

PENGARUH VARIASI ASPECT RATIO SERAT ROVING TERHADAP KUAT LENTUR DAN GESER BALOK BETON NORMAL

Dini Aulia Ramdani¹, Akhmad Suryadi², Rizki Putri Ramadhani³

Mahasiswa Manajemen Rekayasa Konstruksi, Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang¹, Dosen Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang^{2,3}

Email: 2241320057@student.polinema.ac.id, akhmad.suryadi@polinema.ac.id, rizki_putri@polinema.ac.id

ABSTRAK

Beton adalah material konstruksi yang paling banyak digunakan karena memiliki kuat tekan tinggi, tetapi relatif lemah terhadap gaya tarik dan lentur. Penambahan serat ke dalam matriks beton telah terbukti efektif mengontrol retak melalui mekanisme crack bridging, namun pengaruh aspect ratio terhadap kuat lentur dan perilaku geser balok beton normal masih terbatas dikaji. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi aspect ratio serat roving terhadap kuat lentur, perilaku geser, dan efisiensi biaya balok beton normal. Metode eksperimental dilakukan dengan variasi serat roving 0%, 1%, 3%, dan 5% terhadap berat semen, dengan panjang serat 3 cm (AR 1:158) dan 5 cm (AR 1:263). Benda uji berupa balok beton berukuran 15×15×60 cm sebanyak 21 buah untuk pengujian kuat lentur dan pengamatan pola retak, serta silinder berukuran 15×30 cm sebanyak 28 buah untuk pengujian kuat tekan dan kuat tarik belah. Hasil menunjukkan kuat lentur tertinggi pada beton berserat diperoleh pada variasi 5%-3 cm sebesar 3,911 MPa, sedangkan kuat tarik belah optimum sebesar 2,62 MPa yang meningkat 13,4% dari beton normal (2,31 MPa). Pengamatan pola retak mengindikasikan serat roving efektif mengubah mode keruntuhan dari getas menjadi lebih daktail melalui mekanisme penjembatanan retak. Biaya produksi 1 m³ beton meningkat seiring kadar serat, dari Rp1.707.958,39 (0%) menjadi Rp2.139.628,39 (5%). Variasi 5% dengan panjang serat 3 cm memberikan keseimbangan optimal antara peningkatan kuat tarik belah, kontrol retak, dan efisiensi biaya.

Kata kunci : beton berserat; serat roving; aspect ratio; kuat lentur; perilaku geser

ABSTRACT

Concrete is the most widely used construction material because it has high compressive strength, but is relatively weak against tensile and flexural forces. The addition of fibers to the concrete matrix has been proven effective in controlling cracks through the crack bridging mechanism, but the effect of aspect ratio on the flexural strength and shear behavior of normal concrete beams is still limited. This study aims to analyze the effect of roving fiber aspect ratio variation on flexural strength, shear behavior, and cost efficiency of normal concrete beams. An experimental method was conducted with roving fiber variations of 0%, 1%, 3%, and 5% by cement weight, with fiber lengths of 3 cm (AR 1:158) and 5 cm (AR 1:263). Test specimens included concrete beams measuring 15×15×60 cm as many as 21 pieces for flexural testing and crack pattern observation, and cylinders measuring 15×30 cm as many as 28 pieces for compressive and splitting tensile strength testing. The results showed that the highest flexural strength of fiber-reinforced concrete was obtained at the 5%-3 cm variation of 3.911 MPa, while the optimum splitting tensile strength was 2.62 MPa (increased 13.4% from normal concrete). Crack pattern observations indicated that roving fibers effectively changed the failure mode from brittle to more ductile through the crack bridging mechanism. The production cost of 1 m³ of concrete increased with fiber content, from Rp1,707,958.39 (0%) to Rp2,139,628.39 (5%). The 5% variation with 3 cm fiber length provided an optimal balance between splitting tensile strength improvement, crack control, and cost efficiency.

Keywords : fiber-reinforced concrete; roving fiber; aspect ratio; flexural strength; shear

1. PENDAHULUAN

Beton merupakan material konstruksi yang banyak digunakan karena memiliki kuat tekan tinggi, tetapi relatif lemah terhadap gaya tarik dan lentur [1]. Kelemahan ini menyebabkan beton mudah mengalami retak ketika menerima beban yang menghasilkan momen lentur maupun gaya geser. Retak yang terbentuk dapat berkembang dengan cepat hingga menyebabkan keruntuhan getas tanpa memberikan tanda yang signifikan [2], [3].

Berbagai penelitian telah memanfaatkan serat sebagai bahan tambah untuk meningkatkan kinerja beton. Serat yang tersebar di dalam matriks berfungsi sebagai crack bridging yang menghambat pembukaan dan propagasi retak melalui mekanisme transfer tegangan [2]. Khrisna et al. [4] memperoleh kuat tarik belah optimum sebesar 2,062 MPa pada campuran beton dengan 10% serat roving dan substitusi serbuk cangkang kerang. Ridha Syah et al. [5] melaporkan kuat lentur maksimum 3,87 MPa pada beton dengan 15% serat roving dan limbah cangkang tiram. Sementara itu, Setya Wijaya dan Tandi [6] menunjukkan bahwa penggunaan serat kawat nyamuk sebesar 5% mampu meningkatkan kuat tarik belah, meskipun disertai penurunan kuat tekan.

Meskipun demikian, penelitian terdahulu umumnya hanya mengkaji pengaruh persentase serat, sedangkan aspect ratio (rasio panjang terhadap diameter, L/D) belum banyak diteliti sebagai variabel utama. Padahal, aspect ratio berpengaruh terhadap panjang penjangkaran serat dan efektivitas mekanisme pull-out di dalam matriks beton [2]. Pham [2] menyatakan bahwa aspect ratio merupakan parameter penting yang memengaruhi perilaku pasca-retak beton berserat. Hu et al. [3] melaporkan bahwa serat dengan aspect ratio tinggi mampu meningkatkan daktilitas, sedangkan Biswas et al. [7] menunjukkan bahwa terdapat nilai aspect ratio optimum karena nilai yang terlalu tinggi dapat menurunkan kinerja akibat distribusi serat yang kurang merata.

Berbeda dengan serat baja, serat roving berbasis filamen kaca memiliki karakteristik berupa bundel filamen kontinu yang memberikan mekanisme ikatan tersendiri dengan pasta semen [8]. Namun, pengaruh variasi aspect ratio serat roving terhadap kuat lentur, perilaku geser, serta aspek ekonomi beton normal masih belum banyak dikaji secara komprehensif.

Berdasarkan research gap tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi aspect ratio serat roving terhadap (1) kuat lentur balok beton normal, (2) perilaku geser berdasarkan pola retak dan mode keruntuhan, (3) hubungan antara kuat tekan, kuat tarik belah, dan kuat lentur, serta (4) efisiensi ekonomi campuran melalui analisis biaya.

2. METODE

Berisi berupa uraian tahapan penelitian secara rinci dengan desain, metode, atau pendekatan yang digunakan dalam menjawab permasalahan untuk mencapai tujuan penelitian, tanpa mencantumkan bagan alir, sitasi memakai sistem IEEE. Penelitian menggunakan pendekatan eksperimental laboratorium dengan desain *completely randomized design*. Faktor yang divariasikan adalah kadar serat roving (0%, 1%, 3%, dan 5% terhadap berat semen) dan panjang serat (3 cm dan 5 cm), menghasilkan tujuh perlakuan dengan tiga replikasi untuk pengujian lentur serta tiga replikasi untuk pengujian tarik belah pada masing-masing variasi.

Material penyusun beton meliputi Semen Portland Composite Cement (PCC) tipe I dengan berat jenis 2,94 gr/cm³, pasir cor Lumajang (modulus kehalusan 2,72; berat jenis SSD 2,64 gr/cm³; kadar air 8,39%), kerikil pecah Pasuruan ukuran maksimum 19 mm (berat jenis SSD 2,71 gr/cm³; keausan Los Angeles 10,57%; kekerasan 24,08%), dan serat roving kaca (*glass fiber*) dengan diameter efektif 0,19 mm yang dipotong 3 cm (AR 1:158) dan 5 cm (AR 1:263). Pengujian kuat tarik serat roving menunjukkan kuat tarik rata-rata 3.994,62 MPa.

Perancangan campuran mengacu pada SNI 03-2834-2000 [9] untuk beton normal dengan kuat tekan rencana $f'_c = 20$ MPa pada umur 28 hari. Parameter perancangan meliputi faktor air semen (FAS) 0,60, kadar semen 341,67 kg/m³, kadar air bebas 205 kg/m³, persentase pasir terhadap total agregat 43%, dan berat isi beton 2.387,5 kg/m³. Serat roving ditambahkan sebagai persentase dari berat semen dan dihitung sebagai berat tambahan tanpa menggantikan komposisi beton dasar. Prosedur pencampuran melibatkan penambahan serat secara bertahap ke dalam *mixer* setelah agregat kasar dan halus tercampur, untuk memastikan distribusi serat merata dan menghindari *balling effect*.

Benda uji terdiri dari 21 balok beton berukuran 15×15×60 cm untuk pengujian kuat lentur dan pengamatan pola retak, serta 28 silinder beton berukuran 15×30 cm untuk pengujian kuat tekan (9 silinder beton normal pada umur 7, 21, dan 28 hari) dan kuat tarik belah (19 silinder dengan variasi serat pada umur 28 hari). Pengujian kuat lentur dilakukan dengan metode dua titik pembebanan sesuai SNI 4431-2011 [10] menggunakan bentang tumpuan 450 mm dan laju pembebanan 8–10 kg/cm² per menit. Pengujian kuat tekan mengacu pada SNI 1974-2011 [11], sementara kuat tarik belah mengacu pada SNI 03-2491-2002. Pengujian *slump* dilakukan pada seluruh variasi untuk mengevaluasi *workability* beton segar.

Pengamatan perilaku geser dilakukan secara kualitatif melalui dokumentasi foto pola retak setelah pengujian lentur dengan parameter lokasi retak, arah retak, sudut retak

diagonal, lebar retak, dan mode keruntuhan. Analisis data kuat lentur menggunakan persamaan:

$$\sigma_l = \frac{P.L}{b.h^2}$$

dengan σ_l adalah kuat lentur (MPa), P adalah beban maksimum (N), L adalah bentang tumpuan (mm), b adalah lebar balok (mm), dan h adalah tinggi balok (mm). Regangan lentur dihitung dengan:

$$\varepsilon = \frac{6.\delta.h}{L^2}$$

dengan ε adalah regangan, δ adalah lendutan (mm), dan L adalah bentang tumpuan (mm). Analisis biaya dilakukan dengan menyusun Rencana Anggaran Biaya (RAB) untuk setiap variasi campuran per 1 m³ beton, per 1 balok, dan per 1 silinder.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Uji Sifat Fisik Material

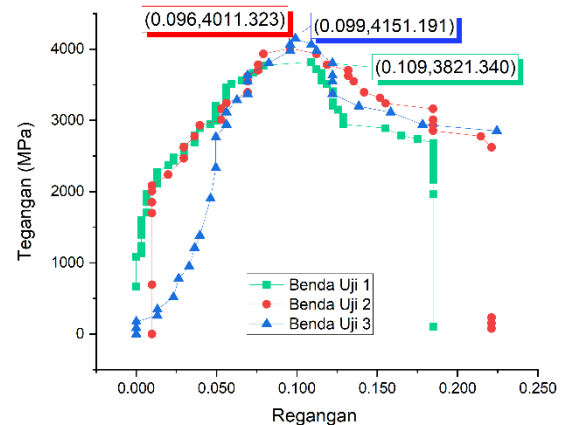
Sebelum dilakukan pengujian mekanik, seluruh material penyusun beton terlebih dahulu diuji untuk memastikan kesesuaiannya terhadap persyaratan yang berlaku. Hasil pengujian menunjukkan bahwa agregat halus memiliki kadar air sebesar 8,39%, berat jenis kering 2,60 gr/cm³, berat jenis SSD 2,64 gr/cm³, berat jenis semu 2,72 gr/cm³, penyerapan 1,75%, kadar lumpur 4,23%, kadar organik Grid 1, dan modulus kehalusan 2,72. Sementara itu, agregat kasar memiliki kadar air 1,75%, berat jenis kering 2,66 gr/cm³, berat jenis SSD 2,71 gr/cm³, berat jenis semu 2,81 gr/cm³, penyerapan 2,07%, kekerasan 24,08%, keausan Los Angeles 10,57%, serta modulus kehalusan 6,74. Pengujian semen juga menghasilkan berat jenis rata-rata sebesar 2,94 gr/cm³. Seluruh hasil pengujian menunjukkan bahwa material yang digunakan telah memenuhi persyaratan sebagai bahan penyusun beton normal sesuai standar yang digunakan dalam penelitian [10].

3.2 Kuat Tarik Serat Roving

Pengujian kuat tarik dilakukan untuk mengetahui kemampuan mekanik serat roving sebelum digunakan sebagai bahan tambah pada campuran beton. Hasil pengujian menunjukkan bahwa serat roving memiliki kuat tarik rata-rata sebesar 3.994,62 MPa, sehingga berpotensi meningkatkan kinerja mekanik beton.

Nilai kuat tarik serat roving yang tinggi menunjukkan bahwa serat memiliki kapasitas yang memadai untuk menahan gaya tarik setelah matriks beton mengalami retak awal. Walaupun kuat tarik serat jauh lebih tinggi dibandingkan kuat tarik beton, peningkatan sifat mekanik beton tidak hanya ditentukan oleh kekuatan serat, tetapi juga dipengaruhi oleh kualitas ikatan antara serat dan pasta semen, distribusi serat di dalam matriks, serta panjang penjangkaran (anchorage length). Oleh karena itu, efektivitas serat roving dalam

meningkatkan kinerja beton bergantung pada interaksi antara karakteristik serat dan matriks beton [2].



Gambar 1. Grafik Tegangan-Regangan Serat Roving

Berdasarkan grafik tegangan–regangan, tegangan meningkat seiring bertambahnya regangan hingga mencapai nilai maksimum sebelum serat mengalami keruntuhan. Hal ini menunjukkan bahwa serat roving memiliki kuat tarik tinggi dan mampu berperan sebagai crack bridging dalam mempertahankan transfer tegangan setelah beton mengalami retak awal [7].

3.2 Kuat Lentur Beton

Hasil pengujian kuat lentur pada umur 28 hari disajikan pada Tabel 1. Beton normal (kontrol) menghasilkan kuat lentur 4,222 MPa, yang secara signifikan melampaui nilai empiris 2,982 MPa berdasarkan hubungan $f_r = 0,62\sqrt{f'_c}$. Temuan ini mengindikasikan kualitas material dan pelaksanaan yang sangat baik pada campuran kontrol.

Tabel 1. Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton dengan Serat Roving Panjang 3cm

Variasi Serat	Panjang (cm)	Aspect Ratio	Kuat Lentur (MPa)
0% (Kontrol)	-	-	4,222
1%	3	1:158	3,467
3%	3	1:158	2,933
5%	3	1:158	3,911

Berdasarkan Tabel 1, seluruh variasi beton berserat menghasilkan kuat lentur yang lebih rendah dibandingkan beton normal. Pada panjang serat 3 cm (AR 1:158), kuat lentur mengalami penurunan dari 3,467 MPa pada kadar serat 1% menjadi 2,933 MPa pada kadar 3%, kemudian meningkat menjadi 3,911 MPa pada kadar 5%. Pola ini menunjukkan bahwa pada kadar serat rendah hingga sedang, jumlah serat

belum mampu memberikan mekanisme crack bridging secara efektif. Namun pada kadar 5%, peningkatan jumlah serat memperbesar peluang terjadinya stress transfer pada bidang retak sehingga kuat lentur kembali meningkat. Variasi 5%-3 cm menjadi variasi terbaik pada beton berserat karena menghasilkan kuat lentur tertinggi sebesar 3,911 MPa.

Tabel 2. Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton dengan Serat Roving Panjang 5cm

Variasi Serat	Panjang (cm)	Aspect Ratio	Kuat Lentur (MPa)
0% (Kontrol)	-	-	4,222
1%	5	1:263	3,111
3%	5	1:263	3,556
5%	5	1:263	3,733

Berdasarkan Tabel 2 dan Gambar 3, kuat lentur pada variasi panjang serat 5 cm (AR 1:263) menunjukkan tren peningkatan yang konsisten seiring bertambahnya kadar serat, yaitu dari 3,111 MPa (1%) menjadi 3,556 MPa (3%) dan 3,733 MPa (5%). Peningkatan tersebut mengindikasikan bahwa serat dengan aspect ratio lebih tinggi memiliki panjang penjangkaran (anchorage length) yang lebih besar sehingga mekanisme crack bridging berlangsung lebih efektif pada berbagai kadar serat. Meskipun demikian, nilai kuat lentur maksimum masih berada di bawah variasi 5%-3 cm, yang menunjukkan bahwa pada beton normal dengan kuat tekan sedang, jumlah serat yang tersebar dalam matriks memberikan pengaruh yang lebih besar dibandingkan panjang seratnya. Hasil ini sejalan dengan Biswas et al. [7], yang menyatakan bahwa distribusi serat dan fraksi volume berperan penting dalam meningkatkan kapasitas lentur beton berserat.

Secara umum, kuat lentur beton berserat lebih rendah dibanding beton normal. Hal ini dipengaruhi oleh terbentuknya porositas mikro pada zona transisi antarmuka (ITZ), orientasi serat yang acak sehingga hanya sebagian serat efektif menahan retak, serta mekanisme kegagalan yang didominasi *fiber debonding* dan *pull-out* dibandingkan putusanya serat [2], [8].

Pada serat 3 cm (AR 1:158), kuat lentur menurun pada kadar 1% dan 3%, kemudian meningkat kembali pada kadar 5%. Pola ini menunjukkan bahwa mekanisme *crack bridging* baru bekerja efektif ketika jumlah serat cukup untuk menjembatani retak. Sebaliknya, serat 5 cm (AR 1:263) menunjukkan tren peningkatan yang lebih konsisten karena memiliki panjang jangkar lebih besar. Namun, nilai kuat lenturnya tetap lebih rendah dibanding variasi 5%-3 cm, mengindikasikan bahwa pada beton normal densitas serat lebih berpengaruh daripada panjang serat [7].

Variasi 5%-3 cm menghasilkan kuat lentur tertinggi pada beton berserat sebesar 3,911 MPa, yang menunjukkan bahwa

serat lebih pendek dengan jumlah lebih banyak mampu memberikan distribusi *crack bridging* yang lebih efektif.

3.3 Kuat Tarik Belah Beton

Hasil pengujian kuat tarik belah pada umur 28 hari disajikan pada Tabel 2. Berbeda dengan kuat lentur, variasi 5%-3 cm menghasilkan kuat tarik belah optimum 2,62 MPa, meningkat 13,4% dibanding beton normal (2,31 MPa).

Tabel 3. Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Beton

Variasi Serat	Panjang (cm)	Aspect Ratio	Kuat Tarik Belah (MPa)
0% (Kontrol)	-	-	2,31
1%	3	1:158	2,31
3%	3	1:158	1,88
5%	3	1:158	2,62
1%	5	1:263	2,08
3%	5	1:263	2,04
5%	5	1:263	1,91

Pola kuat tarik belah untuk serat 3 cm menunjukkan penurunan pada kadar 3% (1,88 MPa) diikuti peningkatan signifikan pada kadar 5% (2,62 MPa). Fenomena penurunan pada kadar 3% dapat dijelaskan oleh hipotesis *critical fiber spacing*, di mana jarak antar serat yang terlalu kecil menciptakan zona *stress concentration* yang mempromosikan pembentukan retak mikro pada ITZ [2]. Pada kadar 5%, densitas serat yang lebih tinggi mengubah mekanisme kegagalan dari inisiasi retak pada ITZ menjadi *crack bridging* yang dominan.

Untuk serat 5 cm, tren penurunan monoton seiring bertambahnya kadar serat (2,08 MPa → 2,04 MPa → 1,91 MPa) mengindikasikan bahwa *aspect ratio* tinggi dengan fraksi volume tinggi justru menurunkan kualitas ikatan antarmuka. Serat yang lebih panjang memiliki luas permukaan spesifik lebih kecil per unit berat, sehingga pada fraksi volume berat yang sama, jumlah serat individual lebih sedikit. Kombinasi jumlah serat sedikit dengan panjang jangkar besar tetapi ikatan antarmuka lemah menghasilkan efisiensi *bridging* yang rendah.

Berdasarkan hubungan empiris $f_{ct} = 0,56\sqrt{f'_c}$, dengan $f'_c = 23,14$ MPa, kuat tarik belah teoritis sebesar 2,69 MPa. Hanya variasi 5%-3 cm (2,62 MPa) yang mendekati nilai teoritis dengan selisih 2,6%. Validasi ini mengkonfirmasi bahwa penambahan serat roving tidak secara otomatis meningkatkan kuat tarik belah; yang menentukan adalah kombinasi optimal antara fraksi volume dan *aspect ratio*.

3.4 Perilaku Geser dan Pola Retak

Pengamatan pola retak menunjukkan bahwa beton normal mengalami retak lentur tunggal dengan bukaan retak terbesar yang mengindikasikan keruntuhan getas. Penambahan serat

roving menghasilkan pola retak yang semakin kompleks dengan lebar retak lebih kecil seiring meningkatnya kadar serat. Variasi 5%-3 cm menunjukkan distribusi retak paling baik yang mencerminkan peningkatan daktilitas, sedangkan pada variasi 5%-5 cm terlihat mekanisme pull-out serat yang lebih dominan selama proses keruntuhan.



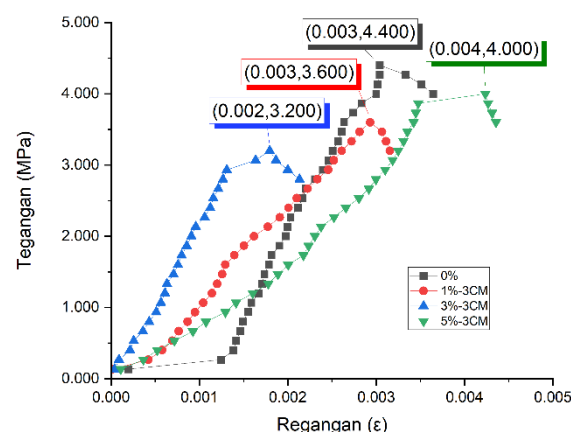
Gambar 2. Perbandingan pola retak balok (a) beton normal, (b) beton serat 5%-3 cm, dan (c) beton serat 5%-5 cm

Sumber: Hasil Pengujian

Analisis pola retak mengkonfirmasi bahwa serat roving efektif mengubah mekanisme kegagalan dari mode lentur-getas menjadi mode yang lebih daktil melalui tiga mekanisme: (1) penahanan pembukaan retak lentur melalui tahanan *pull-out*, (2) redistribusi tegangan tarik dari retak utama ke zona mikro sekitarnya, dan (3) peningkatan ketahanan terhadap retak geser potensial melalui penguatan pada berbagai orientasi [3]. Temuan ini konsisten dengan teori Hu et al. [3] bahwa beton berserat dengan *crack bridging* yang efektif menunjukkan transisi dari *single macro-crack* pada beton normal menjadi *multiple micro-crack* pada beton berserat.

3.5 Hubungan Tegangan-Regangan

Kurva tegangan-regangan menunjukkan bahwa variasi 5%-3 cm dan 5%-5 cm memiliki regangan puncak tertinggi (0,004), yang mengindikasikan kemampuan deformasi dan daktilitas yang lebih baik sebelum keruntuhan. Selain itu, kedua variasi memperlihatkan penurunan tegangan pasca-puncak yang lebih landai dibandingkan beton normal, sehingga mampu mempertahankan kapasitas dukung setelah retak awal. Karakteristik ini menunjukkan bahwa meskipun kuat lentur beton berserat lebih rendah, perilaku pasca-retaknya lebih daktil sehingga memberikan tingkat keamanan struktur yang lebih baik dibandingkan keruntuhan getas pada beton normal.



Gambar 3. Nilai Regangan-Tegangan beton serat panjang 3cm (AR 1:158)

Berdasarkan grafik hubungan tegangan-regangan, seluruh variasi menunjukkan bahwa tegangan meningkat seiring bertambahnya regangan hingga mencapai nilai maksimum sebelum keruntuhan. Beton normal menghasilkan tegangan maksimum tertinggi, sedangkan beton berserat dengan kadar serat 5% menunjukkan regangan lebih besar yang mengindikasikan peningkatan daktilitas. Hal ini menunjukkan bahwa serat roving mampu memperlambat propagasi retak melalui mekanisme *crack bridging*, meskipun peningkatan tegangan maksimum masih dipengaruhi oleh distribusi dan ikatan serat dengan pasta semen.

3.6 Analisis Biaya

Analisis RAB untuk kebutuhan 1 m³ beton disajikan pada Tabel 3. Biaya produksi meningkat secara proporsional dengan kadar serat akibat harga serat roving yang relatif tinggi (Rp20.000,00 per kg).

Tabel 4. Hasil Analisis Biaya Pembuatan Beton

Variasi Serat	Biaya Material Dasar (Rp)	Biaya Serat Roving (Rp)	Total Biaya (Rp)
0% (Kontrol)	1.707.958,39	-	1.707.958,39
1%	1.707.958,39	68.334,00	1.866.294,8
3%	1.707.958,39	205.002,00	2.002.962,80
5%	1.707.958,39	3341.670,00	2.139.628,39

Evaluasi efisiensi biaya-kinerja dilakukan dengan menghitung rasio peningkatan kuat tarik belah terhadap kenaikan biaya. Variasi 5%-3 cm menunjukkan indeks efisiensi sebesar 0,53 (peningkatan kinerja 13,4% dengan kenaikan biaya 25,3%). Meskipun indeks tampak rendah, evaluasi komprehensif harus mempertimbangkan manfaat tidak langsung berupa peningkatan daktilitas, ketangguhan,

pengurangan lebar retak yang menurunkan permeabilitas dan meningkatkan durabilitas, serta potensi pengurangan tulangan baja pada aplikasi tertentu [9].

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. Variasi *aspect ratio* serat roving berpengaruh signifikan terhadap kuat lentur beton dengan pola yang tidak monoton. Variasi 5%-3 cm (AR 1:158) menghasilkan kuat lentur tertinggi pada beton berserat sebesar 3,911 MPa, meskipun masih di bawah beton normal (4,222 MPa). Pola ini mengindikasikan adanya *threshold* fraksi volume yang diperlukan untuk mengaktifkan *crack bridging* efektif.
2. Variasi 5%-3 cm menghasilkan kuat tarik belah optimum sebesar 2,62 MPa, meningkat 13,4% dibanding beton normal (2,31 MPa). Temuan ini mengkonfirmasi bahwa kombinasi optimal antara fraksi volume dan *aspect ratio* menentukan efektivitas serat dalam meningkatkan kapasitas tarik beton.
3. Pengamatan pola retak mengindikasikan serat roving efektif mengubah mode keruntuhan dari getas menjadi lebih daktil melalui mekanisme *crack bridging*. Variasi dengan kadar serat lebih tinggi menunjukkan percabangan retak, retak berliku, dan karakteristik pasca-retak yang lebih landai, yang mengindikasikan ketangguhan yang lebih tinggi.
4. Biaya produksi 1 m³ beton meningkat dari Rp1.707.958,39 (0%) menjadi Rp2.139.628,39 (5%). Evaluasi efisiensi biaya-kinerja menunjukkan bahwa manfaat tidak langsung berupa peningkatan daktilitas dan durabilitas perlu dipertimbangkan dalam analisis ekonomi komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. M. Neville and J. J. Brooks, *Concrete Technology*, 2nd ed. Harlow, UK: Pearson, 2010.
- [2] T. M. Pham, "Fibre-reinforced concrete: State-of-the-art-review on bridging mechanism, mechanical properties, durability, and eco-economic analysis," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 22, 2025.
- [3] G. Hu, L. Zeng, B. Chen, and S. Teng, "Experimental and theoretical investigation on cracking behavior and influencing factors of steel fiber reinforced concrete deep beams," *Buildings*, 2025.
- [4] M. A. Khrisna et al., "Kajian variasi penambahan serat roving dan pemanfaatan serbuk cangkang kerang terhadap kuat tarik beton $f_c'25$," *J. Civil Eng. Sustainable Future*, vol. 2, no. 1, pp. 1-10, 2025.
- [5] T. Ridha Syah, Bunyamin, H. Pramanda, and Naifah, "Analisa kuat lentur beton dengan menggunakan bahan serat roving dan limbah cangkang tiram," *Bisnis Sosial Teknologi*, vol. 14, no. 2, pp. 81-90, 2024.
- [6] H. Setya Wijaya and A. Tandi, "Uji kuat tekan dan kuat tarik belah pada beton dengan serat kawat nyamuk pada mutu $f_c'=19,3$ MPa," *PROKONS: J. Tek. Sipil*, vol. 14, pp. 1-29, 2020.
- [7] R. K. Biswas et al., "Effects of steel fiber percentage and aspect ratios on fresh and hardened properties of ultra-high performance fiber reinforced concrete," *Appl. Mech.*, vol. 2, no. 3, pp. 501-515, 2021.
- [8] V. Overhage et al., "Investigation of pull-out and mechanical performance of fibre reinforced concrete with recycled carbon fibres," *Mater. Struct.*, vol. 57, no. 8, 2024.
- [9] R. Kirthiga and S. Elavenil, "Structural performance of flexural and shear-deficient pre-cracked reinforced concrete beams retrofitted with knitted glass fabric-reinforced cementitious matrix," *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 19, no. 1, 2025.
- [10] SNI 03-2834-2000, *Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional, 2000.
- [11] SNI 4431-2011, *Cara Uji Kuat Lentur Beton Normal dengan Dua Titik Pembebanan*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional, 2011.
- [12] SNI 1974-2011, *Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional, 2011.
- [13] SNI 03-2491-2002, *Cara Uji Kuat Tarik Belah Beton*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional, 2002.
- [14] L. Zhao, G. Chen, and C. Huang, "Experimental investigation on the flexural behavior of concrete reinforced by various types of steel fibers," *Front. Mater.*, 2023.
- [15] M. Hady, N. Hendrifa, and A. Syakir, "Analisis kuat tekan beton menggunakan bahan substitusi serat roving dan cangkang kerang," *J. Tek. Sipil*, vol. 10, no. 2, pp. 45-52, 2023.