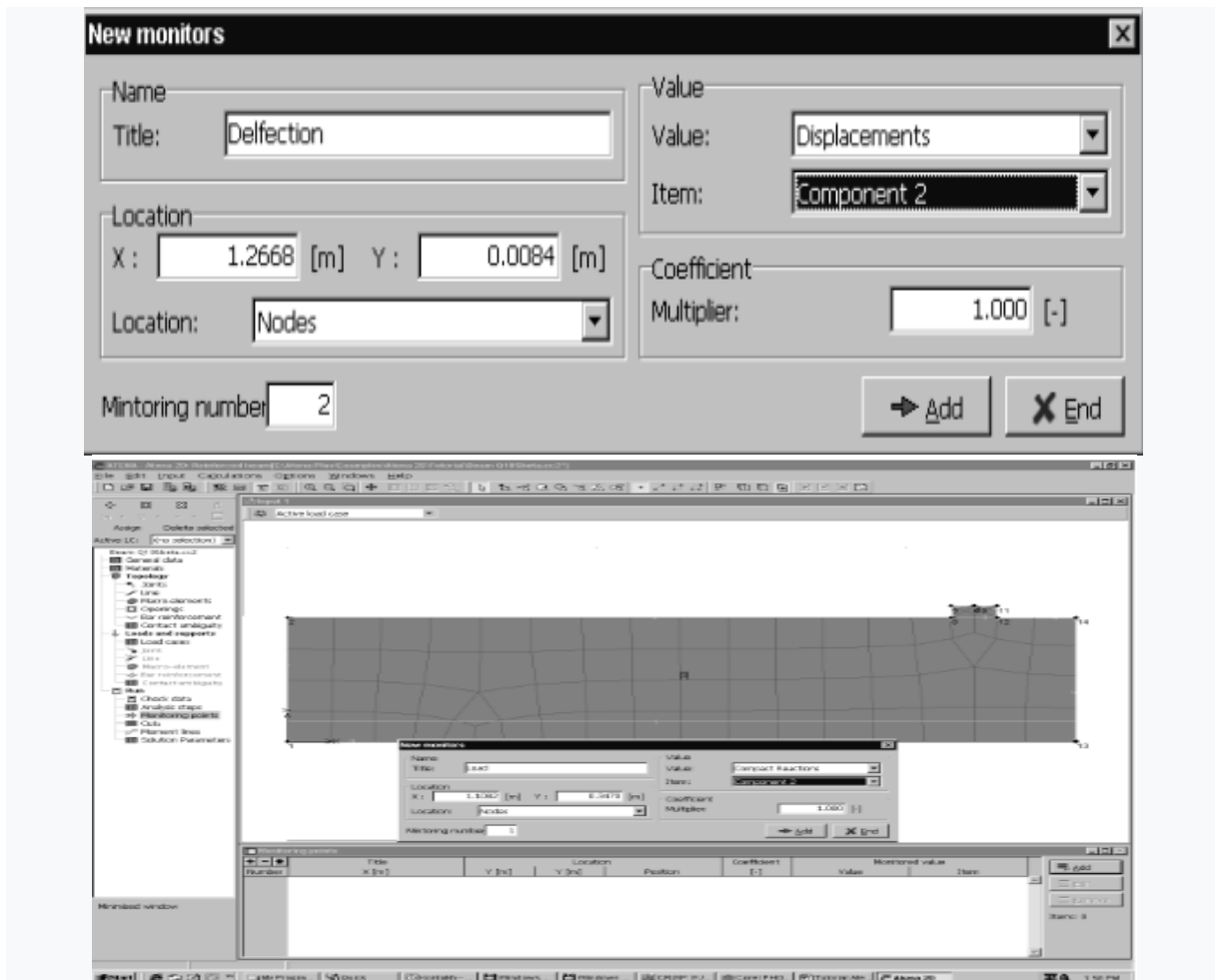
Riwayat pemuatan terdiri dari langkah-langkah pemuatan. Setiap langkah pemuatan didefinisikan sebagai sebuah kombinasi kasus beban, yang telah didefinisikan sebelumnya. Setiap langkah memuat berisi juga definisi parameter solusi, yang menentukan metode solusi yang akan digunakan selama langkah-langkah memuat.



Gambar 3.18 Parameter solusi

g. Titik monitoring.

analisis nonlinier, penting untuk memantau gaya, perpindahan atau tekanan dalam model. Data yang dipantau dapat memberikan informasi penting tentang keadaan struktur.



Gambar 3.19 Monitoring point

Running Program

Setelah balok selesai dimodelkan maka langkah selanjutnya adalah *running* program (analisis nonlinear). Analisis ini dilakukan dengan program ATENA 2D (RUN) melalui ATENA 2D yang diakses dengan cara memilih pada menu bar tombol yang terletak disudut atas kanan layar program atena

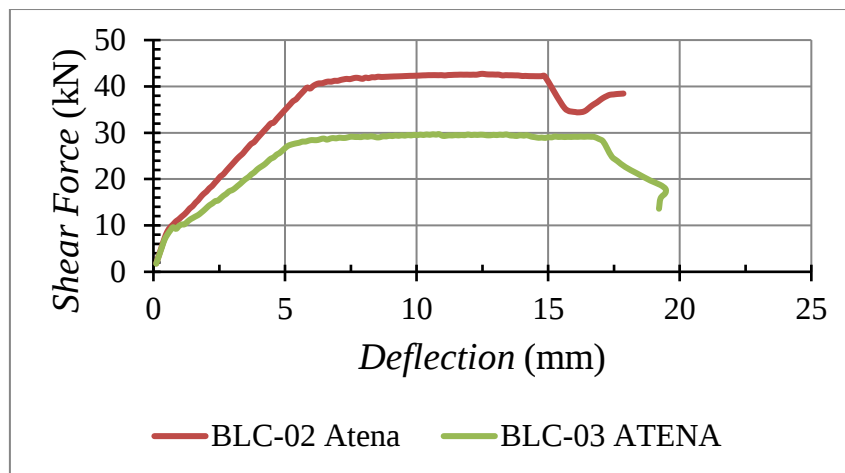
HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis perbandingan beban dan lendutan terhadap kuat lentur balok beton bertulang tanpa perkuatan dan dengan perkuatan semen *grouting* menggunakan

Analisis pengaruh pemasangan lapisan semen *grouting* balok beton bertulang dan variasi jumlah tulangan terhadap kapasitas lentur balok beton bertulang menggunakan metode analitis ATENA 2D, dimana pemodelan ke enam balok dibuat pada *software* ini dan menghasilkan nilai kapasitas lentur, lendutan, daktilis sesuai dengan perbandingan perkuatan pada saat simulasi penggunaan semen *grouting* (Nawy, 1998)

Perbandingan beban dan lendutan hasil ATENA 2D pada, BLC-02, dan BLC-03 Sebagai Balok Tanpa Menggunakan Perkuatan semen *grouting*

Balok BLC-02 merupakan balok lentur kontrol yang menggunakan tulangan tarik 3D13 dan tulangan sengkang D10-100, Balok BLC-03 merupakan balok lentur kontrol yang menggunakan tulangan tarik 5D13 dan tulangan sengkang D10-100. Hasil dari analisis *software athena* dapat dilihat pada grafik 8 berikut (Pratama, 2019).



Grafik 1 Grafik Perbandingan Beban dan Lendutan Balok tanpa Perkuatan

Grafik diatas dapat dilihat bahwa terjadi ketidaksamaan dari grafik beban dan lendutan. Perbandingan lendutan dan beban hasil perhitungan pada software atena dapat dilihat di tabel 4.20 berikut

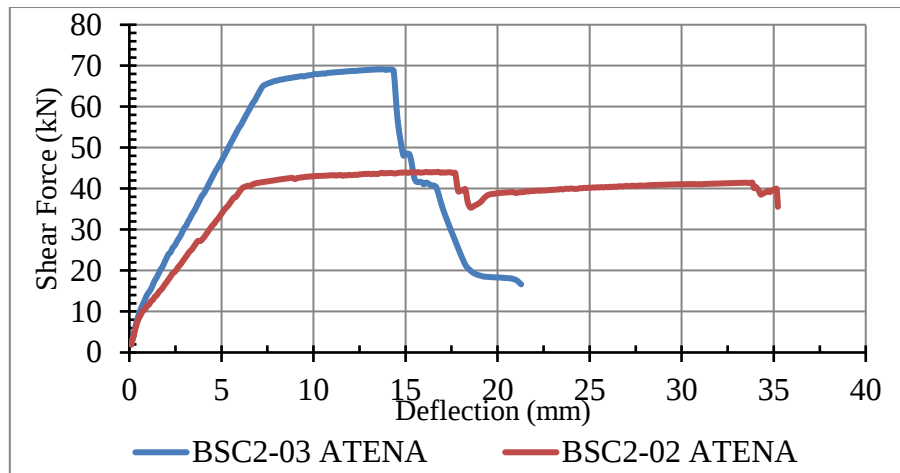
Tabel 2. Hasil *Software Atena* berupa Beban Ultimit dan Lendutan ultimit balok kontrol

Perbandingan Lendutan dan Beban Balok Kontrol			
Tipe Balok	Rasio Tulangan	Beban Ultimit(P_{ult})	Lendutan Ultimit (δ_{ult})
		(kN)	(mm)
BLC-02	0,012747	42,72	12,51
BLC-03	0,021246	63,88	7,56

Berdasarkan grafik dan tabel di atas dapat dilihat bahwa variasi rasio tulangan tarik pada balok menghasilkan grafik yang bervariasi juga. Nilai beban maksimum menjadi semakin besar jika adanya penambahan rasio tulangan tarik. Balok BLC – 02 dengan rasio tulangan 0,012747 dapat menghasilkan lendutan ultimit sebesar 12,51 mm dan menjadi balok yang mengalami lendutan paling besar diantara ketiga balok tersebut dengan beban ultimit sebesar 42,72 kN. Selanjutnya untuk balok BLC – 03 dengan rasio tulangan 0,021246 dapat menghasilkan lendutan ultimit sebesar 7,56 mm dan beban ultimit sebesar 63,88 kN.

Perbandingan beban dan lendutan hasil ATENA 2D BSC2-02, dan BSC2-03 sebagai balok dengan perkuatan menggunakan semen grouting dengan tebal lapisan 80 mm

Balok BSC2-02 merupakan balok dengan tebal perkuatan 80 mm yang menggunakan tulangan tarik 3D13 dan tulangan sengkang D10-100, Balok BSC2-03 merupakan balok dengan tebal perkuatan 80 mm yang menggunakan tulangan tarik 5D13 dan tulangan sengkang D10-100. Hasil dari simulasi dapat dilihat pada grafik 2 dan tabel 3. (Wu, 2018)



Grafik 2. Perbandingan Beban dan Lendutan Balok Menggunakan Perkuatan dengan tebal lapisan 80 mm

Grafik diatas dapat dilihat bahwa terjadi ketidaksamaan dari grafik beban dan lendutan. Perbandingan lendutan dan beban hasil perhitungan pada software Atena dapat dilihat ditabel 3 berikut

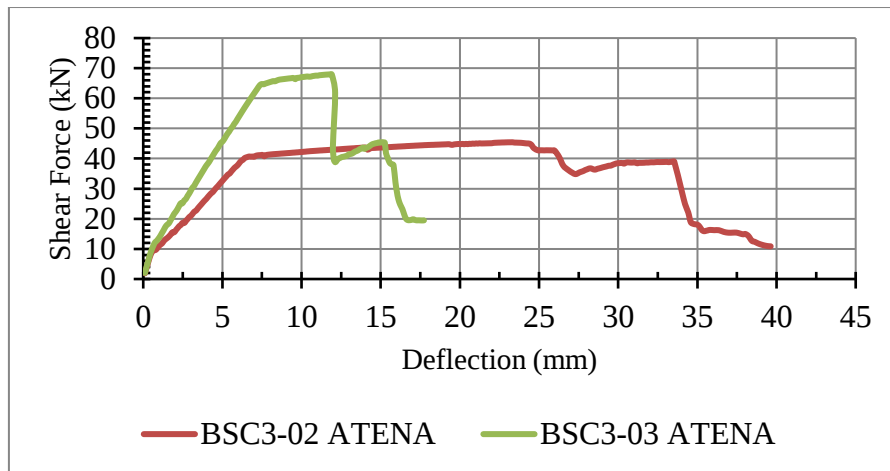
Tabel 3. Perbandingan beban dan lendutan balok menggunakan perkuatan dengan ketebalan 80 mm *Software Athena*

Perbandingan Lendutan dan Beban Balok dengan tebal 80 mm			
Tipe Balok	Rasio Tulangan	Beban Ultimit(<i>P_{ult}</i>)	Lendutan Ultimit (<i>δ_{ult}</i>)
		(kN)	(mm)
BSC 2-02	0,012747	44,09	16,80
BSC 2-03	0,021246	69,12	13,81

Berdasarkan grafik dan tabel di atas dapat dilihat bahwa variasi rasio tulangan tarik pada balok menghasilkan grafik yang bervariasi juga dimana nilai beban maksimum menjadi semakin besar jika adanya penambahan rasio tulangan tarik. Balok simulasi dengan nama BSC 2-02 dengan rasio tulangan 0,012747 dapat menghasilkan lendutan ultimit sebesar 16,80 mm dengan beban ultimit sebesar 44,09 kN. Selanjutnya untuk balok BSC2-03 dengan rasio tulangan 0,021246 dapat menghasilkan lendutan ultimit sebesar 13,81 mm dan beban ultimit sebesar 69,12 kN.

Perbandingan Hasil *Software Athena* BSC 3-02, dan BSC 3-03 sebagai balok dengan perkuatan menggunakan semen *grouting* dengan tebal lapisan 120 mm

Balok BSC 3-2 merupakan balok dengan tebal perkuatan 120 mm yang menggunakan tulangan tarik 3D13 dan tulangan sengkang D10-100, Balok BSC 3-03 merupakan balok dengan tebal perkuatan 120 mm yang menggunakan tulangan tarik 5D13 dan tulangan sengkang D10-100. Hasil dari pengujian balok di laboratorium dapat dilihat pada grafik 4.11 dan tabel 4.23.



Gambar 3. Grafik Perbandingan Beban dan Lendutan Balok Menggunakan Perkuatan dengan Ketebalan 120 mm

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa terjadi ketidaksamaan dari grafik beban dan lendutan. Perbandingan lendutan dan beban hasil eksperimental di laboratorium dapat dilihat di tabel 4 berikut

Tabel 4. Perbandingan Beban dan Lendutan Balok Menggunakan Perkuatan dengan Ketebalan 120 mm

Perbandingan Lendutan dan Beban Balok dengan tebal 120 mm			
Tipe Balok	Rasio Tulangan	Beban Ultimit (P_{ult})	Lendutan Ultimit (δ_{ult})
		(kN)	(mm)
BSC 3-01	0,008498	32,18	32,68
BSC 3-02	0,012747	45,41	23,33
BSC 3-03	0,021246	67,95	11,79

Berdasarkan grafik dan tabel di atas dapat dilihat bahwa variasi rasio tulangan tarik pada balok menghasilkan grafik yang bervariasi dimana nilai beban maksimum menjadi semakin besar jika adanya penambahan rasio tulangan Tarik. Balok BSC 3-02 dengan rasio tulangan 0,012747 dapat menghasilkan lendutan ultimit sebesar 23,33 mm dan beban ultimit sebesar 45,41 kN. Selanjutnya untuk balok BSC 3 -03 dengan rasio tulangan 0,021246 dapat menghasilkan lendutan ultimit sebesar 11,79 mm dan beban ultimit sebesar 67,95 kN.

Dapat disimpulkan bahwa Penggunaan lapisan semen *grouting* pada daerah tekan balok beton bertulang secara signifikan meningkatkan kapasitas lentur balok. Simulasi menunjukkan bahwa balok dengan lapisan semen *grouting* mampu menahan beban lentur yang lebih besar dibandingkan balok tanpa lapisan tersebut. Lapisan semen *grouting* membantu mendistribusikan tegangan tekan secara lebih merata pada daerah tekan balok. Hal ini mengurangi konsentrasi tegangan pada titik-titik tertentu dan meningkatkan ketahanan balok terhadap retak dan kerusakan

Persentase perbandingan beban dan Lendutan pada balok beton bertulang berdasarkan Analisis software ATENA 2D**Tabel 5.** Persentase nilai lendutan dari analisis ATENA 2D

Tipe Balok	Rasio Tulangan	Beban Ultimit(Pult)	Lendutan Ultimit (δ_{ult})	Δm	Persentase lendutan (δ_{ult}) (%)
		(kN)	(mm)	(mm)	
BLC-02	0,012747	42,72	12,51	1,66	1,53
BSC2-02	0,012747	44,09	16,8	5,95	5,48
BSC3-02	0,012747	45,41	23,33	12,48	11,50
BLC-03	0,021246	63,88	7,56	3,29	3,03
BSC2-03	0,021246	69,12	13,81	2,96	2,73
BSC3-03	0,021246	67,95	11,79	0,94	0,87

Dari tabel di atas dilihat persentase peningkatan lendutan pada balok dengan balok dengan tiga tulangan tarik adalah balok BSC3-02 sebesar 23,33 mm dengan persentase 11,50% selanjutnya untuk balok dengan lima tulangan tarik adalah balok BSC3-02 sebesar 13,81 mm dengan persentase 0,87%.

Dapat disimpulkan bahwasanya balok dengan lapisan semen grouting dan variasi tulangan pada daerah tekannya menunjukkan deformasi plastis yang lebih besar dan kemampuan menyerap energi yang lebih tinggi, yang keduanya merupakan indikator peningkatan daktilitas.

KESIMPULAN

Kesimpulan yang didapatkan dalam penelitian ini ialah Balok dengan tebal lapisan 120 mm memiliki lendutan yang paling tinggi diantara balok lainnya yaitu sebesar 18,25%. Pola retak lentur pada balok dengan perkuatan semen *grouting* lebih banyak dibandingkan dengan balok tanpa perkuatan semen *grouting*, Pemasangan lapisan semen *grouting* semakin meningkatkan daktilitas balok sebesar 10-15% sementara untuk kapasitas lentur dan kekakuan tidak mengalami kenaikan yang signifikan dan hanya mempunyai kenaikan 0-5%, Semakin besar rasio tulangan tarik yang digunakan maka semakin menambah kapasitas lentur balok sebesar 10% samapai 20% dan juga meningkatkan nilai kekakuan sebesar 60,77% pada balok beton bertulang, Nilai daktilitas yang diperoleh analisis menggunakan *software Atena 2D* dengan persentasi kenaikan sebesar 10-20%.

DAFTAR PUSTAKA

- Amri, S. (2015). *Teknologi Beton A-Z. Yayasan John Hi-Tech Idetama*, 2(1).
- Cristian Sabau, Cosmin Popescu, Gabriel Sas, Jacob Wittrup Schmid, Thomas Blankvard, B. T. (2018). Strengthening of RC beams using bottom and side NSM reinforcement. *Composite Part*, 1(1).
- Debataraja, L. R. (2019). Studi Eksperimental Perkuatan Lentur Balok Beton Bertulang dengan Metode Pemasangan Tulangan 2D-13 pada Permukaan Tarik Balok. *Diploma- Thesis*.
- Dipohusodo, I. (1994). *Struktur Beton Bertulang*. Gramedia.
- Fikri Alami, R. W. (2014). Studi Eksperimental Perkuatan Geser Balok Beton Bertulang Dengan Gfrp (Glass Fiber Reinforced Polymer). *Jurnal Rekayasa*, 2(1).
- MacGregor. (1997). *Reinforced Concrete : Mechanic and Design 3rd Ed*. Prentice-Hall International, inc.
- Nawy, E. (1998). *Beton Bertulang Suatu Pendekatan Dasar*. Refika Aditama.
- Pratama, R. F. (2019). Analisis Kekakuan Struktur Balok Beton Bertulang Dengan Lubang Hollow Core Pada Tengah Balok. *Jurnal Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya*, 2(2).
- PU, D. (2002). *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung*. Yayasan LPMB.
- Wu, Y.-F. (2018). Ductility Demand of Compression Yielding Fiber Reinforced Polymer-Reinforced

Concrete Beam. *ACI Structural Jurnal*, 5(1).