

ANALISIS KAPASITAS LENTUR BETON BERTULANG MUTU TINGGI VARIASI ADITIF DAN SUBSTITUSI AGREGAT (*FLY ASH* BATUBARA, CANGKANG SAWIT DAN PASIR POZZOLAN)

Lissa Opirina^{1,2}, T. Budi Aulia³, Mochammad Afifuddin⁴

¹⁾ Dosen Fakultas Teknik, Universitas Teuku Umar

Jl. Kampus Alue Penyareng, Meulaboh Aceh Barat, email: lissaopirina@gmail.com

²⁾ Mahasiswa Magister Teknik Sipil Universitas Syiah Kuala

^{3,4)} Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala

Jl. Tgk. Syeh Abdul Rauf No. 7, Darussalam Banda Aceh 23111, email: aulia@unsyiah.ac.id²,
afifuddin64@gmail.com³

Abstract: *The High strength concrete produced with low FAS value require large amount of Cement, aggregates, with the use of additives (silica fume) and super-plasticizer admixture. Meanwhile, material availability are decreasing from natural rock and river. Because of that, continuous research need to be done with the use of additives and substitute aggregates. This study aimed to analyze the flexural capacity of reinforced concrete beams of high quality with a variety of additives and substitutes aggregate namely palm oil clinkers, pozzolan sand and charcoal fly ash. In this study tested 7 pieces beam with 15 x 30 x 220 cm sized for each additive and the substitution of the aggregate total of the test specimen and the test specimen normal beam. The test object is designed to undergo bending failure. Quality steel (fy) used for the principal reinforcement of 445.63 MPa and shear reinforcement amounted to 381.97 MPa, tensile reinforcement using a screw diameter of 15.8 mm, 11.9 mm diameter rebar press screw and shear reinforcement diameter 11.9 mm screw. High Quality Concrete compressive strength (BMT) without variation additives and substitutes aggregate (normal) obtained at 60.652MPa with FAS0.30. The results showed that all the beams undergo bending failure as planned. The result of bending capacity for normal beam is 2,696. The maximum deflection for a variety of additives obtained at BMT charcoal fly ash (FABB) by the percentage of the amount of deflection of the normal BMT amounted to 210.804% with a maximum load 273.305 kN, whereas, for fine aggregate substitution variation obtained at BMT Pozzolan Sand (PPAH) by the percentage of the amount of deflection 178.392% with a load of 257.02 KN. Comparison BMT beam ductility of charcoal fly ash to block the normal BMT amounted to 130.011%, while the beam BMT PPAH 19.751%. It can be concluded that variations and substitutions aggregate additive can increase the value of deflection and ductility of high quality concrete. Charcoal fly ash has the best value and highly effective to be used.*

Keywords : *High Strength Reinforced Concrete Beam, Bending Capacity, Additives, Aggregates Substitution, 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 super plasticizer*. 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 lentur balok beton bertulang mutu tinggi dengan variasi aditif dan substitusi agregat yaitu cangkang sawit, pasir pozzolan dan *fly ash* batubara. Pada penelitian ini diuji 7 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 lentur. Mutu baja (fy) yang digunakan untuk tulangan pokok sebesar 445,63 MPa dan tulangan geser sebesar 381,97 MPa, tulangan tarik yang digunakan berdiameter 15,8 mm ulir, tulangan tekan diameter 11,9 mm ulir dan tulangan geser diameter 11,9 mm ulir. 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 lentur sesuai yang direncanakan. Kapasitas lentur balok normal yang dihasilkan sebesar 2,696. Lentutan maksimum untuk variasi aditif didapat pada BMT *fly ash* batubara (FABB) dengan persentase besarnya lentutan terhadap BMT normal sebesar 210,804% dengan beban maksimum 273,305 kN, sedangkan untuk variasi substitusi agregat halus didapat pada BMT Pasir Pozzolan (PPAH) dengan persentase besarnya lentutan 178,392% dengan beban 257,02 KN. Perbandingan daktilitas balok BMT *fly ash* batubara terhadap balok BMT normal sebesar 130,011%, sedangkan pada balok BMT PPAH 19,751%. Dapat disimpulkan variasi aditif dan substitusi agregat dapat meningkatkan nilai lentutan dan daktilitas beton mutu tinggi. *Fly ash* batubara memiliki nilai yang terbaik dan sangat efektif untuk digunakan

Kata kunci : Balok Beton Bertulang Mutu Tinggi, Kapasitas Lentur, Aditif, Substitusi Agregat, Lentutan, 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).

Pasir pozzolan merupakan jenis material alam yang mengandung senyawa silika atau silika alumina dan alumina yang bentuknya halus sehingga dapat dimanfaatkan sebagai zat tambahan dan agregat pengganti. Begitu juga limbah yang berasal dari *fly ash* batubara dan 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 *fly ash* batubara, cangkang sawit, dan pasir pozzolan 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 lentur balok beton bertulang mutu tinggi menggunakan bahan *fly ash* batubara, cangkang sawit, serta pasir pozzolan sebagai aditif. Pada penelitian ini balok beton bertulang mutu tinggi dengan variasi aditif akan dibandingkan dengan balok beton bertulang mutu tinggi tanpa variasi aditif (normal). Diharapkan dari hasil penelitian ini didapatkan jenis aditif yang terbaik dalam memperbaiki nilai kapasitas lentur 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).

1. Fly Ash Batubara

Menurut ASTM C.618 (ASTM, 1995:304) abu terbang (*fly ash*) didefinisikan sebagai butiran halus hasil residu pembakaran batu bara atau bubuk batu bara. *Fly ash* dapat dibedakan menjadi dua, yaitu abu terbang yang normal dihasilkan dari pembakaran batu bara antrasit atau batu bara *bitomius* dan abu terbang kelas C yang dihasilkan dari batu bara jenis *lignite* atau *subbitumius*. Abu terbang kelas C kemungkinan mengandung kapur (*lime*) lebih dari 10% beratnya. Abu terbang merupakan limbah pembakaran batu bara yang butirannya lebih halus dari pada semen portland, yang mempunyai sifat-sifat hidrolis. Pada awalnya abu terbang ini digunakan sebagai bahan penambah semen dengan kadar 5 - 20% dengan maksud untuk menambah plastisitas adukan beton dan menambah kekedapan beton (Suhud, 1993).

2. 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.

3. Pasir Pozzolan

Pozzolan merupakan bahan yang mengandung senyawa silika alumina, yang tidak mempunyai sifat mengikat seperti semen akan tetapi dalam bentuknya yang halus dan dengan adanya air, maka senyawa-senyawa tersebut akan bereaksi dengan kalsium hidroksida pada suhu normal membentuk senyawa kalsium silikathidrat dan kalsium hidrat yang bersifat hidraulis (Sanjaya, 2008).

Saputra (2010) menyatakan bahwa pozzolan alam yang diambil dari Ujong Batee-Aceh Besar telah memenuhi syarat setelah melalui pemeriksaan komposisi kimia, berat jenis, dan modulus kehalusan dimana sifat fisis yang dimiliki memenuhi standar ASTM C.618-78.

4. 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 ViscoCrete 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).

1. Kuat lentur balok

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.

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

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

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

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).

Analisis balok bertulangan rangkap diperlihatkan pada Gambar 1.

2. 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). dan

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

$$V_c = \left(\frac{1}{6} \sqrt{f'_c} \right) b_w d \quad (2.6)^{(7)}$$

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 (mm^2);
- 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).

3. Lendutan

Menurut Nawy (1998), lendutan yang terjadi pada balok yang dibebani pada dua titik pembebanan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

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

$$\varphi_u = 0,7 \frac{\varepsilon_u}{c} [100(\rho - \rho')]^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\rho - \rho'}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ Jika } (\rho - \rho' < 0.03) \quad (11)$$

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

dimana :

Δ_{ult} = Lentutan 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 ($A'_s / b.d$).

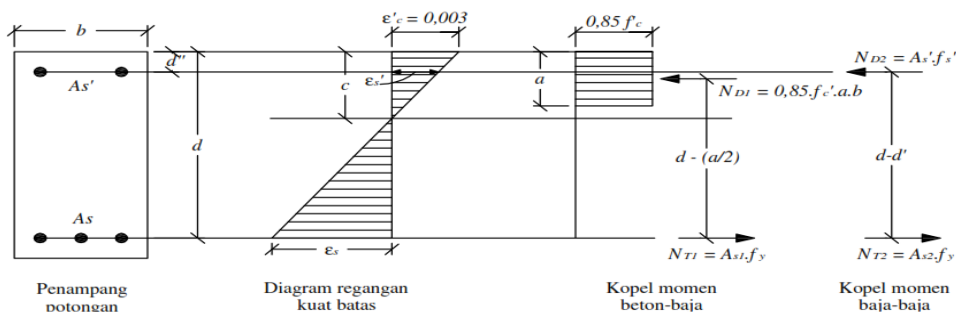
4. Daktilitas

Perilaku beton yang bersifat daktil dan getas dapat dilihat pada Gambar 4.

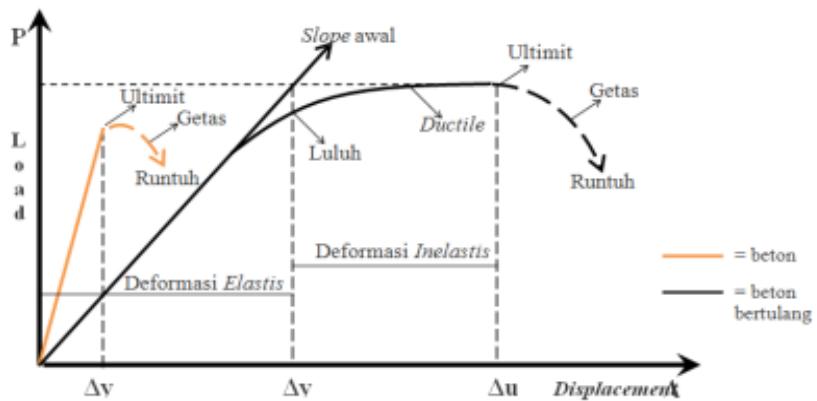
Daktilitas struktur ketika menerima beban merupakan pertimbangan penting bagi perencanaan bangunan dan merupakan sifat struktural yang dijadikan standar kelayakan untuk mengontrol kerusakan (Punmia, 2007).

Daktilitas dapat dihitung dengan Persamaan 13

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



Gambar 1. Distribusi Tegangan Pada Penampang Balok Tulangan Rangkap
Sumber : Dipohusodo (1994)



Gambar 4. Perilaku daktil dan getas pada beton.
Sumber : Punmia, B.C. at al, 200

METODE PENELITIAN

Prosedur Penelitian

1. Perencanaan balok beton bertulang mutu tinggi

Perhitungan awal mengenai kapasitas momen lentur dilakukan guna mendapatkan

gambaran apakah benda uji balok yang direncanakan mengalami gagal lentur. Berdasarkan analisis yang dilakukan untuk mendapatkan benda uji gagal menahan beban lentur maka didapat ukuran dan jumlah tulangan seperti terlihat pada Tabel 1.

2. Pembuatan Benda Uji

Benda uji untuk pengujian kuat lentur adalah balok ukuran 15 cm x 30 cm x 220 cm, sebanyak tujuh buah balok. Enam balok merupakan variasi substitusi agregat dan aditif, sedangkan satu benda uji merupakan balok normal tanpa substitusi agregat dan aditif, yang digunakan sebagai benda uji pembandingan.

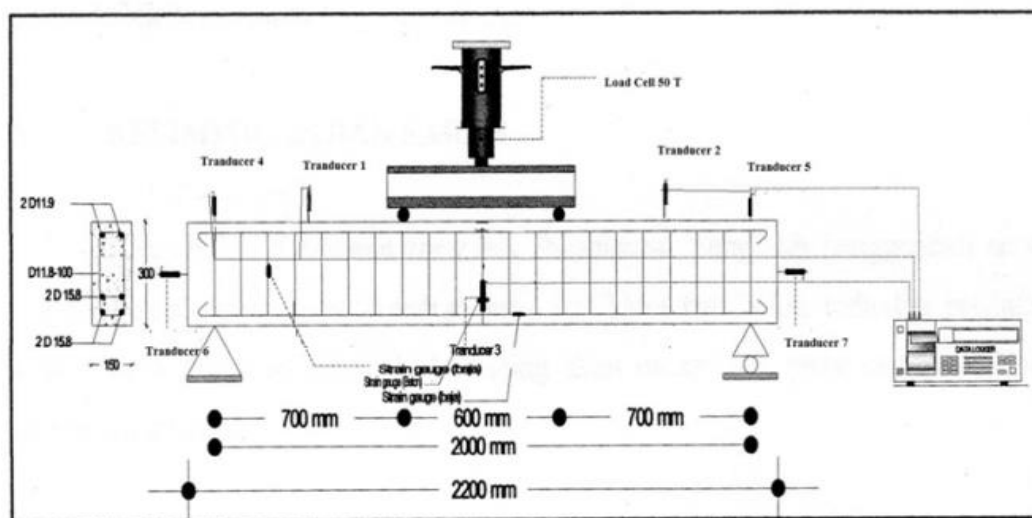
3. Pengujian kuat lentur beton bertulang

Set up pengujian benda uji balok dapat dilihat pada Gambar 7. Adapun perilaku yang diamati adalah sebagai berikut :

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

Tabel 1. Ukuran dan Jumlah Tulangan Benda Uji

Variasi Benda Uji	Benda Uji Balok	Dimensi Balok	Tulangan Pokok		Tulangan Geser	Jumlah
			Tekan	Tarik		
Beton Tinggi Normal Bertulang Mutu	BMT Normal	15 cm x 30 cm x 220 cm	2D11,9	4D15,8	D11,9-100	1
Beton Tinggi Cangkang Agregat Halus Bertulang Mutu	BMT CSAH	15 cm x 30 cm x 220 cm	2D11,9	4D15,8	D11,9-100	1
Beton Tinggi Cangkang Agregat Halus Bertulang Mutu	BMT CSAK	15 cm x 30 cm x 220 cm	2D11,9	4D15,8	D11,9-100	1
Beton Tinggi Pasir Pozzolan Agregat Halus Bertulang Mutu	BMT PPAH	15 cm x 30 cm x 220 cm	2D11,9	4D15,8	D11,9-100	1
Beton Tinggi Pasir Pozzolan Aditif Bertulang Mutu	BMT PPA	15 cm x 30 cm x 220 cm	2D11,9	4D15,8	D11,9-100	1
Beton Tinggi Fly Ash Aditif Bertulang Mutu	BMT FABB	15 cm x 30 cm x 220 cm	2D11,9	4D15,8	D11,9-100	1
Beton Tinggi Cangkang Aditif Bertulang Mutu	BMT CSA	15 cm x 30 cm x 220 cm	2D11,9	4D15,8	D11,9-100	1



Gambar 7. Set Up Pembebanan Benda Uji Balok

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

1. Pengujian kuat tarik baja

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

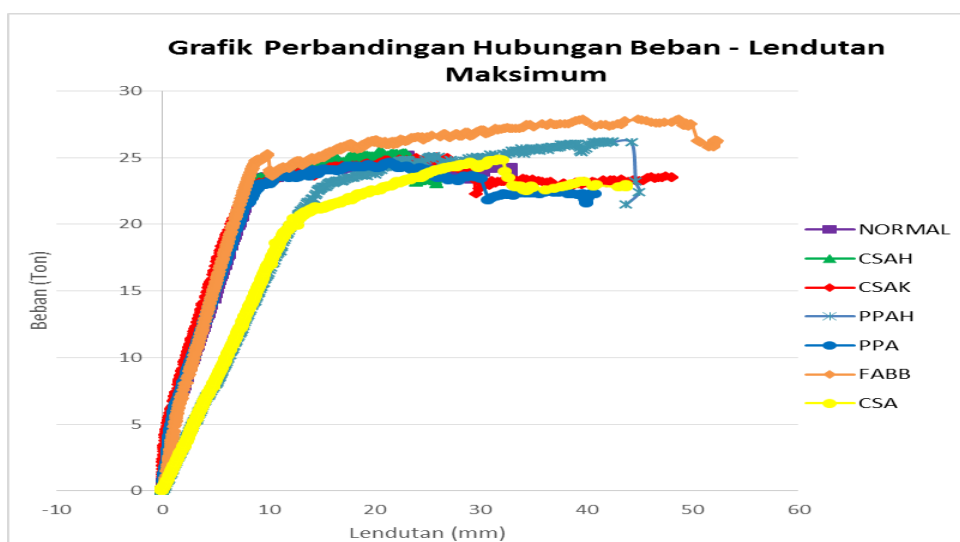
Tabel 6. Hasil Perhitungan Uji Tarik Baja

No	Diameter mm	No. Benda Uji	Tegangan Leleh (kg/cm ²)	Tegangan Leleh Rata-rata (kg/cm ²)	Regangan Leleh (%)	Modulus Elastisitas (kg/cm ²)	Modulus Elastisitas Rata-Rata (kg/cm ²)	Jenis Besi
1	11,9	BU. 1	3947,04	3819,72	0,195	2026723	2086732	Ulir
		BU. 2	3692,39		0,172	2146741		
2	15,8	BU. 1	4710,99	4456,34	0,248	1903429	1964170	Ulir
		BU. 2	4201,69		0,208	2024911		

2. 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 8.



Gambar 8. Grafik Perbandingan Variasi Aditif dan Substitusi Agregat Terhadap Beban-Lendutan di Tengah Bentang Balok BMT

Pada Gambar 8 juga terlihat bahwa grafik PPAH dan CSA lebih landai jika dibandingkan dengan lima grafik lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa balok beton bertulang mutu tinggi dengan substitusi agregat PPAH dan aditif CSA kekakuannya lebih kecil jika dibandingkan dengan kelima balok lainnya.

b. Beban dan regangan baja tarik

Grafik hubungan beban dan regangan

baja tarik terhadap variasi aditif dan substitusi agregat dapat dilihat pada Gambar 9. Pada Gambar 9 dapat dilihat bahwa Balok BMT normal memiliki regangan baja tulangan tarik sebesar $103,108 \mu\epsilon$ atau $0,0103$ pada beban $24,24$ ton. Balok BMT CSAH memiliki regangan baja tulangan tarik sebesar $291,581 \mu\epsilon$ atau $0,0291$ pada beban $25,45$ ton.

Balok BMT CSAK memiliki regangan

baja tulangan tarik sebesar 80,897 $\mu\epsilon$ atau 0,00809 pada beban 25,03 ton. Balok BMT PPAH memiliki regangan baja tulangan tarik sebesar 405,267 $\mu\epsilon$ atau 0,0405 pada beban 23,142 ton. Balok BMT PPA memiliki regangan baja tulangan tarik sebesar 1,245 $\mu\epsilon$ atau 0,00125 pada beban 24,62 ton. Balok BMT FABB memiliki regangan baja tulangan tarik sebesar 107,125 $\mu\epsilon$ atau 0,0107 pada beban 24,070 ton. Sedangkan balok BMT CSA memiliki regangan baja tulangan tarik sebesar 569,911 $\mu\epsilon$ atau 0,0569 pada beban 24,86 ton.

d. Beban dan regangan beton

Grafik hubungan beban dan regangan beton terhadap variasi aditif dan substitusi agregat dapat dilihat pada Gambar 11. Dari Gambar 11 dapat dilihat bahwa balok BMT normal memiliki regangan beton sebesar 238,095 $\mu\epsilon$ pada beban 24,17 ton. Balok BMT CSAH memiliki regangan beton sebesar 5,155 $\mu\epsilon$ pada beban 25,45 ton. Balok BMT CSAK memiliki regangan beton sebesar 416,202 $\mu\epsilon$

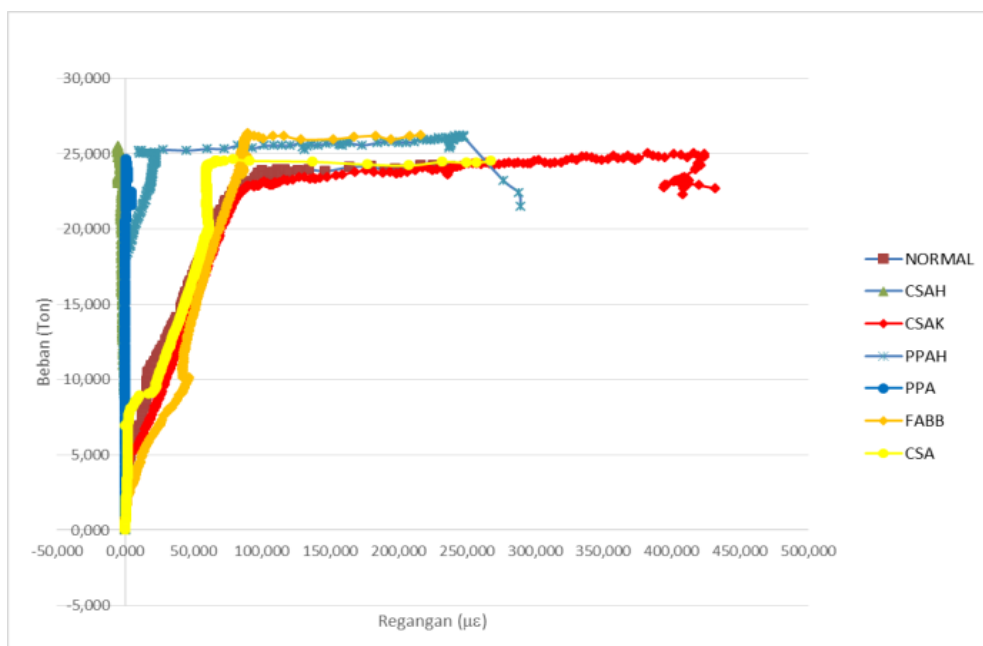
pada beban 25,03 ton. Balok BMT PPAH memiliki regangan beton sebesar 244,822 $\mu\epsilon$ pada beban 26,20 ton. Balok BMT PPA memiliki regangan beton sebesar 0,722 $\mu\epsilon$ pada beban 24,62 ton. Balok BMT FABB memiliki regangan beton sebesar 216,451 $\mu\epsilon$ pada beban 26,20 ton. Balok BMT CSA memiliki regangan beton sebesar 267,762 $\mu\epsilon$ pada beban 24,48 ton. Terlihat pada semua variasi aditif dan substitusi agregat, regangan yang terbaca pada grafik tetap linier.

e. Perbandingan teoritis dengan laboratorium terhadap kapasitas balok BMT normal dengan variasi aditif dan substitusi agregat

Kapasitas balok dengan variasi aditif dan substitusi agregat yang diperlihatkan pada Tabel 7 dapat disimpulkan bahwa, untuk beton mutu tinggi dengan variasi aditif dan substitusi agregat dapat meningkatkan kuat lentur beton mutu tinggi dibandingkan dengan beton mutu tinggi normal.



Gambar 9. Grafik Hubungan Beban- Regangan Baja Tarik Terhadap Variasi Aditif dan Subtitusi Agregat



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

Tabel 7. Perbandingan Kapasitas Balok BMT Normal dengan Balok BMT Variasi Aditif dan Substitusi Agregat Terhadap Teoritis dan Laboratorium Untuk Beban Maksimum

Benda Uji Balok	f_c (Mpa)	f_y Lentur (Mpa)	f_y Geser (Mpa)	Jarak Senggang (mm)	Berat Benda Uji (Kg)	Beban Maksimum (KN)			
						Pu	Plab	Plab/Pu	Plab/Berat
Normal	60,650	445,634	381,972	10,000	270,000	206,551	246,916	1,195	93,222
CSAH	63,890	445,634	381,972	10,000	268,000	207,538	249,663	1,203	94,963
CSAK	67,500	445,634	381,972	10,000	255,000	208,570	245,543	1,177	98,157
PPAH	66,680	445,634	381,972	10,000	269,200	208,342	257,020	1,234	97,325
PPA	66,420	445,634	381,972	10,000	272,000	208,269	241,521	1,160	90,515
FABB	64,560	445,634	381,972	10,000	268,000	207,735	273,305	1,316	103,955
CSA	58,770	445,634	381,972	10,000	268,200	205,946	243,875	1,184	92,692

Tabel 8. Perbandingan Kapasitas Balok BMT Normal dengan Balok BMT Variasi Aditif dan Substitusi Agregat Terhadap Teoritis dan Laboratorium Untuk Momen Lentur

Benda Uji Balok	f_c (Mpa)	f_y Lentur (Mpa)	f_y Geser (Mpa)	Jarak Senggang (mm)	Berat Benda Uji (Kg)	Momen Lentur (KN.m)		
						Mn	Mlab	Mlab/Mn
Normal HSC	60,650	445,634	381,972	10,000	270,000	72,293	86,421	1,195
CSAH	63,890	445,634	381,972	10,000	268,000	72,638	87,382	1,203
CSAK	67,500	445,634	381,972	10,000	255,000	73,000	85,940	1,177
PPAH	66,680	445,634	381,972	10,000	269,200	72,920	89,957	1,234
PPA	66,420	445,634	381,972	10,000	272,000	72,894	84,532	1,160
FABB	64,560	445,634	381,972	10,000	268,000	72,707	95,657	1,316
CSA	58,770	445,634	381,972	10,000	268,200	72,081	85,356	1,184

Tabel 9. Perbandingan Kapasitas Balok BMT Normal dengan Balok BMT Variasi Aditif dan Substitusi Agregat Terhadap Teoritis dan Laboratorium Untuk Nilai Lentutan

Benda Uji Balok	f_c (Mpa)	f_y Lentur (Mpa)	f_y Geser (Mpa)	Jarak Senggang (mm)	Berat Benda Uji (Kg)	Lentutan (mm)		
						Δ teori	Δ lab	Δ lab/ Δ teori
Normal HSC	60,650	445,634	381,972	10,000	270,000	16,919	23,140	1,368
CSAH	63,890	445,634	381,972	10,000	268,000	17,607	20,450	1,161
CSAK	67,500	445,634	381,972	10,000	255,000	21,684	25,930	1,196
PPAH	66,680	445,634	381,972	10,000	269,200	18,190	41,280	2,269
PPA	66,420	445,634	381,972	10,000	272,000	17,579	21,440	1,220
FABB	64,560	445,634	381,972	10,000	268,000	17,747	48,780	2,749
CSA	58,770	445,634	381,972	10,000	268,200	17,747	31,800	1,792

Pembahasan

Kuat Lentur Balok BMT Variasi Aditif dan Substitusi Agregat

1. Lentutan

Perbandingan lentutan balok BMT dengan variasi aditif dan substitusi agregat terhadap balok BMT normal dapat dilihat Tabel 10. Dari nilai lentutan pada Tabel 10 balok BMT dengan variasi aditif dan substitusi agregat cenderung dapat meningkatkan nilai lentutan balok beton mutu tinggi. Pada balok BMT CSAH dan PPA, lentutan maksimum yang terjadi lebih rendah dari lentutan pada balok BMT normal, tetapi nilai lentutan tersebut masih lebih tinggi dibandingkan dengan lentutan yang dihitung secara teoritis. Lentutan maksimum didapat pada BMT FABB dengan persentase besarnya lentutan terhadap BMT normal sebesar 210,804 %, meningkat 110,804 % dari BMT normal, hal ini dikarenakan *fly ash* batubara memiliki diameter butiran yang kecil sehingga penyebaran pada matrik campuran lebih merata. Peningkatan lentutan yang terjadi pada BMT dengan variasi aditif dan substitusi agregat sangat bervariasi antara 12,057 – 110,804 %.

2. Retak dan *Fracture/gagal*

Retak yang terjadi pada pengujian balok BMT dengan variasi aditif dan substitusi agregat dapat dilihat pada Tabel 11 hingga 13 dibawah ini.

Dari Tabel 11 hingga 13 dapat disimpulkan bahwa variasi aditif dan substitusi agregat dapat meningkatkan beban terjadinya retak

awal dengan kisaran beban 3,65 ton sampai 4,76 ton.

Jumlah retak semakin banyak seiring dengan penambahan beban. Balok BMT normal pada saat beban maksimum salah satu retak lentur membesar sampai pada bagian balok atau beton telah luluh selanjutnya diikuti luluh tulangan lentur dan dapat dikatakan balok tersebut getas. Sementara itu 6 balok yang lain yaitu BMT dengan variasi aditif dan substitusi agregat, pada beban lebih besar dari 75% beban maksimum terjadi perubahan grafik hubungan beban – lentutan dari linier ke plastis disini menunjukkan bahwa tulangan lentur telah luluh perlahan dan diikuti dengan luhunya beton atau dengan kata lain variasi aditif dan substitusi agregat kedalam beton mutu tinggi dapat meminimalisir sifat getas. Pembentukan retak pada umumnya dari setiap benda uji berbeda-beda, tetapi kehancuran yang terjadi sama yaitu kehancuran lentur atau gagal lentur. Hal ini di tunjukkan dengan dominannya retak di daerah lentur.

3. Daktilitas

Berdasarkan Tabel 14 dapat dilihat bahwa variasi aditif dan substitusi agregat dapat meningkatkan nilai daktilitas balok BMT. Pada balok BMT PPAH terjadi peningkatan nilai daktilitas yaitu sebesar 19,751 % dibandingkan dengan balok BMT normal, selain dapat meningkatkan kapasitas lentur balok BMT yaitu sebesar 26,2 ton. Pada balok BMT FABB terjadi peningkatan daktilitas terbesar terhadap balok BMT normal yaitu sebesar 130,011 %.

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 aditif *fly ash* batubara memiliki nilai yang terbaik dan sangat efektif digunakan dibandingkan yang lainnya dan

juga dapat meningkatkan kapasitas beban lentur maksimum sebesar 27,86 ton dibandingkan dengan balok pembanding sebesar 25,17 ton, hal ini dikarenakan *fly ash* batubaramemiliki ukuran butiran diameter yang halus sehingga penyebaran pada matrik campuran lebih merata dapat meningkatkan kapasitas lentur balok BMT.

Tabel 10. Perbandingan Lentutan Balok BMT Normal dengan Variasi Aditif dan Substitusi Agregat

Benda Uji Balok	Lentutan Maks (mm)	Perbandingan Lentutan Terhadap Lentutan Normal HSC	
		Persen (%)	Selisih (%)
NORMAL HSC	23,140	100,000	-
CSAH	20,450	88,375	-11,625
CSAK	25,930	112,057	12,057
PPAH	41,280	178,392	78,392
PPA	21,440	92,653	-7,347
FABB	48,780	210,804	110,804
CSA	31,800	137,424	37,424

Tabel 11. Hasil Uji Laboratorium untuk Hasil Retakan Pertama

Benda Uji Balok	P (ton)	Lentutan (mm)	Retakan Pertama		Regangan Beton
			Tarik	Geser	
Normal HSC	3,520	0,540	0,728	-0,021	1,533
CSAH	3,930	0,630	2,300	0,274	0,788
CSAK	4,000	0,330	2,342	-0,085	2,002
PPAH	4,720	2,770	19,960	0,359	0,937
PPA	4,760	0,870	0,035	0,000	0,017
FABB	3,650	0,910	4,389	0,085	7,732
CSA	4,550	2,720	7,490	-0,910	1,981

Tabel 12. Hasil Uji Laboratorium untuk Hasil Nilai Peralihan

Benda Uji Balok	P(ton)	Lentutan (mm)	Peralihan		
			Tarik	Geser	Regangan Beton
Normal HSC	23,480	9,700	49,430	0,760	96,898
CSAH	23,070	8,460	66,191	-0,443	-0,980
CSAK	23,070	9,540	48,108	7,861	109,525
PPAH	22,140	14,450	53,994	2,005	15,442
PPA	21,720	8,190	0,622	0,000	1,455
FABB	24,830	8,890	0,000	0,464	87,245
CSA	21,210	14,730	119,468	6,477	60,641

Tabel 13. Hasil Uji Laboratorium untuk Hasil Retakan Akhir

Benda Uji Balok	P(ton)	Lentutan (mm)	Beban Maksimum		
			Tarik	Geser	Regangan Beton
Normal HSC	25,170	23,140	0,000	14,454	0,000
CSAH	25,450	20,450	291,581	9,727	-5,155
CSAK	25,030	25,930	80,897	9,431	416,202
PPAH	26,200	41,280	0,000	13,631	244,822
PPA	24,620	21,440	1,245	0,034	0,722
FABB	27,860	48,780	0,000	6,014	0,000
CSA	24,860	31,800	569,911	8,967	0,000

Tabel 14. Data Hasil Perhitungan Daktilitas Balok BMT dengan Variasi Penambahan Serat

Variasi Benda Uji	Kondisi Luluh		Kondisi Ultimit		Daktilitas $\mu = \Delta u / \Delta y$	Perbandingan Terhadap BMT Normal
	Beban (Ton)	Lendutan (mm)	Beban (Ton)	Lendutan (mm)		
Normal HSC	23,48	9,7	25,17	23,14	2,386	- %
CSAH	23,07	8,46	25,45	20,45	2,417	1,328 %
CSAK	23,07	9,54	25,03	25,93	2,718	13,936 %
PPAH	22,14	14,45	26,2	41,28	2,857	19,751 %
PPA	21,72	8,19	24,62	21,44	2,618	9,736 %
FABB	24,83	8,89	27,86	48,78	5,487	130,011 %
CSA	20,93	13,75	24,86	31,8	2,313	-3,053 %



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 lentur.
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 fly ash batubara dengan persentase besarnya lendutan terhadap BMT normal sebesar 210,804 %, hal ini dikarenakan fly ash batubara memiliki diameter butiran yang kecil sehingga penyebaran pada matrik campuran lebih merata. Sedangkan lendutan maksimum untuk variasi substitusi agregat halus didapat pada pasir pozzolan dengan persentase besarnya lendutan terhadap BMT normal sebesar 178,392 %.
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 signifikan, untuk variasi aditif fly ash batubara memiliki nilai yang terbaik dan sangat efektif digunakan, sedangkan untuk substitusi agregat halus pasir pozzolan memiliki nilai daktilitas yang tertinggi. Variasi aditif dan substitusi agregat pada balok dapat meningkatkan kapasitas beban lentur maksimum sebesar 27,86 ton dibandingkan dengan balok pembanding sebesar 25,17 ton.

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.