

STUDI EKSPERIMENTAL KARAKTERISTIK BETON DENGAN AGREGAT KASAR DAUR ULANG DENGAN $f_c' = 25$ MPa

Buen Sian¹, Johannes Adhijoso Tjondro², Riani Sidauruk³

¹ Dosen Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan
E-mail: songbunsian@gmail.com

² Dosen Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan
E-mail: tjondro@unpar.ac.id

³ Alumnus Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan

ABSTRAK

Pada studi eksperimental ini, digunakan beton daur ulang dengan agregat kasarnya berasal dari limbah/brangkal benda uji beton di laboratorium. Benda uji silinder digunakan untuk mengetahui sifat mekanik seperti kuat tekan, kuat geser, dan kuat tarik belah. Tiga variasi persentase yang berbeda dari agregat kasar daur ulang digunakan dalam perencanaan campuran dengan $f_c' = 25$ MPa, yaitu 0%, 50%, dan 100% agregat kasar daur ulang. Hasil pengujian menunjukkan nilai kuat tekan karakteristik $f_c' = 28.7$ MPa dan $f_c' = 28.4$ MPa untuk masing-masing campuran 50% dan 100% agregat kasar daur ulang. Nilai kuat tarik belah sebesar $f_{ct} = 2.38$ MPa, $f_{ct} = 2.78$ MPa, dan $f_{ct} = 2.81$ MPa untuk 0%, 50%, dan 100% agregat kasar daur ulang. Sedangkan kuat geser $f_v = 5,55$ MPa, $f_v = 4.28$ MPa, dan $f_v = 3.86$ MPa untuk 0%, 50%, dan 100% agregat kasar daur ulang.

Kata kunci: agregat kasar daur ulang, kuat tekan, kuat tarik belah, kuat geser.

ABSTRACT

In this experimental study, recycled concrete made of waste material from laboratory experiment is used for coarse aggregates. Cylinder specimens were used to determine the mechanical properties such as compressive strength, shear strength, and split tensile strength. Three different percentage variations of coarse recycled concrete aggregates (RCA) were used in mix design with $f_c' = 25$ MPa, which are 0%, 50%, and 100% of RCA. The test results showed the characteristics of compressive strength values are: $f_c' = 28.7$ MPa and $f_c' = 28.4$ MPa for each of the mixtures of 50% and 100% RCA. The split tensile strength values are: $f_{ct} = 2.38$ MPa, $f_{ct} = 2.78$ MPa, and $f_{ct} = 2.81$ MPa for 0%, 50% and 100% RCA. While the shear strength are: $f_v = 5,55$ MPa, $f_v = 4,28$ MPa, and $f_v = 3.86$ MPa for 0%, 50%, and 100% RCA.

Keywords: recycled coarse aggregates, compressive strength, split tensile strength, shear strength.

1. PENDAHULUAN

Industri konstruksi mengalami perkembangan yang sangat cepat dalam memenuhi kebutuhan manusia akan tempat tinggal, sarana, dan prasarana. Namun industri konstruksi berkontribusi menghasilkan sampah atau reruntuhan yang berdampak pada lingkungan. Jumlah sampah konstruksi ini demikian besar sehingga menjadi perhatian dunia untuk menjaga sumber alam yang ada dan mencari alternatif menggunakan material daur ulang, misalnya beton dengan agregat daur ulang.

Kota tertentu kadang mempunyai program modernisasi untuk jalan, jembatan, bangunan industri, dan prasarana lainnya, sehingga perlu meruntuhkan bangunan yang

ada karena dianggap tidak cocok dengan proyek baru. Terutama di negara maju reruntuhan beton berasal dari beton dengan mutu cukup tinggi seperti rangka bangunan, balok jembatan, dan beton pracetak, sehingga menghasilkan sumber agregat daur ulang dengan kualitas yang berbeda.

Beberapa pengujian beton yang menggunakan agregat daur ulang sudah dilakukan sejak awal 1980. Meskipun ada perbedaan formula yang cukup berarti namun kesimpulan dari pengujian beton daur ulang yang sudah dilakukan perlu dipertimbangkan. Sifat beton dengan agregat daur ulang jika dibandingkan dengan beton yang menggunakan agregat natural misalnya, kuat tekan akan menurun sebesar 10% - 30% dan kuat tarik lebih rendah tetapi tidak lebih dari 10%. (El-Reedy, 2009). Agregat daur ulang dapat digunakan sebagai pengganti agregat natural untuk campuran beton setelah dipilih dan disaring (Hansen, 1992; Collin, 1994; Sherwood, 1995). Kuat tekan karakteristik beton tidak dipengaruhi oleh kualitas agregat daur ulang jika rasio air/ semen besar, hanya berpengaruh pada rasio air/semen kecil (Ryu, 2002 dan Padmini et al., 2002).

Material daur ulang termasuk beton daur ulang digunakan untuk pembangunan kompleks, gedung baru, dan jalan pada Olimpiade 2012. Inggris menegaskan bahwa Olimpiade London adalah Olimpiade yang paling berkelanjutan. Pembangunan berkelanjutan adalah proses pembangunan lahan, kota, bisnis, dan masyarakat dengan prinsip, memenuhi kebutuhan sekarang tanpa mengorbankan kepentingan generasi masa depan. Belajar dari pengalaman olimpiade sebelumnya dimana stadion berkapasitas besar dan fasilitas lain tidak bisa digunakan maksimal lagi setelah pesta olimpiade berakhir.

Agregat kasar daur ulang yang dipakai dalam penelitian ini, berupa bekas benda uji silinder beton yang dipecah-pecah kemudian disaring sesuai dengan ukuran agregat maksimum yang dibutuhkan. Mutu Beton yang dipakai untuk perencanaan campuran beton adalah kuat tekan karakteristik (f_c') 25 MPa. Perencanaan campuran beton (*mix design*) terdiri dari 3 variasi. Campuran 1 menggunakan agregat natural semua, campuran 2 menggunakan 50% agregat kasar daur ulang dan agregat halus natural. Sedangkan campuran 3 menggunakan 100% agregat kasar daur ulang dan agregat halus natural. Masing-masing variasi campuran diuji kuat tekan dan kuat tarik belah dengan benda uji silinder pada umur beton 3, 7, 14, 21, dan 28 hari. Benda uji silinder berjumlah 81 buah dengan masing-masing 27 buah untuk setiap variasi campuran. Uji kuat geser menggunakan 9 balok berukuran 100 x 100 x 300 mm³ dengan masing-masing 3 buah balok untuk setiap variasi campuran.

Tujuan dari penelitian ini untuk (1) Mengetahui kuat tekan karakteristik beton daur ulang dengan merencanakan campuran beton dengan cara *ACI*. (2) Mengetahui perkembangan kuat tekan terhadap umur beton. (3) Mengetahui kuat tarik belah dan kuat geser beton daur ulang.

2. BETON SEBAGAI BAHAN BANGUNAN

Beton adalah bahan bangunan yang paling banyak digunakan pada dunia modern ini. Bangunan dari beton diantaranya gedung, jalan raya, jembatan, jalan kereta api, bendungan, pipa saluran, fondasi, dan lain-lain. Beton adalah bahan komposit yang cukup rumit, terdiri dari agregat berfungsi sebagai bahan pengisi (*filler*) dan pasta semen berfungsi sebagai bahan pengikat (*binder*). Sering ditambahkan bahan kimia (*admixture*) untuk memperbaiki atau mengubah sifat-sifatnya sesuai dengan yang kita inginkan.

Meskipun beton dapat dibuat dengan mudah tetapi dalam merencanakan campuran beton perlu pengetahuan teknologi beton yang cukup untuk menghasilkan beton baik. Pada umumnya beton mempunyai komposisi pasta semen hanya sebesar 20 – 35% terhadap volume total beton tapi sangat memegang peranan penting terutama untuk perbandingan berat antara air/semen. Semakin besar rasio berat air/semen maka semakin berkurang kekuatan beton sedang agregat mengisi volume beton sebesar 65 – 80% . Semen yang digunakan untuk beton mempunyai banyak tipe dan jenisnya dengan komposisi kimiawi yang berbeda. Sedangkan agregat mempunyai ukuran, bentuk, gradasi, kekerasan, berat jenis yang berbeda. Sehingga dalam merencanakan campuran beton perlu diperhatikan sifat-sifat bahan dasar tersebut karena bisa mempengaruhi kekuatan beton. Selain pengendalian mutu bahan, diperlukan juga pengendalian selama pelaksanaan dan pengendalian perawatan selama masa pengerasan supaya menghasilkan beton berkualitas baik sesuai yang disyaratkan, seragam, dan ekonomis. Beton mempunyai kuat tekan jauh lebih besar dibandingkan kuat tariknya. Sehingga selalu diperlukan perkuatan tulangan baja pada daerah tariknya menjadi beton bertulang untuk struktur bangunan.

3. BETON DAUR ULANG

Beton daur ulang sudah dikenal cukup lama dalam rangka menjawab tantangan akan banyaknya limbah industri konstruksi dan menjaga sumber daya alam. Di beberapa negara, agregat alami harganya mahal dan limbah industri harus dikirim ke tempat TPA yang membutuhkan biaya penanganan dan pengangkutannya. Beberapa pengujian beton

yang menggunakan agregat daur ulang sudah dilakukan sejak awal 1980. Kesimpulan dari pengujian beton daur ulang yang sudah dilakukan perlu dipertimbangkan. Sifat beton dengan agregat daur ulang jika dibandingkan dengan beton yang menggunakan agregat alami antara lain: (a). Kuat tekan menurun sebesar 10% - 30%. (b). Kuat tarik lebih rendah tidak lebih dari 10%. (c). Modulus elastisitas menurun sebesar 10% - 40 % tergantung dari sumber agregat kasarnya. (d). Susut lebih besar 20% - 55% sedangkan *creep* lebih kecil hingga 10% (El-Reedy, 2009).

CMRA (*Construction Materials Recycling association*) adalah salah satu asosiasi yang mempromosikan limbah konstruksi daur ulang. Amerika sendiri sudah melakukan daur ulang beton sebesar 140 juta ton tiap tahunnya dengan memanfaatkan reruntuhan struktur atau jalan raya. *California Department of General Services* 2011 mengeluarkan peraturan yang cukup ketat dan batasan tentang beton daur ulang berhubung banyaknya limbah beton yang ada. Diantara peraturan dan pembatasan itu menyatakan agregat beton daur ulang atau *Recycled Concrete Aggregates* (RCA) adalah agregat yang terbentuk dari proses pemecahan, pengukuran, pencucian, dan pemilihan dari beton keras yang ada. RCA tidak diijinkan untuk digunakan pada beton struktur tapi dapat diaplikasikan pada beton non struktural seperti batas jalan, *pavement*, *landscape*, dan sejenisnya.

Pusat Komunikasi Publik Kementerian PU baru-baru ini melaporkan bahwa kebutuhan penambahan infrastruktur jalan, khususnya pembangunan dan pemeliharaannya tidak bisa diimbangi oleh kemampuan pemerintah. Saat ini pemerintah hanya mampu mendanai 17% saja. Terkait dengan keterbatasan dana maka diperlukan inovasi baru untuk merehabilitasi jalan. Salah satu alternatifnya adalah menggunakan beton dengan agregat daur ulang. Teknologi daur ulang perkerasan mempunyai beberapa keuntungan yaitu dapat mengembalikan kekuatan perkerasan dan mempertahankan geometrik jalan serta mengatasi ketergantungan akan material baru. Inovasi ini telah dikembangkan oleh Pusat Litbang Jalan dan Jembatan Badan Litbang PU. Saat ini telah banyak ruas jalan yang dibangun dengan perkerasan kaku (*rigid pavement*) berupa perkerasan beton sehingga penggunaan daur ulang limbah beton akan bermanfaat.

4. PERENCANAAN CAMPURAN BETON

Perencanaan campuran (*mix desain*) mempunyai tujuan untuk mendapatkan proporsi masing-masing bahan untuk menghasilkan beton berkualitas baik dan ekonomis. Bahan tersebut biasanya adalah air, semen, pasir, dan batu pecah untuk beton normal tanpa bahan tambahan. Sebelum perencanaan campuran perlu diketahui beberapa hal penting misalnya jenis struktur, kondisi lingkungan, kuat rencana, jenis semen, kualitas

air, sifat agregat, dan lain lain. Sifat agregat meliputi gradasi, kadar air, daya serap, berat jenis relatif, ukuran butir terbesar. Proporsi campuran dapat dihitung dengan metode tertentu seperti: (1). ACI (*American Concrete Institute*) (2). DOE (*British Department of Enviroment*) (3). Nisco Master (Jepang). Perencanaan dengan metode DOE dipakai di Indonesia dan dimuat dalam buku ‘Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton’ SK.SNI.T-15-1990-03. Hasil proporsi bahan campuran dengan berbagai metode biasanya berdasarkan agregat dalam kondisi SSD, sehingga perlu dikoreksi lagi mengingat kondisi agregat di lapangan sudah dipastikan tidak dalam kondisi SSD. Berdasarkan hasil *mix design* maka dapat dihitung proporsi masing-masing campuran sesuai dengan jumlah benda uji yang diperlukan.

Dalam penelitian ini, perencanaan campuran beton menggunakan metode ACI 211.1 – 91 untuk beton normal dengan kuat tekan karakteristik sebesar 25 MPa. Perencanaan campuran beton (*mix design*) terdiri dari 3 variasi. Campuran 1 menggunakan agregat natural semua, campuran 2 menggunakan 50% agregat kasar daur ulang dan agregat halus natural. Sedangkan campuran 3 menggunakan 100% agregat kasar daur ulang dan agregat halus natural.

5. PENGUJIAN BETON

5.1 Kuat Tekan Beton

Pada peraturan beton Indonesia yang baru (SNI 03-2847-2002), kekuatan material beton dinyatakan oleh kuat tekan benda uji berbentuk silinder (f_c') dengan satuan Mpa. Perubahan dari K menjadi f_c' atau dari benda uji kubus menjadi silinder, disebabkan karena SNI mengacu pada peraturan ACI 318. Benda uji silinder yang dimaksud memiliki diameter 15 cm, tinggi 30 cm, dan berumur 28 hari.

Benda uji dibuat terutama untuk mengevaluasi apakah campuran beton mencapai kuat rencana. Beton segar yang telah dicetak, perlu perawatan selama 24 jam pertama baru acuan bisa dilepas dan biasanya direndam dalam air. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur beton hari ke 3, 7, 14, 21, dan 28 dengan menggunakan standar ASTM C 39 (*American Sosity for Testing Material*). Pengujian kuat tekan penting juga untuk memperkirakan kuat yang lain seperti kuat lentur dan kuat tarik beton. Perhitungan kuat tekan beton menggunakan persamaan:

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

dengan:

f_c	= Kuat tekan beton (MPa)
P	= Beban hancur (N)
A	= Luas penampang tertekan rata-rata (mm^2)

Perencana struktur biasanya menentukan kuat tekan beton dalam mendesain kekuatan elemen struktur beton bertulang. Kuat tekan itu disebut kuat tekan beton karakteristik atau kuat tekan beton yang disyaratkan f_c' , berdasarkan benda uji silinder diameter 150 mm dan tinggi 300 mm (SNI 03-2834-2002). Karena sifat variabilitas kekuatan beton atau distribusi beton berbentuk lengkung distribusi normal, maka perencana struktur tidak menggunakan hasil kuat tekan rata-rata yang ditargetkan (f_{cr}'). Sehingga desain campuran harus ditargetkan untuk mencapai kuat tekan rata-rata yang lebih tinggi dari kuat tekan karakteristik. Selisihnya disebut margin kekuatan (k.s) yang besarnya ditentukan dari simpangan baku (*standart deviation*), hasil dari produksi beton sebelumnya dan proporsi benda uji yang diijinkan gagal.

$$f_c' = f_{cr}' - k \cdot s \quad (2)$$

dengan:

f_c'	= Kuat tekan karakteristik (MPa)
f_{cr}'	= Kuat tekan rata-rata yang ditargetkan (MPa)
k	= konstanta (=1,64 untuk 5% benda uji yang diijinkan gagal)
s	= Simpangan baku (MPa)

Persamaan regresi untuk kuat tekan beton adalah:

$$Y = x / (ax + b) \quad (3)$$

dimana:

$$a = \frac{\sum(xy) - n \cdot x_{rata-rata} \cdot y_{rata-rata}}{\sum(x^2) - n \cdot (x_{rata-rata})^2} \quad (4)$$

$$b = y_{rata-rata} - a \cdot x_{rata-rata} \quad (5)$$

$$y = x / F \quad (6)$$

5.2 Kuat Tarik Belah

Pengujian kuat tarik belah beton dilakukan dengan memberikan tegangan tarik pada benda uji silinder yang dioperasikan menggunakan alat *Compression Testing Machine (CTM)*. Kuat tarik beton dapat dihitung dengan persamaan:

$$f_{ct} = 2P / \pi ld \quad (7)$$

dengan:

f_{ct} = Kuat tarik belah (MPa)

P = Beban hancur (N)

l = Panjang benda uji pada bagian yang tertekan (mm)

d = Diameter benda uji (mm)

5.3 Kuat Geser Beton

Pengujian kuat geser bertujuan untuk mengetahui besaran nilai kekuatan geser dari balok beton kemudian dibandingkan dengan hasil perhitungan secara analitis.

Pengujian dilakukan dengan menggunakan CTM dan dihitung memakai persamaan:

$$f_v = P / A \quad (8)$$

dengan:

f_v = Kuat geser beton (MPa)

P = Beban hancur (N)

A = Luas penampang (mm²)

6. HASIL ANALISIS

6.1 Kuat Tekan Beton

Pemeriksaan karakteristik agregat halus dan agregat kasar dilakukan terhadap tiga variasi campuran, yaitu campuran 1 dengan 0% RCA (*Recycled Concrete Aggregate*), campuran 2 dengan 50 % RCA, dan campuran 3 dengan 100% RCA. Hasil pemeriksaan agregat menghasilkan data yang berbeda pada setiap campuran sebagai berikut:

Tabel 1. Pemeriksaan Karakteristik Agregat Halus.

No.	Jenis Pengujian	Satuan	Hasil Pengujian Agregat Halus		
			Campuran 1	Campuran 2	Campuran 3
1	Kadar Air	%	7,820	7,527	9,890
2	Daya serap	%	4,581	3,898	4,167
3	<i>Spesific gravity</i>		2,308	2,552	2,560
4	Modulus kehalusan	%	2,714	2,872	2,946

Tabel 2. Pemeriksaan Karakteristik Agregat Kasar.

No.	Jenis Pengujian	Satuan	Hasil pengujian Agragat kasar		
			Campuran 1 0% RCA	Campuran 2 50% RCA	Campuran 3 100% RCA
1	Kadar Air	%	2,302	3,359	4,715
2	Daya serap	%	2,961	5,404	7,242
3	Berat isi padat	kg/m ³	1507,60	1461,90	1371,98
4	Abrasi	%	20,78	26,30	29,66

Kadar air dan daya serap agregat kasar meningkat seiring meningkatnya persentase agregat kasar alami yang digantikan agregat kasar daur ulang. Sedangkan berat isi menunjukkan penurunan nilai seiring meningkatnya persentase agregat kasar daur ulang. Nilai abrasi memenuhi syarat karena kurang dari 45%. Dari data pemeriksaan karakteristik agregat kasar dan agregat halus dilakukan perencanaan campuran (*mix design*) beton normal dengan metode ACI 211.1 – 91 basis massa untuk mendapatkan proporsi air, semen, agregat halus, dan agregat kasar. Semua campuran membutuhkan air yang sama dalam kondisi agregat SSD yaitu 205 (kg/m³) sehingga dapat dibandingkan antar campurannya. Agregat berasal dari alam sehingga ada selisih antara kadar air dan daya serapnya, oleh karena itu perlu dilakukan koreksi berat air, agregat halus, agregat kasar (Tabel 3).

Tabel 3. Proporsi Campuran.

No.	Proporsi campuran (kg/m ³)	Campuran 1 0% RCA	Campuran 2 50% RCA	Campuran 3 100%RCA
1	Air Koreksi	188,224	196,169	180,34
2	Semen	418,367	418,367	418,367
3	Agregat kasar	971,652	925,944	869,757
4	Agregat halus	766,756	804,52	876,535

Setelah dilakukan pengadukan campuran, pengujian *slump* dan perawatan beton kemudian dilakukan pengujian kuat tekan pada umur beton 3, 7, 14, 21, dan 28 hari untuk ketiga jenis campuran. Pengujian kuat tekan menggunakan alat *Compression Testing Machine (CTM)* dengan memberi *capping* terlebih dahulu pada permukaan silinder agar beban terdistribusi merata.

Pembebanan dilakukan sampai benda uji hancur atau pada beban maksimum kemudian dihitung kuat tekan beton dengan persamaan 3. Sehingga didapat kuat tekan rata-rata untuk umur beton 3, 7, 14, 21, dan 28 hari (Tabel 4, 5, dan Tabel 6).

Tabel 4. Data Hasil Uji Kuat Tekan Beton Campuran 1 dengan 0% RCA.

No.	Nomor Pembuatan	Umur	D (mm)	L (mm)	W (gr)	Luas Penampang (mm ²)	P (N)	fc (MPa)	Kuat Tekan Rata-rata (MPa)
1	I-1	3	150,7	300,0	11847	17824,93	199500	11,19	13,47
2	II-2	3	151,4	301,0	12556	17990,96	283400	15,75	
3	III-1	5	150,0	300,3	11968	17671,44	333600	18,88	18,88
4	I-2	7	151,0	301,0	12220	17907,85	309100	17,26	18,63
5	II-2	7	150,5	300,5	12349	17777,63	326300	18,35	
6	III-2	7	150,0	300,0	11904	17671,44	358500	20,29	
7	I-3	14	150,0	300,5	12018	17671,44	352700	19,96	24,88
8	II-4	14	150,8	300,5	12476	17860,44	561000	31,41	
9	III-3	14	150,0	300,3	11965	17671,44	411000	23,26	
10	I-4	21	150,1	300,5	12116	17683,23	421700	23,85	27,29
11	II-5	21	150,0	301,3	12383	17671,44	597100	33,79	
12	III-4	21	150,2	300,8	12180	17706,80	429300	24,24	
13	I-8	28	151,1	300,5	12223	17919,71	466300	26,02	26,19
14	II-8	28	150,0	301,5	12222	17671,44	452700	25,62	
15	III-8	28	150,0	300,0	11822	17671,44	476100	26,94	

Tabel 5. Data Hasil Uji Kuat Tekan Beton Campuran 2 dengan 50% RCA.

No.	Nomor Pembuatan	Umur	D (mm)	L (mm)	W (gr)	Luas Penampang (mm ²)	P (N)	fc (MPa)	Kuat Tekan Rata-rata (MPa)
1	IV-1	3	150,4	300,0	11973	17765,82	268300	15,10	16,60
2	V-2	3	151,2	300,5	12078	17955,32	291600	16,24	
3	VI-2	3	150,2	302,0	11956	17706,80	326900	18,46	
4	IV-3	7	150,5	301,0	12175	17789,45	407400	22,90	24,68
5	V-3	7	150,3	301,0	12161	17742,20	495000	27,90	
6	VI-3	7	150,1	301,5	12108	17695,01	411100	23,23	
7	IV-5	14	150,5	303,0	12275	17777,63	473500	26,63	28,80
8	V-5	14	150,2	300,5	12010	17718,60	436000	24,61	
9	VI-6	14	150,3	300,0	12161	17730,40	623400	35,16	
10	IV-8	21	150,1	301,0	12120	17700,91	625100	35,31	34,70
11	V-7	21	150,0	300,8	12049	17671,44	620800	35,13	
12	VI-8	21	150,0	300,3	12213	17659,66	594600	33,67	
13	IV-10	28	150,5	301,0	12218	17789,45	556600	31,29	34,00
14	V-8	28	150,0	301,0	12065	17671,44	586100	33,17	
15	VI-10	28	150,0	300,0	12054	17671,44	663400	37,54	

Tabel 6. Data Hasil Uji Kuat Tekan Beton Campuran 3 dengan 100% RCA.

No.	Nomor Pembuatan	Umur	D (mm)	L (mm)	W (gr)	Luas Penampang (mm ²)	P (N)	fc (MPa)	Kuat Tekan Rata-rata (MPa)
1	VII-2	3	150,1	300,8	11948	17695,01	314500	17,77	20,576
2	VIII-2	3	150,3	300,5	11822	17742,20	363700	20,50	
3	IX-2	3	150,3	301,8	11903	17730,40	415900	23,46	
4	VII-4	7	150,0	301,0	11967	17671,44	475400	26,90	26,527
5	VIII-4	7	150,0	300,5	11965	17671,44	438300	24,80	
6	IX-4	7	150,0	300,5	11936	17671,44	492600	27,88	

No.	Kelas	Umur (hari)	U ₁ (MPa)	U ₂ (MPa)	U ₃ (MPa)	U ₄ (MPa)	U ₅ (MPa)	U ₆ (MPa)	U ₇ (MPa)
7	VII-6	14	150,0	300,5	11951	17671,44	544100	30,79	31,596
8	VIII-6	14	150,2	300,0	11839	17706,80	564100	31,86	
9	IX-6	14	150,4	300,0	11951	17765,82	571000	32,14	
10	VII-8	21	150,0	300,8	12020	17671,44	608100	34,41	29,628
11	VIII-8	21	150,0	299,5	11910	17671,44	485400	27,47	
12	IX-8	21	150,2	300,3	11941	17718,60	478500	27,01	
13	VII-9	28	150,0	300,8	12028	17659,66	667700	37,81	36,614
14	VIII-9	28	150,9	300,5	12000	17872,29	577600	32,32	
15	IX-11	28	149,9	300,0	11841	17650,83	701000	39,71	

Hasil kuat tekan rata-rata hari ke 3, 7, 14, 21, dan 28 pengujian kemudian dihitung menggunakan persamaan 3 sampai dengan 6 sehingga menghasilkan persamaan regresi 9, 10, dan 11. Dari persamaan ini didapatkan faktor umur, kuat tekan beton pada hari ke 28, standar deviasi, dan kuat tekan karakteristik aktual beton (Tabel 7, 8, dan 9).

$$Y_1 = \frac{X}{0,0000647x + 0,113316} \quad (9)$$

$$Y_2 = \frac{X}{0,000094x + 0,107378} \quad (10)$$

$$Y_3 = \frac{X}{0,000188x + 0,092707} \quad (11)$$

Dimana: X = umur beton (hari)

Y = kuat tekan (Mpa)

Tabel 7. Kuat Tekan Karakteristik Beton Campuran 1 dengan 0% RCA.

No.	Umur (hari)	Kuat Tekan (MPa)		Kuat Tekan Regresi (MPa)	Faktor Umur	Kuat Tekan 28 Hari (MPa)
		Perhitungan	Rata-rata			
1	3	11,19	13,47	13,993	0,52	21,96*
2	3	15,75		13,993	0,52	30,91
3	5	18,88		17,837	0,66	28,90
4	7	17,26	18,63	20,217	0,75	23,24*
5	7	18,35		20,217	0,75	24,71
6	7	20,29		20,217	0,75	27,31

No.	Umur (hari)	Kuat Tekan (MPa)	Rata-rata	Kuat Tekan Regresi (MPa)	Faktor Umur	Kuat Tekan 28 Hari (MPa)
7	14	19,96	24,88	24,265	0,90	22,26*
8	14	31,41		24,265	0,90	35,04
9	14	23,26		24,265	0,90	25,94
10	21	23,85	27,29	26,001	0,96	24,77*
11	21	33,79		26,001	0,96	35,09
12	21	24,24		26,001	0,96	25,18
13	28	26,02	26,19	26,965	1,00	26,02
14	28	25,62		26,965	1,00	25,62
15	28	26,94		26,965	1,00	26,75
Rata-rata						26,91
Standar deviasi						4,040
Kuat tekan karakteristik aktual						20,287

*) Ketidaktepatan dalam pengadukan dan pengecoran menghasilkan nilai kuat tekan yang rendah.

Tabel 8. Kuat Tekan Karakteristik Beton Campuran 2 dengan 50% RCA.

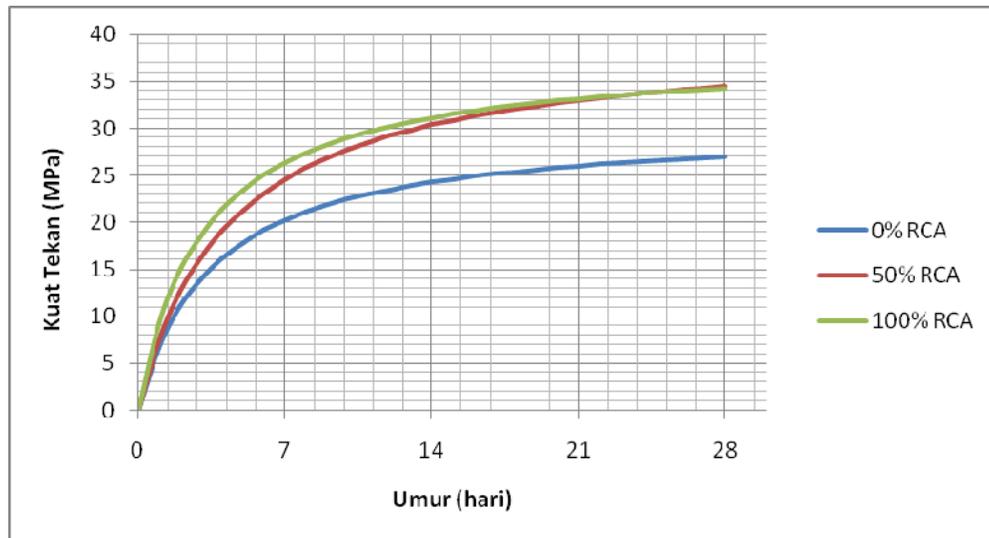
No.	Umur (hari)	Kuat Tekan (MPa)		Kuat Tekan Regresi (MPa)	Faktor Umur	Kuat Tekan 28 Hari (MPa)
		Perhitungan	Rata-rata			
1	3	15,10	16,60	16,230	0,471	32,09
2	3	16,24		16,230	0,471	34,51
3	3	18,46		16,230	0,471	39,23
4	7	22,90	24,68	24,548	0,712	32,18
5	7	27,90		24,548	0,712	39,20
6	7	23,23		24,548	0,712	32,64
7	14	26,63	28,80	30,387	0,881	30,23
8	14	24,61		30,387	0,881	28,06
9	14	35,16		30,387	0,881	39,91
10	21	35,31	34,70	33,004	0,957	36,90
11	21	35,13		33,004	0,957	36,71
12	21	33,67		33,004	0,957	35,19

Tabel 8. (lanjutan).						
13	28	31,29	34,00	34,490	1,000	31,29
14	28	33,17		34,490	1,000	33,17
15	28	37,54		34,490	1,000	37,54
Rata-rata						34,59
Standar deviasi						3,590
Kuat tekan karakteristik aktual						28,702

Tabel 9. Kuat Tekan Karakteristik Beton Campuran 3 dengan 100% RCA.

No.	Umur (hari)	Kuat Tekan (MPa)		Kuat Tekan Regresi (MPa)	Faktor Umur	Faktor Umur Terhadap 28 Hari (MPa)
		Perhitungan	Rata-rata			
1	3	17,77	20,58	18,608	0,543	32,76
2	3	20,50		18,608	0,543	37,78
3	3	23,46		18,608	0,543	43,23
4	7	26,90	26,53	26,309	0,767	35,07
5	7	24,80		26,309	0,767	32,33
6	7	27,88		26,309	0,767	36,33
7	14	30,79	31,60	31,143	0,908	33,90
8	14	31,86		31,143	0,908	35,08
9	14	32,14		31,143	0,908	35,39
10	21	34,41	29,63	33,174	0,967	35,57
11	21	27,47		33,174	0,967	28,39
12	21	27,01		33,174	0,967	27,92
13	28	37,81	36,61	34,293	1,000	37,81
14	28	32,32		34,293	1,000	32,32
15	28	39,71		34,293	1,000	39,72
Rata-rata						34,91
Standar deviasi						3,983
Kuat tekan karakteristik aktual						28,374

Dari persamaan regresi diperoleh perkembangan kuat tekan perhari sehingga dapat dibuat grafik perbandingan kuat tekan terhadap umur beton untuk setiap campuran (Gambar 1).



Gambar 1. Grafik Perbandingan Kuat Tekan terhadap Umur Beton.

Grafik diatas menunjukkan bahwa beton dengan 50% RCA dan beton dengan 100% RCA memiliki perkembangan kuat tekan yang hampir sama. Mutu beton yang bisa dicapai (kuat tekan karakteristik aktual) dari campuran 2 dan 3 harganya melebihi kuat tekan yang disyaratkan (25 Mpa) sedangkan campuran 1 mutu beton tidak mencapai yang disyaratkan.

6.2 Kuat Tarik Belah Beton

Pengujian kuat tarik belah beton menggunakan alat *Compression Testing Machine (CTM)*. Pembebanan dilakukan sampai benda uji mengalami keretakan dan dicatat beban maksimum yang dicapai selama pengujian. Kuat tarik belah beton dihitung menggunakan persamaan 7. Selanjutnya akan didapat kuat tarik belah maksimum untuk masing-masing benda uji dan kemudian dirata-ratakan untuk masing-masing umur pengujian.

**Tabel 10. Data Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Beton Campuran 1
dengan 0% RCA.**

No.	Kode Pembuatan	Umu r	D (mm)	L (mm)	W (gr)	Luas Penampang (mm ²)	P (N)	fct (MPa)	Kuat Tarik Rata-rata (MPa)
1	II-3	7	151,6	300,5	12581	18050	188500	2,64	2,51
2	III-6	7	150,6	299,5	12167	17813	168200	2,38	
3	I-6	14	150,0	300,0	12043	17671	157500	2,23	2,22
4	I-7	14	150,0	299,5	12035	17671	155600	2,21	
5	I-9	21	151,4	297,5	12110	17991	141600	2,00	2,07
6	II-7	21	150,8	300,3	12381	17860	151800	2,14	
7	I-5	28	150,9	300,5	12187	17884	156300	2,20	2,73
8	II-6	28	149,7	301,0	13317	17589	234300	3,31	
9	III-7	28	150,1	300,8	12133	17683	190900	2,69	

**Tabel 11. Data Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Beton Campuran 2
dengan 50% RCA.**

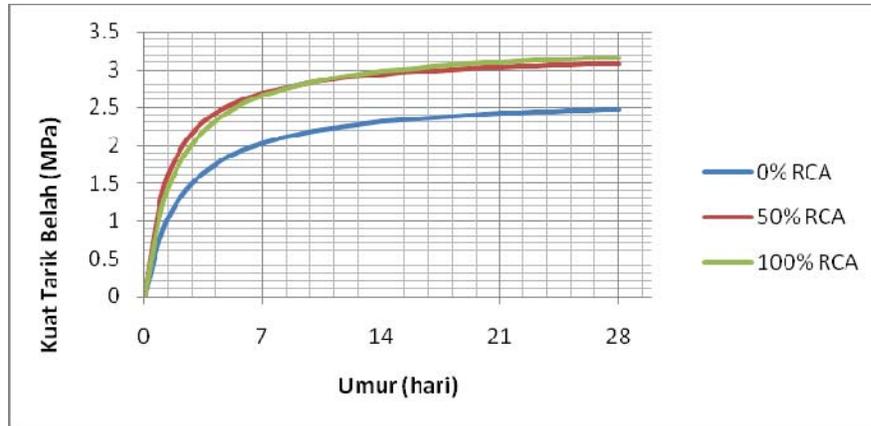
No.	Code Pembuatan	Umu r	D (mm)	L (mm)	W (gr)	Luas Penampan g (mm ²)	P (N)	fct (MPa)	Kuat Tarik Rata-rata (MPa)
1	IV-2	3	150,2	302,0	12036	17719	147170	2,07	2,04
2	V-1	3	151,5	301,0	12205	18027	144200	2,01	
3	VI-1	3	150,8	302,5	12257	17849	146200	2,04	
4	IV-4	7	151,7	301,3	12213	18062	182700	2,55	2,72
5	VI-4	7	150,3	301,5	12185	17742	205100	2,88	
6	IV-6	14	150,3	301,5	12120	17730	196500	2,76	2,87
7	V-4	14	149,8	300,5	12400	17624	186100	2,63	
8	VI-5	14	150,0	300,0	12048	17671	226300	3,20	
9	IV-7	21	149,8	300,5	12195	17618	242900	3,44	3,29
10	V-6	21	150,1	301,0	12198	17689	238500	3,36	
11	VI-7	21	150,7	300,8	12188	17825	218600	3,07	

Tabel 11. (lanjutan).									
12	IV-9	28	150,1	300,5	12004	17695	238700	3,37	2,97
13	V-8	28	150,0	301,3	12140	17671	181800	2,56	

Tabel 12. Data Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Beton Campuran 3 dengan 100% RCA.

No.	Code Pembuatan	Umu r	D (mm)	L (mm)	W (gr)	Luas Penampangan (mm ²)	P (N)	fct (MPa)	Kuat Tarik Rata-rata (MPa)
1	VII-1	3	150,2	301,3	11981	17707	150100	2,11	2,02
2	VIII-1	3	150,6	300,5	11936	17801	137300	1,93	
3	IX-1	3	150,2	301,0	11933	17707	142400	2,01	
4	VII-3	10	150,2	300,0	11955	17707	185800	2,63	2,85
5	VIII-3	10	151,1	300,5	12000	17932	194800	2,73	
6	IX-3	10	149,8	302,0	11948	17613	227100	3,20	
7	VII-5	14	150,2	300,5	12010	17707	223200	3,15	2,98
8	VIII-5	14	150,7	300,5	12009	17837	191200	2,69	
9	IX-5	14	150,1	300,5	11908	17695	219400	3,10	
10	VII-7	21	149,8	300,5	11921	17613	212300	3,00	3,13
11	VIII-7	21	150,2	300,5	12012	17707	219300	3,10	
12	IX-7	21	150,3	300,5	12045	17742	232400	3,28	
13	VII-10	28	150,1	301,0	11951	17695	233700	3,29	3,14
14	IX-9	28	149,6	300,8	11900	17583	240000	3,40	
15	IX-10	28	149,1	300,3	11834	17466	192100	2,73	

Dari nilai kuat tarik rata-rata yang didapatkan, kemudian menggunakan persamaan regresi 3 sampai dengan 6 menghasilkan grafik perkembangan kuat tarik belah setiap harinya untuk setiap variasi campuran (Gambar 2).



Gambar 2. Grafik Perbandingan Kuat Tarik Belah Beton terhadap Umur Beton.

Dari Gambar terlihat bahwa kuat tarik belah beton menunjukkan nilai kuat tarik belah yang hampir sama untuk beton dengan 50% RCA dan 100% RCA. Sedangkan beton dengan 0% RCA menghasilkan nilai yang rendah seperti nilai kuat tekannya.

Tabel 13. Perbandingan Nilai Kuat Tarik Belah Beton dibagi $\sqrt{f_c}$.

Persentase Agregat	f_{ct} (MPa)	f_c' (MPa)	$f_{ct}/\sqrt{f_c}$
0% RCA	1,83	20,28	0,41
50% RCA	2,56	28,70	0,48
100%RCA	2,81	28,37	0,53

Tabel 13 menunjukkan perbandingan dari nilai kuat tarik belah yang dibagi $\sqrt{f_c}$, koefisien ini merupakan perbandingan terhadap perhitungan teoritis yang menunjukkan $f_{ct} < 0,62 \cdot \sqrt{f_c}$. Nilai koefisien dari ketiga campuran beton ini menunjukkan hasil yang nilainya lebih kecil dari **0,62**.

6.3 Kuat Geser Beton

Pengujian kuat geser bertujuan untuk mengetahui besaran nilai kekuatan geser dari balok beton, kemudian dibandingkan dengan hasil perhitungan secara analisis. Pada uji geser balok digunakan sistem pembebanan *single point loading* dimana pembebanan diletakan pada bagian tengah dari balok beton yang diuji dengan menggunakan mesin CTM. Hasil pengujian kuat geser balok beton dapat dibandingkan dengan hasil

perhitungan secara analisis menggunakan persamaan 7. Dari tabel 14, terlihat bahwa nilai kuat geser beton daur ulang semakin menurun seiring dengan semakin besarnya persentase penggunaan agregat kasar daur ulang.

Tabel 14. Data Hasil Pengujian Kuat Geser Balok Beton.

Persentase RCA	Kode sampel	b (mm)	d (mm)	L (mm)	Beban (N)	Luas Bidang Benda Uji (mm ²)	Kuat Geser (MPa)	Kuat Geser Rata-rata (MPa)
0%	1-A	99,0	102,0	300,0	51322,6	10098	5,082	5,549
	1-B	100,0	103,5	300,0	66914,4	10350	6,465	
	1-C	100,0	95,0	300,0	48451,2	9500	5,100	
50%	2-A	99,0	102,0	300,0	56252,0	10098	5,571	4,277
	2-B	100,0	103,0	300,0	34888,0	10300	3,387	
	2-C	100,0	103,0	302,5	39886,0	10300	3,872	
100%	3-A	99,0	103,0	297,5	44296,0	10197	4,344	3,861
	3-B	100,0	102,0	301,0	40180,0	10200	3,939	
	3-C	99,0	102,0	303,0	33320,0	10098	3,300	

7. KESIMPULAN

1. Kuat tekan karakteristik beton dengan agregat kasar daur ulang menunjukkan hasil yang relatif sama dengan bertambahnya persentase agregat kasar daur ulang. Campuran 50% RCA memberikan nilai kuat tekan karakteristik aktual 28,7 MPa sedangkan campuran 100% RCA sebesar 28,4 MPa.
2. Kuat tarik belah beton dengan agregat kasar daur ulang menunjukkan hasil yang relatif sama dengan bertambahnya persentase agregat kasar daur ulang. Campuran 0% RCA sebesar 2,38 MPa, 50% RCA 2,78 MPa sedangkan 100% RCA sebesar 2,81 MPa.
3. Semakin besar persentase agregat kasar daur ulang yang digunakan semakin turun nilai kuat gesernya.

DAFTAR PUSTAKA

1. ACI Committee 318 (2008). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary*. Farmington Hills, USA.
2. ASTM C 78. *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete Using Simple Beam with Thrid-Point Loading*. Farmington Hills, USA.
3. Departemen Pekerjaan Umum : SNI 03-2847-2002. (2002). *Tata Cara Perencanaan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung*. Badan Standarisasi Nasional, Jakarta, Indonesia.
4. El-Reedy, M. A. (2009). *Advanced Materials and Techniques for Reinforced Concrete Structures*. CRC Press.
5. Nawy, Edward G. (2005). *Reinforced Concrete*. 5th ed.
6. Neville, A.M. 1981. *Properties of Concrete*. Pittman Publication, 3rd ed.
7. Nugraha, P., Antoni (2007). *Teknologi Beton: Dari Material, Pembuatan, ke Beton Kinerja Tinggi*, Penerbit Andi, Yokyakarta, Indonesia.
8. Pani, L., Francesconi, L. and Concu, G. (2011). *Influence of Replacement Percentage of Recycle Aggregates on Recycled Aggregate Concrete Properties, Symposium PRAGUE*, Fib.
9. Yong, P.C., Teo, D.C.L. (2009). *Utilisation of Recycled Agregate as Coarse Aggregate in Concrete*, UNIMAS E-Journal of Civil Engineering.
10. Hansen, T.C. (1992). *Recycling of Demolished Concrete and Masonry*. 1st ed. Taylor & Francis Group.