

ANALISIS KAPASITAS GESER BETON BERTULANG MUTU TINGGI VARIASI ADITIF DAN SUBSTITUSI AGREGAT (CANGKANG SAWIT)

Sukma Merriza¹, T. Budi Aulia², Muttaqin Hasan³

¹⁾ Magister Teknik Sipil, Universitas Syiah Kuala Darussalam, Banda Aceh, email: sukmaedah@gmail.com

^{2,3)} Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala

Jl. Tgk. Syeh Abdul Rauf No. 7, Darussalam Banda Aceh 23111, email : aulia@unsyiah.ac.id²,
muttaqin@unsyiah.ac.id³

Abstract: *The high concrete produced by low FAS value requiring large amount of cement, aggregates, and additives (silica fume) and super-plasticizer admixture. Meanwhile, the material availability come from river and natural stone become decreasing of the amount. For this reason, it is required to carry out the study about other additive and aggregate substitute to replace it. This study aimed to analyze the shear capacity of high quality reinforced concrete beams using additives and aggregate substitute variations such as palm shell. There are 7 test objects of beams used in this study which size is 15 x 30 x 220 cm for each additive and aggregate substitute variations and there is one normal test object of beam. The test object is designed to get bending shear. The steel quality (fy) used for the main reinforcement is 462,24 MPa and shear reinforcement is 423,46 MPa, tensile reinforcement used is diameter 18,9 mm of screw, stress reinforcement used is diameter 15,8 mm of screw and shear reinforcement is diameter 5,68 mm of plain. High Quality Concrete Compressive strength (BMT) without additives and aggregates substitutes variations (normal) obtained is 60,652 MPa with 0,30 of FAS. The results show that all the beams get bending shear as designed. The shear capacity of normal beam obtained is 2,285. The maximum deflection for additive variation obtained BMT of Palm Shell Additive (CSA) with the deflection percentage to the normal BMT is 146,310% and the maximum load 227,002 kN. Ductility comparison between BMT of course aggregate of palm shells (CSAK) and normal BMT beam is 115,544%. It can be concluded that additive and aggregate substitute variations can improve deflection and ductility values of high quality concrete. Palm shells has the best value and highly effective to be used.*

Keywords : *High Quality Reinforced Concrete Beam, Shear Capacity, Additive, Aggregate Substitute, Deflection, Ductility.*

Abstrak: Beton mutu tinggi dibentuk dengan nilai FAS yang rendah, sehingga membutuhkan semen dalam jumlah yang besar, agregat serta penggunaan bahan tambahan / *additive (silica fume)* dan *admixture superplasticizer*. Sementara itu ketersediaan material yang berasal dari sungai dan batuan alam semakin berkurang jumlahnya. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian lanjutan tentang penggunaan bahan tambahan pengganti tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kapasitas geser balok beton bertulang mutu tinggi dengan variasi aditif dan substitusi agregat yaitu cangkang sawit. Pada penelitian ini diuji 4 buah balok berukuran 15 x 30 x 220 cm untuk masing-masing aditif dan substitusi agregat sebanyak satu benda uji dan satu benda uji balok normal. Benda uji didisain untuk mengalami gagal geser. Mutu baja (fy) yang digunakan untuk tulangan pokok sebesar 462,24 MPa dan tulangan geser sebesar 423,46 MPa, tulangan tarik yang digunakan berdiameter 18,9 mm ulir, tulangan tekan diameter 15,8 mm ulir dan tulangan geser diameter 5,68 mm polos. Kuat tekan Beton Mutu Tinggi (BMT) tanpa variasi aditif dan substitusi agregat (normal) yang didapat sebesar 60,652 MPa dengan FAS 0,30. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semua balok mengalami gagal geser sesuai yang direncanakan. Kapasitas geser balok normal yang dihasilkan sebesar 2,285. Lendutan maksimum untuk variasi aditif didapat pada BMT cangkang sawit aditif (CSA) dengan persentase besarnya lendutan terhadap BMT normal sebesar 146,310% dengan beban maksimum 227,002 kN, dengan persentase besarnya lendutan 143,511% dengan beban 233,378 KN. Perbandingan daktilitas balok BMT cangkang sawit agregat kasar (CSAK) terhadap balok BMT normal sebesar 115,544%. Dapat disimpulkan variasi aditif dan substitusi agregat dapat meningkatkan nilai lendutan dan daktilitas beton mutu tinggi. Cangkang sawit memiliki nilai yang terbaik dan sangat efektif untuk digunakan

Kata kunci : Balok Beton Bertulang Mutu Tinggi, Kapasitas Geser, Aditif, Substitusi Agregat, Lendutan, Daktilitas.

Seiring dengan perkembangan zaman, struktur bangunan mengalami perkembangan yang pesat, misalnya gedung – gedung tinggi, struktur jembatan dengan bentang panjang, tower dan sebagainya. Struktur yang demikian membutuhkan beton mutu tinggi yang memiliki kuat tekan minimal 6000 psi (41,4 MPa) untuk menopang semua beban dengan dimensi komponen struktur yang cukup ramping (Mulyono, 2005).

Penggunaan bahan tambah mineral (*additive*) untuk membentuk beton mutu tinggi sudah merupakan bagian yang mutlak. Zat tambahan adalah bahan yang mempunyai kandungan utama silika dan alumina dan didapat dari alam maupun buatan. Zat tambahan ini merupakan bahan tambah yang dimaksudkan untuk memperbaiki kinerja beton. Beberapa jenis bahan tambah ini adalah pozzolan, *fly ash*, slag, dan *silica fume*. Bahan tambahan ini dapat bersifat *cementitious*, pozzolanik atau dua-duanya yang dapat digunakan sebagai bahan tambahan dalam campuran beton dan merupakan hasil buangan dari industri, (Mulyono, 2005).

Cangkang sawit merupakan jenis material yang juga dapat digunakan sebagai zat tambahan pengganti. Pemanfaatan limbah dan material alam tersebut di atas khususnya di daerah Aceh masih sangat terbatas, dengan demikian penggunaan cangkang sawit sebagai bahan tambahan pengganti masih mungkin untuk dikembangkan untuk menghasilkan beton mutu tinggi dengan harga yang lebih murah dengan tetap mempertahankan sifat-sifat mekanis beton mutu tinggi yang sesuai

dengan standar yang berlaku.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis kapasitas geser balok beton bertulang mutu tinggi menggunakan bahan cangkang sawit sebagai aditif dan substitusi agregat. Pada penelitian ini balok beton bertulang mutu tinggi dengan variasi aditif dan substitusi agregat akan dibandingkan dengan balok beton bertulang mutu tinggi tanpa variasi aditif dan substitusi agregat (normal). Diharapkan dari hasil penelitian ini didapatkan jenis aditif atau substitusi agregat kasar dan halus yang terbaik dalam memperbaiki nilai kapasitas geser beton mutu tinggi.

KAJIAN PUSTAKA

Beton Mutu Tinggi

Mulyono (2005 : 295) menyatakan kriteria beton mutu tinggi berubah sesuai dengan perkembangan zaman dan kemajuan tingkat mutu yang berhasil dicapai. Pada tahun 1950-an, beton dikategorikan mempunyai mutu tinggi jika kekuatan tekannya 30 MPa, tahun 1960–1970 kriterianya naik menjadi 40 MPa. Saat ini beton dikatakan sebagai beton mutu tinggi jika kekuatan tekannya di atas 55 MPa dan 80 MPa sebagai beton mutu sangat tinggi, sedangkan 120 MPa bisa dikategorikan sebagai beton bermutu ultra tinggi.

Bahan Tambahan

Penggunaan bahan tambahan dimaksudkan untuk memperbaiki dan menambah sifat bahan sesuai dengan sifat beton yang diinginkan. Bahan tambahan yang digunakan dalam beton dapat dibedakan menjadi dua yaitu bahan tambahan yang bersifat kimia atau

chemical admixture, dan bahan tambahan mineral yang dikenal dengan *additive* (Mulyono, 2005).

Cangkang Sawit

Kerak cangkang sawit merupakan limbah padat sisa pembakaran buah kelapa sawit yang tidak dimanfaatkan lagi oleh pabrik. Menurut hasil penelitian Muhardi (2004) limbah pembakaran serat dan cangkang sawit berupa abu dan kerak yang memiliki unsur yang bermanfaat untuk meningkatkan kekuatan mortar. Mortar yang menggunakan abu sawit sebagai pengganti sebagian semen dengan persentase 10% - 40% dan perbandingan volume semen : agregat halus 1 : 3, serta faktor air semen 0,55 menghasilkan kuat tekan maksimum pada penambahan abu kelapa sawit 20% (Salihuddin, 1993 : Muhardi dkk, 2004) yang mana abu sawit memiliki sifat pozolan dan mengandung unsur silika yang cukup banyak (sekitar 60% dari berat seluruh sisa pembakaran).

Superplasticizer

Superplasticizer merupakan bahan tambahan kimia yang digunakan untuk memperbaiki workabilitas dan mengurangi jumlah air pencampur (*high range water reducing admixture*). (Mulyono, 2005). *Superplasticizer* dari salah satu produk yang diperdagangkan secara umum dan salah satu jenisnya adalah Visco Crete 10.

Kekuatan Balok Beton Bertulang

Dalam desain kekuatan batas (ultimit), balok didesain untuk mulai gagal pada beban yang diperbesar. Pada taraf ini, baja diharapkan telah melampaui titik lelehnya,

sementara beton diharapkan telah memasuki daerah plastis (Schodek, 1999).

Kuat lentur balok

Analisis balok bertulangan rangkap diperlihatkan pada Gambar 1.

Nawy (1998 : 109) menyatakan analisis lentur balok bertulang rangkap menyangkut penentuan kuat nominal momen suatu penampang (M_n) dengan nilai-nilai a , b , d , d' , A_{s1} , A_s' , f_c' , dan f_y dapat ditulis dengan persamaan berikut.

$$M_{n1} = A_{s1} \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (1)$$

$$M_{n2} = A_s' \cdot f_y \cdot (d - d') \quad (2)$$

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} \quad (3)$$

Tinggi blok tegangan beton :

$$a = \frac{A_{s1} \cdot f_y}{0,85 \cdot f_c' \cdot b} \quad (4)$$

Letak garis netral :

$$C = \frac{a}{\beta} \quad (5)$$

dimana :

- M_n = Kuat nominal momen lentur (kg.cm);
- a = Tinggi blok tegangan tekan (cm);
- C = Jarak serat terluar ke 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).

Kuat geser balok

Dalam perencanaan kekuatan geser, McCormac (2001 : 240) meninjau kekuatan geser nominal (V_n) sebagai jumlah dari dua bagian :

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s) \quad (6)$$

Dimana:

- V_n = Kekuatan geser nominal (kg) ;

V_c = Kekuatan geser yang disumbangkan oleh beton (kg);
 V_s = Kekuatan geser yang disumbangkan oleh tulangan geser (kg).

Kapasitas kemampuan beton (tanpa penulangan geser) untuk menahan gaya geser dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (7) :

$$V_c = \left(\frac{1}{6} \sqrt{f'_c} \right) b_w d \quad (7)$$

Dimana :

V_c = Kapasitas geser beton (N) ;
 f'_c = Kuat tekan beton (MPa) ;
 b_w = Lebar balok (mm) ; dan
 d = Tinggi efektif penampang beton (mm).

Menurut Nawy (1998 : 162), untuk tulangan geser, V_s dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (8) :

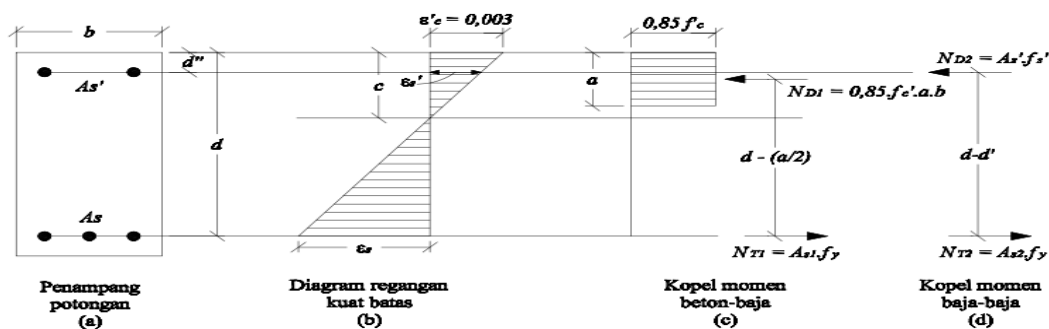
$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \quad (8)$$

Dimana :

V_s = Gaya geser nominal 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 beton bertulang (mm); dan
 s = Jarak pusat ke pusat batang tulangan geser kearah sejajar tulangan pokok memanjang (mm).

Lendutan

Menurut Nawy (1998), lendutan yang



Gambar 1. Distribusi Tegangan Pada Penampang Balok Tulangan Rangkap

terjadi pada balok yang dibebani pada dua titik pembebanan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\Delta_{ultimit} = 0,125 \times \varphi_u \times l^2 \quad (10)$$

$$\varphi_u = 0,7 \frac{\epsilon_u}{c} [100(\rho - \rho')]^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\rho - \rho'}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{Jika } (\rho - \rho' < 0.03) \quad (11)$$

$$\varphi_u = \frac{\epsilon_u}{c} \text{ Jika } (\rho - \rho' > 0.03) \quad (12)$$

Dimana :

Δ_{ult} = Lendutan beban ultimit di tengah bentang (mm);
 φ_u = Kurvatur ultimit (rad/mm);
 L = Panjang bentang (mm);
 ϵ_u = Regangan ultimit pada beton;
 c = Jarak serat terluar ke garis netral (mm);
 ρ = Rasio tulangan tarik ($A_s / b.d$); dan
 ρ' = Rasio tulangan tekan ($A'_s / b.d$).

Daktalitas

Perilaku beton yang bersifat daktail dan getas dapat dilihat pada Gambar 4. Daktalitas struktur ketika menerima beban merupakan pertimbangan penting bagi perencanaan bangunan dan merupakan sifat struktural yang dijadikan standar kelayakan untuk mengontrol kerusakan (Punmia, 2007)

Daktalitas dapat dihitung dengan Persamaan 13

$$\mu = \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (13)$$

Sumber : Dipohusodo (1994)

METODE PENELITIAN

Perencanaan balok beton bertulang mutu tinggi

Perhitungan awal mengenai kapasitas momen geser dilakukan guna mendapatkan gambaran apakah benda uji balok yang direncanakan mengalami gagal geser. Berdasarkan analisis yang dilakukan untuk mendapatkan benda uji gagal menahan beban geser maka didapat ukuran dan jumlah tulangan seperti terlihat pada Tabel 1.

Pembuatan Benda Uji

Jumlah dan variasi benda uji dapat dilihat pada Tabel 2. Benda uji untuk pengujian kuat geser adalah balok ukuran 15 cm x 30 cm x 220 cm, sedangkan balok ukuran 15 x 15 x 60 cm untuk pengujian lentur murni, dan silinder ukuran diameter 15 cm x tinggi 30 cm untuk pengujian kuat tekan sebagai benda uji kontrol dan kuat tarik belah. Untuk lebih jelas dapat dilihat pada Tabel 2.

Pengujian kuat tekan

Pengujian tekan dilakukan dengan mem-

berikan beban arah vertikal atau sejajar secara perlahan-lahan hingga benda uji hancur. Seperti Gambar 3.

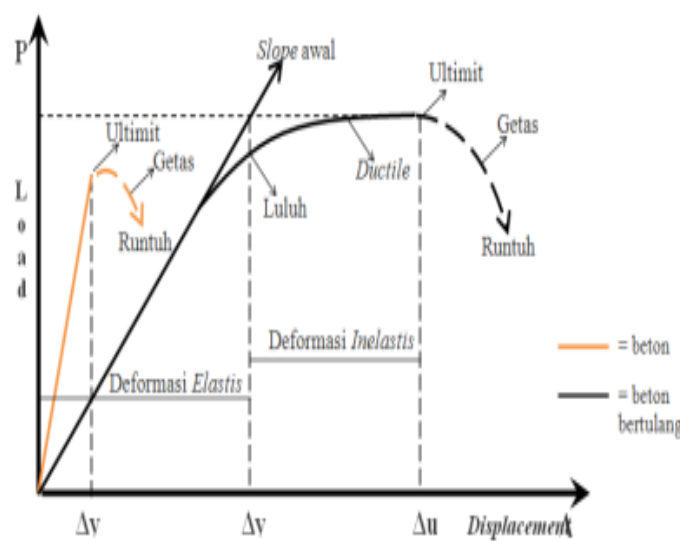
Pengujian kuat lentur

Pengujian dilakukan dengan sistem balok sederhana dengan beban terpusat pada dua titik. Beban dari mesin uji disalurkan melalui plat baja untuk diteruskan ke balok menjadi beban titik masing-masing pada jarak 1/3 bentang, seperti terlihat pada Gambar 4.

Pengujian kuat geser beton bertulang

Set up pengujian benda uji balok dapat dilihat pada Gambar 5. Adapun perilaku yang diamati adalah sebagai berikut :

- Retak yang terjadi yaitu retak awaldan pola retak
- Lendutan yang terjadi
- Regangan baja dan beton yang terjadi
- Beban maksimum yang dipikul oleh balok; dan
- Pola kehancuran.



Gambar 2. Perilaku daktail dan getas pada beton.

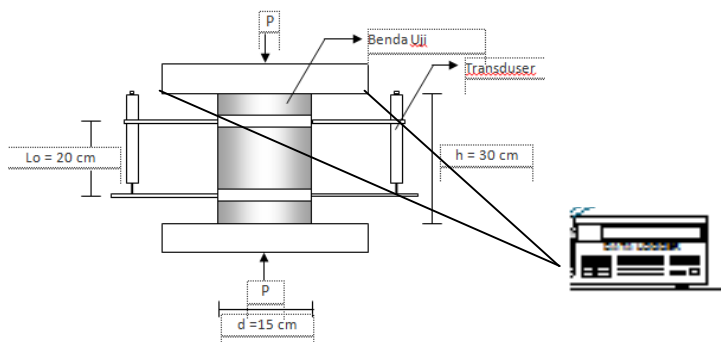
Sumber : Punmia, B.C. at al, 2007

Tabel 1. Ukuran dan Jumlah Tulangan Benda Uji

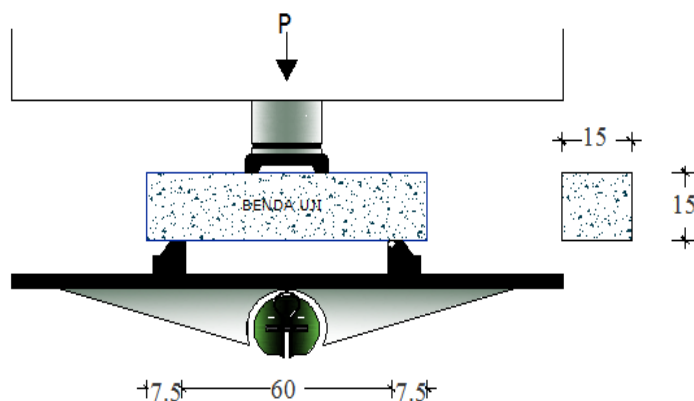
| Variasi Benda Uji | Benda Uji Balok | Dimensi Balok | Tulangan Pokok | | Tulangan Geser | Jumlah |
|--|-----------------|------------------------|----------------|--------|----------------|--------|
| | | | Tekan | Tarik | | |
| Beton Bertulang Tinggi Normal | Mutu BMT Normal | 15 cm x 30 cm x 220 cm | 2D15,8 | 4D18,9 | D5,68-300 | 1 |
| Beton Bertulang Tinggi Cangkang Agregat Halus (20 %) | Mutu BMT CSAH | 15 cm x 30 cm x 220 cm | 2D15,8 | 4D18,9 | D5,68-300 | 1 |
| Beton Bertulang Tinggi Cangkang Agregat Kasar (40%) | Mutu BMT CSAK | 15 cm x 30 cm x 220 cm | 2D15,8 | 4D18,9 | D5,68-300 | 1 |
| Beton Bertulang Tinggi Cangkang Aditif (15%) | Mutu BMT CSA | 15 cm x 30 cm x 220 cm | 2D15,8 | 4D18,9 | D5,68-300 | 1 |
| Total Benda Uji | | | | | | 4 |

Tabel 2. Jumlah dan variasi perlakuan benda uji.

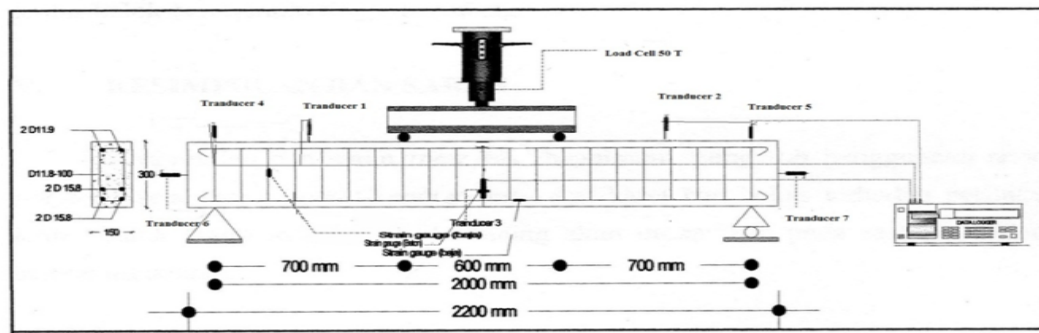
| Variasi Benda Uji | Benda Uji | Pengujian | Jumlah | |
|---|---|-------------------------|---------------|-------|
| | | | Masing-masing | Total |
| BMT Normal | Silinder diameter 15 cm x tinggi 30 cm | Kuat Tekan | 3 | 3 |
| | Balok 15 cm x 15 cm x 60 cm | Kuat Tarik Belah | 3 | 3 |
| | Balok 15 cm x 15 cm x 60 cm | Kuat Tarik Lentur Murni | 3 | 3 |
| | Balok 15 cm x 30 cm x 220 cm | Geser | 1 | 1 |
| BMT Variasi Aditif dan Substitusi Agregat (CSAH, CSAK, CSA) | Silinder diameter 15 cm x tinggi 30 cm | Kuat Tekan | 3 | 9 |
| | Silinder diameter 15 cm x tinggi 30 cm (CSAH, CSAK) | Kuat Tarik Belah | 3 | 6 |
| | Balok 15 cm x 15 cm x 60 cm | Kuat Tarik Lentur Murni | 3 | 9 |
| | Balok 15 cm x 30 cm x 220 cm | Geser | 1 | 6 |



Gambar 5. Pengujian Kuat Tekan Silinder



Gambar 6. Pengujian Kuat Tarik Lentur



Gambar 5. Set Up Pembebanan Benda Uji Balok

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian kuat tekan BMT dengan variasi aditif dan substitusi agregat

Hasil pengujian kuat tekan silinder diperlihatkan pada Tabel 3. Tabel 3 menampilkan hasil kuat tekan (f'_c) benda uji silinder diameter 15 cm x tinggi 30 cm BMT variasi aditif dan substitusi agregat.

Hubungan tegangan-regangan BMT dengan variasi aditif dan substitusi agregat

Berdasarkan data yang diperoleh, di buat grafik hubungan tegangan-regangan BMT dengan cara menghitung tegangan-regangan setiap interval pada kenaikan beban 200 kg dan disesuaikan dengan pemberian beban sampai benda uji hancur. Rekapitulasi nilai tegangan-regangan maksimum benda uji silinder diameter 15 cm dan tinggi 30 cm diperlihatkan pada Tabel 4.

Pengujian kuat tarik lentur BMT dengan variasi aditif dan substitusi agregat

Rekapitulasi nilai kuat lentur BMT variasi aditif dan substitusi agregat dengan benda

uji balok 15 cm x 15 cm x 60 cm yang disajikan pada Tabel 5.

Pengujian kuat tarik baja

Data hasil tegangan luluh, regangan luluh dan modulus elastisitas baja untuk masing-masing diameter diperlihatkan pada Tabel 6.

Perbandingan Hasil Pengujian Balok BMT dengan Variasi Penambahan Aditif dan Substitusi agregat

a. Beban dan lendutan

Perbandingan beban dan lendutan BMT dengan variasi aditif dan substitusi agregat dapat dilihat pada Gambar 6.

Berdasarkan Gambar 6 dapat dilihat bahwa balok BMT normal memiliki lendutan maksimum sebesar 7,860 mm pada beban 252,995 kN. Balok BMT CSA memiliki lendutan maksimum sebesar 8,420 mm pada beban 258,394 kN. Balok BMT CSAK memiliki lendutan maksimum sebesar 8,970 mm pada beban 255,353 kN. Sedangkan balok BMT CSA memiliki lendutan maksimum sebesar 11,500 mm pada beban 227,001 kN.

Pada gambar 6 juga terlihat bahwa grafik CSA lebih landai jika dibandingkan dengan lima grafik lainnya. Hal ini menunjukkan

bahwa balok beton bertulang mutu tinggi dengan aditif CSA kekakuannya lebih kecil jika dibandingkan dengan dua balok lainnya.

b. Beban dan regangan baja geser 1

Hubungan beban – regangan baja geser 1 terhadap variasi aditif dan substitusi agregat ditampilkan pada Gambar 7. Dari Gambar 7 juga dapat dilihat bahwa Balok BMT normal memiliki regangan baja tulangan geser sebesar $0,000 \mu\epsilon$ pada beban 252,995 kN. Balok BMT CSAH memiliki regangan baja tulangan geser sebesar $23784 \mu\epsilon$ pada beban 258,394 kN. Balok BMT CSAK memiliki regangan baja tulangan geser sebesar $20680 \mu\epsilon$ pada beban 255,353 kN. Sedangkan balok BMT CSA memiliki regangan baja tulangan geser sebesar $0,000 \mu\epsilon$ pada beban 227,001 kN.

c. Beban dan regangan baja tulangan geser 2

Hubungan beban – regangan baja geser 2 terhadap variasi aditif dan substitusi agregat ditampilkan pada Gambar 8. Dari Gambar 8 juga dapat dilihat bahwa Balok BMT normal memiliki regangan baja tulangan geser sebesar $57455 \mu\epsilon$ pada beban 252,995 kN. Balok BMT CSAH memiliki regangan baja tulangan geser sebesar $85476 \mu\epsilon$ pada beban 258,394 kN. Balok BMT CSAK memiliki regangan baja tulangan geser sebesar $80130 \mu\epsilon$ pada beban 255,353 kN. Balok BMT CSA memiliki regangan baja tulangan geser sebesar $388367 \mu\epsilon$ pada beban 227,001 kN.

d. Beban dan regangan baja tulangan geser 3

Hubungan beban – regangan baja geser 3

terhadap variasi aditif dan substitusi agregat ditampilkan pada Gambar 9. Dari Gambar 9 juga dapat dilihat bahwa Balok BMT normal memiliki regangan baja tulangan geser sebesar $5212 \mu\epsilon$ pada beban 252,995 kN. Balok BMT CSAH memiliki regangan baja tulangan geser sebesar $1625 \mu\epsilon$ pada beban 258,394 kN. Balok BMT CSAK memiliki regangan baja tulangan geser sebesar $636 \mu\epsilon$ pada beban 255,353 kN. Balok BMT CSA memiliki regangan baja tulangan geser sebesar $0,000 \mu\epsilon$ pada beban 227,001 kN

e. Beban dan regangan beton

Hubungan beban – regangan beton 1 terhadap variasi aditif dan substitusi agregat ditampilkan pada Gambar 10. Dari Gambar 10 juga dapat dilihat bahwa balok BMT normal memiliki regangan beton sebesar $131,464 \mu\epsilon$ pada beban 252,995 kN. Balok BMT CSAH memiliki regangan beton sebesar $95,041 \mu\epsilon$ pada beban 258,394 kN. Balok BMT CSAK memiliki regangan beton sebesar $3,898 \mu\epsilon$ pada beban 255,353 kN. Balok BMT CSA memiliki regangan beton sebesar $70,099 \mu\epsilon$ pada beban 227,001 kN. Terlihat pada semua variasi aditif dan substitusi agregat, regangan yang terbaca pada grafik tetap linier.

f. Beban dan regangan beton 2

Hubungan beban – regangan beton 2 terhadap variasi aditif dan substitusi agregat ditampilkan pada Gambar 11. Dari Gambar 11 juga dapat dilihat bahwa balok BMT normal memiliki regangan beton sebesar $222,798 \mu\epsilon$ pada beban 252,995 kN. Balok BMT CSAH memiliki regangan beton sebesar $-9,350$

µε pada beban 258,394 kN. Balok BMT CSAK memiliki regangan beton sebesar 6,223 µε pada beban 255,353 kN. Balok BMT CSA memiliki regangan beton sebesar 0,000µε

pada beban 227,001 kN Terlihat pada semua variasi aditif dan substitusi agregat, regangan yang terbaca pada grafik tetap linier dan naik turun.

Tabel 3. Rekapitulasi Kuat Tekan Silinder

| Variasi Benda Uji | Dimensi Benda Uji (Cm) | | Luas (cm ²) | Beban (kg) | f'c (kg/cm ²) | f'c (MPa) | f'c rata-rata (MPa) |
|-------------------|------------------------|----------|-------------------------|------------|---------------------------|-----------|---------------------|
| | Tinggi | Diameter | | | | | |
| NORMAL HSC | 30,31 | 15,10 | 179,08 | 106000 | 591,92 | 58,07 | 60,65 |
| | 30,14 | 15,15 | 180,27 | 108000 | 599,11 | 58,77 | |
| | 30,20 | 15,05 | 177,78 | 118000 | 663,75 | 65,11 | |
| CSAH | 30,03 | 14,97 | 176,01 | 114000 | 647,70 | 63,54 | 63,89 |
| | 30,36 | 14,94 | 175,30 | 118000 | 673,12 | 66,03 | |
| | 31,28 | 15,01 | 176,95 | 112000 | 632,95 | 62,09 | |
| CSAK | 30,09 | 14,98 | 176,13 | 121000 | 687,01 | 67,40 | 67,50 |
| | 30,36 | 14,93 | 174,95 | 122000 | 697,33 | 68,41 | |
| | 30,27 | 14,99 | 176,48 | 120000 | 679,97 | 66,70 | |
| | 29,72 | 14,94 | 175,19 | 118000 | 673,57 | 66,08 | |
| CSA | 29,85 | 15,05 | 177,78 | 110000 | 618,75 | 60,70 | 58,77 |
| | 30,00 | 15,10 | 178,96 | 108000 | 603,49 | 59,20 | |
| | 29,00 | 15,18 | 180,86 | 104000 | 575,02 | 56,41 | |

Tabel 4. Rekapitulasi Nilai Tegangan-regangan

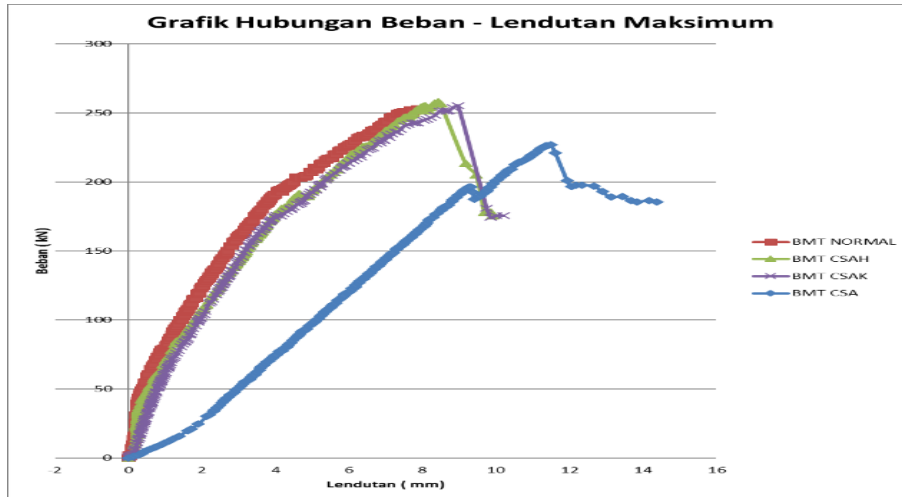
| Variasi Benda Uji | Beban (P) (Kg) | Tegangan (MPa) | Regangan Maksimum |
|-------------------|----------------|----------------|-------------------|
| Normal HSC | 108000 | 61,115 | 0,00159 |
| CSAH | 102000 | 57,720 | 0,00178 |
| CSAK | 116000 | 65,643 | 0,00256 |
| CSA | 106000 | 59,984 | 0,00290 |

Tabel 5. Rekapitulasi Nilai Kuat Tarik Lentur

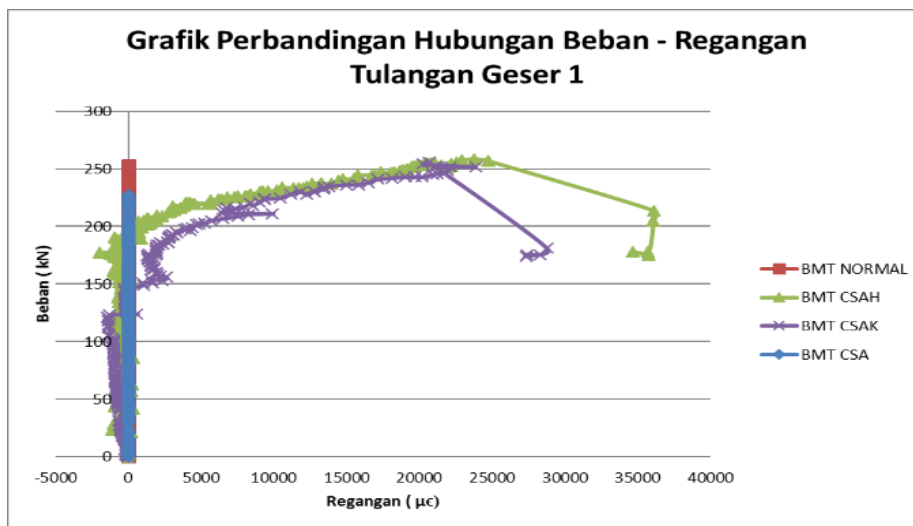
| Variasi Benda Uji | Nama Benda Uji | Berat Benda Uji (kg) | Dimensi Benda Uji | | | Beban (P) (kg) | Kuat Tarik (fr) (MPa) | Kuat Tarik Rata-rata (fr) (MPa) |
|-------------------|----------------|----------------------|-------------------|------------|-------------|----------------|-----------------------|---------------------------------|
| | | | Panjang (cm) | Lebar (cm) | Tinggi (cm) | | | |
| | | | | | | | | |
| Normal HSC | BTL.1 | 33,85 | 45 | 15 | 15 | 4020 | 5,464 | 5,351 |
| | BTL.2 | 33,93 | 45 | 15 | 15 | 3850 | 5,233 | |
| | BTL.3 | 33,9 | 45 | 15 | 15 | 3940 | 5,355 | |
| CSAH | BTL.1 | 28,89 | 45 | 15 | 15 | 2710 | 3,683 | 3,665 |
| | BTL.2 | 28,55 | 45 | 15 | 15 | 2820 | 3,833 | |
| | BTL.3 | 29,18 | 45 | 15 | 15 | 2560 | 3,479 | |
| CSAK | BTL.1 | 28,06 | 45 | 15 | 15 | 4690 | 6,374 | 6,388 |
| | BTL.2 | 28,25 | 45 | 15 | 15 | 4740 | 6,442 | |
| | BTL.3 | 28,3 | 45 | 15 | 15 | 4670 | 6,347 | |
| CSA | BTL.1 | 29,14 | 45 | 15 | 15 | 3480 | 4,730 | 5,011 |
| | BTL.2 | 29,11 | 45 | 15 | 15 | 4130 | 5,613 | |
| | BTL.3 | 28,82 | 45 | 15 | 15 | 3450 | 4,689 | |

Tabel 6. Hasil Perhitungan Uji Tarik Baja

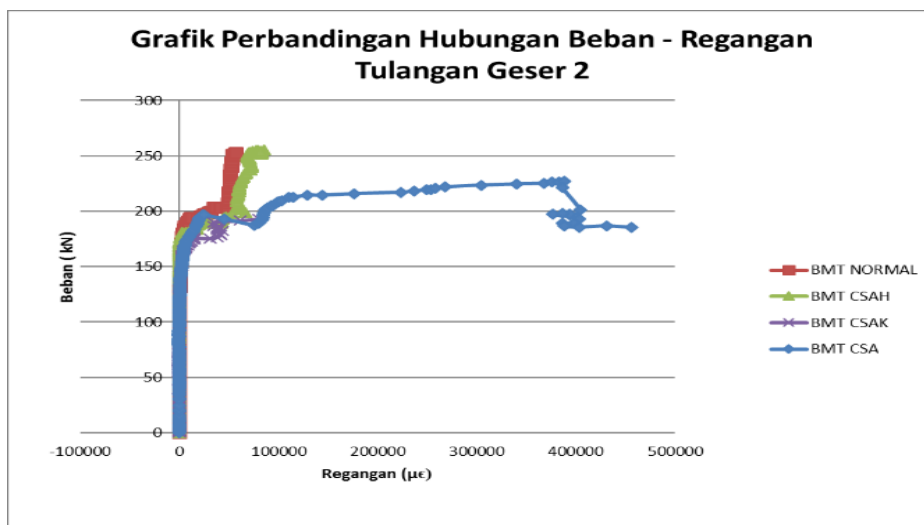
| No | Diameter (mm) | No. Benda Uji | Tegangan Leleh Rata-rata | Regangan Leleh | Modulus Elastisitas | Modulus Elastisitas Rata-Rata | Jenis Besi |
|----|---------------|---------------|--------------------------|----------------|-----------------------|-------------------------------|------------|
| | | | (kg/cm ²) | (%) | (kg/cm ²) | (kg/cm ²) | |
| 1 | 11,9 | BU. 1 | 4316,67 | 0,208 | 0,210 | 2057500 | Polos |
| | | BU. 2 | | 0,212 | | | |
| 2 | 15,8 | BU. 1 | 4203,82 | 0,205 | 0,210 | 2088500 | Ulir |
| | | BU. 2 | | 0,2197 | | | |
| 3 | 18,9 | BU. 1 | 4711,88 | 0,259 | 0,234 | 2022896 | Ulir |
| | | BU. 2 | | 0,210 | | | |



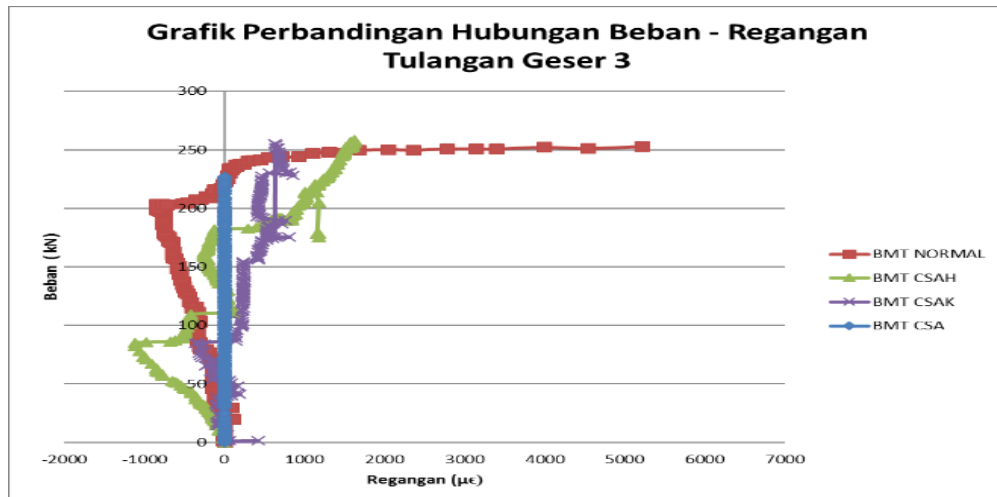
Gambar 6. Grafik Perbandingan Variasi Aditif dan Substitusi Agregat Terhadap Beban-Lendutan di Tengah Bentang Balok BMT



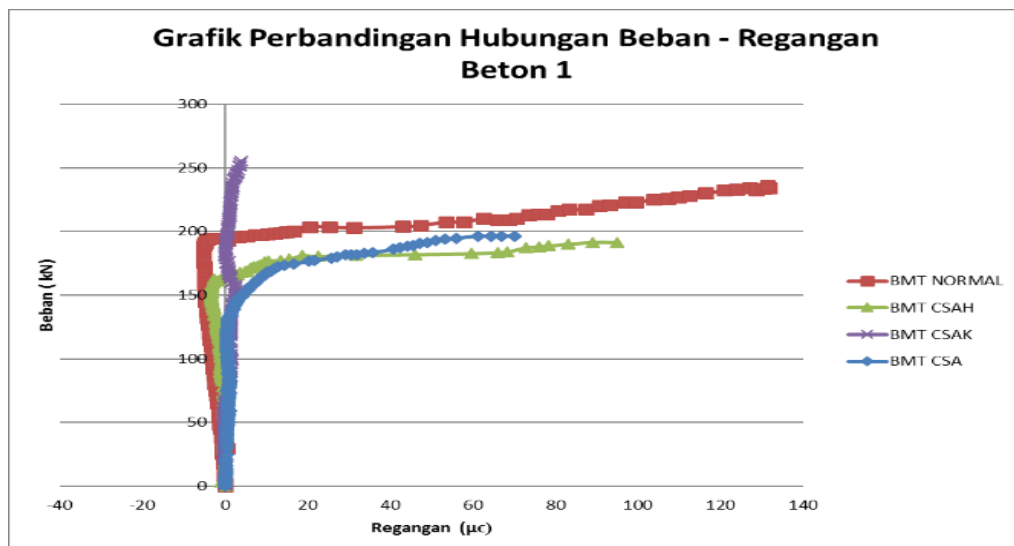
Gambar 7. Grafik Hubungan Beban- Regangan Baja Geser 1 Terhadap Variasi Aditif dan Substitusi Agregat



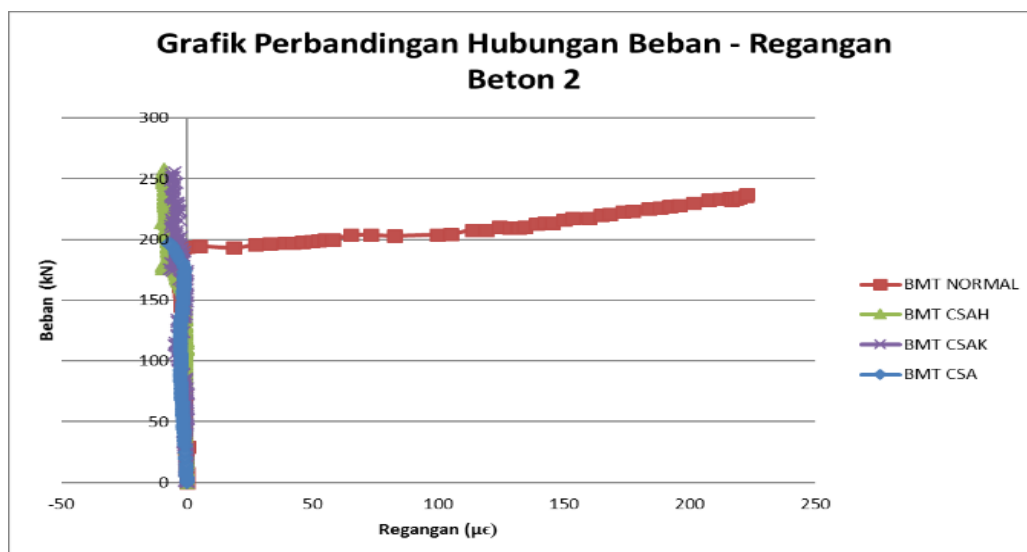
Gambar 8. Grafik Hubungan Beban- Regangan Baja Geser 2 Terhadap Variasi Aditif dan Substitusi Agregat



Gambar 9. Grafik Hubungan Beban- Regangan Baja Geser3 Terhadap Variasi Aditif dan Substitusi Agregat



Gambar 10. Grafik Hubungan Beban- Regangan Beton 1 Terhadap Variasi Aditif dan Substitusi Agregat



Gambar 11. Grafik Hubungan Beban- Regangan Beton 2 Terhadap Variasi Aditif dan Substitusi Agregat

Tabel 7. Perbandingan Teoritis Kapasitas Penampang Balok BMT Normal dengan Balok BMT Variasi Aditif dan Substitusi Agregat

| Benda Uji Balok | $f'c$ (Mpa) | f_y Lentur (Mpa) | f_y Geser (Mpa) | Jarak Sengkang (mm) | Berat Benda Uji (Kg) | Beban Maksimum (KN) | | | Jenis Keruntuhan |
|-----------------|-------------|--------------------|-------------------|---------------------|----------------------|---------------------|-----------|---------------|------------------|
| | | | | | | V_n Teoritis | V_{lab} | V_{lab}/V_n | |
| Normal HSC | 60,650 | 462,240 | 423,460 | 30,000 | 268,000 | 64,899 | 126,499 | 1949 | Geser |
| CSAH | 63,890 | 462,240 | 423,460 | 30,000 | 269,000 | 66,119 | 129,197 | 1954 | Geser |
| CSAK | 67,500 | 462,240 | 423,460 | 30,000 | 257,000 | 67,445 | 127,676 | 1893 | Geser |
| CSA | 58,770 | 462,240 | 423,460 | 30,000 | 257,200 | 64,175 | 113,501 | 1769 | Geser |

Pembahasan

Kuat tekan dan kuat tarik lentur BMT variasi aditif dan substitusi agregat

Diagram hasil kuat tekan dan kuat tarik lentur terhadap BMT dengan variasi aditif dan substitusi agregat ditampilkan pada Gambar 11. Dari gambar 11 dapat dilihat bahwa nilai kuat tekan BMT variasi aditif dan substitusi agregat meningkat dibandingkan dengan BMT normal, kecuali pada benda uji CSA dengan nilai kuat tekan yang lebih kecil dari benda uji normal, tetapi masih termasuk dalam kategori beton mutu tinggi. Penambahan variasi aditif dan substitusi agregat kedalam campuran beton akan berpengaruh terhadap kekuatan tekan. Jika dihubungkan dengan momen nominal yang terbentuk, semakin tinggi nilai kuat tekan yang dihasilkan semakin rendah nilai blok tegangan tekan, maka semakin tinggi nilai momen nominal yang terbentuk.

Berbeda dengan kuat tekan, kuat tarik lentur BMT variasi aditif dan substitusi agregat memiliki hasil yang lebih tinggi dan lebih rendah dibandingkan dengan BMT normal. Pada benda uji CSAH, dan CSA nilai kuat tarik lentur yang dihasilkan lebih rendah dari benda uji normal. Pengujian kuat tarik lentur ini juga didapat untuk mengetahui retak awal pada balok BMT dan dijadikan sebagai acuan pada saat pengujian.

Kuat Lentur Balok BMT Variasi Aditif dan Substitusi Agregat

1. Lendutan

Perbandingan Lendutan Balok BMT Normal dengan Balok BMT Variasi Aditif dan Substitusi Agregat ditampilkan pada Tabel 8. Dari Tabel 8 dapat. Dari Tabel 8 dapat dilihat balok BMT dengan variasi aditif dan substitusi agregat cenderung dapat meningkatkan nilai lendutan balok beton mutu tinggi. Lendutan maksimum didapat pada BMT CSA dengan persentase besarnya lendutan terhadap BMT normal sebesar 146,310 %, meningkat 46,310 % dari BMT normal, hal ini dikarenakan cangkang sawit aditif (CSA) memiliki diameter butiran yang kecil sehingga penyebaran pada matrik campuran lebih merata. Peningkatan lendutan yang terjadi pada BMT dengan variasi aditif dan substitusi agregat sangat bervariasi antara 7,125 – 46,310 %.

2. Retak dan *Fracture/gagal*

Retak yang terjadi pada pengujian balok BMT dengan variasi aditif dan substitusi agregat dapat dilihat pada Tabel 9, 10 dan 11. Berdasarkan tabel-tabel tersebut dapat disimpulkan bahwa variasi aditif dan substitusi agregat dapat meningkatkan beban terjadinya

retak awal dengan kisaran beban 51,109 kN sampai 84,561 kN.

Jumlah retak semakin banyak seiring dengan penambahan beban. Balok BMT normal pada saat beban maksimum salah satu retak geser membesar sampai pada bagian balok atau beton telah luluh selanjutnya diikuti luluh tulangan lentur. Sementara itu 3 balok yang lain yaitu BMT dengan variasi aditif dan substitusi agregat, pada beban lebih besar dari 75% beban maksimum terjadi perubahan grafik hubungan beban – lendutan dari linier ke plastis disini menunjukkan bahwa tulangan geser telah luluh perlahan dan diikuti dengan luluhnya beton. Pembentukan retak pada umumnya dari setiap benda uji berbeda-beda, tetapi kehancuran yang terjadi sama yaitu kehancuran geser atau gagal geser. Hal ini di tunjukkan dengan dominannya retak di daerah geser.

3. Daktilitas

Hasil Perhitungan Daktilitas Balok BMT dengan Variasi Penambahan Serat ditampilkan pada Tabel 10. Dari Tabel 10 dapat dilihat bahwa variasi aditif dan substitusi agregat

dapat meningkatkan nilai daktilitas balok BMT. Pada balok BMT CSAK terjadi peningkatan nilai daktilitas yaitu sebesar 115,544 % dibandingkan dengan balok BMT normal, selain dapat meningkatkan kapasitas geser balok BMT yaitu sebesar 255,353 kN. Pada balok BMT CSA terjadi penurunan nilai daktilitas terbesar terhadap balok BMT normal yaitu sebesar 66,598%.

Dapat disimpulkan bahwa variasi aditif dapat digunakan untuk meningkatkan daktilitas beton mutu tinggi yang diketahui memiliki sifat yang getas atau nilai daktilitas yang rendah. Nilai daktilitas dari keenam variasi aditif dan substitusi agregat tersebut menunjukkan sebagai substitusi agregat kasar cangkang sawit memiliki nilai yang terbaik dan sangat efektif digunakan dibandingkan yang lainnya dan juga dapat meningkatkan kapasitas beban geser maksimum sebesar 255,353 kN dibandingkan dengan balok pembanding sebesar 252,995 kN, hal ini dikarenakan cangkang sawit memiliki ukuran butiran diameter yang bagus sehingga penyebaran pada matrik campuran lebih merata dapat meningkatkan kapasitas geser balok BMT.

Tabel 8. Perbandingan Lendutan Balok BMT Normal dengan Balok BMT Variasi Aditif dan Substitusi Agregat

| Benda Uji Balok | Lendutan Maks (mm) | Perbandingan Lendutan Terhadap Lendutan Normal HSC | |
|--------------------|-----------------------|---|-------------|
| | | Persen (%) | Selisih (%) |
| NORMAL HSC | 7,860 | 100,000 | - |
| CSAH | 8,420 | 107,125 | 7,125 |
| CSAK | 8,970 | 114,122 | 14,122 |
| CSA | 11,500 | 146,310 | 46,310 |

Tabel 9. Hasil Uji Laboratorium untuk Hasil Retakan Pertama

| Benda Uji Balok | P (kN) | Lendutan (mm) | Retak Pertama | | | | |
|--------------------|-----------|------------------|---------------|----------|----------|---------------------|---------------------|
| | | | Regangan Baja | | | Regangan Beton 1 | Regangan Beton 1 |
| | | | Geser 1 | Geser 2 | Geser 3 | | |
| Normal HSC | 51,109 | 0,400 | 0,000 | 0,000 | -126,000 | -0,299 | -0,681 |
| CSAH | 52,385 | 0,590 | -207,000 | -63,000 | -654,000 | 0,000 | -0,404 |
| CSAK | 84,561 | 1,540 | -971,000 | -359,000 | -359,000 | 1,214 | -0,280 |
| CSA | 58,859 | 3,350 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 1,065 | 1,768 |

Tabel 10. Hasil Uji Laboratorium untuk Hasil Nilai Peralihan

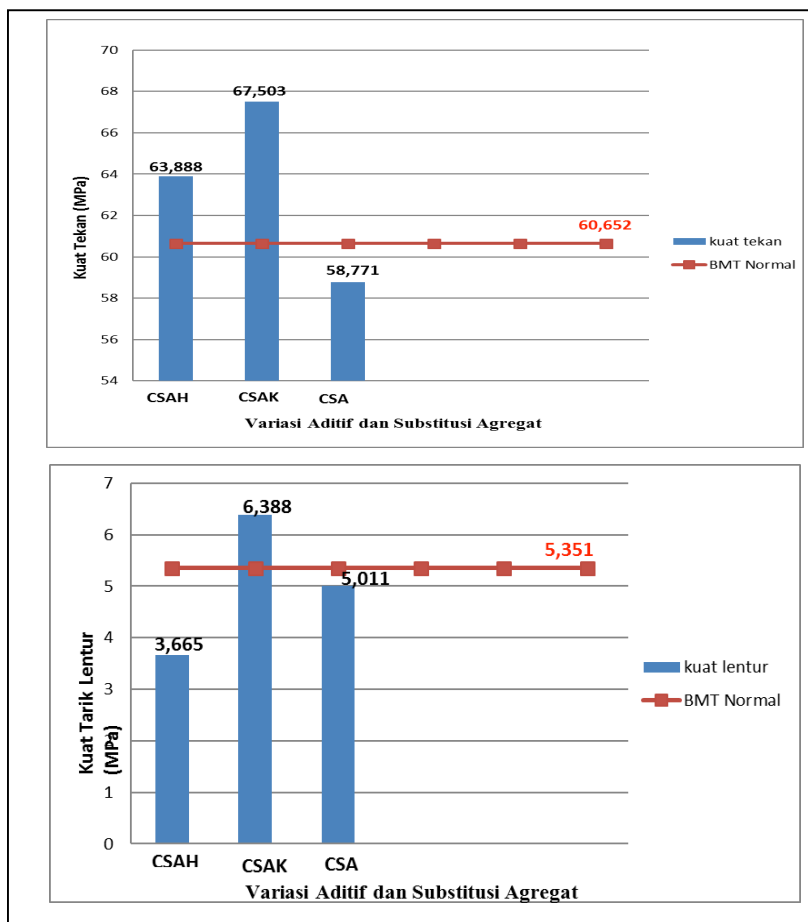
| Benda Uji Balok | P (kN) | Lendutan (mm) | Retak Pertama | | | | |
|--------------------|-----------|------------------|---------------|----------|----------|------------------|------------------|
| | | | Regangan Baja | | | Regangan Beton 1 | Regangan Beton 1 |
| | | | Geser 1 | Geser 2 | Geser 3 | | |
| Normal HSC | 168,142 | 3,250 | 0,000 | 2047,000 | -654,000 | -4,942 | -3,152 |
| CSAH | 178,246 | 4,090 | -798,000 | 2131,000 | 148,000 | 15,506 | -5,389 |
| CSAK | 150,876 | 3,210 | 1648,000 | 2769,000 | 241,000 | 2,556 | -0,576 |
| CSA | 147,443 | 7,410 | 0,000 | 2046,000 | 0,000 | 3,323 | -1,640 |

Tabel 11. Hasil Uji Laboratorium untuk Hasil Beban Maksimum

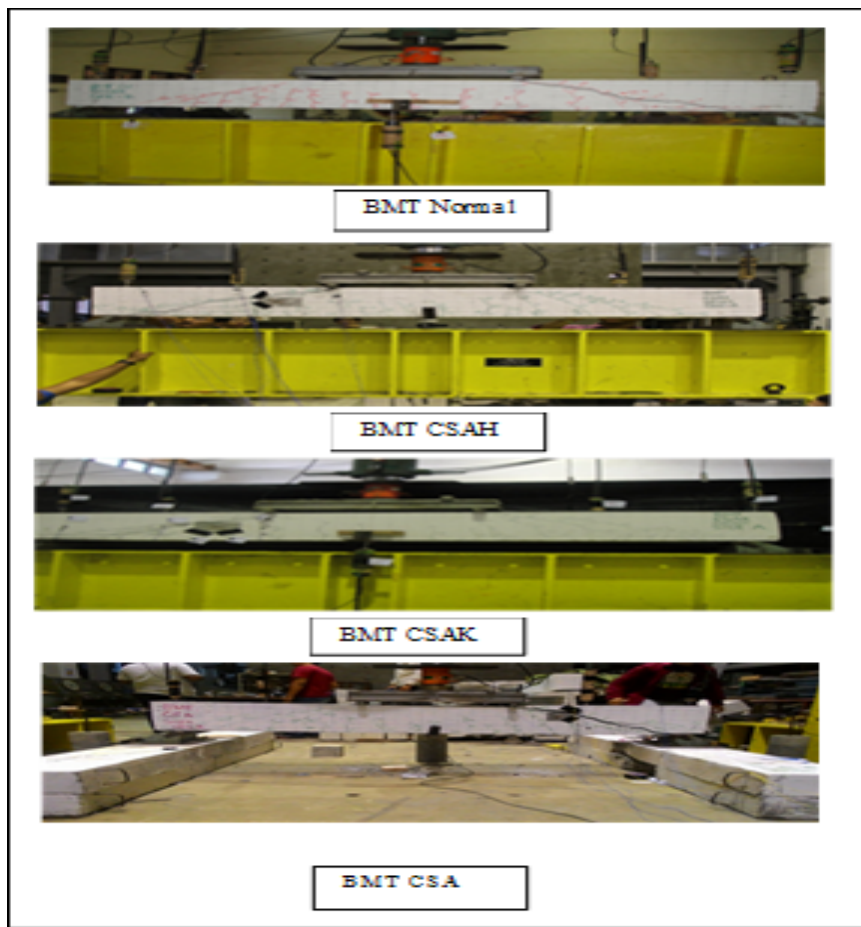
| Benda Uji Balok | P (kN) | Lendutan (mm) | Retak Pertama | | | | |
|--------------------|-----------|------------------|---------------|------------|----------|------------------|------------------|
| | | | Regangan Baja | | | Regangan Beton 1 | Regangan Beton 1 |
| | | | Geser 1 | Geser 2 | Geser 3 | | |
| Normal HSC | 252,998 | 7,860 | 0,000 | 57455,000 | 5212,000 | 0,000 | 0,000 |
| CSAH | 258,394 | 8,420 | 23784,000 | 81868,000 | 1625,000 | 0,000 | -9,031 |
| CSAK | 255,353 | 8,970 | 20680,000 | 0,000 | 636,000 | 3,898 | -4,899 |
| CSA | 227,001 | 11,500 | 0,000 | 388282,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |

Tabel 12. Data Hasil Perhitungan Daktilitas Balok BMT dengan Variasi Penambahan Serat

| Variasi Benda Uji | Kondisi Luluh | | Kondisi Ultimit | | Daktilitas $\mu = \Delta u / \Delta y$ | Perbandingan Daktilitas Terhadap BMT Normal |
|----------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------|-----------------------------|---|--|
| | Beban (P) (kN) | Lendutan Δy (mm) | Beban (P) (Ton) | Lendutan Δu (mm) | | |
| | | | | | | |
| Normal HSC | 168,142 | 3,250 | 252,998 | 7,860 | 2,418 | - % |
| CSAH | 178,246 | 4,090 | 258,394 | 8,420 | 2,059 | 85,124 % |
| CSAK | 150,876 | 3,210 | 255,353 | 8,970 | 2,794 | 115,544 % |
| CSA | 147,443 | 7,140 | 227,001 | 11,500 | 1,611 | 66,598 % |



Gambar 12. Diagram Kuat tekan dan Kuat Tarik Lentur Terhadap BMT dengan variasi aditif dan substitusi agregat



Gambar 13. Pola Retak Balok BMT dengan Variasi Aditif dan Substitusi Agregat

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

1. Hasil pengujian kuat tekan, kuat tarik lentur dan tegangan-regangan beton dengan variasi aditif dan substitusi agregat dapat diklasifikasikan kepada beton mutu tinggi yang bersifat getas.
2. Kegagalan balok BMT dengan variasi aditif dan substitusi agregat sesuai dengan yang direncanakan, yaitu gagal geser.
3. Balok BMT dengan variasi aditif dan substitusi agregat dapat meningkatkan nilai lendutan dan daktilitas balok beton mutu tinggi.
4. Lendutan maksimum untuk variasi aditif didapat pada cangkang sawit aditif dengan persentase besarnya lendutan terhadap BMT normal sebesar 146,310%, hal ini dikarenakan cangkang sawit aditif memiliki diameter butiran yang kecil sehingga penyebaran pada matrik campuran lebih merata.
5. Pola retak antara balok BMT variasi aditif dan substitusi agregat lebih banyak, jumlah retaknya yang terjadi secara perlahan serta pendek dibandingkan dengan balok BMT normal. Variasi aditif dan substitusi agregat juga dapat meningkatkan beban terjadinya retak awal pada balok beton bertulang mutu tinggi.
6. Daktilitas balok BMT dengan variasi aditif dan substitusi agregat meningkat secara

siknifikan, untuk substitusi agregat halus cangkang sawit memiliki nilai daktilitas yang tertinggi. Variasi aditif dan substitusi agregat pada balok dapat meningkatkan kapasitas beban geser maksimum sebesar 258,394 kN dibandingkan dengan balok pembanding sebesar 252,995 kN.

Saran

Penelitian ini diharapkan dapat dilanjutkan oleh peneliti lain, dengan memperhatikan beberapa hal dan saran sebagai berikut: Untuk melanjutkan penggunaan variasi aditif dan substitusi agregat pada beton mutu tinggi untuk mengurangi sifat getas, dapat digunakan variasi aditif dan substitusi agregat lainnya baik yang juga berasal dari limbah sisa pembuangan industri maupun material alam dan dapat dibandingkan dengan hasil yang telah diteliti pada tesis ini.

DAFTAR KEPUSTAKAAN

- Aulia, T, 1999, Effect of Mechanical Properties of Aggregate on The Ductility of High Performance Concrete, Karsten Deutschman, Lacer No. 4, University of Leipzig, 133 – 147.
- Mardiono, Pengaruh Pemanfaatan Abu Terbang (Fly Ash) dalam Beton Mutu Tinggi, Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Univeritas Gunadarma, Jakarta
- McCormac, J.C., 2001, “Desain Beton Bertulang”, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Muhardi, Sitompul, IR & Rinaldi, 2004, Pengaruh Penambahan Abu Sawit terhadap Kuat Tekan Mortar, Seminar Hasil Penelitian Dosen, Program Studi S1 Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau
- Mulyono, T., (2005), ”Teknologi Beton”, Penerbit ANDI, Yogyakarta.
- Nugraha, P, dan Antoni, (2007), ”Teknologi Beton”, Penerbit ANDI, Yogyakarta.
- Park, R. And Paulay, T., 1975, Reinforced Concrete Structure, John Wiley & Sons. Inc., New York.
- Pujianto, A., Beton Mutu Tinggi dengan Bahan Tambah Superplasticizer dan Fly Ash, Jurnal Ilmiah Semesta Teknika, Vol. 13, No. 2, 171-180, November 2010.
- Punmia, B.C, Ashok, K.J, and Arun, K.J., 2007, Limit State Design of Reinforced Concrete, Published By. Laxmi Publications (P) LTD. New Delhi. Penerbit: Firewall Media, 2007.
- Yusra A, 2015, Pengaruh Variasi Zat Tambahan Terhadap Sifat Mekanis Beton Mutu Tinggi, Fakultas Teknik, Unsyiah, Banda Aceh.