

KARAKTERISTIK BETON DENGAN PENAMBAHAN LIMBAH SERAT NYLON DAN POLIMER *CONCRETE*

Shanti Wahyuni Megasari¹⁾ Gusneli Yanti²⁾ Zainuri³⁾

Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lancang Kuning

Jl. Yos Sudarso km. 8 Rumbai – Pekanbaru

E-mail : shanti@unilak.ac.id

Abstrak

Tujuan penelitian adalah untuk mengetahui karakteristik beton dengan penambahan limbah serat polimer (nylon) dan polimer *concrete* terhadap pengujian tekan dan tarik belah. Perencanaan campuran beton menggunakan metode DoE (*Development of Environment*). Rancangan benda uji menggunakan kuat tekan K-175, faktor air semen (fas) 0,6 dengan 3 (tiga) variasi penambahan limbah serat polimer (nylon) 0%, 0,1%, 0,2% dan 0,3% serta penambahan polimer *concrete* (polcon) dengan perbandingan 1:100 terhadap berat air. Benda uji menggunakan silinder beton dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Pengujian yang dilakukan adalah kuat tekan beton dan kuat tarik belah pada umur beton 28 hari. Dari hasil pengujian terjadi peningkatan nilai kuat tekan beton rata-rata pada penambahan serat 0%; 0,1%; 0,2% dan 0,3% secara berurutan yaitu 33,011%; 3,379%; 4,281%; dan 2,985% dibandingkan dengan benda uji tanpa polcon. Sedangkan pada hasil pengujian kuat tarik belah beton diperoleh peningkatan nilai kuat tarik belah pada penambahan serat 0%; 0,1%; 0,2% dan 0,3% secara berurutan yaitu 19,998 %; 0%; 5,555% dan 9,090% dibandingkan dengan benda uji tanpa polcon. Hasil pengujian kuat tekan dan kuat tarik belah diperoleh trend (kecenderungan) kurva yang sama yaitu mengalami peningkatan pada penambahan limbah serat nylon sebesar 0,1%; kemudian akan mengalami penurunan pada penambahan limbah serat nylon 0,2% dan 0,3%. Hal tersebut dikarenakan semakin banyaknya jumlah serat dalam beton dengan karakteristik permukaan nylon yang licin akan mengakibatkan kurang kuatnya ikatan atau lekatan antara material-material penyusun beton. Dapat disimpulkan bahwa penambahan limbah serat nylon dan polimer *concrete* dapat meningkatkan nilai kuat tekan dan kuat tarik belah beton.

Kata Kunci : Beton, Kuat tekan, Kuat tarik belah, Limbah serat nylon, Polimer *concrete*

Abstract

The purpose of this study is to determine concrete characteristics with addition of waste polymer fiber (nylon) and concrete polymer to compressive strength and split tensile test. Concrete mix design used DoE (Development of Environment) method. Sample has compressive strength of K-175, water cement factor 0,6 with 3 variations of waste polymer fiber (nylon) 0%, 0,1%, 0,2%, 0,3% and additional concrete polymer (polcon) with 1:100 ratio to water weight. Sample of concrete cylinder with 15 cm diameter and 30 cm height. Compressive strength and split tensile test held in concrete age 28 days. Test results showed enhancement of compressive strength average value in fyber

addition of 0%; 0,1%; 0,2% and 0,3% sequentially were 33,011%; 3,379%; 4,281%; and 2,985% than sample without polcon. Otherwise the results of split tensile strength showed increasement in fyber addition of 0%; 0,1%; 0,2% and 0,3% sequentially were 19,998 %; 0%; 5,555% and 9,090 % than sample without polcon. The results of compressive strength and split tensile test retrieved same curve trend that showed increasement in nylon waste fiber of 0,1%; therefore decreasement in nylon waste fiber of 0,2% and 0,3%. It happened because of increasing fiber number in concrete with nylon slippery surfaces characteristic lead to lack of bond or concrete material coherency. In conclusion, the addition of nylon waste fiber and concrete polymer could increase compressive strength and split tensile value of concrete.

Keywords: *Concrete, Compressive strength, Split tensile strength, Waste polymer fiber, Polimer concete*

A. PENDAHULUAN

Latar belakang penelitian adalah beton memiliki daktilitas yang rendah dicerminkan oleh kurva-kurva tegangan-regangannya yang memiliki penurunan kekuatan tekan yang signifikan pada daerah beban puncak, sehingga menyebabkan keruntuhan secara tiba-tiba. Untuk memperbaiki sifat beton tersebut dapat dilakukan dengan melalui pemanfaatan bahan tambah kimia (*chemical admixture*) maupun mineral (*mineral admixture*). Salah satu jenis bahan tambahan tersebut adalah serat dan polimer *concrete* (polcon), yang diharapkan dapat membantu meningkatkan daktilitas dari beton yang dihasilkan. Disisi lain, Konsep bangunan beton (*greener concrete*) yang ramah lingkungan sedang berkembang di dunia konstruksi. Salah satunya dengan menggunakan material penyusun beton dengan memanfaatkan material buangan (*waste*) dengan konsep 4R (*Reduce, Refurbish, Reuse dan Recycle*).

Tujuan penelitian adalah untuk mengetahui kuat tekan dan kuat tarik belah beton dengan penambahan limbah serat nylon dan polimer *concrete* (polcon).

Manfaat penelitian yaitu diharapkan akan dapat memberikan informasi dan pengetahuan tentang bahan campuran beton alternatif dalam menciptakan konsep bangunan ramah lingkungan (*greener concrete*).

B. TINJAUAN PUSTAKA

1. Beton

Beton didapat dari pencampuran bahan-bahan agregat halus dan kasar yaitu pasir, batu-batu pecah, atau bahan semacam lainnya, dengan menambahkan secukupnya bahan perekat semen, dan air sebagai bahan pembantu guna keperluan reaksi kimia selama proses pengerasan dan perawatan beton berlangsung. Agregat halus dan kasar, disebut sebagai bahan campuran kasar campuran, merupakan komponen utama beton. Nilai kekuatan serta daya tahan (*durability*) beton merupakan fungsi dari banyak faktor, diantaranyaialah nilai banding campuran dan mutu bahan susun metode pelaksanaan pengecoran, pelaksanaan finishing, temperatur, dan kondisi perawatan pengerasan (Dipohusodo I., 1996).

2. Beton Serat

Menurut Suhardiman, M (2011), beton serat didefinisikan sebagai beton yang terbuat dari campuran semen, agregat halus, agregat kasar, dan sejumlah kecil serat atau fiber (ACI Committe 544, 1982). Bahan-bahan serat yang dapat digunakan untuk perbaikan sifat pada beton yaitu dengan meningkatkan ketahanan retak awal (*first crack*). Serat yang ditambahkan dapat dari berbagai tipe, bentuk permukaan, panjang serat dan persentase jumlah serat (*fiber volume fraction*).

Menurut bahan tambah serat yang dapat digunakan terdiri dari 5 (lima) macam :

- a. Beton serat baja (*Steel Fiber Reinforced Concrete, SFRC*)
- b. Beton serat kaca (*Glass Fiber Reinforced Concrete, GFRC*)
- c. Beton serat sintesis plastik (*Synthetic Fiber Reinforced Concrete, SFRC*)
- d. Beton serat karbon (*Carbon Fiber Reinforced Concrete, CFRC*)
- e. Beton serat alam (*Natural Fiber Reinforced Concrete, NFRC*)

Menurut Soroushian (1987), pendekatan teori untuk menjelaskan mekanisme kerja serat beton adalah :

a. *Spacing concept*

Dengan mendekatkan jarak antar serat dalam campuran beton akan membuat beton lebih mampu membatasi ukuran retak dan mencegah berkembangnya retak menjadi lebih besar. Kerja serat akan lebih efektif jika diletakkan berjajar dan seragam tidak tumpang tindih (*overlapping*). Pada kondisi sebenarnya, penyebaran serat di dalam adukan beton sulit untuk dibuat beraturan dan saling menindih, sehingga volume efektif potongan serat hanya dapat dianggap 41% dari volume sebenarnya.

b. *Composit material concept*

Suatu konsep pendekatan untuk memperkirakan kuat tarik dan lentur beton dengan asumsi bahan penyusun beton saling melekat sempurna, dengan memperkirakan kekuatan material komposit saat timbul retak pertama (*first crack strength*).

3. Polimer concrete (POLCON)

Polimer concrete (POLCON) adalah material polimer dalam bentuk emulsi komposit manometer untuk memodifikasi sifat-sifat material dan mekanis beton dan mortar. Polcon dapat ditambahkan sebagai salah satu unsur material dalam pembuatan beton dan mortar untuk mempercepat pengerasan tanpa perawatan basah (*wet curing*) sekaligus untuk meningkatkan kekuatan, ketahanan terhadap benturan, kuat tekan, kuat lentur, kuat tarik, kuat belah dan keawetan beton dan mortar. Koefisien ekspansi beton dan mortar relatif tetap, lebih tahan terhadap panas, penetrasi air tawar maupun air asin. Perbandingan sifat mekanis beton yang menggunakan polcon dan beton biasa dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan Sifat Mekanis Beton yang Menggunakan Polcon dan Beton Biasa

Sifat Mekanis Beton	Kuat Tarik, MPa	Modulus Elastisitas, GPa	Kuat Tekan, MPa	Kuat Lekat Geser, KPa	Serapan Air, %	Ketahanan Terhadap Asam Klorida
Menggunakan Polcon	5,6	14	38	≥ 4,550	-	4
Tanpa Polcon	2,5	24,5	35	875	5,5	-

(Sumber : Polcon PT Masushita Builders)

4. Kuat Tekan Beton

Kuat tekan beton diawali oleh tegangan tekan maksimum (f_c') dengan satuan N/mm² atau MPa (Mega Pascal). Sebelum diberlakukan sistem satuan SI di Indonesia, nilai tegangan menggunakan satuan kgf/cm². Kuat tekan beton yang berumur 28 hari berkisar antara nilai $\pm 10-65$ MPa (Dipohusodo I., 1996). Nilai kuat tekan beton didapat dari hasil pengujian kuat tekan yang gunanya untuk mengetahui mutu dari beton tersebut. Pengujian kuat tekan beton dilakukan dengan cara memberi gaya tekan aksial terhadap benda uji silinder dengan dilakukan peningkatan beban sampai benda uji mengalami keruntuhan. Besarnya kuat tekan beton dapat dihitung dengan cara membagi beban maksimum pada saat benda uji tersebut hancur dengan penampang benda uji.

Pengujian terhadap kuat tekan beton dilakukan dengan menggunakan silinder yang berdiameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Nilai tegangan yang dihasilkan dari uji kuat tekan beton yang berbentuk silinder, dihitung dengan rumus :

$$f_c' = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Keterangan :

- f_c' = Kuat tekan beton (MPa)
- P = Beban maksimum yang mengakibatkan silinder hancur (MPa)
- A = Luas penampang tertekan benda uji (cm²)

Dari hasil pengumpulan data kekuatan hancur tekan beton, dilakukan penentuan kuat tekan beton rata-rata dengan mempergunakan rumus sebagai berikut :

$$f_{c'rt} = \frac{\sum_{i=1}^N f_c'}{N} \quad (2)$$

Keterangan :

- f_c' = Kekuatan tekan beton yang didapat dari masing-masing benda uji (MPa)
- $f_{c'rt}$ = Kekuatan tekan beton rata-rata (kg/cm²)
- N = Jumlah seluruh nilai hasil pemeriksaan

Benda uji dikatakan memenuhi persyaratan mutu kekuatan tekan beton apabila nilai yang dihasilkan lebih besar dari nilai yang direncanakan (Dipohusodo I., 1996).

5. Kuat Tarik Belah Beton

Menurut Nawy (1990), kuat tarik beton berpengaruh pada perambatan dan lebar retak dalam struktur dengan batasan dalam satuan MPa dan dinyatakan sebagai :

$$f_{tarik} = 0,5 - 0,6\sqrt{f_c'} \quad (3)$$

Pengujian kuat tarik beton dilakukan dengan membebani benda uji silinder beton dengan suatu beban/gaya yang tegak lurus terhadap sumbu longitudinalnya. Kuat tarik belah benda uji berbentuk silinder merupakan pengujian tarik tidak langsung dari benda uji beton berbentuk silinder yang diperoleh dari hasil pembebanan benda uji tersebut, yang diletakkan mendatar sejajar dengan permukaan meja penekan mesin uji tekan.

Kekuatan tarik belah berkisar antara 10 % - 15 % dari kekuatan tekannya (Nawy, 1990). Untuk mengatasi hal tersebut, pada struktur beton biasanya diberikan penguatan

tarik dan geser pada daerah tarik dari penampangnya. Kuat tarik belah dihitung dengan persamaan :

Pengujian terhadap kuat tarik belah dihitung dengan rumus:

$$\sigma_{tr} = \frac{2P}{LD} \quad (4)$$

Keterangan :

- σ_{tr} = Kuat tarik belah (MPa)
- P = Beban maksimum (N)
- L = Panjang benda uji (mm)
- D = Diameter benda uji (mm)

C. METODE PENELITIAN

1. Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Beton Prodi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lancang Kuning.

2. Material Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian adalah :

- a. Semen dengan jenis PCC (*Portland Composite Cement*) type I produksi PT. Semen Padang
- b. Agregat kasar berupa batu pecah yang berasal Kabupaten Kampar
- c. Agregat halus berupa pasir yang berasal dari Kabupaten Kampar
- d. Air yang digunakan berasal dari sumur dilingkungan Prodi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lancang Kuning
- e. Material buangan atau limbah berupa serat (nylon)
- f. Polcon *Concrete & Mortar Modifier* produksi PT. Masushinta Builders

3. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian meliputi pengujian pendahuluan pada agregat kasar dan agregat halus. Data tersebut digunakan untuk perhitungan perencanaan campuran beton (*mix design*) dengan menggunakan metode DoE (*Departement of Environment*). Kemudian dilakukan pencampuran material yang memenuhi syarat dan dilanjutkan dengan pembuatan benda uji, pengujian slump, perawatan dan pengujian kuat tekan dan kuat tarik belah beton setelah benda uji berumur 28 hari.

4. Rancangan Benda Uji Penelitian

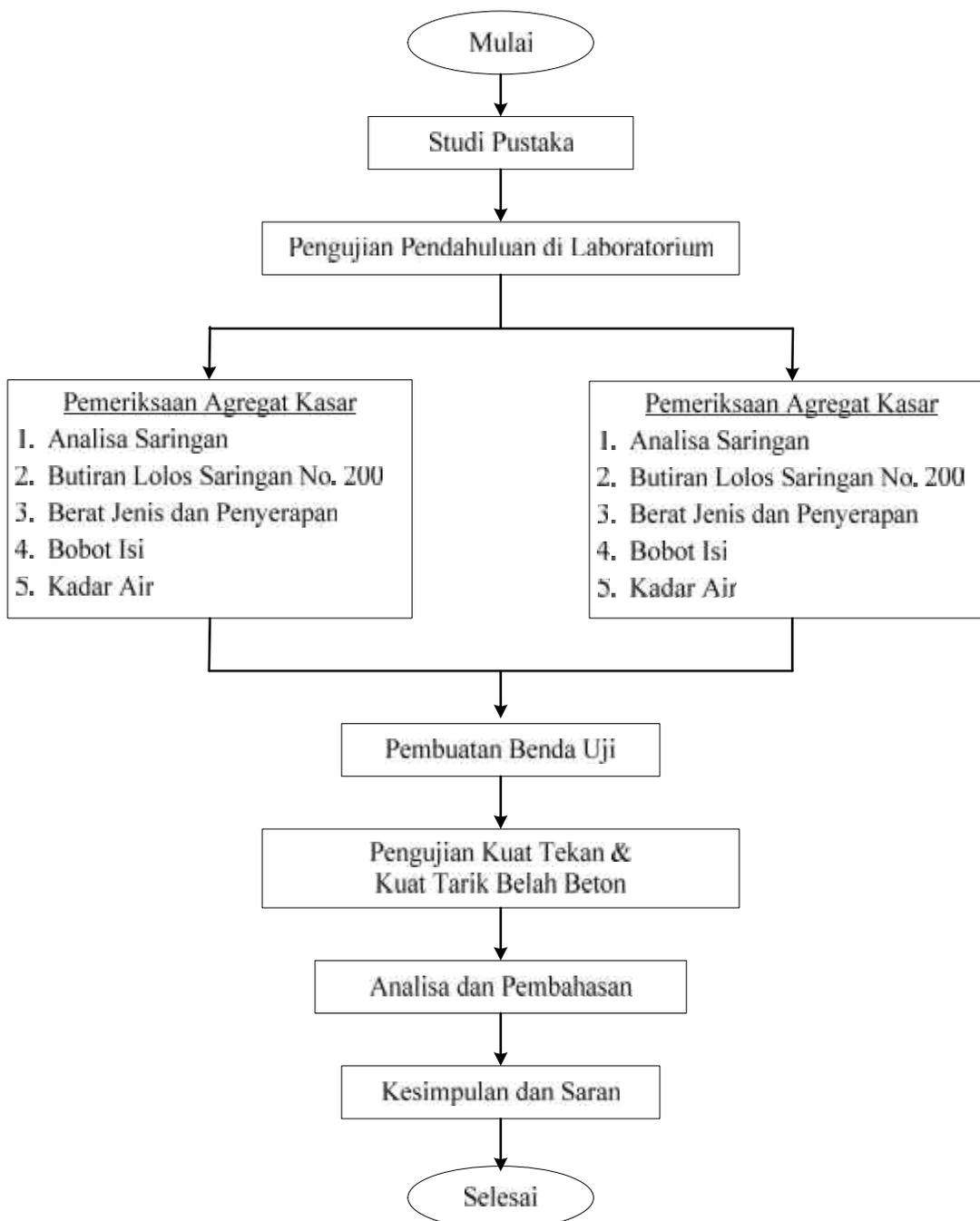
Rancangan benda uji dilakukan dengan menggunakan kuat tekan beton K-175, faktor air semen (fas) sebesar 0,6 dan penambahan polcon sebanyak 1:100 terhadap berat air. Variasi penambahan limbah serat nylon yaitu 0%; 0,1%; 0,2% dan 0,3 %. Benda uji berbentuk silinder berdiameter 15 cm dan tinggi 30 cm dengan jumlah sampel pada masing-masing variasi sebanyak 4 (empat) sampel benda uji. Rincian rancangan benda uji penelitian dapat dilihat pada Tabel 2

Tabel 2. Rancangan Benda Uji

Benda Uji	Persentase Penambahan Limbah Serat				Total Benda Uji
	0	0,1	0,2	0,3	
Tanpa Polcon	4	4	4	4	16
Dengan Polcon	4	4	4	4	16

5. Bagan Alir Penelitian

Bagan alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Bagan Alir Penelitian

D. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Hasil pengujian kuat tekan beton dengan penambahan limbah serat nylon dan polcon dapat dilihat pada Tabel 3 dan Gambar 2.

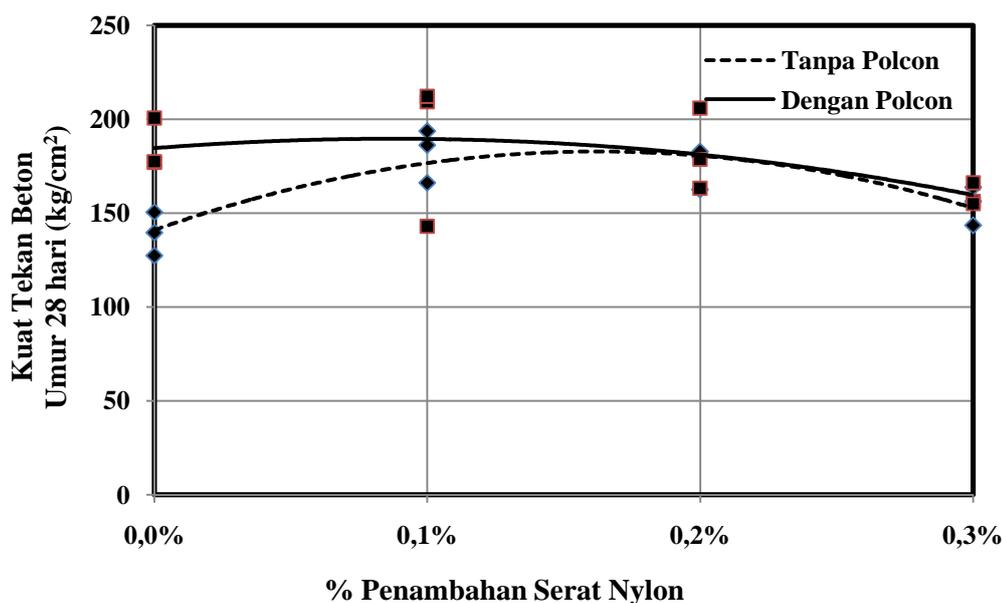
Tabel 3. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Umur 28 hari

Benda Uji	% Serat Nylon	Nomor Sampel	Beban Max (kN)	Kuat Tekan Beton (kg/cm ²)	Kuat Tekan Rata-rata (kg/cm ²)
Tanpa Polcon	0	1	261	150,556	139,212
		2	221	127,483	
		3	242	139,596	
	0,1	1	323	186,321	182,091
		2	336	193,820	
		3	288	166,131	
	0,2	1	282	162,670	175,168
		2	312	179,975	
		3	317	182,860	
	0,3	1	249	143,634	154,594
		2	284	163,824	
		3	271	156,325	
Dengan Polcon	0	1	348	200,742	185,167
		2	307	177,091	
		3	308	177,668	
	0,1	1	363	209,394	188,244
		2	368	212,279	
		3	248	143,057	
	0,2	1	357	205,933	182,667
		2	283	163,247	
		3	310	178,822	
	0,3 %	1	288	166,131	159,209
		2	271	156,325	
		3	269	155,171	

Berdasarkan Tabel 3 terdapat peningkatan nilai kuat tekan rata-rata pada benda uji tanpa polcon dengan 0% serat yaitu 139,212 kg/cm² menjadi 185,167 kg/cm² pada benda uji dengan polcon. Peningkatan yang terjadi sebesar 33,011% dibandingkan dengan benda uji tanpa polcon. Hal tersebut juga terjadi pada benda uji 0,1%; 0,2% dan 0,3% dengan persentase peningkatan nilai kuat tekan secara berurutan sebesar 3,379%; 4,281%; dan 2,985%. Dari hasil penelitian tersebut membuktikan bahwa penggunaan polcon pada beton dapat meningkatkan kekuatan tekan beton rata-rata.

Nilai kuat tekan beton rata-rata tanpa polcon dengan 0% limbah serat sebesar 139,212 kg/cm² menjadi 182,091 kg/cm² pada penambahan 0,1% limbah serat. Peningkatan yang terjadi sebesar 30,801% dibandingkan dengan 0% limbah serat nylon. Nilai kuat tekan beton rata-rata dengan polcon juga mengalami peningkatan yaitu dengan 0% limbah serat sebesar 185,167 kg/cm² menjadi 188,244 kg/cm² pada penambahan 0,1% limbah serat. Peningkatan yang terjadi sebesar 1,662% dibandingkan dengan 0% limbah serat nylon. Namun kekuatan tekan rata-rata mengalami penurunan

pada penambahan limbah serat sebesar 0,2% dan 0,3% baik pada benda uji tanpa maupun dengan polcon. Pada Gambar 2 dapat dilihat bahwa diperoleh trend (kecenderungan) yang sama yaitu mengalami kenaikan nilai kuat tekan pada benda uji dengan penambahan limbah serat nylon 0,1% namun mengalami penurunan pada benda uji dengan penambahan 0,2% dan 0,3% baik pada benda uji tanpa maupun dengan polcon. Hal tersebut membuktikan bahwa penambahan limbah serat nylon dapat meningkatkan kekuatan tekan beton namun dengan persentase tertentu, dikarenakan semakin banyaknya jumlah serat dengan karakteristik permukaan nylon yang licin akan mengakibatkan kurang kuatnya ikatan atau lekatan antara material-material penyusun beton.



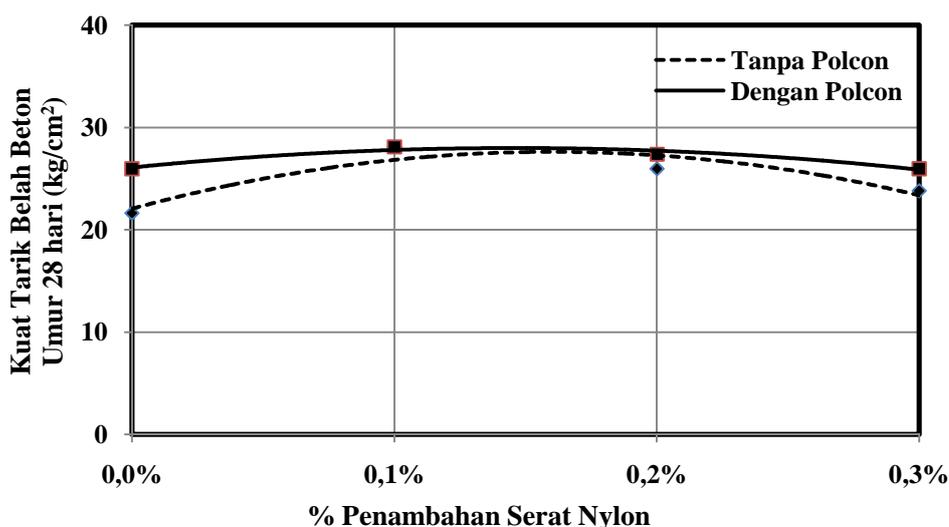
Gambar 2. Grafik Nilai Kuat Tekan Beton Umur 28 hari

2. Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Beton

Hasil pengujian kuat tarik belah beton dengan penambahan limbah serat nylon dan polcon dapat dilihat pada Tabel 4 dan Gambar 3.

Tabel 4. Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Beton Umur 28 hari

Benda Uji	% Limbah Serat Nylon	Beban Max (kN)	Kuat Tarik Belah Beton (kg/cm ²)
Tanpa Polcon	0 %	150	21,632
	0,1 %	195	28,121
	0,2 %	180	25,958
	0,3 %	165	23,795
Dengan Polcon	0 %	180	25,958
	0,1 %	195	28,121
	0,2 %	190	27,400
	0,3 %	180	25,958



Gambar 3. Nilai Kuat Tarik Belah Beton Umur 28 hari

Berdasarkan Tabel 4 terdapat peningkatan nilai kuat tarik belah pada benda uji tanpa polcon dengan 0% serat yaitu $21,632 \text{ kg/cm}^2$ menjadi $25,958 \text{ kg/cm}^2$ pada benda uji dengan polcon. Peningkatan yang terjadi sebesar 19,998 % dibandingkan dengan benda uji tanpa polcon. Pada benda uji dengan penambahan 0,1% terdapat hasil nilai kuat tarik belah yang sama antara benda uji tanpa polcon dan dengan polcon. Sedangkan pada benda uji dengan penambahan serat sebanyak 0,2% dan 0,3% terjadi peningkatan nilai kuat tarik belah dengan persentase peningkatan secara berurutan sebesar 5,555% dan 9,090 %. Dari hasil penelitian tersebut membuktikan bahwa penggunaan polcon pada beton dapat meningkatkan kekuatan tarik belah beton.

Nilai kuat tarik belah beton tanpa polcon dengan 0% limbah serat sebesar $21,632 \text{ kg/cm}^2$ menjadi $28,121 \text{ kg/cm}^2$ pada penambahan 0,1% limbah serat. Peningkatan yang terjadi sebesar 29,997% dibandingkan dengan 0% limbah serat nylon. Nilai kuat tarik belah beton dengan polcon juga mengalami peningkatan yaitu dengan 0% limbah serat sebesar $25,958 \text{ kg/cm}^2$ menjadi $28,121 \text{ kg/cm}^2$ pada penambahan 0,1% limbah serat. Peningkatan yang terjadi sebesar 8,333% dibandingkan dengan 0% limbah serat nylon. Nilai kekuatan tarik belah juga mengalami penurunan pada penambahan limbah serat sebesar 0,2% dan 0,3% baik pada benda uji tanpa maupun dengan polcon sama dengan hasil pengujian kuat tekan beton. Pada Gambar 3 dapat dilihat bahwa diperoleh trend (kecenderungan) yang sama yaitu mengalami kenaikan nilai kuat tekan pada benda uji dengan penambahan limbah serat nylon 0,1% namun mengalami penurunan pada benda uji dengan penambahan 0,2% dan 0,3% baik pada benda uji tanpa maupun dengan polcon.

E. KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian ini adalah :

1. Penambahan polimer dan serat nylon pada campuran beton dapat meningkatkan nilai kuat tekan dan kuat tarik belah beton.

2. Dari hasil pengujian kuat tekan dan kuat tarik belah diperoleh kecenderungan (*trend*) kurva mengalami peningkatan pada penambahan limbah serat nylon sebesar 0,1%; kemudian akan mengalami penurunan pada penambahan limbah serat nylon 0,2% dan 0,3%.
3. Penambahan serat yang terlalu banyak pada suatu campuran beton dapat menyebabkan terjadinya penurunan kuat tekan dan kuat tarik belah beton, dikarenakan semakin banyaknya jumlah serat dengan karakteristik permukaan nylon yang licin akan mengakibatkan kurang kuatnya ikatan antara material-material penyusun beton.

DAFTAR PUSTAKA

- Departemen Pekerjaan Umum, 2002, *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung SK SNI 03-2847-2002*, Departemen Pekerjaan Umum, Jakarta.
- Balaguru P., dan Shah S.P., 1992, *Fibre Reinforced Cement Composites*, McGraw-Hill, Singapore.
- Balai Jembatan dan Bangunan Pelengkap Jalan, 2011, *Pedoman Pengendalian Mutu Pekerjaan Beton*, Kementerian Pekerjaan Umum, Bandung.
- Departemen Pemukiman dan Prasarana Wilayah, 2002, *Metode, Spesifikasi dan Tata Cara Beton, Semen, Perkerasan Beton Semen*, Departemen Kimpraswil, Jakarta.
- Dipohusodo I., 1994, *Struktur Beton Bertulang*, PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.
- Hannant D.J., 1978, *Fibre Cements and Fibre Concretes*, John Wiley & Sons, New York.
- Mulyono T., 2004, *Teknologi Beton (Edisi kedua)*, Penerbit Andi Offset, Yogyakarta.
- Nawy E.G., 1990, *Beton Bertulang; Suatu Pendekatan Dasar*, PT. Eresco, Bandung.
- Soroushian dan Bayasi, 1987, *Fibre Reinforced Concrete Design and Application*, Seminar Proceeding Composite and Structure Centre, Michigan State University.
- Suhardiman M., 2011, *Kajian Pengaruh Penambahan Serat Bambu Ori Terhadap Kuat Tekan dan Kuat Tarik Beton*, Jurnal Teknik, Vol.1, No.2, Oktober 2011.
- Tjokrodimulyo K., 1995, *Buku Ajar Teknologi Beton*, Jurusan Teknik Sipil UGM, Yogyakarta.