

Studi Pemanfaatan Serat Limbah Spanduk sebagai Bahan Tambah terhadap Kuat Lentur Balok Beton

Agssel Dwi Putra Palulun¹

¹ Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Indonesia Toraja, Jalan Nusantara No. 120, Makale Tana Toraja, 91811, Indonesia
corresponding author : agselpalulun65@gmail.com

ABSTRAK

Kata Kunci:

Limbah Spanduk
Serat PVC
Kuat Lentur
Balok Beton
Material Berkelanjutan

Spanduk berbahan polivinil klorida (PVC) banyak digunakan sebagai media promosi, tetapi setelah masa pakainya berakhir sering dibakar atau dibuang sembarangan sehingga mencemari lingkungan. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh penambahan serat limbah spanduk terhadap kuat lentur balok beton. Penelitian dilakukan secara eksperimental di laboratorium dengan variasi kadar serat 0%, 5%, 10%, dan 15% dari berat semen pada beton dengan mutu rencana f'_c 24 MPa. Serat dipotong dengan ukuran panjang sekitar 5 cm dan lebar 2 mm. Benda uji berupa balok berukuran 150 mm × 150 mm × 600 mm sebanyak dua buah untuk setiap variasi, diuji lentur dengan pembebanan dua titik pada umur 28 hari. Agregat halus dan kasar memenuhi persyaratan, dan nilai slump campuran sebesar 93 mm berada dalam rentang rencana 75–100 mm. Beton normal menghasilkan kuat lentur rata-rata tertinggi sebesar 2,733 MPa. Penambahan serat 5%, 10%, dan 15% menghasilkan kuat lentur rata-rata 2,200 MPa, 1,933 MPa, dan 2,133 MPa, atau turun 19,5%, 29,3%, dan 22,0% terhadap beton normal. Kadar serat tersebut setara dengan fraksi volume 1,1–3,4%, yang lebih tinggi daripada kadar serat sintetis pada umumnya, sehingga penurunan kuat lentur diduga disebabkan oleh lemahnya lekatan permukaan PVC yang licin, penggumpalan serat, dan bertambahnya rongga dalam beton. Serat limbah spanduk berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan tambah beton untuk elemen nonstruktural, tetapi kadar serat perlu diturunkan dan dioptimalkan pada penelitian lanjutan.

Keywords:

Banner Waste
PVC Fiber
Flexural Strength
Concrete Beam
Sustainable Material

ABSTRACT

Banners made of polyvinyl chloride (PVC) are widely used as promotional media, but after their service life they are often burned or discarded carelessly, polluting the environment. This study aims to evaluate the effect of adding banner waste fibers on the flexural strength of concrete beams. The research was conducted experimentally in the laboratory with fiber contents of 0%, 5%, 10%, and 15% by weight of cement in concrete with a design strength f'_c of 24 MPa. The fibers were cut to approximately 5 cm in length and 2 mm in width. The specimens were 150 mm × 150 mm × 600 mm beams, two for each variation, tested in flexure under two-point loading at 28 days. The fine and coarse aggregates met the requirements, and the slump of 93 mm was within the planned range of 75–100 mm. Normal concrete produced the highest average flexural strength of 2.733 MPa. Adding 5%, 10%, and 15% fibers yielded average flexural strengths of 2.200 MPa, 1.933 MPa, and 2.133 MPa, decreases of 19.5%, 29.3%, and 22.0% relative to normal concrete. These fiber contents correspond to volume fractions of 1.1–3.4%, which are higher than the usual dosage of synthetic fibers, so the strength reduction is attributed to the weak bond of the smooth PVC surface, fiber balling, and increased voids in the concrete. Banner waste fibers have potential as a concrete additive for non-structural elements, but the fiber content should be reduced and optimized in further research.

This is an open access article under the [CC-BY-SA](#) license.



I. Pendahuluan

Beton merupakan material konstruksi yang paling banyak digunakan saat ini karena bahan bakunya mudah diperoleh, proses pembuatannya relatif sederhana, dan kuat tekannya tinggi [1]. Namun, beton memiliki kelemahan mendasar, yaitu kuat tarik dan kuat lenturnya rendah, hanya sekitar 10–15% dari kuat tekannya, serta bersifat getas sehingga mudah retak ketika menerima beban lentur [2], [3]. Oleh karena itu, berbagai upaya dilakukan untuk memperbaiki sifat beton, salah satunya dengan menambahkan bahan tambah atau serat ke dalam campuran.

Bahan tambah (admixture) adalah material selain semen, air, dan agregat yang ditambahkan ke dalam campuran untuk memodifikasi sifat beton segar maupun beton keras, seperti kemudahan pengerjaan, kekuatan, dan daya tahan [3]. Penambahan serat yang tersebar acak dalam beton bertujuan menahan perambatan retak sehingga meningkatkan kuat tarik, kuat lentur, dan daktilitas beton [4], [5]. Serat yang digunakan dapat berupa serat baja, serat sintetis, serat alami, maupun serat yang berasal dari limbah.

Di sisi lain, limbah padat, terutama limbah plastik, menjadi persoalan lingkungan yang semakin mendesak. Pemanfaatan limbah plastik sebagai agregat atau serat dalam beton telah banyak dikaji sebagai upaya mengurangi volume limbah sekaligus menghemat sumber daya alam [6], [7]. Limbah PVC dari pipa bekas, misalnya, telah digunakan sebagai pengganti agregat pada beton ringan [8], sedangkan limbah lain seperti abu sekam padi dan karet ban juga dimanfaatkan sebagai bahan tambah agregat beton [9].

Salah satu limbah plastik yang jumlahnya terus meningkat adalah spanduk berbahan polivinil klorida (PVC). Spanduk banyak digunakan sebagai media promosi karena murah, tahan lama, dan fleksibel, tetapi setelah masa pakainya berakhir sering dibakar atau dibuang sembarangan sehingga menimbulkan pencemaran udara dan lingkungan [10]. Beberapa penelitian telah memanfaatkan limbah spanduk dalam beton. Penambahan serat limbah spanduk sebesar 0,5% dari berat beton dilaporkan meningkatkan kuat tekan hingga 4,95% meskipun kelecakan menurun [10]. Penelitian lain menunjukkan bahwa potongan limbah spanduk hingga 1% cenderung menurunkan kuat tekan beton pada kadar yang lebih tinggi akibat distribusi serat yang tidak merata dan efek penggumpalan [11]. Pada mortar, serat limbah banner PVC menurunkan kuat tekan tetapi meningkatkan kuat tarik pada persentase tertentu [12].

Penelitian-penelitian tersebut umumnya berfokus pada kuat tekan dan kuat tarik belah, sedangkan pengaruh serat limbah spanduk terhadap kuat lentur balok beton belum banyak dikaji, padahal kuat lentur merupakan sifat yang paling diharapkan meningkat dengan penambahan serat. Penelitian ini bertujuan: (1) memeriksa sifat fisik agregat dan kelecakan campuran beton; (2) menganalisis pengaruh penambahan serat limbah spanduk sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15% dari berat semen terhadap kuat lentur balok beton umur 28 hari; dan (3) mengevaluasi kadar serat tersebut dalam bentuk fraksi volume sebagai dasar penentuan kadar serat yang lebih tepat pada penelitian berikutnya.

II. Metode Penelitian

A. Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan terdiri atas semen Portland, agregat halus berupa pasir, agregat kasar berupa batu pecah, air bersih, dan serat limbah spanduk. Spanduk bekas dibersihkan dari debu dan kotoran, ditandai menggunakan penggaris, kemudian dipotong dengan gunting menjadi serat berukuran panjang sekitar 5 cm dan lebar sekitar 2 mm, lalu disimpan dalam wadah yang bersih dan kering (Gambar 1).



Gambar 1. Bahan Serat Limbah Spanduk: (a) Spanduk Bekas sebagai Bahan Baku; (b) Proses Pemotongan Spanduk; (c) Serat Limbah Spanduk Siap Pakai

B. Pengujian Agregat dan Perancangan Campuran

Sifat fisik agregat diperiksa sesuai standar yang berlaku, meliputi analisis saringan [13], berat jenis dan penyerapan [14], kadar air [15], kadar lumpur [16], berat isi [17], dan keausan agregat kasar dengan mesin Los Angeles [18]. Perancangan campuran dilakukan dengan metode SNI 7656:2012 [19] yang mengacu pada ACI

211.1 [20] untuk mutu rencana kuat tekan $f'_c = 24$ MPa dan slump rencana 75–100 mm. Kelecekan beton segar diperiksa dengan uji slump [21].

C. Variasi Campuran dan Benda Uji

Serat limbah spanduk ditambahkan dengan kadar 0%, 5%, 10%, dan 15% dari berat semen, sedangkan jumlah semen, air, dan agregat dibuat tetap. Benda uji berupa balok beton berukuran 150 mm × 150 mm × 600 mm sebanyak dua buah untuk setiap variasi, sehingga jumlah seluruhnya delapan benda uji. Beton normal diberi kode BN dan beton dengan serat spanduk diberi kode BS. Setelah dicetak, benda uji dibiarkan mengeras selama 24 jam, dilepas dari cetakan, kemudian dirawat dengan perendaman dalam air hingga umur 28 hari.

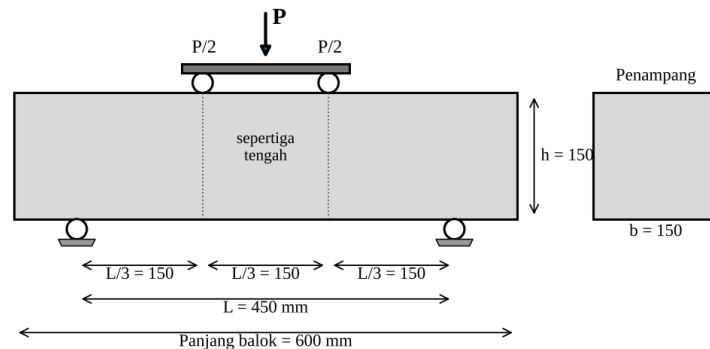
Untuk membandingkan kadar serat dengan kadar serat yang umum digunakan dalam literatur, kadar serat berdasarkan berat semen dikonversi menjadi kadar per meter kubik beton dan fraksi volume serat:

$$m_f = p \times C \quad V_f = m_f / \rho_f \times 100\% \quad (1)$$

dengan p adalah persentase serat terhadap berat semen, C adalah kadar semen per meter kubik beton (kg/m^3), m_f adalah massa serat per meter kubik (kg/m^3), ρ_f adalah berat jenis serat PVC yang diambil $1.400 \text{ kg}/\text{m}^3$ [6], dan V_f adalah fraksi volume serat.

D. Pengujian dan Analisis Kuat Lentur

Pengujian kuat lentur dilakukan sesuai SNI 4431:2011 [22] dengan sistem pembebanan dua titik pada sepertiga bentang. Jarak antartumpuan $L = 450$ mm, sehingga beban P dibagi menjadi dua beban terpusat sebesar $P/2$ yang berjarak $L/3 = 150$ mm (Gambar 2).



Gambar 2. Skema Benda Uji dan Pembebanan Dua Titik pada Uji Kuat Lentur

Apabila patah terjadi di daerah sepertiga tengah bentang, kuat lentur dihitung dengan [22]:

$$f_r = P L / (b h^2) \quad (2)$$

dengan f_r adalah kuat lentur (MPa), P adalah beban maksimum (N), L adalah jarak antartumpuan (mm), b adalah lebar balok (mm), dan h adalah tinggi balok (mm). Pengaruh penambahan serat dinyatakan dengan perubahan relatif terhadap beton normal dan keseragaman hasil dinyatakan dengan selisih relatif antara kedua benda uji:

$$\Delta f_r = (\bar{f}_{r,BS} - \bar{f}_{r,BN}) / \bar{f}_{r,BN} \times 100\% \quad R = |f_{r,1} - f_{r,2}| / \bar{f}_r \times 100\% \quad (3)$$

Sebagai pembanding, nilai modulus keruntuhan beton normal menurut SNI 2847:2019 [2] adalah:

$$f_r = 0,62 \sqrt{f'_c} \quad (4)$$

sehingga untuk $f'_c = 24$ MPa diperoleh $f_r = 3,04$ MPa.

III. Hasil dan Pembahasan

A. Sifat Fisik Agregat

Hasil pemeriksaan sifat fisik agregat kasar dan agregat halus disajikan pada Tabel 1 dan Tabel 2. Seluruh parameter agregat kasar memenuhi persyaratan. Kadar lumpur 0,80% berada di bawah batas 1%, penyerapan 1,60% tergolong rendah, dan nilai keausan 18,55% jauh di bawah batas 40%, sehingga batu pecah yang digunakan tergolong keras dan layak untuk beton struktural.

Tabel 1. Hasil Pemeriksaan Sifat Fisik Agregat Kasar

No	Jenis Pengujian	Standar	Syarat	Hasil	Keterangan
1	Kadar air	SNI 03-1971-1990	0,5–5%	0,691%	Memenuhi
2	Kadar lumpur	SNI 03-4142-1996	$\leq 1\%$	0,800%	Memenuhi

No	Jenis Pengujian	Standar	Syarat	Hasil	Keterangan
3	Berat isi lepas (g/cm ³)	SNI 03-4804-1998	1,2–1,9	1,436	Memenuhi
4	Berat isi padat (g/cm ³)	SNI 03-4804-1998	1,2–1,9	1,579	Memenuhi
5	Berat jenis curah (bulk)	SNI 03-1969-1990	1,6–3,1	2,783	Memenuhi
6	Berat jenis SSD	SNI 03-1969-1990	1,6–3,1	2,827	Memenuhi
7	Berat jenis semu	SNI 03-1969-1990	1,6–3,1	2,913	Memenuhi
8	Penyerapan	SNI 03-1969-1990	0,2–5%	1,600%	Memenuhi
9	Keausan (Los Angeles)	SNI 2417:2008	≤ 40%	18,55%	Memenuhi

Agregat halus juga memenuhi persyaratan, dengan kadar lumpur 2,467% di bawah batas 5% dan penyerapan 3,354%. Berat jenis jenuh kering permukaan agregat halus sebesar 2,230 relatif rendah dibandingkan pasir pada umumnya yang berkisar 2,5–2,7, sehingga agregat halus ini cenderung lebih ringan dan lebih porus. Kondisi ini perlu diperhitungkan karena dapat memengaruhi kebutuhan air dan kekuatan beton.

Tabel 2. Hasil Pemeriksaan Sifat Fisik Agregat Halus

No	Jenis Pengujian	Standar	Syarat	Hasil	Keterangan
1	Kadar air	SNI 03-1971-1990	0,5–5%	2,637%	Memenuhi
2	Kadar lumpur	SNI 03-4142-1996	≤ 5%	2,467%	Memenuhi
3	Berat isi lepas (g/cm ³)	SNI 03-4804-1998	1,2–1,9	1,334	Memenuhi
4	Berat isi padat (g/cm ³)	SNI 03-4804-1998	1,2–1,9	1,419	Memenuhi
5	Berat jenis curah (bulk)	SNI 03-1970-1990	1,6–3,1	2,179	Memenuhi
6	Berat jenis SSD	SNI 03-1970-1990	1,6–3,1	2,230	Memenuhi
7	Berat jenis semu	SNI 03-1970-1990	1,6–3,1	2,297	Memenuhi
8	Penyerapan	SNI 03-1970-1990	0,2–5%	3,354%	Memenuhi

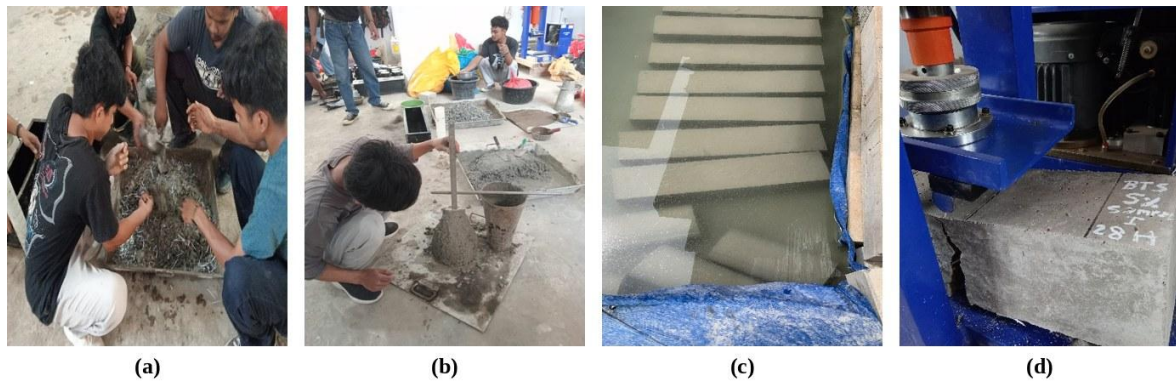
B. Proporsi Campuran dan Kelecekan

Proporsi campuran untuk dua benda uji balok (volume 0,027 m³) dan kebutuhan per meter kubik beton disajikan pada Tabel 3. Kadar semen sebesar 317 kg/m³ dengan air 106 kg/m³ menghasilkan faktor air-semen 0,33. Massa serat untuk kadar 5%, 10%, dan 15% masing-masing 0,43 kg, 0,86 kg, dan 1,28 kg per dua balok.

Tabel 3. Proporsi Campuran Beton untuk Dua Benda Uji Balok (0,027 m³) dan per Meter Kubik

Variasi	Semen (kg)	Serat spanduk (kg)	Air (kg)	Pasir (kg)	Batu pecah (kg)	Serat per m ³ (kg/m ³)
BN (0%)	8,56	–	2,86	23,96	26,50	–
BS 5%	8,56	0,43	2,86	23,96	26,50	15,9
BS 10%	8,56	0,86	2,86	23,96	26,50	31,7
BS 15%	8,56	1,28	2,86	23,96	26,50	47,6
Per m ³ beton	317	–	106	887	981	–

Hasil uji slump beton segar sebesar 93 mm berada dalam rentang rencana 75–100 mm, sehingga kelecekan campuran tergolong baik. Proses pencampuran serat, uji slump, perawatan, dan pengujian kuat lentur ditunjukkan pada Gambar 3.



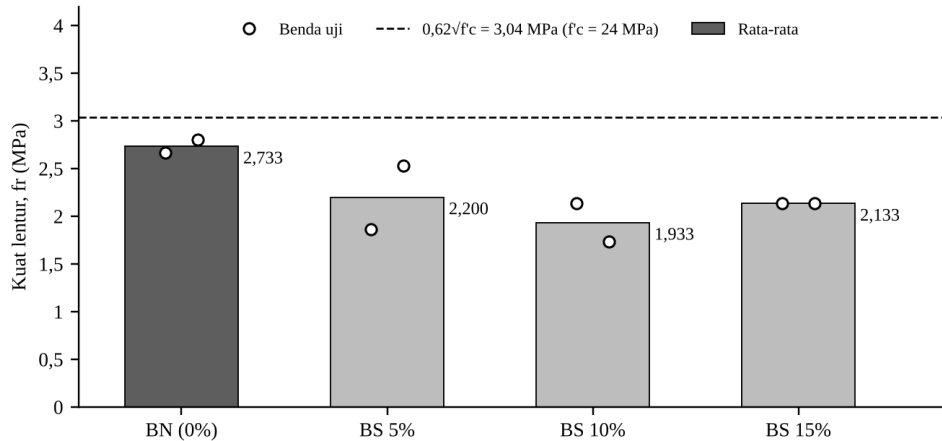
Gambar 3. Tahapan Pelaksanaan: (a) Pencampuran Serat Limbah Spanduk; (b) Uji Slump; (c) Perawatan Benda Uji dengan Perendaman; (d) Pengujian Kuat Lentur dan Pola Patah Balok

C. Kuat Lentur Balok Beton

Hasil pengujian kuat lentur balok beton umur 28 hari disajikan pada Tabel 4 dan Gambar 4. Beban maksimum pada Tabel 4 diperoleh dari kuat lentur dengan Persamaan (2) untuk $b = h = 150$ mm dan $L = 450$ mm.

Tabel 4. Hasil Pengujian Kuat Lentur Balok Beton Umur 28 Hari

Kode	P benda uji 1 (kN)	P benda uji 2 (kN)	fr benda uji 1 (MPa)	fr benda uji 2 (MPa)	fr rata-rata (MPa)
BN (0%)	20,0	21,0	2,667	2,800	2,733
BS 5%	14,0	19,0	1,867	2,533	2,200
BS 10%	16,0	13,0	2,133	1,733	1,933
BS 15%	16,0	16,0	2,133	2,133	2,133



Gambar 4. Kuat Lentur Rata-Rata dan Hasil Setiap Benda Uji pada Variasi Kadar Serat Limbah Spanduk

Beton normal (BN) menghasilkan kuat lentur rata-rata tertinggi, yaitu 2,733 MPa dengan beban maksimum 20–21 kN. Penambahan serat limbah spanduk menurunkan kuat lentur pada seluruh variasi, yaitu menjadi 2,200 MPa pada kadar 5%, 1,933 MPa pada kadar 10%, dan 2,133 MPa pada kadar 15%. Penurunan terbesar terjadi pada kadar 10%, sedangkan pada kadar 15% kuat lentur sedikit lebih tinggi daripada kadar 10% tetapi tetap di bawah beton normal.

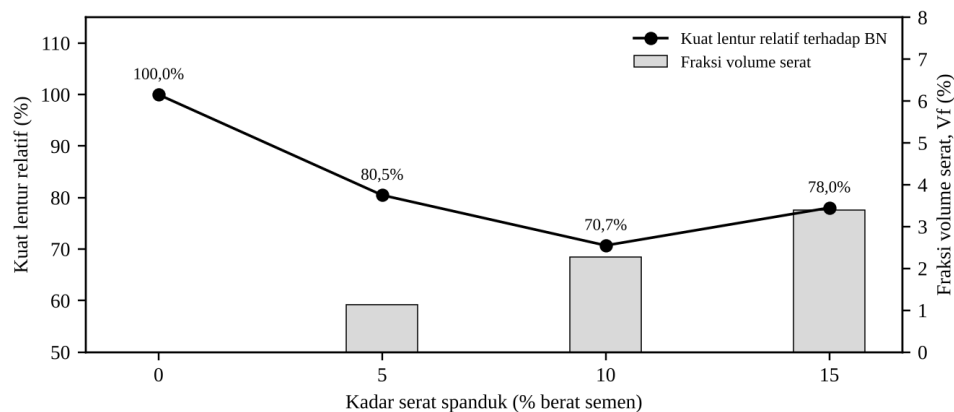
Kuat lentur beton normal sebesar 2,733 MPa juga berada di bawah nilai modulus keruntuhan menurut Persamaan (4) sebesar 3,04 MPa, atau sekitar 90% dari nilai tersebut. Dengan menggunakan hubungan yang sama, kuat lentur 2,733 MPa setara dengan kuat tekan sekitar 19,4 MPa, sehingga kuat tekan aktual beton kemungkinan berada di bawah mutu rencana 24 MPa. Kondisi ini perlu dikonfirmasi dengan uji kuat tekan silinder pada penelitian lanjutan.

D. Pengaruh Kadar Serat dan Keseragaman Hasil

Perubahan kuat lentur relatif, keseragaman hasil, dan fraksi volume serat setiap variasi disajikan pada Tabel 5 dan Gambar 5.

Tabel 5. Perubahan Kuat Lentur, Keseragaman Hasil, dan Fraksi Volume Serat

Kode	fr rata-rata (MPa)	Kuat lentur relatif (%)	Δ fr (%)	Selisih antarbenda uji, R (%)	Fraksi volume serat, Vf (%)
BN (0%)	2,733	100,0	–	4,9	0,00
BS 5%	2,200	80,5	–19,5	30,3	1,13
BS 10%	1,933	70,7	–29,3	20,7	2,27
BS 15%	2,133	78,0	–22,0	0,0	3,40



Gambar 5. Kuat Lentur Relatif terhadap Beton Normal dan Fraksi Volume Serat pada Setiap Kadar Serat

Dengan Persamaan (3), penambahan serat 5%, 10%, dan 15% menurunkan kuat lentur masing-masing sebesar 19,5%, 29,3%, dan 22,0%. Selisih hasil antara dua benda uji pada beton normal hanya 4,9%, tetapi meningkat menjadi 30,3% pada kadar 5% dan 20,7% pada kadar 10%. Besarnya selisih ini menunjukkan bahwa sebaran serat dalam balok tidak seragam, sehingga sebagian benda uji memiliki daerah dengan konsentrasi serat atau rongga yang lebih besar. Pada kadar 15%, kedua benda uji memberikan hasil yang sama (2,133 MPa). Karena jumlah benda uji hanya dua untuk setiap variasi, kenaikan kecil dari kadar 10% ke 15% belum dapat dipastikan sebagai kecenderungan nyata dan kemungkinan masih berada dalam rentang variasi hasil uji.

Dengan Persamaan (1) dan kadar semen 317 kg/m³, kadar serat 5%, 10%, dan 15% setara dengan 15,9 kg/m³, 31,7 kg/m³, dan 47,6 kg/m³, atau fraksi volume 1,13%, 2,27%, dan 3,40%. Nilai ini jauh lebih tinggi daripada kadar serat sintetis yang umum digunakan pada beton, yaitu sekitar 0,1–0,5% volume [4], [5], dan juga lebih tinggi daripada kadar limbah spanduk 0,5–1% pada penelitian sebelumnya [10], [11].

E. Pembahasan

Penurunan kuat lentur akibat penambahan serat limbah spanduk dapat dijelaskan oleh tiga faktor. Pertama, permukaan PVC yang licin dan bersifat hidrofobik menghasilkan lekatan yang lemah dengan pasta semen, sehingga serat mudah tercabut sebelum mampu menahan perambatan retak [6], [7]. Kedua, serat berbentuk pita pipih dengan panjang 5 cm cenderung saling melilit dan menggumpal pada kadar tinggi, sehingga distribusinya tidak merata dan membentuk bidang lemah di dalam beton, sebagaimana juga dilaporkan pada penelitian limbah spanduk sebelumnya [11]. Ketiga, serat dalam jumlah besar menambah luas permukaan yang harus diselimuti pasta dan meningkatkan rongga udara terperangkap, sehingga kepadatan beton berkurang [4], [5].

Penurunan kuat lentur pada penelitian ini sejalan dengan temuan bahwa limbah plastik dalam beton umumnya menurunkan kekuatan seiring bertambahnya kadar plastik, walaupun dapat memperbaiki sifat pascaretak seperti daktilitas dan ketangguhan [6], [7]. Pengamatan pola patah dan perilaku balok setelah beban puncak belum dilakukan secara kuantitatif, sehingga manfaat serat terhadap ketangguhan lentur belum dapat dinilai. Selain itu, pada penelitian dengan kadar serat yang rendah, limbah spanduk masih dapat meningkatkan kuat tekan [10] dan kuat tarik [12], sehingga kadar serat yang lebih rendah kemungkinan memberikan hasil yang lebih baik.

Berdasarkan hasil tersebut, serat limbah spanduk dengan kadar 5–15% dari berat semen belum dapat direkomendasikan untuk elemen struktural yang mengandalkan kuat lentur, tetapi masih berpotensi digunakan

pada elemen nonstruktural seperti paving, kanstin, atau panel beton sebagai upaya pengurangan limbah. Penelitian lanjutan disarankan menggunakan kadar serat yang lebih rendah, misalnya 0,25–1% volume, ukuran serat yang lebih kecil atau permukaan yang dikasarkan untuk meningkatkan lekatan, jumlah benda uji minimal tiga untuk setiap variasi, serta pengujian kuat tekan dan pengukuran kurva beban–lendutan untuk mengevaluasi ketangguhan lentur.

IV. Kesimpulan

Agregat halus dan agregat kasar yang digunakan memenuhi persyaratan sebagai bahan beton, dan campuran beton dengan faktor air-semen 0,33 menghasilkan nilai slump 93 mm yang berada dalam rentang rencana 75–100 mm.

Beton normal menghasilkan kuat lentur rata-rata tertinggi sebesar 2,733 MPa. Penambahan serat limbah spanduk sebesar 5%, 10%, dan 15% dari berat semen menurunkan kuat lentur menjadi 2,200 MPa, 1,933 MPa, dan 2,133 MPa, atau turun 19,5%, 29,3%, dan 22,0%, dengan penurunan terbesar pada kadar 10%. Selisih hasil antarbenda uji meningkat hingga 30,3% pada beton berserat, yang menunjukkan sebaran serat yang tidak seragam.

Kadar serat yang digunakan setara dengan fraksi volume 1,13–3,40%, jauh di atas kadar serat sintesis pada umumnya. Penurunan kuat lentur diduga disebabkan oleh lemahnya lekatan permukaan PVC, penggumpalan serat, dan bertambahnya rongga dalam beton. Serat limbah spanduk berpotensi dimanfaatkan pada elemen beton nonstruktural, dan kadar serat perlu diturunkan serta dioptimalkan pada penelitian lanjutan.

Daftar Pustaka

- [1] S. Melinda, S. O. Dapas, dan M. D. J. Sumajouw, “Studi eksperimental pengujian kuat tekan beton menggunakan kapur dan batu apung sebagai bahan pengganti sebagian semen,” *Jurnal Sipil Statik*, 2020.
- [2] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 2847:2019 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan*. Jakarta, Indonesia: BSN, 2019.
- [3] P. K. Mehta dan P. J. M. Monteiro, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, ed. ke-4. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2014.
- [4] A. Bentur dan S. Mindess, *Fibre Reinforced Cementitious Composites*, ed. ke-2. London, UK: Taylor & Francis, 2007.
- [5] American Concrete Institute, *ACI 544.1R-96 (Reapproved 2009) Report on Fiber Reinforced Concrete*. Farmington Hills, MI, USA: ACI, 2009.
- [6] R. Siddique, J. Khatib, dan I. Kaur, “Use of recycled plastic in concrete: A review,” *Waste Management*, vol. 28, no. 10, pp. 1835–1852, 2008, doi: 10.1016/j.wasman.2007.09.011.
- [7] N. Saikia dan J. de Brito, “Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review,” *Construction and Building Materials*, vol. 34, pp. 385–401, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.066.
- [8] S. C. Kou, G. Lee, C. S. Poon, dan W. L. Lai, “Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes,” *Waste Management*, vol. 29, no. 2, pp. 621–628, 2009, doi: 10.1016/j.wasman.2008.06.014.
- [9] R. Raafidiani, I. R. Handriawan, dan A. Febriansya, “Pemanfaatan limbah abu sekam padi dan karet ban sebagai bahan tambah agregat pada beton,” vol. 16, no. 2, 2022.
- [10] A. A. Setiawan, “Pemanfaatan limbah spanduk plastik sebagai bahan tambah dalam campuran beton,” 2017.
- [11] U. Usman, D. F. Manalu, dan Y. Apriyanti, “Studi kuat tekan dan kuat tarik belah beton dengan menggunakan potongan limbah spanduk sebagai bahan tambah,” *FROPIL (Forum Profesional Teknik Sipil)*, vol. 6, no. 1, pp. 52–61, 2019, doi: 10.33019/fropil.v6i1.1269.
- [12] H. S. W. Sunarwadi, D. H. Nugroho, dan R. D. Apriani, “Eksperimental pemanfaatan limbah banner (polyvinil chlorida) dalam pembuatan mortar berserat (fiber mortar),” *Jurnal Daktilitas*, vol. 3, no. 2, pp. 94–100, 2023, doi: 10.36563/daktilitas.v3i2.953.
- [13] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 03-1968-1990 Metode Pengujian tentang Analisis Saringan Agregat Halus dan Kasar*. Jakarta, Indonesia: BSN, 1990.
- [14] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 03-1969-1990 Metode Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar dan SNI 03-1970-1990 Metode Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus*. Jakarta, Indonesia: BSN, 1990.
- [15] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 03-1971-1990 Metode Pengujian Kadar Air Agregat*. Jakarta, Indonesia: BSN, 1990.

-
- [16] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 03-4142-1996 Metode Pengujian Jumlah Bahan dalam Agregat yang Lolos Saringan No. 200 (0,075 mm)*. Jakarta, Indonesia: BSN, 1997.
- [17] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 03-4804-1998 Metode Pengujian Bobot Isi dan Rongga Udara dalam Agregat*. Jakarta, Indonesia: BSN, 1998.
- [18] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 2417:2008 Cara Uji Keausan Agregat dengan Mesin Abrasi Los Angeles*. Jakarta, Indonesia: BSN, 2008.
- [19] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 7656:2012 Tata Cara Pemilihan Campuran untuk Beton Normal, Beton Berat dan Beton Massa*. Jakarta, Indonesia: BSN, 2012.
- [20] American Concrete Institute, *ACI 211.1-91 Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*. Farmington Hills, MI, USA: ACI, 1991.
- [21] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 1972:2008 Cara Uji Slump Beton*. Jakarta, Indonesia: BSN, 2008.
- [22] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 4431:2011 Cara Uji Kuat Lentur Beton Normal dengan Dua Titik Pembebanan*. Jakarta, Indonesia: BSN, 2011.