

SIFAT MEKANIS BETON BERSERAT BAJA DENGAN METODE PENGERJAAN PRALETAK AGREGAT (MECHANICAL PROPERTIES OF STEEL-FIBER-REINFORCED CONCRETE PRODUCED BY AGGREGATE PREPLACING METHOD)

Sam Randa¹⁾, Iman Satyarno²⁾, Djoko Sulisty³⁾

¹⁾ Puslitbang Jalan dan Jembatan

¹⁾ Jl. A. H. Nasution No. 264 Bandung 40294,

^{2), 3)} Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada

^{2), 3)} Jl. Grafika No. 2 Kampus UGM, Yogyakarta 55281

^{1), 2), 3)} e-mail: sam.randa@pusjatan.pu.go.id; iman@tsipil.ugm.ac.id; djokosulistyo@tsipil.ugm.ac.id

Diterima: 09 April 2013; direvisi: 03 Juli 2013; disetujui: 01 Agustus 2013

ABSTRAK

Jumlah serat yang dapat ditambahkan ke dalam beton berserat yang diaduk secara konvensional dibatasi oleh fenomena penggumpalan serat dalam pengaduk beton. Tulisan ini membahas metode alternatif pembuatan beton berserat dengan indeks kekuatan tinggi dengan cara praletak adukan agregat kasar dan serat. Hubungan indeks kekuatan serat terhadap sifat-sifat mekanis beton agregat-serat praletak dilaporkan secara rinci. Indeks kekuatan volumetrik serat dalam beton adalah 0%, 1%, 1,6% dan 2,0%. Sifat-sifat mekanis yang diteliti mencakup cepat-rambat getaran ultrasonik, modulus elastisitas, kuat tekan, kuat tarik-lentur dan keuletan. Sifat-sifat fisis beton meliputi kerapatan massa, penyerapan air, dan volume pori permeabel juga dilaporkan. Didapati bahwa penambahan serat memperbaiki sifat-sifat mekanis beton agregat praletak. Indeks kekuatan serat berkorelasi kuat terhadap sifat-sifat mekanis beton. Untuk beton agregat praletak polos hingga beton agregat praletak berserat dengan indeks kekuatan 2, kuat tekan meningkat secara linier dari 21,9 MPa menjadi 46,9 MPa. Kuat tarik-lentur beton meningkat secara eksponensial dari 3,3 MPa menjadi 15,5 MPa. Di sisi lain, modulus elastisitas beton berkurang secara linier dengan bertambahnya indeks kekuatan serat, yakni dari 31.700 MPa menjadi 23.700 MPa. Pemeriksaan sifat-sifat fisis beton mengindikasikan bahwa beton ini memiliki level durabilitas yang memadai untuk penerapan pada struktur.

Kata kunci: beton agregat praletak, beton berserat baja, SIFCON, indeks kekuatan tinggi, sifat-sifat mekanis

ABSTRACT

Fiber addition into conventionally produced concrete is limited due to the balling of fibers in concrete mixer. This research proposed alternative method in producing fiber-reinforced concrete with a high reinforcing index by preplacing a premixture of coarse aggregates and fibers. Experimental programs were conducted to study the effect of fiber reinforcing index on the mechanical properties of hardened concrete, which are in terms of ultrasonic pulse velocity, elastic modulus, compressive strength, flexural-tensile strength and toughness. Reinforcing indices investigated were 0,0, 1,0, 1,6 and 2,0. The study also examined physical properties of concrete in terms of density, water absorption and volume of permeable voids. It is found that fibers can significantly improved the mechanical properties of concrete. Reinforcing index strongly correlates with concrete's mechanical properties. For plain concrete to fibrous concrete with reinforcing index of 2,0 compressive strength increased linearly from 21,9 MPa to 46,9 MPa respectively. Moreover, flexural-tensile strength of the corresponding concrete increased exponentially from 3,3 MPa to 15,5 MPa respectively. On the other hand, the modulus of elasticity decreased linearly with the addition of fiber reinforcing index, i.e. from 31.700 MPa to 23.700 MPa respectively. Evaluation on their physical properties indicates that these concrete possess sufficient level of durability for structural application.

Keywords: preplaced-aggregate concrete, fiber-reinforced concrete, SIFCON, high-reinforcing index, mechanical properties

PENDAHULUAN

Pada beton berserat, penambahan serat-serat ke dalam adukan beton segar membutuhkan pengadukan yang cermat demi menghasilkan sebaran serat yang merata dalam beton. Serat, dengan rasio aspek tinggi, yang ditambahkan dalam kadar volumetrik lebih dari dua persen menjadi sukar bahkan tidak mungkin diaduk dan dicor (Swamy and Mangat 1974; Karki 2011). Pada saat pengadukan terjadi efek penggumpalan serat (*balling*) dalam mesin pengaduk sehingga bahan-bahan tidak teraduk rata. Kesulitan ini membatasi pengembangan beton berserat konvensional.

Penelitian ini dilatari oleh perlunya cara alternatif untuk membuat beton berserat dengan indeks perkuatan tinggi tanpa adanya masalah penggumpalan serat seperti pada metode konvensional. Di sini diuraikan metode beton agregat praletak berserat baja dan sifat-sifat beton yang dihasilkan.

KAJIAN PUSTAKA

Beton agregat praletak, pertama kali ditemukan oleh Turzillo dan Wertz pada tahun 1937 (ACI Committee 304 1997), dibuat dengan menginjeksi agregat kasar yang ditempatkan pada acuan kedap dengan adukan grout matriks semen. Bersama dengan mengerasnya matriks semen pun mengikat agregat kasar menjadi kesatuan beton. Beton yang dihasilkan memiliki modulus elastisitas yang cenderung lebih tinggi daripada beton normal konvensional (Awal 1984, Abdelgader and Górski 2003). Ini disebabkan kadar agregat kasar yang relatif tinggi dan susunan agregat kasar dalam beton ini berada dalam saling kontak antar butir.

Bayer (2004) membuktikan bahwa metode beton agregat praletak bermanfaat mengurangi suhu beton massa akibat reaksi hidrasi semen. Bayer (2004) juga melaporkan sifat-sifat beton massa yang dihasilkan dengan cara praletak agregat meliputi kuat tekan, modulus elastisitas, angka pantul palu beton Schmidt dan cepat-rambat getaran ultrasonik

(*Ultrasonic Pulse Velocity—UPV*). Nilai UPV beton telah diketahui berkorelasi dengan modulus elastisitas beton polos konvensional (BSI 1986, Yildirim and Sengul 2011). Tetapi untuk beton agregat praletak korelasi ini belum banyak dilaporkan.

Untuk menghasilkan beton berkadar serat tinggi, metode beton agregat praletak kemudian diadopsi dengan mengganti seluruh agregat kasar dengan serat-serat baja yang diletakkan secara acak dalam acuan beton. Beton jenis ini dinamakan *Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON)*. Beton *SIFCON* ditemukan oleh Dr. David Lankard pada tahun 1983 dan diperkenalkan pertama kali kepada angkatan bersenjata Amerika sebagai bahan yang berpotensi untuk diterapkan pada struktur-struktur tahan ledakan (Schneider *et al.* 1988).

Beton *SIFCON* menunjukkan sifat kekuatan tarik dan lentur, keuletan dan kemampuan meregang yang luar biasa tinggi. Hanya saja, modulus elastisitas *SIFCON* terbilang rendah yakni pada kisaran 7.000 MPa (Homrich dan Naaman 1988) sampai dengan 19.000 MPa (Marrs 1998). Ini berkaitan erat dengan kandungan matriks yang sangat tinggi yang dapat mencapai lebih dari 70% volume beton. Komposisi matriks yang sangat tinggi menyebabkan beton *SIFCON* kurang ekonomis (Mondragon 1988).

Pada beton berserat konvensional, penambahan serat tidak banyak memengaruhi nilai kuat tekan. Namun, keuletan tekan (*compressive toughness*) beton meningkat drastis dengan adanya regangan yang sangat besar paska beban maksimum dicapai. Perubahan kekuatan lentur beton akibat penambahan serat baja jauh lebih signifikan dibanding pengaruhnya terhadap kekuatan tekan beton (ACI Committee 544 1988, Wang 2006). Sedang keuletan lentur (*flexural toughness*) yang dikuantifikasi oleh indeks-indeks keuletan lentur (ASTM Standard C1018 1998) dapat meningkat menurut kadar penambahan serat (Johnston dan Skarendahl 1992, Mohammadi, Singh dan Kaushik 2008). Kenaikan sifat-sifat mekanik didapati berkorelasi dengan kadar dan karakteristik serat dalam beton. Beberapa peneliti menggunakan

indeks kekuatan massa serat (Ezeldin dan Balaguru 1992, Nataraja, Dhang dan Gupta 1999), atau sekedar fraksi volume serat oleh (Wang 2006, Mohammadi, Singh dan Kaushik 2008), sedang beberapa peneliti belakangan telah menyarankan definisi indeks kekuatan volumetrik (*volumetric reinforcing index*), RI_v , sebagai parameter yang berkorelasi kuat dengan sifat-sifat beton berserat (Mansur, Chin dan Wee 1999, Neves dan Fernandes de Almeida 2005, Thomas and Ramaswamy 2007, Ou, *et al.* 2012). Indeks kekuatan dinyatakan dalam Persamaan (1) berikut ini:

$$RI_v = V_f \cdot \frac{l_f}{\phi_f} \dots \dots \dots (1)$$

Keterangan:

- V_f = kadar serat volumetrik
- l_f = panjang serat
- ϕ_f = diameter serat

Dari penelitian-penelitian terdahulu ini, capaian indeks kekuatan tertinggi adalah yang dilaporkan oleh Ou *et al.* (2012) sebesar 1,70. Para peneliti telah mengusulkan rumus-rumus empiris yang menghubungkan antara sifat-sifat mekanik beton berserat konvensional terhadap indeks kekuatan serat (Yurtseven 2004, Thomas dan Ramaswamy 2007, Ou, *et al.* 2012). Sifat-sifat ini belum mencakup untuk untuk beton berserat dengan metode praletak agregat.

HIPOTESIS

Dalam penelitian ini dihipotesiskan bahwa dengan menggabungkan teknik beton agregat praletak dan *SIFCON*, akan dapat dihasilkan beton berserat dengan indeks kekuatan serat volumetrik yang tinggi dengan modulus elastisitas yang berada di rentang antara keduanya. Untuk itu diperlukan suatu komposisi adukan *mortar grout* dengan sifat-sifat segar, meliputi sifat alir dan *bleeding*, yang memadai untuk keperluan ini. Penelitian ini juga bertujuan untuk memperoleh hubungan-hubungan indeks kekuatan serat terhadap sifat-

sifat fisis dan mekanis beton yang dihasilkan dengan metode praletak agregat.

METODOLOGI

Bahan-bahan dan proporsi adukan

Dalam penelitian ini, bahan-bahan yang digunakan dipilih dari bahan-bahan yang memenuhi persyaratan untuk pembuatan beton konvensional. Bahan-bahan yang digunakan meliputi: semen Portland Pozzolana (PPC); *Fly Ash* dari PLTU Suralaya Banten, ukuran butir $\leq 150 \mu\text{m}$; pasir dari Galunggung, ukuran butir $\leq 1,18 \text{ mm}$; batu pecah produksi Lagadar di Cimahi, ukuran butir $19 \text{ mm} - 37,5 \text{ mm}$. Serat baja yang digunakan dalam penelitian ini adalah *ex Dramix® RC-80/60-BN* produksi Bekaert. Serat baja ini memiliki kait pada kedua ujungnya, panjang serat $l = 60 \text{ mm}$, diameter $\phi = 0,75 \text{ mm}$. Serat terbuat dari baja karbon rendah dengan kuat tarik minimum serat baja adalah 1050 MPa . *Superplasticizer* yang digunakan tipe *polycarboxylate* cair. Air pencampur bersumber dari jaringan air bersih di laboratorium Balai Jembatan, Puslitbang Jalan dan Jembatan di Bandung.

Proporsi bahan-bahan dalam adukan *grout* yang digunakan, dipilih melalui prosedur *trial-and-error* adukan. Kriteria pemilihan formula *grout* terutama adalah faktor alir dan nilai *bleeding*. Nilai faktor alir *grout* ditentukan menurut prosedur SNI 03-6808 (BSN 2002). Nilai *bleeding grout* ditentukan menurut prosedur SNI 03-6430.3 (BSN 2000).

Untuk keperluan pembetonan ini, faktor alir *grout* yang ditargetkan adalah kurang dari 35 detik. Target ini dianggap cukup mengingat nilai yang disarankan oleh Mondragon (1988) adalah 25 – 40 detik. Formula adukan *grout* yang diuji ditunjukkan dalam Tabel 1.

Nilai *bleeding grout* 3 jam semula ditetapkan maksimum 5%. Nilai ini semula dianggap cukup karena penelitian oleh Awal (1984) telah menggunakan *grout* dengan *bleeding* hingga 10%. Namun dari hasil uji tekan beton keras diamati bahwa nilai *bleeding* 5% ini menyebabkan pelemahan di bagian sisi

atas beton dimana air *bleeding* terkumpul beberapa saat setelah pengecoran. Selain itu, *grout* pertama F40-15 WC36 SP0,6 ini tidak direkomendasikan karena, setelah mencermati *bleeding grout* pada setiap selang waktu 5,15 dan 60 menit selama 3 jam pertama, diamati kecenderungan bahwa *bleeding* masih akan bertambah setelah 3 jam pengamatan (lihat Gambar 1). Karena itu modifikasi adukan dilakukan pada adukan kedua dengan menetapkan target *bleeding* maksimum yang baru yakni 2,5% dengan tetap memperhatikan syarat faktor alir.

Tabel 2 menampilkan hasil uji sifat-sifat *grout* yang digunakan dalam penelitian ini. Perhatikan bahwa faktor alir, berat satuan dan kekuatan *grout* relatif sama untuk kedua *grout*, tetapi nilai *bleeding* 3 jam *grout* kedua hanya setengah nilai *bleeding grout* yang pertama. Faktor alir *grout* diperoleh 30 detik dengan *bleeding* 2,5% konstan mulai menit ke-75 sejak penguangan.

Pencampuran serat Dramix dan batu di laboratorium dilakukan dalam *mixer* beton. Pada saat pengadukan ditambahkan sejumlah air untuk mengurai serat-serat Dramix yang terbundel perekat. Proporsi campuran batu (agregat kasar) dan serat yang digunakan diperoleh setelah menguji kerapatan massa, kadar rongga dan berat jenis gabungan batu-serat. Proporsi bahan-bahan dalam campuran batu-serat ditampilkan dalam Tabel 3. Campuran batu-serat yang semula dirancang dengan kadar serat 1,5%, 3,0% dan 4,5%, secara aktual diperoleh masing-masing 1,3%, 2,0% dan 2,5%. Ini disebabkan serat menimbulkan efek pengembangan volume rongga dalam campuran batu-serat (Tabel 4). Sifat-sifat fisis adukan batu serat, yang perlu diperhatikan dalam merancang campuran batu-serat, ditampilkan secara rinci dalam Tabel 4.

Pembuatan spesimen beton

Pelaksanaan pembuatan spesimen beton dilakukan dalam 2 tahapan. Tahap pertama yaitu menyiapkan adukan batu-serat dan menempatkan batu serat ke dalam cetakan. Cetakan harus kedap air dan dipasang dengan kencang. Campuran batu-serat, dalam kondisi

kering udara, diisi ke dalam cetakan dan dipadatkan dengan batang baja penumbuk, sesuai dengan cara pemadatan untuk pembuatan spesimen beton normal.

Tahapan kedua yaitu membuat adukan *grout* mortar dan pelaksanaan infiltrasi *grout*. Alat pengaduk *grout* yang digunakan tersusun atas mesin bor listrik dan pengayuh (*paddle*) yang dapat dipasang ke mesin bor, menggantikan mata bor. Bahan-bahan diaduk dalam ember dengan urutan pemasukan bahan:

1. larutan air dan *superplasticizer*.
2. bahan sementisius.
3. pasir.

Campuran bahan-bahan ini diaduk hingga rata. *Grout* dituangkan ke atas permukaan batu-serat dalam cetakan perlahan-lahan, hingga *grout* berinfiltrasi dan mengisi semua bagian pori batu-serat dalam cetakan.

Beton dapat dibuka dari cetakan setelah mengeras (± 20 jam), lalu spesimen direndam air dalam bak pemeraman beton hingga umur 28 hari untuk diuji. Jumlah benda uji disajikan dalam Tabel 5.

Pengujian beton

Pengujian atas spesimen beton keras terdiri atas uji *UPV*, uji kerapatan, penyerapan dan rongga permeabel, uji modulus elastisitas, uji tekan aksial dan uji lentur balok 2 titik pembebanan. Beton diuji setelah diperam dengan perendaman air pada umur 28 hari.

Pengujian *UPV* dilakukan menurut prosedur ASTM C 597 (ASTM 2003). Alat yang digunakan adalah alat uji ultrasonik *portable* merek TICO® dari *Proceq*. Nilai frekuensi getaran yang dipancarkan oleh alat uji yang digunakan adalah 54 kHz. Benda uji *UPV* merupakan silinder beton yang sama dengan uji modulus elastisitas dan uji tekan dengan diameter 150 mm tinggi 300 mm.

Uji kerapatan, penyerapan dan rongga permeabel beton dilakukan sesuai prosedur SNI 03-6433 (BSN 2000). Spesimen uji diambil dari pengeboran inti patahan balok uji lentur. Diameter benda uji 100 mm tinggi 150 mm.

Uji modulus elastisitas tekan beton dilakukan menurut standar ASTM C 469. Regangan tekan diukur dengan

compressometer, yang terdiri atas dua buah LVDT dan dipasang secara diametral berlawanan pada benda uji silinder. Uji tekan beton mengikuti prosedur SNI 1974 (BSN 2011). Laju pembebanan tekan konstan 0,24 MPa/s.

Uji lentur beton dengan dua titik pembebanan mengikuti prosedur SNI 4431 (BSN 2011).

Pengujian dilakukan terhadap spesimen balok beton agregat praletak berukuran $150 \times 150 \times 600$ mm. Spesimen balok dibebani pada titik-titik sepertiga dari bentangan 450 mm. Beban diberikan pada laju pergerakan *stroke* konstan 0,07 mm/menit.

Tabel 1. Formula adukan *mortar grout* yang digunakan

No	Kode Grout	Air W [kg/m ³]	Semen C [kg/m ³]	Pasir S [kg/m ³]	Fly Ash F [kg/m ³]	Sp [kg/m ³]
1.	F40-15 WC36 SP0,6	372,6	743,0	712,9	297,2	6,24
2.	F20-10 WC40 SP0,5	355,7	741,1	926,3	148,2	4,45

Tabel 2. Sifat-sifat adukan *mortar grout*

No.	Kode Grout	$\frac{F}{C}$	$\frac{W}{C+F}$	$\frac{Sp}{C+F}$	$\frac{C}{S}$	Faktor Alir [detik]	Bliding Akhir [3 jam]	Kerapatan Massa [kg/m ³]	Kuat Tekan [MPa]
1.	F40-15 WC36 SP0,6	40%	0,36	0,6%	1,04	28,0	5,0%	2052	46,9
2.	F20-10 WC40 SP0,5	20%	0,40	0,5%	0,80	30,0	2,5%	2096	47,5

Tabel 3. Massa bahan penyusun adukan batu-serat per meter kubik

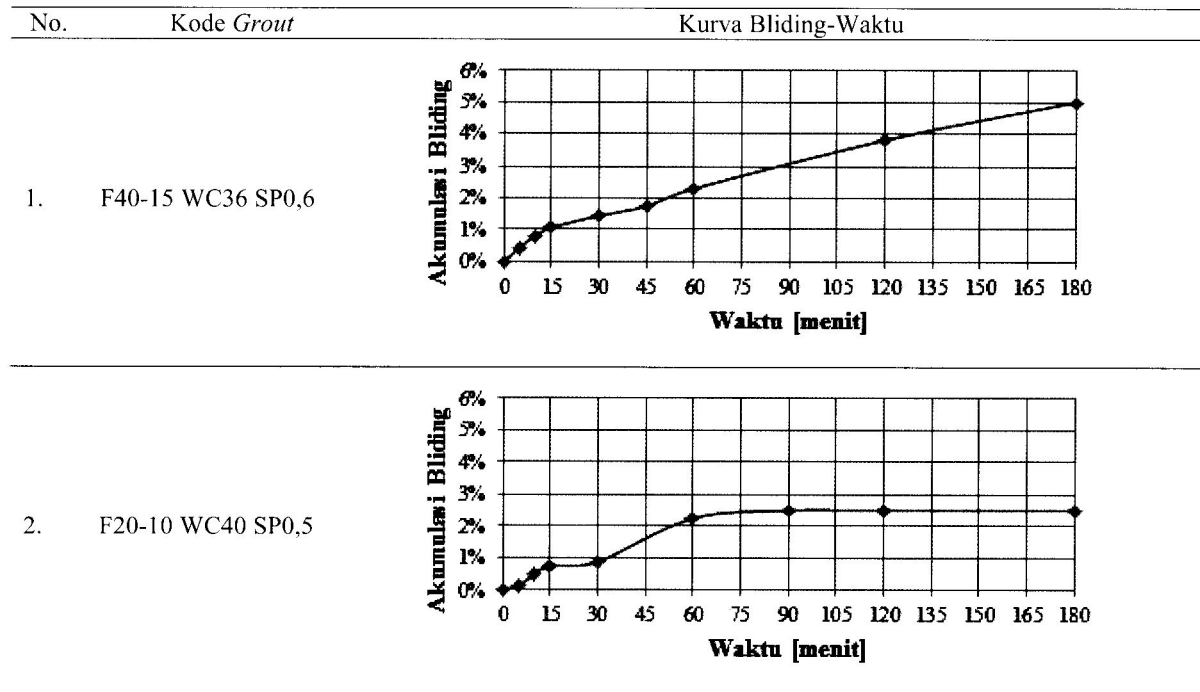
Kode Campuran	Massa Serat Baja [kg]	Massa Batu Pecah [kg]	Rasio Massa Serat/Batu
PAC 00	0	1569	0,0000
FPAC 15	102	1236	0,0822
FPAC 30	157	938	0,1670
FPAC 45	193	758	0,2544

Tabel 4. Parameter dan sifat fisis adukan batu-serat

Kode Campuran	Kadar Serat Volumetrik, V_f [%]	Rasio Aspek Serat l/ϕ	Indeks Perkuatan RI_v	Volume Rongga [%]	Kerapatan Massa [kg/m ³]	Berat Jenis Gabungan
PAC 00	0,0	80	0,0	42,0	1569	2,67
FPAC 15	1,3	80	1,0	53,1	1338	2,83
FPAC 30	2,0	80	1,6	63,5	1094	2,99
FPAC 45	2,5	80	2,0	69,8	951	3,15

Tabel 5. Variasi dan jumlah benda uji

Kode	Kadar Volume Serat Baja Rancangan	Jumlah Spesimen untuk Peruntukan Uji		
		Uji Kuat Tekan, Elastisitas dan UPV	Uji Lentur 2 Titik Beban	Kerapatan, Penyerapan, Pori Permeabel
PAC 00	0,0%	4	3	3
FPAC 15	1,5%	4	3	3
FPAC 30	3,0%	4	3	3
FPAC 45	4,5%	4	3	3
Jumlah		12	12	12



Gambar 1. Nilai *bleeding grout* terhadap waktu selama 3 jam pertama

HASIL DAN ANALISIS

Sifat fisis kerapatan, penyerapan, dan kadar rongga permeabel

Sifat-sifat fisis rata-rata untuk setiap variasi beton diberikan dalam Tabel 6. Nilai penyerapan beton agregat praletak bertambah seiring bertambahnya kadar serat dalam beton. Penambahan serat menyebabkan bertambahnya kebutuhan matriks *grout* dalam beton. Selanjutnya, ini meningkatkan volume pori permeabel beton yang tersekap di dalam *grout* karena proses pengadukan. Selain itu, peningkatan juga didorong oleh meningkatnya pori permeabel pada antar-muka matriks dan serat baja. Penyerapan rata-rata beton setelah direndam paling tinggi dicapai oleh seri FPAC 45 (kadar serat aktual 2,5%) sebesar 6,58%. Ini menandakan durabilitas beton yang baik, yakni di bawah nilai rekomendasi 10% (Neville 1995).

Kerapatan masa beton semakin berkurang dengan semakin bertambahnya kadar serat. Hal ini konsisten dengan hasil pengukuran kerapatan masa adukan batu-serat

dalam Tabel 4 yang juga memiliki kecenderungan serupa. Kerapatan masa kering beton agregat praletak berserat dan polos yang telah diuji berkisar antara 2,30–2,45 g/cm³, seluruhnya tergolong dalam rentang nilai beton bobot normal, yakni 2,20–2,50 g/cm³ (BSN 2012).

Dengan membandingkan hasil kadar rongga permeabel pada Tabel 6 dan nilai rekomendasi untuk spesimen silinder bor inti dari *Cement Concrete & Aggregates Australia* (2009), maka beton seluruh spesimen, kecuali FPAC 45, tergolong dalam kelas durabilitas sangat baik dengan nilai kurang dari 12%. Sedang spesimen FPAC 45 tergolong dalam kelas durabilitas baik hingga sedang dengan nilai rata-rata 16%.

Sifat mekanis beton

Sifat-sifat mekanis beton agregat praletak polos dan berserat rata-rata ditampilkan dalam Tabel 7. Sifat-sifat ini ternyata dipengaruhi oleh indeks kekuatan serat yang ditambahkan pada masing-masing variasi beton agregat praletak yang dibuat seperti ditampilkan dalam Tabel 4.

Pengaruh tersebut akan diuraikan lebih rinci dalam subpasal-subpasal berikut ini.

Cepat-rambat getaran ultrasonik (UPV)

Nilai *UPV* masing-masing variasi beton didaftar dalam baris 1 Tabel 7. Didapati bahwa nilai *UPV* semakin berkurang seiring dengan bertambahnya kadar serat. Nilai *UPV* beton agregat praletak polos (PAC 00) sebesar 4,71 km/s, menurun secara gradual pada beton agregat praletak berserat dengan indeks perkuatan 2,0 menjadi 4,32 km/s. Penurunan nilai *UPV* ini berkaitan erat dengan meningkatnya kadar volume *mortar grout*, yakni sama dengan kadar rongga adukan batu-serat (Tabel 4). *Mortar grout* mengandung sejumlah gelembung udara yang tersekap di dalamnya. Dengan meningkatnya volume *grout* dalam beton, meningkat pula gelembung udara yang tersekap dalam beton. Ini menyebabkan rambatan ultrasonik yang lebih lambat. Meski demikian, dengan nilai *UPV* antara 4,3 km/s sampai 4,7 km/s, berdasarkan penggolongan oleh Whitehurst (Carino 2008), maka beton tergolong baik ($3,66 \text{ km/s} < UPV \leq 4,57 \text{ km/s}$) hingga sangat baik ($UPV > 4,57 \text{ km/s}$). Ini

mengindikasikan bahwa *grout* dapat mengisi rongga-rongga antar batu-serat dengan baik.

Gambar 2 menampilkan plot nilai *UPV* dan modulus elastisitas dari hasil pengujian ini dan Bayer (2004). Selain itu diplot juga hubungan modulus elastisitas dan *UPV* dari British Standard (BS 1881-203 1986), dan dari Yildirim dan Sengul (2011). Dapat diamati bahwa Persamaan (2) dari Yildirim dan Sengul cocok dengan hasil penelitian ini dan dari Bayer.

$$E_c = 6 \cdot \exp(0,076 \cdot UPV^2) \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:

E_c = modulus elastisitas beton (Gpa)

UPV = cepat-rambat getaran ultrasonik (km/c)

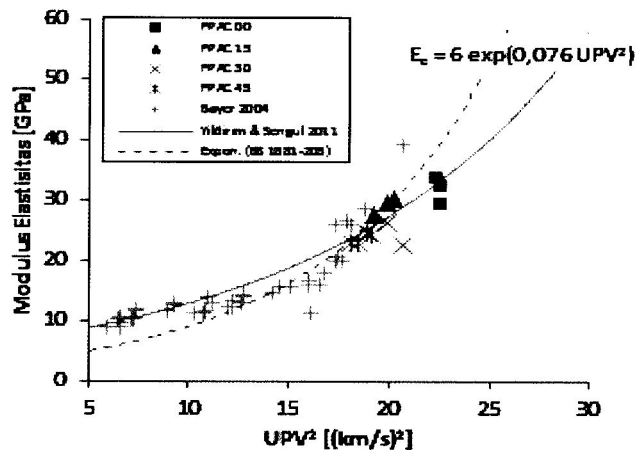
Dengan adanya rumus empiris ini kita dapat mengestimasi nilai modulus elastisitas beton agregat praletak maupun konvensional dengan pengujian non-destruktif pada struktur yang sudah dibangun (*existing*) sehingga dapat mengurangi biaya pengujian dalam, misalnya, penilaian kondisi struktur beton.

Tabel 6. Nilai rata-rata sifat fisis beton

Sifat Fisis	Kode Beton			
	PAC 00	FPAC 15	FPAC 30	FPAC 45
Penyerapan setelah direndam, [%]	3,51	4,35	4,28	6,58
Penyerapan setelah direndam dan dididihkan, [%]	3,62	4,50	4,55	6,94
Kerapatan massa kering [g/cm ³]	2,43	2,41	2,40	2,32
Kerapatan massa setelah direndam [g/cm ³]	2,52	2,52	2,51	2,47
Kerapatan massa setelah direndam dan dididihkan [g/cm ³]	2,52	2,52	2,51	2,48
Kerapatan massa semu [g/cm ³]	2,67	2,70	2,70	2,77
Kadar volume rongga permeabel [%]	8,80	10,84	10,94	16,10

Tabel 7. Sifat-sifat mekanis rata-rata beton

No.	Sifat Fisis	Kode Beton			
		PAC 00	FPAC 15	FPAC 30	FPAC 45
1.	Cepat-Rambat Getaran Ultrasonik [km/s]	4,71	4,45	4,54	4,32
2.	Modulus Elastisitas [MPa]	31.686	29.070	24.379	23.691
3.	Kuat Tekan [MPa]	21,93	29,31	36,28	46,93
4.	Tegangan Lentur Retak Pertama [MPa]	3,185	3,155	4,963	4,445
5.	Kuat Tarik-Lentur [MPa]	3,265	6,939	15,522	15,468



Gambar 2. Hubungan antara *UPV* dan modulus elastisitas statik beton

Modulus elastisitas beton

Modulus elastisitas varian beton agregat praletak ditampilkan pada baris 2 Tabel 7. Modulus elastisitas beton semakin berkurang dengan semakin bertambahnya kadar serat. Modulus elastisitas paling tinggi dicapai oleh beton agregat praletak polos PAC 00 dengan rata-rata 31.686 MPa, dan paling rendah adalah beton agregat praletak berserat FPAC 45 dengan rata-rata 23.691 MPa. Hasil ini sesuai harapan, karena adanya saling kontak titik-ke-titik antar butir agregat kasar dalam beton agregat praletak polos. Beban terdistribusi dalam beton melalui “kerangka” batu pecah. Sedang pada beton agregat praletak berserat, saling kontak antar agregat ini tidak dalam intensitas yang setara dengan beton agregat polos karena berkurangnya kadar batu pecah (Tabel 3) dan bertambahnya kadar volume *grout*, yang sama dengan kadar volume rongga dalam batu-serat (Tabel 4).

Hubungan indeks kekuatan serat dan modulus elastisitas beton diplot dalam Gambar 3. Sumbu horizontal mewakili indeks kekuatan volumetrik serat aktual dalam beton dan sumbu vertikal mewakili nilai rasio modulus elastisitas rata-rata masing-masing seri beton terhadap modulus elastisitas rata-rata beton dengan kadar serat nol. Hasil penelitian terhadap beton berserat konvensional dari sumber pustaka (Neves dan Fernandes de Almeida 2005, Thomas dan Ramaswamy 2007, Ou, *et al.*

2012) diplot bersama dalam Gambar 3 untuk perbandingan.

Dapat diamati, hasil penelitian di sini menemukan kecenderungan penurunan modulus elastisitas seiring penambahan indeks kekuatan serat dalam beton agregat praletak berserat. Fenomena ini cenderung berbeda dibanding beton serat konvensional dari hasil penelitian Thomas dan Ramaswamy (2007) dan dari Ou, *et al.* (2012). Tetapi hasil ini selaras dengan hasil penelitian beton konvensional yang lain dari Neves dan Fernandes de Almeida (2005). Penelitian lain yang menemukan bahwa kadar penambahan serat mengurangi modulus elastisitas yaitu dari Rossi dan Harrouche (1990), Nataraja, *et al.* (1999) dan Mansur, *et al.* (1999). Pengaruh volume serat terhadap modulus elastisitas tampaknya belum konsisten dalam beton berserat metode konvensional.

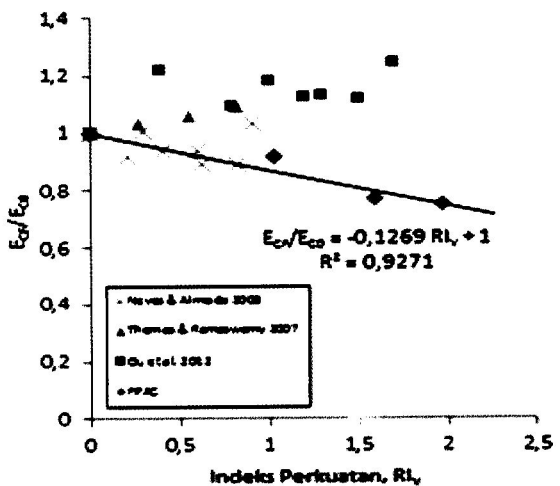
Modulus elastisitas beton agregat praletak berserat dapat diprediksi dengan rumus empiris hasil pengujian berikut ini:

$$E_{CF}/E_{C0} = 1 - 0,1269 \cdot RI_V \dots\dots\dots(3)$$

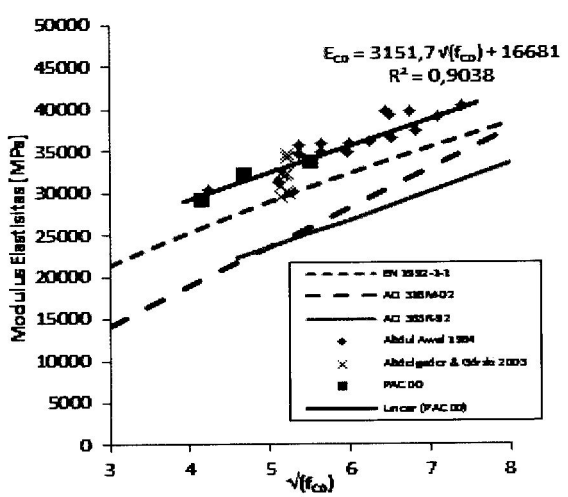
Keterangan:

- E_{CF} = modulus elastisitas beton agregat praletak berserat (MPa)
- E_{C0} = modulus elastisitas beton agregat praletak polos (MPa)
- RI_V = indeks kekuatan volumetrik serat dalam beton

Untuk menghitung modulus elastisitas beton agregat praletak berserat dengan persamaan (3) dibutuhkan dua variabel diketahui yaitu modulus elastisitas beton agregat praletak polos dan indeks perkuatan serat. Indeks perkuatan serat ditentukan dalam perancangan adukan beton. Sedang modulus elastisitas beton agregat praletak polos dapat ditentukan berdasarkan hubungan empiris terhadap kuat tekan beton agregat praletak polos.



Gambar 3. Hubungan indeks perkuatan dan modulus elastisitas beton



Gambar 4. Hubungan antara modulus elastisitas dan kuat tekan beton agregat praletak polos

Pada Gambar 4 ditampilkan plot hubungan antara modulus elastisitas dan akar kuadrat kuat tekan beton agregat praletak polos PAC 00. Gambar ini juga mengplot hasil-hasil penelitian sebelumnya (Awal 1984, Abdelgader dan Górski 2003) beserta kurva persamaan empiris dari peraturan beton untuk beton normal dari Amerika (ACI Committee 318 2002) dan Eropa BS EN 1992-1-1 2004 (BSI 2004) serta beton mutu tinggi (ACI Committee 363 1992). Terlihat beton agregat praletak polos memiliki modulus elastisitas yang cenderung lebih tinggi dibanding kurva prediksi untuk beton normal dan mutu tinggi. Rumus empiris yang menghubungkan kuat tekan dengan modulus elastisitas beton agregat praletak polos dinyatakan dalam persamaan (4).

$$E_{c0} = 3151,7\sqrt{f_{c0}} + 16681 \dots\dots\dots(4)$$

Untuk
 $16 \text{ MPa} < f_{c0} < 55 \text{ MPa}$

Keterangan:
 f_{c0} = kekuatan tekan beton agregat praletak polos (Mpa)
 E_{c0} = modulus elastisitas beton agregat praletak polos (Mpa)

Kuat tekan silinder beton

Kekuatan tekan beton ditampilkan dalam baris 3 dari Tabel 7. Kuat tekan beton semakin meningkat dengan semakin banyak serat yang dikandung dalam beton. Nilai kuat tekan beton agregat praletak polos (PAC 00) sebesar 21,9 MPa, meningkat secara gradual pada beton agregat praletak berserat dengan indeks perkuatan 2,0 menjadi 46,9 MPa. Plot hubungan antara indeks perkuatan serat dan kekuatan tekan beton agregat praletak berserat ternormalisasi terhadap beton agregat praletak polosnya ditunjukkan dalam Gambar 7. Hasil dari penelitian lain (Neves dan Fernandes de Almeida 2005, Thomas dan Ramaswamy 2007, Ou, et al. 2012, Wang 2006) pada beton berserat konvensional juga diplot untuk perbandingan. Sebagaimana terlihat, pengaruh penambahan serat pada kuat tekan beton

agregat praletak sangat signifikan dibanding kecenderungan pengaruhnya terhadap kuat tekan beton serat metode konvensional. Hubungan empiris antara kekuatan tekan dan indeks kekuatan volumetrik serat baja dalam beton agregat praletak dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$f_{CF}/f_{C0} = 1 + 0,5462 \cdot RI_V \dots\dots\dots(5)$$

Keterangan:

- f_{C0} = kekuatan tekan beton agregat praletak polos (Mpa)
- f_{CF} = kekuatan tekan beton agregat praletak dengan penambahan serat dengan indeks kekuatan RI_V (Mpa)
- RI_V = indeks kekuatan volumetrik serat dalam beton

Selain nilai kuat tekan, penambahan serat juga berpengaruh pada karakteristik tegangan-regangan tekan beton. Penambahan serat memberi sifat keuletan (*toughness*) kepada beton agregat praletak. Sifat ini juga dialami dalam beton berserat konvensional. Gambar 5 (a), (b), (c) dan (d) menunjukkan kurva tegangan-regangan tekan dari masing-masing untuk PAC 00, FPAC 15, FPAC 30 dan FPAC 45. Gambar 6 mengplot tegangan-regangan rata-rata yang dibuat dengan mengambil nilai rata-rata tegangan pada regangan yang sama dari kurva setiap spesimen yang diuji. Dapat diamati bahwa pada beton dengan kadar serat yang lebih tinggi, regangan tekan yang dapat dicapai jauh lebih besar dari beton agregat praletak polos. Kurva tegangan-regangan seolah mengalami transformasi dilatasi (pembesaran skala) oleh adanya peningkatan kadar serat dalam beton. Perilaku ini memiliki kemiripan dengan hasil uji tekan pasir berserat tersementasi (Consoli, Prietto and Ulbrich 1998, Park 2011).

Keuletan tekan beton berserat dapat dinilai berdasarkan parameter rasio keuletan, yang diusulkan oleh Ezeldin dan Balaguru (1992), yang didefinisikan sebagai perbandingan antara luas daerah di bawah kurva tegangan-regangan hingga regangan 0,015 dibagi hasil

kali kuat tekan dan regangan 0,015. Hasil kali tersebut merupakan luas persegi dengan tinggi sama dengan ordinat kuat tekan beton dan lebar sama dengan absis regangan 0,015.

Nilai rasio keuletan beton agregat praletak berserat ternormalisasi terhadap rasio keuletan beton agregat praletak polos rata-rata untuk masing-masing varian uji diplot terhadap indeks kekuatan serat dalam Gambar 9. Terlihat bahwa kenaikan rasio keuletan akibat penambahan serat pada beton metode praletak agregat menjadi lebih signifikan dibanding beton cara konvensional yang dilaporkan Ou, *et al.* (2012). Garis regresi rasio keuletan ternormalisasi terhadap indeks kekuatan untuk beton metode praletak agregat memiliki gradien yang lebih curam dibanding beton serat konvensional. Hubungan kadar serat dan rasio keuletan tekan ini dapat dinyatakan dalam rumus empiris hasil regresi berikut:

$$TR_{CF}/TR_{C0} = 1 + 1,8727 \cdot RI_V \dots\dots\dots(6)$$

Keterangan:

- TR_{CF} = rasio keuletan tekan beton agregat praletak dengan penambahan serat
- TR_{C0} = rasio keuletan tekan beton agregat praletak polos.

Kuat lentur balok

Kekuatan lentur ditampilkan dalam baris 5 Tabel 7. Hasil uji lentur berupa kurva beban terhadap lendutan balok, untuk masing-masing varian beton, diplot dalam Gambar 9. Kekuatan lentur beton mengalami peningkatan bersama dengan bertambahnya indeks kekuatan serat. Kuat lentur beton agregat praletak polos (PAC 00) dari 3,195 MPa, melonjak secara eksponensial hingga beton agregat praletak berserat dengan indeks kekuatan 2,0 menjadi 15,468 MPa. Rasio kuat lentur beton agregat praletak berserat terhadap beton agregat praletak polos diplot terhadap indeks kekuatan serat dalam Gambar 10. Hasil-hasil penelitian terdahulu (Yurtseven 2004, Wang 2006, Thomas and Ramaswamy 2007, Mohammadi, Singh dan Kaushik 2008) atas beton berserat konvensional diplot bersama untuk tujuan

perbandingan. Terlihat bahwa kecenderungan kenaikan rasio kuat lentur beton agregat praletak berserat terhadap beton agregat praletak polos dari metode konvensional maupun metode praletak menunjukkan keselarasan. Indeks kekuatan serat yang lebih tinggi yang dicapai pada penelitian ini menghasilkan kenaikan yang lebih tinggi pula. Kenaikan rasio kuat lentur mengikuti *trend* eksponensial dengan rumus empiris berikut:

$$f_{RF}/f_{R0} = \exp(0,8452 \cdot RI_V) \dots\dots\dots (7)$$

Keterangan:

- f_{RF} = kekuatan lentur beton agregat praletak berserat (Mpa)
- f_{R0} = kekuatan lentur beton agregat praletak polos (Mpa)

Dari kurva beban-lendutan dalam Gambar 9, dapat dihitung indeks-indeks keuletan lentur balok beton agregat praletak berserat sesuai prosedur yang diatur dalam ASTM C 1018 - 97. Indeks keuletan merupakan nilai yang didapat dengan membagi luas daerah di bawah kurva hingga lendutan yang ditetapkan terhadap luas daerah hingga lendutan retak pertama. Nilai-nilai 5,0, 10,0 dan 20,0 untuk masing-masing I_5 , I_{10} , dan I_{20} , seperti didefinisikan berikut ini, merujuk pada perilaku bahan yang elastik hingga retak pertama dan selanjutnya berperilaku plastik sempurna. Nilai indeks I_5 diperoleh dengan membagi luas daerah hingga lendutan 3,0 kali nilai lendutan retak pertama terhadap luasan hingga retak pertama. Nilai indeks I_{10} diperoleh dengan membagi luas daerah hingga lendutan 5,5 kali nilai lendutan retak pertama terhadap luasan

hingga retak pertama. Nilai indeks I_{20} diperoleh dengan membagi luas daerah hingga lendutan 10,5 kali nilai lendutan retak pertama terhadap luasan hingga retak pertama (ASTM 1998). Indeks-indeks ini bernilai sama dengan 1,0 untuk beton agregat praletak polos.

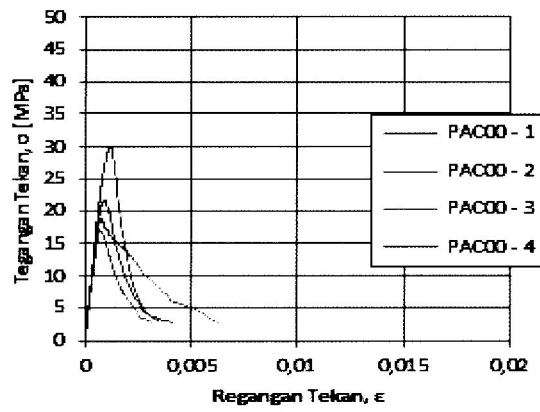
Indeks-indeks keuletan I_5 , I_{10} , dan I_{20} yang diperoleh untuk setiap varian beton agregat praletak yang diuji diplot masing-masing dalam Gambar 11, Gambar 12 dan Gambar 13. Dalam gambar-gambar tersebut juga diplot bersama hasil-hasil dari penelitian terdahulu (Johnston dan Skarendahl 1992, Wang 2006, Mohammadi, Singh and Kaushik 2008) terhadap beton berserat metode konvensional untuk perbandingan. Nilai indeks keuletan lentur yang dihasilkan dengan metode konvensional memiliki kecenderungan yang selaras dengan metode praletak. Seluruh spesimen beton agregat praletak berserat yang diperoleh menunjukkan sifat yang tergolong dalam kategori bahan elastik-plastik berdasarkan kriteria batasan dari ASTM C 1018 (ASTM 1998)

Kenaikan indeks keuletan linier proporsional terhadap indeks kekuatan serat yang ditambahkan. Rumus-rumus empiris berdasarkan regresi data penelitian ini, yang menyatakan hubungan indeks kekuatan serat terhadap indeks keuletan lentur beton, dinyatakan dalam Persamaan (8), (9) dan (10).

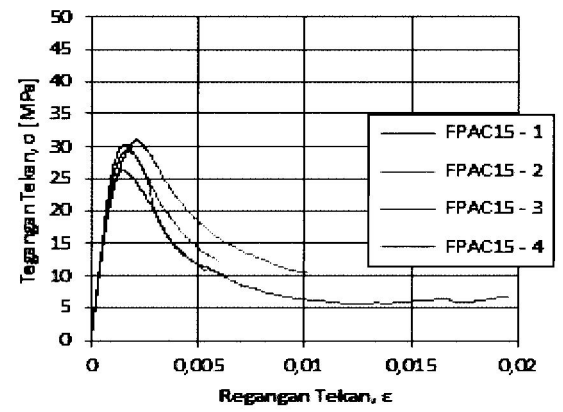
$$I_5 = 3,6886 \cdot RI_V + 1 \dots\dots\dots (8)$$

$$I_{10} = 11,1730 \cdot RI_V + 1 \dots\dots\dots (9)$$

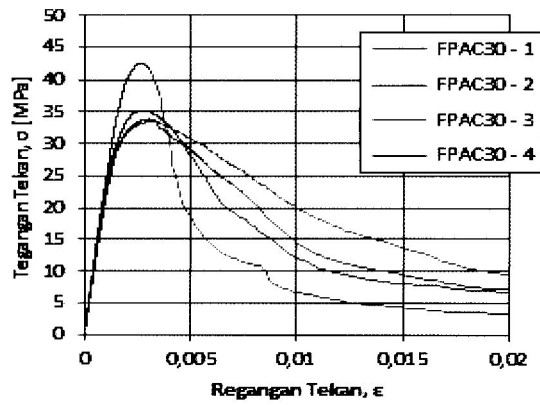
$$I_{20} = 24,449 \cdot RI_V + 1 \dots\dots\dots (10)$$



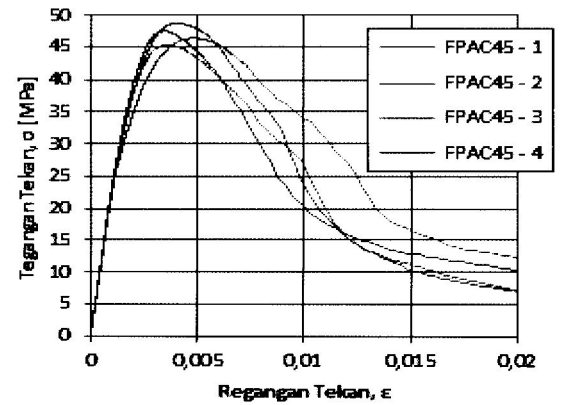
(a)



(b)

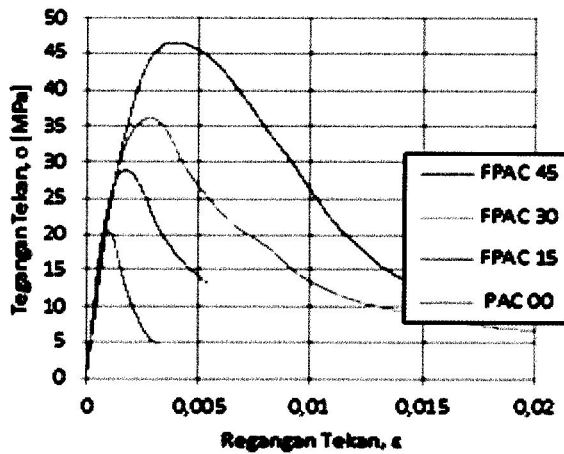


(c)

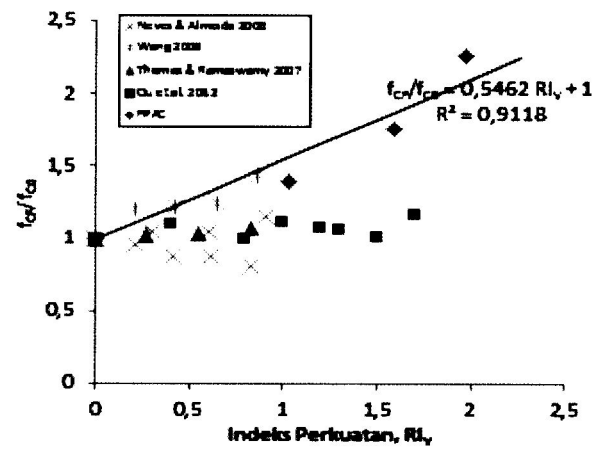


(d)

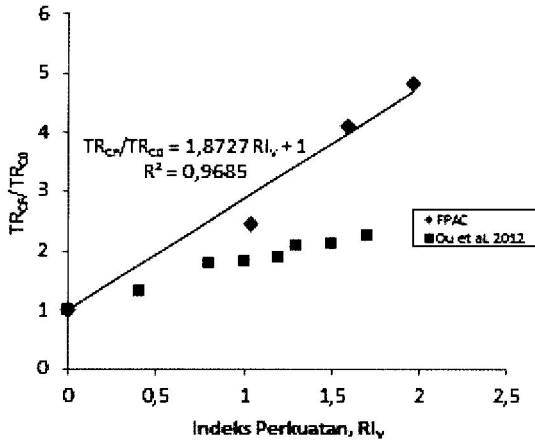
Gambar 5. Kurva tegangan-regangan spesimen beton agregat praletak



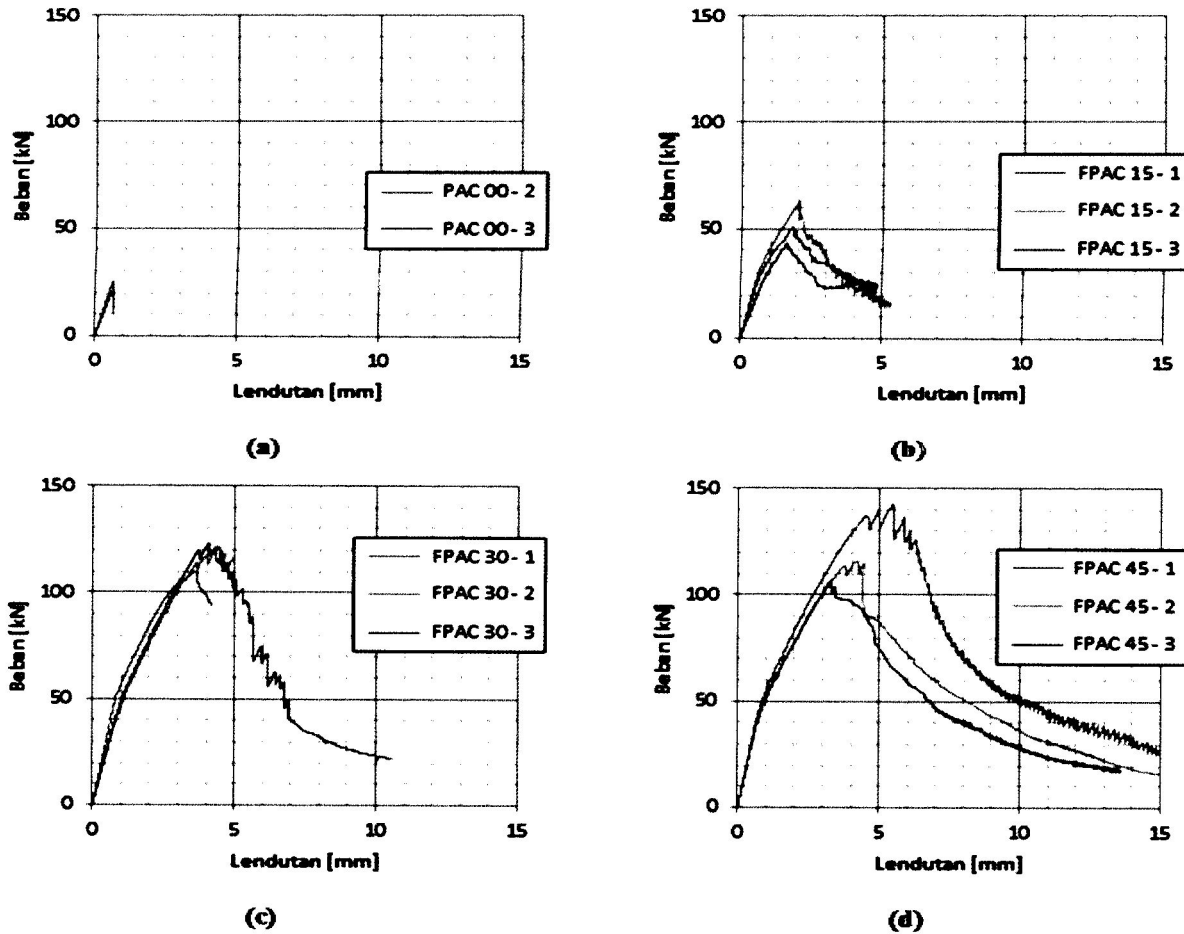
Gambar 6. Kurva tegangan-regangan rata-rata



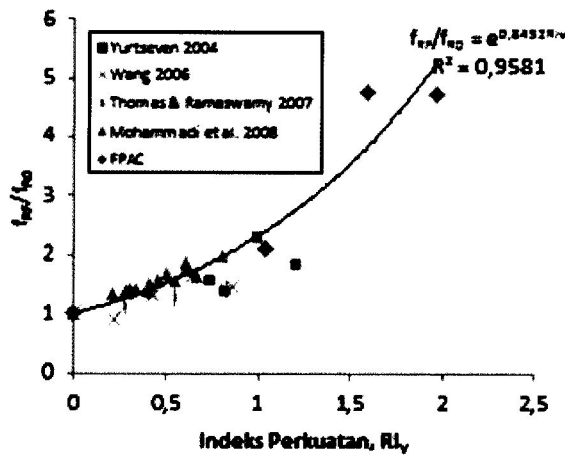
Gambar 7. Hubungan indeks perkuatan serat dan rasio kuat tekan beton



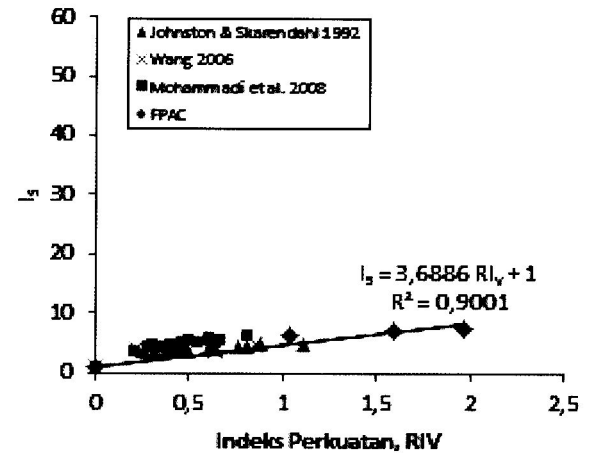
Gambar 8. Hubungan indeks perkuatan serat dan rasio keuletan tekan beton



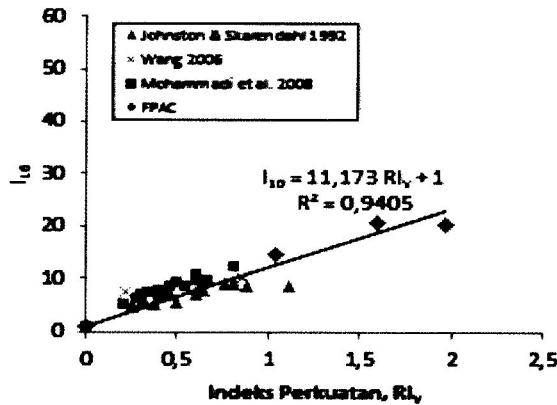
Gambar 9. Kurva beban-lendutan balok beton agregat praletak polos dan berserat



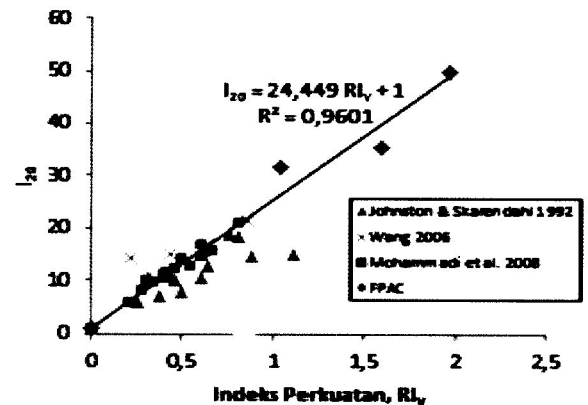
Gambar 10. Hubungan indeks perkuatan serat dan rasio kuat lentur beton



Gambar 11. Hubungan Indeks Perkuatan Serat dan Indeks Keuletan I_5



Gambar 12. Hubungan indeks perkuatan serat dan indeks keuletan I_{10}



Gambar 13. Hubungan indeks perkuatan serat dan indeks keuletan I_{20}

PEMBAHASAN

Dari segi penyerapan maupun volume rongga permeabel beton agregat praletak berserat FPAC 15 dan FPAC 30 terindikasi handal dan potensial untuk diterapkan pada struktur yang terpapar kondisi lingkungan agresif. Sedang untuk FPAC 45 akan memerlukan tambahan perlindungan pada permukaan bila hendak diterapkan pada struktur di lingkungan agresif.

Sifat-sifat beton agregat praletak berserat menunjukkan bahwa beton ini memiliki potensi untuk dapat diterapkan pada elemen-elemen struktur beton yang memerlukan fleksibilitas dan daktilitas yang tinggi misalnya pada konstruksi yang banyak menerima beban benturan (*impact*) seperti perkerasan jalan, lantai jembatan, pilar jembatan pada sungai dengan ancaman debris pada saat banjir, bunker dan sebagainya. Untuk itu akan dibutuhkan penelitian dan pengembangan lebih lanjut.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Dari uraian diatas dapat diperoleh beberapa kesimpulan, yaitu sebagai berikut:

1. Pembuatan beton berserat baja dengan metode praletak agregat-serat dapat menghasilkan beton dengan indeks kekuatan serat mencapai 2,0. Nilai ini melampaui capaian beton serat normal dengan metode konvensional yakni 1,70 yang dilaporkan dalam Ou, *et al.*(2012). Masalah *balling* pada pembuatan beton berserat metode konvensional dengan indeks kekuatan tinggi dapat diatasi dengan metode pembeconan praletak adukan agregat kasar dan serat baja.
2. Proporsi *mortar grout* yang memberikan kinerja memuaskan untuk beton agregat praletak berserat adalah sebagai berikut: air 355,7 kg/m³; semen PPC 741,1 kg/m³; pasir berbutir kurang dari 1,18 mm 926,3 kg/m³; *fly ash* 148,2 kg/m³; dan *superplasticizer* jenis *polycarboxylate* 4,45 g/m³.
3. *Grout* segar dengan komposisi tersebut memberikan nilai faktor alir 30 detik dan volume *bleeding* 2,5%. *Bleeding grout* berhenti pada selang waktu 75 menit. Beton agregat praletak yang dihasilkan padat tanpa adanya bagian yang keropos (*honeycombing*).
4. Beton agregat praletak berserat yang dihasilkan memiliki bobot normal dengan tingkat kekedapan yang memadai untuk level durabilitas baik hingga sangat baik.
5. Peningkatan indeks kekuatan serat dalam beton agregat praletak menyebabkan perubahan-perubahan karakteristik dari beton agregat praletak polos ke beton agregat praletak dengan indeks kekuatan serat 2,0 masing-masing sebagai berikut:
 - a. cepat-rambat getaran ultrasonik (*UPV*) menurun dari nilai 4,7 km/s menjadi 4,3 km/s.
 - b. modulus elastisitas menurun secara linier dari 31686 MPa menjadi 23691 MPa;
 - c. kuat tekan beton meningkat secara linier dari 21,9 MPa menjadi 46,9 MPa.

- d. rasio keuletan tekan (*compressive toughness ratio*) beton meningkat secara linier sebanyak 2 kali lipat.
- e. kuat lentur beton bertambah secara eksponensial dari 3,27 MPa menjadi 15,47 Mpa.
- f. indeks-indeks keuletan lentur (*flexural toughness indices*) beton bertambah secara linier.

Saran

Beberapa saran yang dapat diberikan untuk kajian selanjutnya adalah:

1. Pengembangan *grout* dengan mutu yang lebih baik.
2. Kajian teknik pengadukan, pemadatan dan penempatan batu-serat untuk pembeconan.
3. Pengukuran sifat-sifat geoteknis adukan agregat-serat dan korelasinya terhadap sifat-sifat beton agregat-serat praletak.
4. Pengembangan model perilaku mekanis beton agregat-serat praletak.
5. Kajian penerapan beton agregat-serat praletak sebagai elemen struktural dan beton massa.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih Kepada:

1. Balai Jembatan dan Bangunan Pelengkap Jalan, Puslitbang Jalan dan Jembatan, Balitbang, Kementerian Pekerjaan Umum atas fasilitas laboratorium.
2. Dr.-Ing. Ir. Andreas Triwiyono, Lektor Kepala Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, atas ulasan dan saran-saran dalam penulisan ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdelgader, Hakim S., dan Jaroslaw Górski. 2003. "Stress-Strain Relations and Modulus of Elasticity of Two-Stage Concrete." *Journal of Materials in Civil Engineering*. 15(4), August: 329-334.
- ACI Committee 304. 1997. *Guide for the Use of Preplaced Aggregate Concrete for Structural*

- and Mass Concrete Applications. (ACI 304.1R-92) (Reapproved 1997). Detroit: American Concrete Institute.
- ACI Committee 318. 2002. *Building Code Requirements for Structural Concrete*. ACI 318M-02 and Commentary (ACI 318RM-02). Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- ACI Committee 363. 1992. *State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete*. ACI 363R-92 (Reapproved 1997). Farmington Hills : American Concrete Institute.
- ACI Committee 544. 1988. *Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete*. ACI 544.4R-88 (Reapproved 1999). Farmington Hills: American Concrete Institute.
- American Society for Testing and Materials . 1998. Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading). ASTM Standard C1018-97. West Conshohocken: ASTM International.
- _____. 2003. *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. ASTM C 597 - 02. 2003. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Awal, A. S. M. Abdul. 1984. *Manufacture and Properties of Prepacked Aggregate Concrete*. Master Thesis, University of Melbourne.
- Badan Standardisasi Nasional. 2000. *Metode Pengujian Kerapatan, Penyerapan dan Rongga dalam Beton yang Telah Mengeras*. SNI 03-6433. Jakarta: BSN.
- _____. 2000. *Metode Pengujian Ekspansi dan Bleeding Campuran Grout Segar untuk Beton dengan Agregat Praletak di Laboratorium*. SNI 03-6430.3. Jakarta: BSN.
- _____. 2002. *Metode Pengujian Kekentalan Grout untuk Beton Agregat Praletak (Metode Pengujian Corong Alir)*. SNI 03-6808. Jakarta: BSN.
- _____. 2011. *Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder*. SNI 1974. Jakarta: BSN
- _____. 2011. 2011. *Cara Uji Kuat Lentur Beton Normal dengan Dua Titik Pembebanan*. SNI 4431. Jakarta: BSN.
- _____. 2012. *Tata Cara Pemilihan Campuran untuk Beton Normal, Beton Berat dan Beton Massa*. SNI 7656. Jakarta: BSN.
- Bayer, I. Raci. 2004. *Use of Preplaced Aggregate Concrete for Mass Concrete Applications*. M. Sc. Thesis., Middle East Technical University.
- British Standard Institution. 1986. *Testing Concrete - Part 203: Recommendations for Measurement of Velocity of Ultrasonic Pulses in Concrete*. BS 1881-203. London: BSI.
- _____. 2004. *Eurocode 2: Design of Concrete Structures -- Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. BS EN 1992-1-1. London: British Standards Institution.
- Carino, Nicholas J. 2008. "Nondestructive Test Methods." Bab 21 dalam *Concrete Construction Engineering Handbook*, disunting oleh Edward G. Nawy. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Cement Concrete & Aggregates Australia. 2009. *Chloride Resistance of Concrete*. Sidney: CCAA.
- Consoli, Nilo C., Pedro D. M. Prietto, and Luciane A. Ulbrich. 1998. "Influence of Fiber and Cement Addition on Behavior of Sandy Soil." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 124 (12): 1211-1214.
- Ezeldin, Samer, and Perumalsamy N. Balaguru. 1992. "Normal- and High-Strength Fiber-Reinforced Concrete under Compression." *Journal of Materials in Civil Engineering* 4 (4): 415-429.
- Homrich, Joseph R., dan Antoine E. Naaman. 1988. *Stress-Strain Properties of SIFCON in Uniaxial Compression and Tension*. University of Michigan, Kirtland, New Mexico: Air Force Weapons Laboratory, 134.
- Johnston, C. D., and Å Skarendahl. 1992. "Comparative Flexural Performance Evaluation of Steel Fibre-Reinforced Concretes According to ASTM C 1018 Shows Importance of Fibre Parameters." *Materials and Structures*. 25(4): 191-200.
- Karki, Netra Bahadur. 2011. *Flexural Behavior of Steel Fiber Reinforced Prestressed Concrete Beams and Double Punch Test for Fiber Reinforced Concrete*. Ph.D. Diss., University of Texas.
- Mansur, M. A., M. S. Chin, dan T. H. Wee. 1999. "Stress-Strain Relationship of High-Strength Fiber Concrete in Compression." *Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)* 11, no. 1: 21-29.
- Marrs, David Leonard. 1998. *The Development of SIFCON for Use in Structural Applications*. Ph.D Diss., University of Paisley.

- Mohammadi, Y., S. P. Singh, and S. K. Kaushik. 2008. "Properties of Steel Fibrous Concrete Containing Mixed Fibres in Fresh and Hardened State." *Construction and Building Materials*. 22 (5): 956-965.
- Mondragon, Ray. 1998. *SIFCON with Sand*. New Mexico: New Mexico Engineering Research Institute.
- Nataraja, M. C., N. Dhang, dan A. P. Gupta. 1999. "Stress-Strain Curves for Steel-Fiber Reinforced Concrete under Compression." *Cement & Concrete Composites* (Elsevier Science Ltd.) 21, no. 5-6: 383-390.
- Neves, R. D., dan J. C. O. Fernandes de Almeida. 2005. "Compressive Behaviour of Steel Fibre Reinforced Concrete." *Structural Concrete*. 6 (1), March: 1-8.
- Neville, A. M. 1995. *Properties of Concrete*. 4th ed.. Essex: Pearson Education Ltd.
- Ou, Yu-Chen, et al. 2012. "Compressive Behavior of Steel-Fiber-Reinforced Concrete with a High Reinforcing Index." *Journal of Materials in Civil Engineering*. 24 (2): 207-215.
- Park, Sung-Sik. 2011. "Unconfined Compressive Strength and Ductility of Fiber-Reinforced Cemented Sand." *Construction and Building Materials*. 25 (2): 1134-1138.
- Rossi, P., dan N. Harrouche. 1990. "Mix Design and Mechanical Behaviour of some Steel-Fibre-Reinforced Concretes used in Reinforced Concrete Structures." *Materials and Structures* (RILEM) 23, no. 4: 256-266.
- Schneider, et al. 1988. *ISST Structure with SIFCON - HFC-2 Test*. New Mexico: New Mexico Engineering Research Institute.
- Swamy, R. N., dan P. S. Mangat. 1974. "Influence of Fibre-Aggregate Interaction on Some Properties of Steel Fibre Reinforced Concrete." *Matériaux et Construction* (RILEM) 7, no. 5: 307-314.
- Thomas, Job, and Ananth Ramaswamy. 2007. "Mechanical Properties of Steel Fiber-Reinforced Concrete." *Journal of Materials in Civil Engineering*. 19 (5): 385-392.
- Wang, Chuanbo. 2006. *Experimental Investigation on Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC)*. M.Sc. Thesis, University of Canterbury.
- Yildirim, Hasan, dan Ozkan Sengul. 2011. "Modulus of Elasticity of Substandard and Normal Concretes." *Construction and Building Materials*. 25 (4): 1645-1652.
- Yurtseven, Alp Eren. 2004. *Determination of Mechanical Properties of Hybrid Fiber Reinforced Concrete*. M.Sc Thesis, Middle East Technical University.