

Pengaruh Kadar Potongan Limbah Spanduk Flexi sebagai Serat terhadap Kuat Tarik Belah Beton

Julfrandi Palembang¹, Hernita Matana², Abraham Ganti³

¹ Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Indonesia Toraja, Jalan Nusantara No. 120, Makale Tana Toraja, 91811, Indonesia

^{2,3} Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Indonesia Toraja, Jalan Nusantara No. 120, Makale Tana Toraja, 91811, Indonesia

corresponding author : julfrandipalembangan@gmail.com

ABSTRAK

Kata Kunci:

Limbah Spanduk
Serat PVC
Kuat Tarik Belah
Beton Berserat
Analisis Varians

Beton memiliki kuat tarik yang rendah sehingga mudah retak, sedangkan spanduk flexi bekas berbahan polivinil klorida (PVC) berlapis serat nilon sulit terurai dan umumnya dibuang atau dibakar. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh penambahan potongan limbah spanduk sebagai serat terhadap kelecakan dan kuat tarik belah beton. Spanduk dipotong menjadi serat berukuran $\pm 50 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ dan ditambahkan sebesar 5%, 10%, dan 15% dari berat semen, atau 16,8, 33,6, dan 50,4 kg/m³, tanpa mengurangi jumlah semen. Campuran dirancang dengan SNI 7656:2012 untuk mutu rencana f'_c 25 MPa, dan 12 benda uji silinder 150 mm $\times$ 300 mm diuji tarik belah pada umur 28 hari. Penambahan serat menurunkan slump dari 93 mm menjadi 87, 84, dan 79 mm. Kuat tarik belah beton kontrol sebesar 1,41 MPa, sedangkan beton dengan serat spanduk 5%, 10%, dan 15% masing-masing 1,82 MPa, 1,34 MPa, dan 1,18 MPa, atau berubah +28,3%, -5,0%, dan -16,7%. Analisis varians satu arah menunjukkan perbedaan yang signifikan ($F = 5,36$; $p = 0,026$), tetapi uji Tukey menunjukkan bahwa perbedaan yang signifikan hanya terjadi antara kadar 5% dan 15% ($p = 0,020$), sedangkan kadar 5% belum berbeda signifikan dari beton kontrol ($p = 0,148$) karena sebaran hasil beton kontrol yang besar (CV 25,0%). Kadar serat 5% dari berat semen memberikan kuat tarik belah tertinggi dengan sebaran terkecil, sedangkan kadar di atas 10% menurunkan kuat tarik belah dan kelecakan beton.

Keywords:

Banner Waste
PVC Fiber
Splitting Tensile Strength
Fiber-Reinforced Concrete
Analysis of Variance

ABSTRACT

Concrete has a low tensile strength and is therefore prone to cracking, while used flexi banners made of polyvinyl chloride (PVC) with a nylon fiber mesh are hardly degradable and are usually discarded or burned. This study aims to analyze the effect of adding cut banner waste as fiber on the workability and splitting tensile strength of concrete. The banners were cut into fibers of approximately 50 mm $\times$ 2 mm and added at 5%, 10%, and 15% by weight of cement, or 16.8, 33.6, and 50.4 kg/m³, without reducing the cement content. The mix was designed according to SNI 7656:2012 for a design strength f'_c of 25 MPa, and 12 cylindrical specimens of 150 mm $\times$ 300 mm were tested for splitting tensile strength at 28 days. The addition of fiber reduced the slump from 93 mm to 87, 84, and 79 mm. The splitting tensile strength of the control concrete was 1.41 MPa, while concrete with 5%, 10%, and 15% banner fiber reached 1.82 MPa, 1.34 MPa, and 1.18 MPa, changes of +28.3%, -5.0%, and -16.7%, respectively. One-way analysis of variance showed a significant difference ($F = 5.36$; $p = 0.026$), but the Tukey test showed that the only significant difference was between 5% and 15% ($p = 0.020$), while 5% did not yet differ significantly from the control ($p = 0.148$) because of the large scatter of the control results (CV 25.0%). A fiber content of 5% by weight of cement gave the highest splitting tensile strength with the smallest scatter, whereas contents above 10% reduced both the splitting tensile strength and the workability of concrete.

This is an open access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



I. Pendahuluan

Beton merupakan material konstruksi yang paling banyak digunakan karena mudah dibuat, bahan bakunya tersedia secara luas, dan kuat tekannya tinggi [1]. Namun, kuat tarik beton hanya sekitar 10–15% dari kuat tekannya, sehingga beton mudah retak akibat beban tarik, lentur, maupun susut [1], [2]. Salah satu cara yang banyak digunakan untuk memperbaiki perilaku tarik beton adalah penambahan serat. Serat yang tersebar acak dalam beton dapat menahan perambatan retak mikro dan menjembatani retak setelah beton retak, sehingga meningkatkan kuat tarik, ketahanan retak, dan daktilitas beton [3].

Pemanfaatan limbah sebagai bahan beton terus dikembangkan untuk mendukung konstruksi yang berkelanjutan. Di Toraja, limbah plastik HDPE telah dimanfaatkan sebagai substitusi parsial agregat halus pada batako [4]. Limbah lain yang jumlahnya besar adalah spanduk flexi bekas dari kegiatan promosi, kampanye, dan acara. Spanduk flexi terbuat dari lembaran polivinil klorida (PVC) dengan anyaman serat nilon di dalamnya, sehingga tahan air, lentur, dan memiliki kuat tarik yang tinggi [5]. Sifat yang sama membuat spanduk sulit terurai di alam, dan pembakarannya menghasilkan polutan, sehingga pemanfaatan kembali spanduk bekas memiliki nilai lingkungan yang nyata.

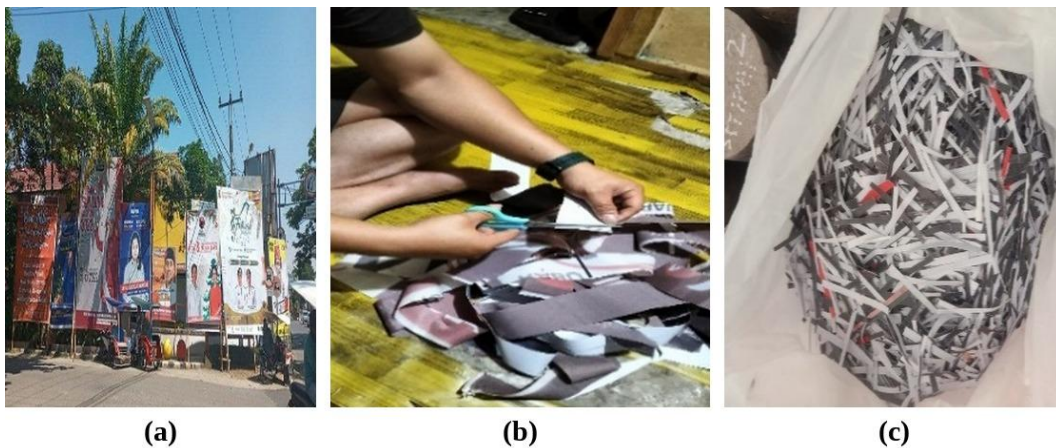
Beberapa penelitian telah mengkaji limbah spanduk sebagai serat. Usman dkk. [5] menambahkan potongan spanduk berukuran $35 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ sebesar 0,15% dan 0,45% dari berat beton, dan memperoleh kuat tarik belah 28 hari sebesar 2,16 MPa dan 2,22 MPa, lebih rendah daripada beton tanpa serat (2,47 MPa), dengan kuat tekan yang juga menurun. Sebaliknya, Sunarwadi dkk. [6] melaporkan bahwa serat banner 1%, 2%, dan 3% meningkatkan kuat tarik aksial mortar menjadi 1,70 MPa, 1,49 MPa, dan 1,42 MPa dibandingkan dengan 1,35 MPa pada mortar tanpa serat, dengan nilai tertinggi pada kadar terendah. Hasil yang berbeda ini menunjukkan bahwa pengaruh serat spanduk sangat bergantung pada ukuran serat dan kadarnya, terutama karena serat yang lebar dan berpermukaan licin cenderung mengganggu kepadatan beton.

Penelitian ini menggunakan serat spanduk yang lebih ramping ($\pm 50 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$) dengan kadar yang lebih tinggi. Tujuan penelitian adalah: (1) memeriksa karakteristik agregat yang digunakan; (2) menganalisis pengaruh penambahan serat limbah spanduk sebesar 5%, 10%, dan 15% dari berat semen terhadap kelecakan dan kuat tarik belah beton umur 28 hari; dan (3) menguji signifikansi perbedaan antarvariasi secara statistik.

II. Metode Penelitian

A. Bahan dan Pembuatan Serat

Penelitian dilaksanakan secara eksperimental di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Kristen Indonesia Toraja. Bahan yang digunakan adalah semen, agregat halus, agregat kasar, air, dan serat limbah spanduk. Serat dibuat dari spanduk flexi bekas yang dibersihkan dari debu dan kotoran, ditandai dengan penggaris, lalu dipotong dengan gunting menjadi potongan berukuran panjang $\pm 50 \text{ mm}$ dan lebar $\pm 2 \text{ mm}$, sehingga rasio panjang terhadap lebar sekitar 25. Serat disimpan dalam wadah yang bersih dan kering sebelum dicampurkan (Gambar 1).



Gambar 1. Bahan Serat: (a) Spanduk Flexi Bekas; (b) Pemotongan Spanduk; (c) Serat Limbah Spanduk $\pm 50 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$

B. Pengujian Agregat dan Perancangan Campuran

Karakteristik agregat diperiksa melalui analisis saringan [7], berat jenis dan penyerapan agregat kasar dan halus [8], [9], kadar air [10], kadar lumpur [11], berat isi [12], dan keausan agregat kasar dengan mesin Los Angeles [13]. Campuran beton dirancang dengan metode SNI 7656:2012 [14] untuk mutu rencana $f'_c = 25 \text{ MPa}$, dan kelecakan beton segar diperiksa dengan uji slump [15].

C. Variasi Campuran dan Benda Uji

Variasi campuran terdiri atas beton kontrol (BK) tanpa serat dan beton dengan serat spanduk (SS) sebesar 5%, 10%, dan 15% dari berat semen. Serat ditambahkan sebagai bahan tambah tanpa mengurangi jumlah semen, air, maupun agregat. Benda uji berupa silinder berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm, sebanyak tiga benda uji untuk setiap variasi, sehingga jumlah seluruhnya 12 benda uji. Benda uji dilepas dari cetakan setelah 24 jam dan dirawat dengan perendaman dalam air hingga umur 28 hari (Gambar 3).

D. Pengujian Kuat Tarik Belah dan Analisis Data

Kuat tarik belah diuji sesuai SNI 2491:2014 [16] dengan meletakkan silinder secara mendatar di antara pelat penekan sehingga beban P bekerja sebagai beban garis sepanjang benda uji (Gambar 2). Kuat tarik belah dihitung dengan:

$$f_{ct} = 2P / (\pi L D) \quad (1)$$

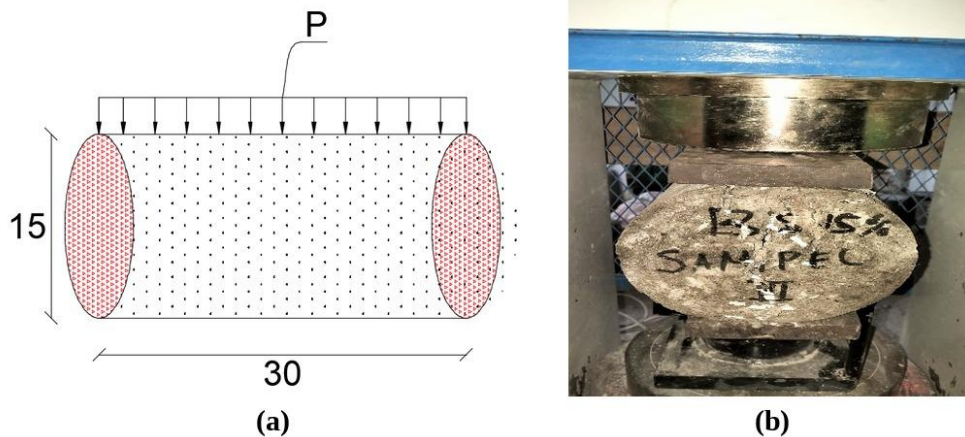
dengan P adalah beban maksimum (N), L adalah panjang silinder (300 mm), dan D adalah diameter silinder (150 mm). Pengaruh serat dinyatakan dengan perubahan relatif terhadap beton kontrol dan keseragaman hasil dengan koefisien variasi:

$$\Delta = (\bar{x}_{SS} - \bar{x}_{BK}) / \bar{x}_{BK} \times 100\% \quad CV = s / \bar{x} \times 100\% \quad (2)$$

Signifikansi perbedaan antarvariasi diuji dengan analisis varians (ANOVA) satu arah pada taraf 5% dan dilanjutkan dengan uji Tukey HSD untuk membandingkan setiap pasangan variasi [17]:

$$F = [\sum n_j (\bar{x}_j - \bar{\bar{x}})^2 / (k - 1)] / [\sum \sum (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 / (N - k)] \quad HSD = q_{\alpha; k; N-k} \sqrt{(KT_{galat} / n)} \quad (3)$$

dengan $k = 4$ variasi, $n = 3$ benda uji, $N = 12$, q adalah nilai studentized range, dan KT_{galat} adalah kuadrat tengah galat. Hasil kuat tarik belah juga dibandingkan dengan perkiraan $f_{ct} \approx 0,56\sqrt{f'_c}$ untuk beton normal [18].



Gambar 2. Uji Kuat Tarik Belah: (a) Skema Pembebanan Silinder 150 mm × 300 mm; (b) Pengujian Benda Uji

III. Hasil dan Pembahasan

A. Karakteristik Agregat

Hasil pemeriksaan agregat disajikan pada Tabel 1. Agregat kasar memiliki kadar lumpur 0,81%, di bawah batas 1%, penyerapan 1,08%, dan keausan Los Angeles 17,31%, jauh di bawah batas 40%, sehingga tergolong keras dan baik untuk beton. Agregat halus memiliki kadar lumpur 2,53%. Nilai ini masih di bawah batas 5% untuk agregat halus beton, sehingga agregat halus memenuhi syarat tanpa pencucian. Agregat halus memiliki berat jenis jenuh kering permukaan 2,35 yang relatif rendah dan penyerapan 4,93% yang tinggi, sehingga koreksi air pencampuran berdasarkan kondisi jenuh kering permukaan perlu dilakukan dengan cermat.

Tabel 1. Hasil Pemeriksaan Karakteristik Agregat Kasar dan Agregat Halus

Jenis Pengujian	Standar	Syarat (kasar / halus)	Agregat Kasar	Agregat Halus	Keterangan
Kadar air (%)	SNI 03-1971-1990	—	0,69	3,99	—
Kadar lumpur (%)	SNI 03-4142-1996	$\leq 1 / \leq 5$	0,81	2,53	Memenuhi
Berat isi lepas (g/cm ³)	SNI 03-4804-1998	1,2–1,9	1,43	1,34	Memenuhi
Berat isi padat (g/cm ³)	SNI 03-4804-1998	1,2–1,9	1,57	1,42	Memenuhi
Berat jenis curah	SNI 03-1969/1970-1990	1,6–3,1	2,65	2,24	Memenuhi

Jenis Pengujian	Standar	Syarat (kasar / halus)	Agregat Kasar	Agregat Halus	Keterangan
Berat jenis SSD	SNI 03-1969/1970-1990	1,6–3,1	2,68	2,35	Memenuhi
Berat jenis semu	SNI 03-1969/1970-1990	1,6–3,1	2,73	2,52	Memenuhi
Penyerapan (%)	SNI 03-1969/1970-1990	0,2–5	1,08	4,93	Memenuhi
Keausan Los Angeles (%)	SNI 2417:2008	≤ 40	17,31	–	Memenuhi

B. Proporsi Campuran dan Kadar Serat

Proporsi campuran untuk tiga silinder ($0,0159 \text{ m}^3$) dan hasil konversinya per meter kubik disajikan pada Tabel 2. Kadar semen sebesar $335,9 \text{ kg/m}^3$ dan air $213,3 \text{ kg/m}^3$ menghasilkan faktor air-semen $0,635$. Serat spanduk 5%, 10%, dan 15% dari berat semen setara dengan 16,8, 33,6, dan $50,4 \text{ kg/m}^3$. Dengan berat jenis PVC flexi sekitar 1,3–1,4, kadar tersebut setara dengan fraksi volume serat sekitar 1,2–1,3%, 2,4–2,6%, dan 3,6–3,9%, yang tergolong tinggi untuk serat sintetis makro, yang umumnya digunakan pada fraksi volume 0,1–2% [3].

Tabel 2. Proporsi Campuran Beton untuk Tiga Silinder ($0,0159 \text{ m}^3$) dan per Meter Kubik

Bahan	BK	SS 5%	SS 10%	SS 15%
Semen, kg (kg/m^3)	5,343 (335,9)	5,343 (335,9)	5,343 (335,9)	5,343 (335,9)
Air, kg (kg/m^3)	3,393 (213,3)	3,393 (213,3)	3,393 (213,3)	3,393 (213,3)
Pasir, kg (kg/m^3)	14,232 (894,9)	14,232 (894,9)	14,232 (894,9)	14,232 (894,9)
Batu pecah, kg (kg/m^3)	15,099 (949,4)	15,099 (949,4)	15,099 (949,4)	15,099 (949,4)
Serat spanduk, kg (kg/m^3)	–	0,267 (16,8)	0,534 (33,6)	0,801 (50,4)
Slump (mm)	93	87	84	79

Nilai slump beton kontrol sebesar 93 mm, sedangkan beton dengan serat spanduk 5%, 10%, dan 15% masing-masing 87 mm, 84 mm, dan 79 mm. Penurunan slump hingga 15% pada kadar tertinggi terjadi karena serat yang pipih dan panjang membentuk jaringan yang menahan aliran beton segar serta menambah luas permukaan yang harus diselubungi pasta [3]. Seluruh campuran masih dapat dipadatkan dengan baik pada uji slump.



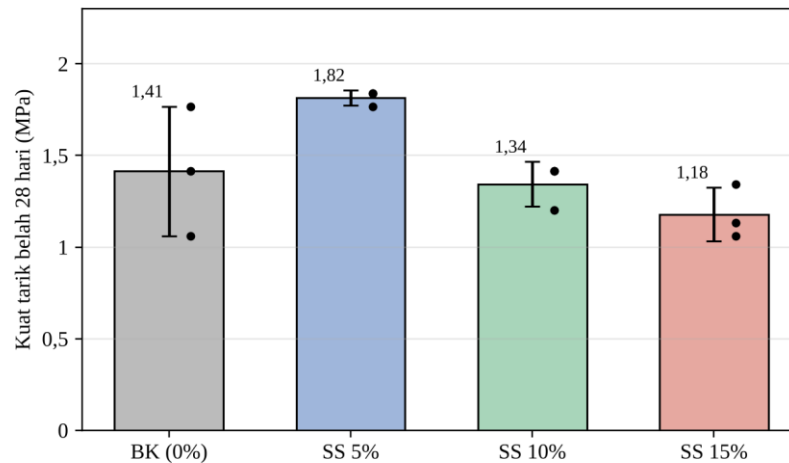
Gambar 3. Pembuatan Benda Uji: (a) Uji Slump; (b) Pencampuran dan Pencetakan; (c) Perawatan dengan Perendaman

C. Kuat Tarik Belah Beton

Hasil pengujian kuat tarik belah umur 28 hari disajikan pada Tabel 3 dan Gambar 4. Kuat tarik belah setiap benda uji dihitung ulang dari beban maksimum dengan Persamaan (1). Beton kontrol menghasilkan kuat tarik belah rata-rata $1,41 \text{ MPa}$, sedangkan beton dengan serat spanduk 5%, 10%, dan 15% masing-masing $1,82 \text{ MPa}$, $1,34 \text{ MPa}$, dan $1,18 \text{ MPa}$, atau berubah +28,3%, –5,0%, dan –16,7%.

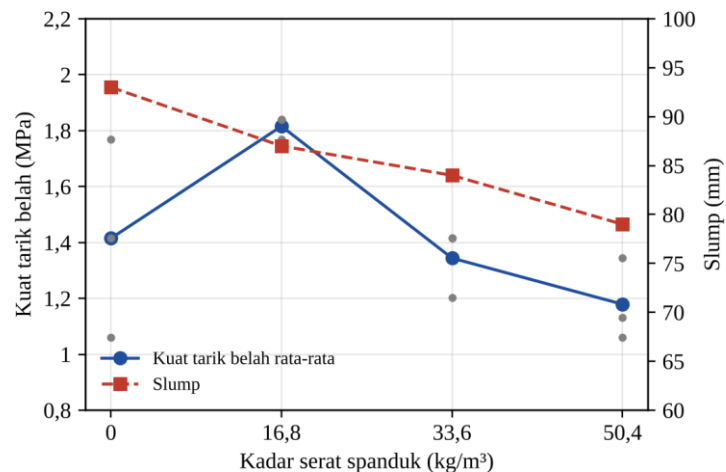
Tabel 3. Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Beton Umur 28 Hari ($D = 150 \text{ mm}$; $L = 300 \text{ mm}$)

Variasi	P benda uji 1/2/3 (kN)	fct benda uji (MPa)	fct rata-rata (MPa)	Δ (%)	s (MPa)	CV (%)
BK	75 / 100 / 125	1,06 / 1,41 / 1,77	1,41	–	0,35	25,0
SS 5%	130 / 125 / 130	1,84 / 1,77 / 1,84	1,82	+28,3	0,04	2,2
SS 10%	100 / 100 / 85	1,41 / 1,41 / 1,20	1,34	–5,0	0,12	9,1
SS 15%	95 / 80 / 75	1,34 / 1,13 / 1,06	1,18	–16,7	0,15	12,5



Gambar 4. Kuat Tarik Belah Beton Umur 28 Hari, Simpangan Baku, dan Hasil Setiap Benda Uji

Beton SS 5% tidak hanya menghasilkan kuat tarik belah tertinggi, tetapi juga sebaran terkecil (CV 2,2%), dengan beban maksimum 125–130 kN pada ketiga benda uji. Sebaliknya, beton kontrol memiliki sebaran yang sangat besar, dengan beban maksimum 75–125 kN dan CV 25,0%. Hal ini menunjukkan bahwa serat dalam kadar yang tepat membuat keruntuhan tarik belah lebih seragam karena serat menahan perambatan retak setelah retak awal terbentuk. Hubungan antara kadar serat, kuat tarik belah, dan slump ditunjukkan pada Gambar 5: kuat tarik belah meningkat pada kadar 16,8 kg/m³ dan menurun pada kadar yang lebih tinggi, sementara slump terus menurun.



Gambar 5. Hubungan Kadar Serat Spanduk dengan Kuat Tarik Belah dan Slump Beton

D. Uji Signifikansi Statistik

Hasil ANOVA satu arah dan uji Tukey disajikan pada Tabel 4. ANOVA menghasilkan $F = 5,36$ dengan $p = 0,026$, sehingga terdapat perbedaan kuat tarik belah yang signifikan antarvariabel. Namun, uji Tukey menunjukkan bahwa hanya pasangan SS 5% dan SS 15% yang berbeda signifikan (selisih 0,64 MPa; $p = 0,020$), sedangkan SS 5% dan beton kontrol belum berbeda signifikan (selisih 0,40 MPa; $p = 0,148$). Dengan kuadrat tengah galat 0,041 MPa², nilai HSD sebesar 0,53 MPa, sehingga selisih SS 5% terhadap beton kontrol (0,40 MPa) masih berada di bawah batas yang dapat dideteksi dengan tiga benda uji. Besarnya sebaran beton kontrol

merupakan penyebab utama, sehingga peningkatan 28,3% pada SS 5% perlu dikonfirmasi dengan jumlah benda uji yang lebih banyak.

Tabel 4. Hasil ANOVA Satu Arah dan Uji Tukey HSD Kuat Tarik Belah (F tabel 3; 8 = 4,07; HSD = 0,53 MPa)

Pengujian / Pasangan	Selisih rata-rata (MPa)	Nilai p	Keputusan
ANOVA (F = 5,36)	–	0,026	Signifikan
SS 5% – BK	+0,40	0,148	Tidak signifikan
SS 10% – BK	–0,07	0,972	Tidak signifikan
SS 15% – BK	–0,24	0,518	Tidak signifikan
SS 5% – SS 10%	+0,47	0,081	Tidak signifikan
SS 5% – SS 15%	+0,64	0,020	Signifikan
SS 10% – SS 15%	+0,17	0,754	Tidak signifikan

E. Pembahasan

Peningkatan kuat tarik belah pada kadar 5% sejalan dengan mekanisme penjembatanan retak oleh serat. Serat spanduk mengandung anyaman nilon yang memiliki kuat tarik tinggi, dan pada kadar rendah serat dapat tersebar cukup merata sehingga menahan pembukaan retak di sepanjang bidang belah [3]. Hasil ini sejalan dengan Sunarwadi dkk. [6] yang memperoleh kuat tarik tertinggi pada kadar serat banner terendah. Penurunan pada kadar 10% dan 15% sejalan dengan Usman dkk. [5]: serat yang berlebih cenderung menggumpal, menurunkan kelecakan, dan menambah rongga di sekitar serat. Permukaan PVC yang licin juga menghasilkan lekatan yang lemah dengan pasta semen, sehingga serat lebih banyak berperan sebagai bidang lemah daripada penulangan ketika jumlahnya terlalu besar.

Nilai kuat tarik belah yang diperoleh (1,18–1,82 MPa) jauh lebih rendah daripada perkiraan $0,56\sqrt{f'_c} = 2,80$ MPa untuk beton dengan mutu rencana 25 MPa [18]. Jika hubungan tersebut berlaku, kuat tarik belah beton kontrol (1,41 MPa) setara dengan kuat tekan sekitar 6 MPa. Selain itu, faktor air-semen 0,635 lebih tinggi daripada nilai yang umumnya diperlukan untuk kuat tekan rata-rata perlu $f'_{cr} = f'_c + 8,3 = 33,3$ MPa [14]. Kuat tekan beton tidak diuji pada penelitian ini, sehingga mutu beton yang sebenarnya belum dapat dipastikan. Oleh karena itu, peningkatan relatif akibat serat lebih dapat dipercaya daripada nilai absolut kuat tarik belahnya.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan, yaitu jumlah benda uji hanya tiga untuk setiap variasi, kuat tekan dan kuat lentur tidak diuji, sifat serat (tebal, kuat tarik, dan berat jenis) tidak diukur, dan kadar serat yang diuji tidak mencakup rentang di bawah 5%. Penelitian lanjutan disarankan menguji kuat tekan pendamping, menambah jumlah benda uji, mengukur sifat serat, serta mengkaji kadar 1–7,5% dari berat semen untuk menentukan kadar optimum secara lebih tepat.

IV. Kesimpulan

Agregat yang digunakan memenuhi persyaratan sebagai bahan beton, dengan kadar lumpur agregat halus 2,53% yang masih di bawah batas 5%. Penambahan serat limbah spanduk sebesar 5%, 10%, dan 15% dari berat semen (16,8–50,4 kg/m³) menurunkan slump dari 93 mm menjadi 79–87 mm.

Kuat tarik belah 28 hari beton kontrol sebesar 1,41 MPa, sedangkan beton dengan serat spanduk 5%, 10%, dan 15% masing-masing 1,82 MPa (+28,3%), 1,34 MPa (–5,0%), dan 1,18 MPa (–16,7%). Perbedaan antarvariasi signifikan (F = 5,36; p = 0,026), tetapi secara berpasangan hanya kadar 5% dan 15% yang berbeda signifikan, sedangkan kadar 5% belum berbeda signifikan dari beton kontrol (p = 0,148).

Kadar serat limbah spanduk 5% dari berat semen merupakan kadar terbaik pada penelitian ini karena menghasilkan kuat tarik belah tertinggi dengan sebaran terkecil, sedangkan kadar 10–15% menurunkan kuat tarik belah dan kelecakan. Nilai absolut kuat tarik belah yang rendah menunjukkan perlunya pengujian kuat tekan dan perbaikan rancangan campuran pada penelitian lanjutan.

Daftar Pustaka

- [1] K. Tjokrodinuljo, *Teknologi Beton*. Yogyakarta, Indonesia: Biro Penerbit Teknik Sipil, Universitas Gadjah Mada, 2007.
- [2] P. K. Mehta dan P. J. M. Monteiro, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, ed. ke-4. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2014.
- [3] ACI Committee 544, *ACI 544.1R-96 Report on Fiber Reinforced Concrete*. Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute, 2009.

-
- [4] I. Padang, H. Matana, S. Pongbura, dan A. Marthen, "Pemanfaatan limbah plastik HDPE sebagai substitusi parsial agregat halus terhadap sifat mekanis campuran batako," *Jurnal Cahaya Mandalika*, pp. 1720–1726, 2024.
- [5] Usman, D. F. Manalu, dan Y. Apriyanti, "Studi kuat tekan dan kuat tarik belah beton dengan menggunakan potongan limbah spanduk sebagai bahan tambah," *Jurnal Fropil*, vol. 6, no. 1, pp. 52–61, 2018, doi: 10.33019/fropil.v6i1.1269.
- [6] H. S. W. Sunarwadi, D. H. Nugroho, dan R. D. Apriani, "Eksperimental pemanfaatan limbah banner (polyvinil chlorida) dalam pembuatan mortar berserat (fiber mortar)," *Daktalitas: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 3, no. 2, pp. 94–100, 2023.
- [7] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 03-1968-1990 Metode Pengujian tentang Analisis Saringan Agregat Halus dan Kasar*. Jakarta, Indonesia: BSN, 1990.
- [8] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 03-1969-1990 Metode Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar*. Jakarta, Indonesia: BSN, 1990.
- [9] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 03-1970-1990 Metode Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus*. Jakarta, Indonesia: BSN, 1990.
- [10] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 03-1971-1990 Metode Pengujian Kadar Air Agregat*. Jakarta, Indonesia: BSN, 1990.
- [11] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 03-4142-1996 Metode Pengujian Jumlah Bahan dalam Agregat yang Lolos Saringan No. 200 (0,075 mm)*. Jakarta, Indonesia: BSN, 1996.
- [12] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 03-4804-1998 Metode Pengujian Bobot Isi dan Rongga Udara dalam Agregat*. Jakarta, Indonesia: BSN, 1998.
- [13] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 2417:2008 Cara Uji Keausan Agregat dengan Mesin Abrasi Los Angeles*. Jakarta, Indonesia: BSN, 2008.
- [14] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 7656:2012 Tata Cara Pemilihan Campuran untuk Beton Normal, Beton Berat dan Beton Massa*. Jakarta, Indonesia: BSN, 2012.
- [15] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 1972:2008 Cara Uji Slump Beton*. Jakarta, Indonesia: BSN, 2008.
- [16] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 2491:2014 Metode Uji Kekuatan Tarik Belah Spesimen Beton Silinder*. Jakarta, Indonesia: BSN, 2014.
- [17] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, ed. ke-9. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2017.
- [18] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 2847:2019 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan*. Jakarta, Indonesia: BSN, 2019.