

**Pengaruh Penggunaan Material Daur Ulang pada Beton
Memadat Mandiri terhadap Kuat Tekan, Modulus
Elastisitas, dan Kuat Lentur**

*Influence of Recycled Aggregates on the Compressive Strength, Modulus of Elasticity
perpustakaan.uns.ac.id and Flexural Strength of Self Compacting Concrete digilib.uns.ac.id*

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Menempuh Ujian Sarjana Teknik
Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik UNS



2011

commit to user

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSETUJUAN	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
MOTTO DAN PERSEMBAHAN.....	iv
ABSTRAK.....	v
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR NOTASI DAN SIMBOL	xvii
DAFTAR LAMPIRAN	xix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Batasan Masalah	3
1.4. Tujuan Penelitian	4
1.5. Manfaat Penelitian	4
BAB 2. LANDASAN TEORI	5
2.1. Tinjauan Pustaka	5
2.2. Landasan Teori.....	7
2.2.1. Beton Memadat Mandiri (<i>Self Compacting Concrete, SCC</i>)	7
2.2.2. Beton Daur Ulang Memadat Mandiri	11
2.2.3. Material Penyusun Beton Daur Ulang Memadat Mandiri	11
2.2.3.1. Semen Portland.....	11
2.2.3.2. Agregat	12
a. Agregat Halus	12
b. Agregat Kasar Alami.....	14
c. Agregat Kasar Daur Ulang	16

2.2.3.3. Air.....	22
2.2.3.4. Bahan Tambah.....	23
a. Pengertian Bahan Tambah.....	23
b. <i>Superplasticizer</i>	23
c. Debu Silika (<i>Silicafume</i>).....	25
d. Abu Terbang (<i>Fly Ash</i>).....	26
2.2.4. Kuat Tekan Beton	28
2.2.5. Modulus Elastisitas Beton.....	29
2.2.6. Kuat Lentur Beton.....	33
BAB 3. METODE PENELITIAN.....	39
3.1. Tinjauan Umum	39
3.2. Bahan dan Benda Uji Penelitian	39
3.3. Alat Uji Penelitian.....	41
3.4. Tahap Penelitian.....	42
3.5. Pengujian Bahan Dasar Beton.....	44
3.6. Perancangan <i>Mix Design</i>	44
3.7. Pembuatan Beton Segar	45
3.8. Perawatan Benda Uji.....	45
3.9. Pengujian Benda Uji	47
3.9.1. Pengujian Kuat Tekan.....	47
3.9.2. Pengujian Modulus Elastisitas	47
3.9.3. Pengujian Kuat Lentur	48
BAB 4. HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN.....	51
4.1. Hasil Pengujian Agregat	51
4.1.1. Hasil Pengujian Agregat Halus	51
4.1.2. Hasil Pengujian Agregat Kasar Alami Pecah	53
4.1.3. Hasil Pengujian Agregat Kasar Alami Bulat	55
4.1.4. Hasil Pengujian Agregat Kasar Daur Ulang	57
4.2. Rancang Campur Adukan Beton.....	59
4.3. Hasil Pengujian	60

4.3.1. Hasil Pengujian Beton Segar (<i>Slump Flow Test</i>).....	60
4.3.2. Hasil Pengujian Kuat Tekan	63
4.3.3. Hasil Pengujian Modulus Elastisitas.....	65
4.3.4. Hasil Pengujian Kuat Lentur.....	69
4.4. Pembahasan.....	71
4.4.1. Beton Segar	71
4.4.2. Kuat Tekan	72
4.4.3. Modulus Elastisitas	73
4.4.4. Hubungan Kuat Tekan dengan Modulus Elastisitas	74
4.4.5. Kuat Lentur (<i>Modulus of Rupture</i>)	75
4.4.6. Hubungan Kuat Tekan dengan Kuat Lentur (<i>Modulus of Rupture</i>)	77
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN.....	78
5.1. Kesimpulan	78
5.2. Saran.....	79
DAFTAR PUSTAKA	xix
LAMPIRAN.....	xx



ABSTRAK

Kurnia Widianoro, 2011, Pengaruh Penggunaan Material Daur Ulang pada Beton Memadat Mandiri terhadap Kuat Tekan, Modulus Elastisitas, dan Kuat Lentur. Tugas Akhir Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret Surakarta.

Beton memadat mandiri (*Self Compacting Concrete, SCC*) merupakan inovasi dalam pembuatan beton dalam mengatasi bentuk bangunan yang kompleks, dan bertulangan rapat. Penggunaan material daur ulang merupakan salah satu usaha memanfaatkan limbah yang ada sekaligus memberikan nilai keberlanjutan pada proses produksi beton. Pembuatan SCC menggunakan agregat daur ulang merupakan salah satu upaya pembuatan beton ramah lingkungan sekaligus mengatasi permasalahan pengerjaan dan pencetakan pada beton konvensional. Penelitian ini bertujuan mempelajari efek dari penggunaan agregat daur ulang terhadap kuat tekan, modulus elastisitas dan kuat lentur beton SCC.

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan 11 jenis campuran yang diuji dengan tiga buah benda uji untuk tiap campuran. Terdapat tiga jenis agregat kasar yang digunakan, yaitu : agregat alami pecah, agregat alami bulat dan agregat daur ulang. Agregat daur ulang digunakan sebagai pengganti agregat alami dengan persentase 0%, 20%, 40%, 60%, 80% dan 100% terhadap total agregat keseluruhan. Benda uji yang digunakan adalah silinder beton dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm dan balok berukuran 10 cm x 10 cm x 50 cm. Kuat desak, modulus elastisitas, kuat lentur dan beton serat SCC diuji pada umur beton 28 hari.

Hasil pengujian kuat tekan SCC menunjukkan bahwa apabila dikombinasikan dengan agregat alami pecah, agregat daur ulang dapat menurunkan nilai kuat tekan sebesar 12,26% (dari 50,74 MPa menjadi 44,52 Mpa). Namun apabila dikombinasikan dengan agregat alami bulat, kuat tekan meningkat 62,78% (dari 27,35 MPa menjadi 44,52 MPa). Nilai modulus elastisitas cenderung fluktuatif baik pada SCC kombinasi agregat alami pecah dengan agregat daur ulang (kenaikan terbesar +27,08% untuk penggunaan 40% agregat daur ulang dan penurunan terbesar -36,01% untuk penggunaan 60% agregat daur ulang) maupun SCC kombinasi agregat alami bulat dengan agregat daur ulang (kenaikan terbesar +63,64% untuk penggunaan 80% agregat daur ulang dan penurunan terbesar -21,82% pada kadar 40%). Hasil pengujian kuat lentur SCC kombinasi agregat alami pecah dengan agregat daur ulang fluktuatif namun cenderung naik, dengan kenaikan tertinggi pada penggunaan 80% daur ulang, yakni naik 61,29% dan kenaikan terendah terjadi pada penggunaan 100% daur ulang, yakni 9,68%. Kuat lentur SCC kombinasi agregat alami bulat dengan daur ulang mencapai nilai tertinggi pada kadar 0% dan mencapai nilai terendah pada kadar 20% dan 100%.

Kata kunci: agregat daur ulang, batu bulat, batu pecah, kuat lentur, kuat tekan, modulus elastisitas, *self compacting concrete*.

ABSTRACT

Kurnia Widianoro, 2011, Influence of Recycled Aggregates on the Compressive Strength, Modulus of Elasticity and Flexural Strength of Self Compacting Concrete. Tugas Akhir Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret Surakarta.

Self Compacting Concrete (SCC) was an innovation in concrete production to overcome the problems due to complexity of building shape and reinforcement. The use of recycled aggregate was an effort to utilize waste materials, and sustain the concrete material usage on the concrete production. The making of SCC using recycled aggregate was an effort to make a green concrete and to solve the workability and casting problem on conventional concrete. This research aimed to study the effects on SCC's compressive strength, modulus of elasticity, and flexural strength due to the application of recycled aggregate.

This research used the experimental method with 11 mixtures which were tested in three samples each. There were three kind of coarse aggregates used: natural crushed aggregate, natural rounded aggregate, and recycled aggregate. Recycled aggregate used as natural aggregate replacement at 0%, 20%, 40%, 60%, 80% and 100% from the total amount of coarse aggregate. The test sample was a cylinder form with 15 cm of diameter and 30 cm of height and beam size was 10 cm x 10 cm x 50 cm. Compressive strength, modulus of elasticity, and flexural strength of SCC were tested at 28 days of concrete age.

SCC compressive strength test results show that if recycled aggregate was combined with natural crushed aggregate, the compressive strength decreased by 12,26% (50,74 MPa to 44,52 MPa). However, if it was combined with natural rounded aggregate, the compressive strength increased by 62,78% (27,35 MPa to 44,52 MPa). The value of modulus of elasticity disposed to be fluctuate not only for natural crushed aggregate - recycled aggregate combination (highest increase was +27,08% on 40% used of recycled aggregate and highest decrease was -36,01% on 60% used of recycled aggregate) but also natural rounded-recycled aggregate combination (highest increase was +63,64% on 80% used of recycled aggregate, and the highest decrease was -21,82% on 40% used of recycled aggregate). The flexure test result shows that natural crushed-recycled aggregate combination have a fluctuate value that prone to be increased, with 61,29% as the highest increasement and 9,68% as the lowest, at 80% and 100% used of recycled aggregate respectively. Flexural strength of SCC with natural rounded-recycled aggregate combination reached the highest at 0% used of recycled aggregate and the lowest point at 20% and 100% used of recycled aggregate.

Keywords: compressive strength, crushed aggregate, flexural strength, modulus of elasticity, recycled aggregate, rounded aggregate, self compacting concrete,

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pembangunan dengan sebagian besar komponen berupa beton masih menjadi pilihan utama para pelaku konstruksi. Hal ini disebabkan karena beton mempunyai beberapa kelebihan dibandingkan bahan-bahan lain. Dari segi ekonomi, harga beton relatif murah karena material dasarnya berasal dari bahan-bahan lokal. Selain itu beton memiliki kuat desak yang tinggi, dapat dicetak menjadi bentuk yang beragam, serta memiliki ketahanan yang baik terhadap cuaca dan lingkungan. Kelebihan-kelebihan tersebut yang menyebabkan beton masih menjadi pilihan utama, bahkan terus bertambah dari waktu ke waktu.

Kebutuhan terhadap beton yang terus bertambah memicu penambangan batuan (sebagai salah satu bahan penyusun beton) secara besar-besaran. Hal ini menyebabkan turunnya jumlah sumber daya alam yang tersedia (terjadi kelangkaan) dan bila dilakukan eksploitasi secara terus-menerus dapat menyebabkan kerusakan lingkungan. Di sisi lain, *sustainability* (keberlanjutan) pada produksi beton juga perlu diperhatikan. Salah satu tindakan untuk meningkatkan *sustainability* pada produksi beton adalah dengan menurunkan ketergantungan pada agregat alami dan memaksimalkan sampah sisa pembongkaran bangunan sebagai material daur ulang (www.sustainableconcrete.org.uk).

Pada saat jalan, bangunan, trotoar, kerb dan *gutter* yang terbuat dari beton dibongkar, maka beton akan berubah menjadi limbah. Limbah beton dapat dibuang sebagai timbunan atau dihancurkan dan digunakan kembali sebagai agregat untuk membuat beton baru. Proses penghancuran material limbah dan menggunakannya kembali sebagai agregat kasar untuk membuat beton baru sangat masuk akal karena dapat

commit to user

mengurangi limbah dan kebutuhan akan agregat alami (*virgin aggregate*) (ACI Committee E-701, 2007).

Banyaknya jumlah material daur ulang dipicu juga oleh maraknya perubahan wajah bangunan lama menjadi lebih modern dan perubahan fungsi bangunan yang berorientasi bisnis misalnya permukiman menjadi *mall* serta ditambah dengan adanya bencana alam yang menyisakan sampah reruntuhan bangunan.

Hasil studi eksperimen yang dilakukan Suharwanto (2005) menunjukkan bahwa agregat daur ulang mengandung mortar sebesar 25 hingga 45% untuk agregat kasar dan 70 hingga 100% untuk agregat halus. Di samping itu, pada agregat daur ulang juga terdapat retak mikro yang disebabkan oleh *stone crusher* pada saat produksi agregat daur ulang yang tidak dapat membelah daerah lempengan atau patahan pada agregat alam. Hal ini menunjukkan bahwa kualitas dari agregat daur ulang tidak dapat dikatakan sama dengan agregat alami (*natural aggregates*).

Selain masalah lingkungan, salah satu permasalahan dalam proses produksi beton adalah kurangnya tenaga terampil dalam bidang ini. Sebagai solusi, di Jepang pada awal 1980 mulai dikembangkan *Self Compacting Concrete* (SCC). Beton ini mulai digunakan secara luas pada awal 1990-an. SCC adalah suatu beton yang memiliki sifat alir (*flowability*) yang tinggi dan dapat mengisi ruang-ruang cetakan beton tanpa proses pemadatan atau hanya sedikit sekali memerlukan getaran untuk memadatkannya. Karena dapat memadat dengan sendirinya, maka beton SCC dapat diaplikasikan dengan jumlah tenaga kerja yang lebih sedikit, sehingga biaya yang dikeluarkan juga menjadi lebih efisien.

Pembuatan SCC yang tanpa/dengan sangat sedikit proses pemadatan tentu menyebabkan waktu produksi menjadi lebih singkat. Oleh karena itu SCC seringkali digunakan untuk membuat beton *precast*, cor setempat (*in situ*), misalnya pekerjaan *bored pile* dan pelat lantai.

Parameter kualitas kekuatan beton dapat ditinjau dari kuat tekan, modulus elastisitas dan kuat lentur. Kuat tekan beton adalah kemampuan luasan permukaan beton dalam menahan gaya tekan yang dibebankan secara aksial sumbu penampang. Pembebanan dilakukan hingga beton pecah/hancur (Wang dan Salmon, 1990).

Modulus elastisitas adalah perbandingan antara tegangan dan regangan. Semakin besar nilai modulus elastisitas, maka dengan tegangan yang sama, regangan (lendutan) yang terjadi akan semakin kecil. Untuk beton, sifat elastisnya berlaku hingga sekitar 40% dari kuat tekan (f_c') setelah itu, perilaku beton dianggap tidak elastis (Nawy, 1990).

Kuat lentur beton adalah kemampuan beton menahan beban dalam arah tegak lurus sumbunya, sampai beton tersebut patah. Menurut Neville (1987) kuat lentur adalah kuat tarik maksimum yang secara teoritis dicapai pada serat bagian bawah dari sebuah balok uji. Nilainya bergantung pada dimensi dari balok uji dan susunan beban.

Penelitian ini akan membahas mengenai pengaruh material daur ulang pada SCC terhadap kuat tekan, modulus elastisitas dan kuat lentur sehingga diharapkan dapat menjawab beberapa permasalahan-permasalahan di atas.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang masalah di atas, maka dapat dirumuskan suatu masalah yaitu bagaimana pengaruh material daur ulang sebagai agregat kasar terhadap kuat tekan, modulus elastisitas, dan kuat lentur pada beton SCC.

1.3. Batasan Masalah

Untuk membatasi permasalahan agar penelitian ini lebih terarah dan tidak meluas maka perlu adanya pembatasan sebagai berikut:

- a. Material daur ulang digunakan sebagai agregat kasar.
- b. Sumber material daur ulang berasal dari sisa benda uji di Laboratorium Bahan dan Material Universitas Sebelas Maret Surakarta.
- c. Semen yang digunakan adalah semen tipe OPC (*Ordinary Portland Cement*).
- d. Agregat alam yang digunakan adalah yang berbentuk pecah dan bulat.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan yang diharapkan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penggunaan material daur ulang sebagai agregat kasar pada SCC terhadap kuat tekan, modulus elastisitas, dan kuat lentur.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah :

Menambah pengetahuan tentang pemanfaatan material daur ulang sebagai agregat kasar pada SCC.



BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Beton memadat mandiri (*Self Compacting Concrete, SCC*) adalah campuran beton yang dapat memadat sendiri tanpa menggunakan alat pemadat (*vibrator*). SCC dapat memadat ke setiap sudut dari struktur bangunan dan dapat mengalir mengisi tinggi permukaan yang diinginkan dengan rata (*self leveling*) tanpa mengalami *bleeding* dan segregasi. SCC digunakan dengan cara dipompa dari bawah *formwork* struktur bangunan atau dengan cara dituang dari atas. Maksimum tinggi jatuh SCC adalah 2 m dari *formwork* struktur bangunan. Gradasi yang tepat dari agregat dan kombinasi dari komposisi material yang berkadar bahan semen tinggi adalah hal utama dalam memenuhi syarat-syarat SCC (Himawan dan Dharma, 2004 dalam Adrianto, 2010).

SCC pertama kali ditemukan di Jepang pada tahun 1990-an sebagai bentuk upaya untuk mengatasi persoalan pengecoran komponen gedung artistik dengan bentuk geometri yang tergolong rumit apabila dilakukan pengecoran menggunakan beton normal. Riset tentang SCC masih terus dilakukan hingga sekarang dengan banyak aspek kajian, misalnya ketahanan, permeabilitas, dan kuat tekan. Kekuatan tekan beton kering 120 MPa sudah dapat dicapai karena penggunaan *superplasticizer* yang memungkinkan penurunan rasio air-semen (w/c) hingga nilai $w/c = 0,3$ atau lebih kecil (Juvas, 2004).

Sementara itu, beton daur ulang dirasakan semakin penting karena turut menjaga sumber daya alam dan mengurangi limbah yang ada dengan menggunakan beton yang sudah tersedia sebagai sumber agregat untuk beton baru (Kalaiaarasu & Subramanian, 2006).

Fenomena yang kerap terjadi pada beton segar adalah segregasi, yaitu partikel yang lebih besar cenderung turun dan mengumpul di bawah. Hal ini disebabkan oleh buruknya gradasi dan/atau penggunaan air yang terlalu banyak.

Segregasi pada beton akan berkurang apabila digunakan material yang lebih ringan, contohnya agregat daur ulang (Corinaldesi dan Moriconi, 2004). *Specific gravity* dari agregat daur ulang berkisar antara 2,2 -2,5 lebih rendah dibanding agregat alam yaitu 2,6 pada kondisi *SSD* (ACI Committee E-701, 2007).

Secara umum sifat mekanis beton agregat daur ulang lebih jelek dibanding beton yang terbuat dari agregat alam, terutama dalam menahan beban tarik (Amri, 2005). Namun demikian, berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Corinaldesi et al. (1999), diperoleh hasil bahwa pembuatan beton struktural (30 MPa) masih bisa dilakukan dengan penggantian 100% agregat daur ulang terhadap agregat alami. Hal ini menjadikan penelitian mengenai penggunaan agregat daur ulang sangat baik untuk dilakukan, karena selain masih dapat memenuhi standar beton struktural, penggunaan agregat daur ulang juga berwawasan lingkungan (mengurangi penggunaan agregat alami).

Penelitian mengenai penggunaan agregat daur ulang pada campuran SCC oleh Ali dan Al-Tersawy (2010) dengan 0%, 25%, 50% dan 100% penggunaan agregat daur ulang sebagai pengganti agregat alami menyatakan bahwa agregat daur ulang memenuhi syarat sebagai material penyusun SCC. Penelitian tentang penggunaan agregat daur ulang sebagai pengganti agregat alami untuk kelipatan 20% pernah dilakukan oleh Kumutha dan Vijay (2010) pada beton konvensional (non-SCC) dengan hasil kuat tekan beton menurun seiring semakin banyak persentase agregat daur ulang yang digunakan. Pada penggunaan 100% daur ulang kuat tekan turun 28% dibandingkan beton tanpa agregat daur ulang.

Pemakaian *fly ash* mengacu pada penelitian (Sugiharto, dkk, 2010) yang menyebutkan bahwa penggunaan *fly ash* sampai perbandingan *binder* 5:5. Penggunaan *fly ash* yang lebih banyak dari semen menyebabkan jumlah air yang

dibutuhkan semakin berkurang. Penelitian H.S. Peng, H.J. Chen & T. Yen menunjukkan bahwa penggunaan efek dari penggantian *fly ash* terhadap semen sebesar 10% dapat meningkatkan kuat tekan beton pada umur 28 hari, sedangkan untuk penggantian 30% akan menurunkan kuat tekan beton pada umur 28 hari tetapi akan menambah nilai *slump* (karena kehalusan butirannya dan bentuk partikelnya yang bulat). Penelitian ini menggunakan *fly ash* sebesar 20% dari berat *powder* (partikel dengan ukuran kurang dari 0,125 mm, EFNARC dengan maksud agar nilai kuat tekan tidak terlalu turun dan dapat meningkatkan nilai *slump*.

Penggunaan 1,5% *silica fume* yang digunakan berdasar penelitian Ardi,dkk (2010) yang menunjukan bahwa penggunaan *silica fume* tersebut dapat menghasilkan beton dengan kuat tekan 40 MPa pada umur 7 hari.

2.2. Landasan Teori

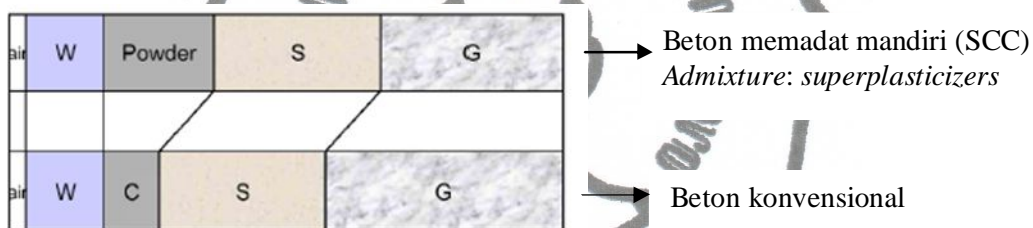
2.2.1. Beton Memadat Mandiri (*Self Compacting Concrete, SCC*)

SCC adalah beton yang mampu mengalir sendiri yang dapat dicetak pada bekisting dengan tingkat penggunaan alat pemadat yang sangat sedikit atau bahkan tanpa alat pemadat sama sekali. Beton ini dicampur memanfaatkan pengaturan ukuran agregat, porsi agregat, komponen halus dan *admixture superplasticizer* untuk mencapai kekentalan khusus yang memungkinkannya mengalir sendiri. SCC merupakan penelitian yang sudah cukup lama dilakukan di Jepang mulai era tahun 1990-an. Dalam perkembangannya di masyarakat luas, SCC ini menawarkan banyak keuntungan, diantaranya pengerjaan pemadatan beton di lapangan tanpa memerlukan pekerja pemadat yang lebih banyak dan SCC ini juga dapat memenuhi tuntutan desainer untuk mewujudkan suatu struktur bentuk dan dengan tulangan yang kompleks (Okamura dan Ouchi, 2003).

SCC ini mampu mengalir melewati celah antar tulangan yang rumit tanpa vibrator karena viskositas atau kekentalan beton segar yang terkendali. Dalam pembuatan

SCC, perlu pengendalian penggunaan *superplasticizer* supaya diperoleh kekentalan khusus yang memungkinkan beton ini dapat mengalir. Selain itu, dengan ukuran agregat kasar yang tidak terlalu besar, beton ini jauh lebih mudah mengalir melewati celah antar tulangan.

Perbedaan utama SCC dengan beton konvensional terletak pada komposisi campuran beton, yaitu penggunaan porsi bahan pengisi yang cukup besar, sekitar 40 % dari volume total campuran beton. Bahan pengisi ini adalah pasir butiran halus dengan ukuran butiran maksimum (d_{max}) $\leq 0,125$ mm. Porsi besar bahan pengisi ini menyebabkan campuran beton cenderung berperilaku sebagai pasta (Okamura dan Ouchi, 2003).

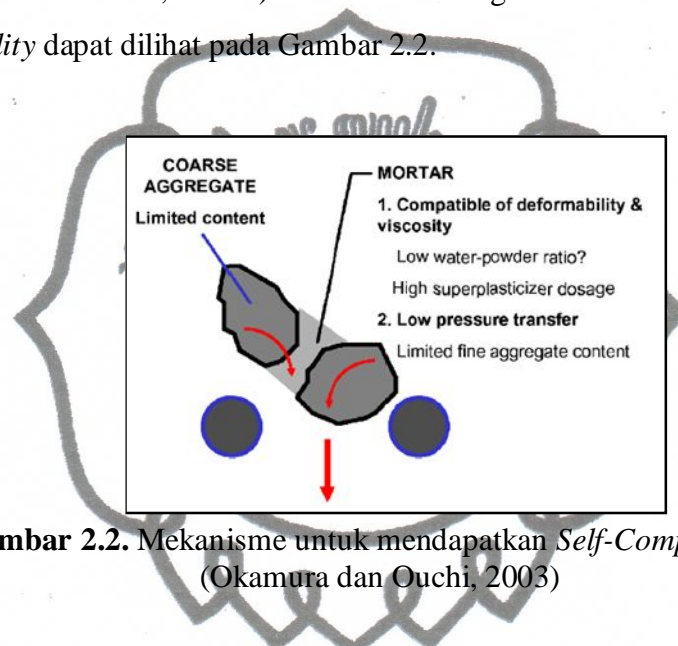


Gambar 2.1. Perbandingan proporsi campuran SCC dan beton konvensional (Okamura dan Ouchi, 2003)

Dari Gambar 2.1. dapat dilihat bahwa perbedaan proporsi campuran SCC dengan campuran konvensional terletak pada jumlah agregat kasar (G) dan jumlah *powder* (P) terhadap semen (C). *Powder* adalah semen yang dikombinasikan dengan partikel halus lainnya (ukuran butiran $< 0,125$ mm) seperti *fly ash* dan *silicafum*. Selain itu pada SCC juga digunakan *admixture* berupa *superplasticizers*. Tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada jumlah air (W) dan pasir (S).

Mengenai cara memperoleh *self compactibility*, menurut Okamura dan Ouchi (2003), kontak dan gesekan antar partikel agregat bertambah apabila jarak relatif antar partikel berkurang sehingga mengakibatkan meningkatnya *internal stress* pada saat pencetakan beton. Riset menunjukkan bahwa energi yang dibutuhkan

beton untuk mengalir digunakan untuk mengakomodasi peningkatan *internal stress* yang mengakibatkan terjadinya penggumpalan (*blockage*). Mengurangi jumlah agregat kasar dari jumlah normalnya akan efektif untuk menghindari terjadinya penggumpalan. Pasta dengan kekentalan tinggi juga dibutuhkan untuk menghindari penggumpalan (*blockage*) agregat kasar saat beton mengalir melalui tulangan. Kekentalan dengan kemampuan alir yang baik ini dapat dicapai dengan menambahkan *superplasticizers* dan menjaga rasio *air-powder* tetap rendah (Okamura dan Ouchi, 2003). Ilustrasi mengenai cara mendapatkan *self compactability* dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Mekanisme untuk mendapatkan *Self-Compactability* (Okamura dan Ouchi, 2003)

Menurut Muntu dan Gunawan (2004) dalam Adrianto (2010), suatu campuran beton dikatakan SCC jika memiliki sifat-sifat sebagai berikut :

a. Pada beton segar (*fresh concrete*)

SCC dalam keadaan segar harus memiliki tingkat *workability* yang baik yaitu:

- 1) *Filling ability* atau kemampuan campuran beton segar untuk mengisi ruangan. Dapat diuji menggunakan *slumpflow*, V-funnel
- 2) *Passing ability* atau kemampuan campuran beton segar untuk melewati tulangan. Dapat diuji menggunakan L-box, U-box
- 3) *Segregation resistance* atau ketahanan campuran beton segar terhadap segregasi. Dapat diuji menggunakan V-funnel.

b. Pada beton keras (*hardened concrete*)

- 1) Memiliki tingkat absorpsi dan permeabilitas yang rendah,
- 2) Mempunyai tingkat durabilitas yang tinggi,
- 3) Mampu membentuk campuran beton yang homogen.

Menurut *The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems* (EFNARC) beberapa kriteria teknis dari SCC adalah sebagai berikut:

Tabel 2.1. Kriteria SCC menurut EFNARC

Metode Pengujian	Satuan	Tipe jangkauan nilai	
		Minimal	Maksimal
<i>Slumpflow</i> dengan kerucut Abrams	mm	650	800
$T_{50\text{cm}}$ <i>slumpflow</i>	detik	2	5
J-ring	mm	0	10
V-funnel	detik	6	12
L-box	(h2/h1)	0,8	1,0

Sumber : *EFNARC Specification and Guidelines for SCC (2002)*

Metode pengujian pada Tabel 2.1. bukan merupakan syarat mutlak beton untuk dapat dikategorikan sebagai SCC. Beberapa pengujian memungkinkan untuk tidak dilakukan, tergantung dari kegunaan SCC yang akan diproduksi.

Pada beton yang direncanakan sebagai beton bertulang, harus dilakukan pengujian *J-ring* untuk mengetahui parameter beton ketika melewati tulangan. Sedangkan pada penggunaannya sebagai perkerasan (*rigid pavement*) parameter utama SCC yang dibutuhkan adalah *flowability*, seperti pada penelitian yang dilakukan oleh Wang dkk. (2005), dari daftar metode pengujian yang terdapat pada Tabel 2.1. yang dilakukan hanya metode pengujian *slump flow* dengan kerucut *Abrams*.

2.2.2. Beton Daur Ulang Memadat Mandiri

Beton daur ulang memadat mandiri adalah beton yang memiliki kemampuan mengalir mengisi cetakan beton dan memadat sendiri tanpa ataupun dengan sedikit bantuan alat penggetar yang memanfaatkan agregat daur ulang sebagai pengganti agregat alami.

2.2.3. Material Penyusun Beton Daur Ulang Memadat Mandiri

2.2.3.1. Semen Portland

Semen portland dihasilkan dengan cara menghaluskan klinker yang terdiri dari silikat-silikat kalsium yang bersifat hidrolis dengan gips sebagai bahan tambahan (PUBI-1982, dalam Tjokrodinuljo, 1996). Fungsinya untuk merekatkan butir-butir agregat agar terjadi suatu massa yang padat dan juga untuk mengisi rongga-rongga antar butir agregat. Empat unsur yang paling penting dalam semen adalah:

- Trikalsium silikat* (C_3S) atau $3CaO.SiO_2$
- Dikalsium silikat* (C_2S) atau $2CaO.SiO_2$
- Trikalsium aluminat* (C_3A) atau $3CaO.Al_2O_3$
- Tetrakalsium aluminoforit* (C_4AF) atau $4CaO.Al_2O_3.FeO_2$

Jenis-jenis semen portland yang sering digunakan dalam konstruksi serta penggunaannya dicantumkan dalam Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Jenis semen portland di Indonesia sesuai SII 0013-81

Jenis semen	Karakteristik umum
Jenis I	Semen portland untuk penggunaan umum yang tidak memerlukan persyaratan khusus seperti disyaratkan pada jenis-jenis lain
Jenis II	Semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan terhadap sulfat dan panas hidrasi sedang
Jenis III	Semen portland yang dalam penggunaannya menuntut persyaratan kekuatan awal yang tinggi setelah pengikatan terjadi
Jenis IV	Semen portland yang dalam penggunaannya menuntut persyaratan panas hidrasi yang rendah
Jenis V	Semen portland yang dalam penggunaannya menuntut persyaratan ketahanan yang tinggi terhadap sulfat

Sumber :Kardiyono Tjokrodinuljo (1996)

Semen yang digunakan pada penelitian ini adalah *Ordinary Portland Cement* (OPC). Semen ini tidak memiliki bahan tambah seperti *pozzoland*, *fly ash*, *slag* ataupun zat *additive* semen lainnya, sehingga diharapkan dapat diketahui pengaruh penggunaan *fly ash* yang digunakan dalam penelitian ini.

2.2.3.2. Agregat

Agregat adalah butiran mineral alami yang berfungsi sebagai bahan pengisi dalam campuran mortar atau beton. Agregat ini menempati sebanyak 60 % - 80 % dari volume mortar atau beton, sehingga pemilihan agregat merupakan suatu bagian penting dalam pembuatan mortar atau beton (Mulyono, 2004). Berdasarkan ukuran besar butirnya, agregat yang dipakai dalam adukan beton dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu agregat halus dan agregat kasar.

a. Agregat Halus

Menurut Tjokrodinuljo (1996), agregat halus adalah agregat yang berbutir kecil antara 0,15 mm dan 5 mm. Dalam pemilihan agregat halus harus benar-benar memenuhi persyaratan yang telah ditentukan. Karena sangat menentukan dalam hal kemudahan pengerjaan (*workability*), kekuatan (*strength*), dan tingkat keawetan (*durability*) dari beton yang dihasilkan. Pasir sebagai bahan pembentuk mortar bersama semen dan air, berfungsi mengikat agregat kasar menjadi satu kesatuan yang kuat dan padat.

Berdasarkan ASTM C 125-03, agregat halus adalah agregat yang lolos saringan 4,75 mm (No. 4) dan tertahan pada saringan 75 μ m (No. 200)

Menurut PBI 1971 (NI-2) pasal 33, syarat-syarat agregat halus (pasir) adalah sebagai berikut :

- 1) Agregat halus terdiri dari butiran-butiran tajam dan keras, bersifat kekal dalam arti tidak pecah atau hancur oleh pengaruh cuaca, seperti panas matahari dan hujan.
- 2) Agregat halus tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 5 % terhadap jumlah berat agregat kering. Apabila kandungan lumpur lebih dari 5 %, agregat halus harus dicuci terlebih dahulu.
- 3) Agregat halus tidak boleh mengandung bahan-bahan organik terlalu banyak. Hal demikian dapat dibuktikan dengan percobaan warna dari *Abrams Header* dengan menggunakan larutan NaOH.
- 4) Agregat halus terdiri dari butiran-butiran yang beranekaragam besarnya dan apabila diayak dengan susunan ayakan yang ditentukan dalam pasal 3.5 ayat 1 (PBI 1971), harus memenuhi syarat sebagai berikut :
 - (a) Sisa di atas ayakan 4 mm , harus minimum 2 % berat.
 - (b) Sisa di atas ayakan 1 mm , harus minimum 10 % berat.
 - (c) Sisa di atas ayakan 0,25 mm , harus berkisar antara 80 % - 90 % berat.

Pasir di dalam campuran beton sangat menentukan dalam hal kemudahan pengerjaan (*workability*), kekuatan (*strength*), dan tingkat keawetan (*durability*) dari beton yang dihasilkan. Untuk memperoleh hasil beton yang seragam, mutu pasir harus dikendalikan. Oleh karena itu pasir sebagai agregat halus harus memenuhi gradasi dan persyaratan yang ditentukan. Batasan susunan butiran agregat halus dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Batasan susunan butiran agregat halus

Ukuran saringan (mm)	Persentase lolos saringan			
	Daerah 1 (Pasir Kasar)	Daerah 2 (Pasir Agak Kasar)	Daerah 3 (Pasir Agak Halus)	Daerah 4 (Pasir Halus)
10,00	100	100	100	100
4,80	90-100	90-100	90-100	95-100
2,40	60-95	75-100	85-100	95-100
1,20	30-70	55-90	75-100	90-100
0,60	15-34	35-59	60-79	80-100
0,30	5-20	8-30	12-40	15-50
0,15	0-10	0-10	0-10	0-15

Sumber : Kardiyono Tjokrodinuljo (1996)

b. Agregat Kasar Alami

Menurut Tjokrodinuljo (1996) disebutkan bahwa agregat kasar adalah agregat yang mempunyai ukuran butir-butir besar antara 5 mm dan 40 mm. Sifat dari agregat kasar mempengaruhi kekuatan akhir beton keras dan daya tahannya terhadap disintegrasi beton, cuaca dan efek-efek perusak lainnya. Agregat kasar mineral ini harus bersih dari bahan-bahan organik dan harus mempunyai ikatan yang baik dengan semen.

Berdasarkan ASTM C 125-03, agregat kasar adalah suatu agregat yang tertahan pada saringan 4,75 mm (No. 4).

Sifat-sifat bahan bangunan sangat perlu untuk diketahui, karena dengan mengetahui sifat dan karakteristik dari bahan tersebut, kita dapat menentukan langkah-langkah yang diambil dalam menangani bahan bangunan tersebut. Sifat-sifat dari agregat kasar yang perlu untuk diketahui antara lain ketahanan (*hardness*), bentuk dan tekstur permukaan (*shape and texture surface*), berat jenis agregat (*specific gravity*), ikatan agregat kasar (*bonding*), modulus halus butir (*fineness modulus*), dan gradasi agregat (*grading*).

Menurut PBI 1971 (NI-2) pasal 3.4 syarat-syarat agregat kasar adalah sebagai berikut :

- 1) Agregat kasar harus terdiri dari butir-butir keras dan tidak berpori. Agregat kasar yang mengandung butir-butir pipih hanya dapat dipakai apabila jumlah butir-butir pipih tersebut tidak melebihi 20 % dari berat agregat seluruhnya. Butir-butir agregat kasar harus bersifat kekal, artinya tidak pecah atau hancur oleh pengaruh cuaca, seperti terik matahari dan hujan.
- 2) Agregat kasar tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 1 % yang ditentukan terhadap berat kering. Apabila kadar lumpur melampaui 1 % maka agregat kasar harus dicuci.
- 3) Agregat kasar tidak boleh mengandung zat-zat yang dapat merusak beton, seperti zat-zat yang reaktif alkali.

4) Kekerasan butir-butir agregat kasar yang diperiksa dengan bejana penguji dari Rudelof dengan beton penguji 20 ton, yang harus memenuhi syarat-syarat :

(a) Tidak terjadi pembubukan sampai fraksi 9,5-19 mm lebih dari 24 % berat.

(b) Tidak terjadi pembubukan sampai 19-30 mm lebih dari 22 % berat.

Kekerasan ini dapat juga diperiksa dengan mesin *Los Angeles*. Dalam hal ini tidak boleh terjadi kehilangan berat lebih dari 50 %.

5) Agregat kasar harus terdiri dari butir-butir yang beranekaragam besarnya dan apabila diayak dengan susunan ayakan yang ditentukan dalam pasal 3.5 ayat 1 PBI 1971, harus memenuhi syarat sebagai berikut :

(a) Sisa diatas ayakan 31,5 mm harus 0 % berat .

(b) Sisa diatas ayakan 4 mm harus berkisar antara 90 % dan 98 % berat.

(c) Selisih antara sisa-sisa kumulatif diatas dua ayakan yang berurutan, maksimum 60 % dan minimum 10 % berat.

Batasan susunan butiran agregat kasar dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4. Persyaratan gradasi agregat kasar

Ukuran saringan (mm)	Persentase lolos saringan	
	40 mm	20 mm
40	95-100	100
20	30-70	95 – 100
10	10-35	22-55
4,8	0-5	0-10

Sumber : Kardiyono Tjokrodinuljo (1996)

Susunan untuk butiran (gradasi) yang baik akan dapat menghasilkan kepadatan (*density*) maksimum dan porositas (*voids*) minimum. Sifat penting dari suatu agregat (baik kasar maupun halus) ialah kekuatan hancur dan ketahanan terhadap benturan yang dapat mempengaruhi ikatannya dengan pasta semen, porositas dan karakteristik penyerapan air yang mempengaruhi daya tahan terhadap proses pembekuan waktu musim dingin dan agresi kimia, serta ketahanan terhadap penyusutan (Tjokrodinuljo, 1996).

Bentuk dari partikel agregat dapat mempengaruhi kebutuhan air, *workability*, kemampuan untuk diangkut (*mobility*), *bleeding*, kemampuan untuk membentuk hasil akhir yang baik (*finishability*) dan kekuatan. Partikel yang lebih bulat (*rounded*) memberikan *workability* yang lebih baik dibandingkan dengan partikel yang bentuknya pecah atau bersudut. Hal ini disebabkan karena sedikitnya bidang kontak antar partikel yang dialami oleh partikel bulat, sehingga gaya gesek antar partikel menjadi lebih kecil dan aliran beton menjadi lebih mudah. Selain itu, dengan faktor air semen yang sama, bentuk agregat bulat memberikan *workability* yang lebih baik dibandingkan agregat berbentuk pecah. Hal ini terjadi karena pada agregat pecah, jumlah air yang meresap ke pori cukup banyak akibat dari luasan permukaannya yang besar (www.cement.org).

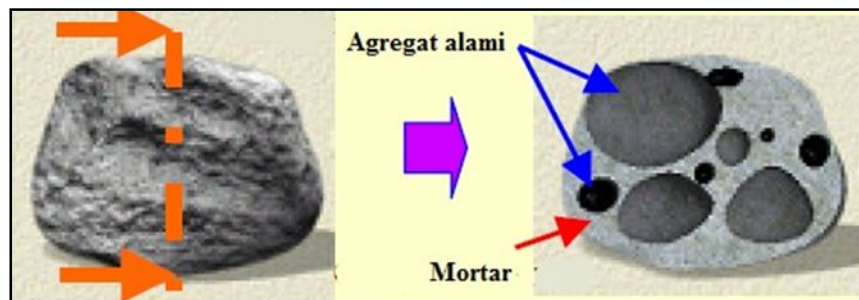
Bentuk tekstur permukaan agregat juga mempengaruhi kuat tekan pada beton. Campuran yang menggunakan agregat bertekstur kasar menyebabkan ikatan antara agregat dengan pasta lebih besar sehingga menghasilkan kekuatan yang lebih tinggi apabila dibandingkan dengan agregat bertekstur halus (www.engr.psu.edu).

c. Agregat Kasar Daur Ulang

Definisi agregat daur ulang menurut ACI Educational Bulletin EI-07 (2007) adalah agregat yang didapatkan dari dari beton yang rusak, dibuang tulangnya dan dihancurkan dalam ukuran dan gradasi yang lebih spesifik.

Kinerja material dan kinerja struktur beton agregat daur ulang cenderung berbeda dibandingkan kinerja beton beragregat normal. Berdasarkan beberapa hasil studi eksperimental, agregat daur ulang yang berupa agregat kasar mengandung mortar sebesar 25 % hingga 45 %, sedangkan agregat daur ulang berupa agregat halus mengandung mortar 70 % hingga 100 %. Kandungan mortar tersebut mengakibatkan berat jenis agregat menjadi lebih kecil, lebih porous atau berpori, sehingga kekerasannya berkurang, bidang temu (*interface*) yang bertambah, dan unsur-unsur kimia agresif lebih mudah masuk dan merusak. Disamping itu, pada

agregat daur ulang juga terdapat retak mikro, dimana retak tersebut dapat ditimbulkan oleh tumbukan mesin pemecah batu (*stone crusher*) pada saat proses produksi agregat daur ulang, yang tidak dapat membelah daerah lempengan atau patahan pada agregat alam. Retak tersebut tertahan oleh kekangan mortar yang menyelimuti agregat alam (Suharwanto, 2005 dalam Susanto, 2008). Keberadaan mortar pada agregat daur ulang dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Potongan agregat daur ulang (Dosho, 2007)

Beberapa perbedaan kualitas, sifat-sifat fisik dan kimia agregat daur ulang tersebut menyebabkan perbedaan sifat-sifat (propertis) material beton yang dihasilkan (Suharwanto, 2005 dalam Susanto, 2008). Perbedaan yang diamati diantaranya adalah menurunnya kuat tekan, modulus elastisitas, dan kuat tariknya. Selain itu kemiringan kurva hubungan tegangan-regangan uniaksial dan multiaksial menjadi landai pada saat sebelum beban puncak dan menjadi curam setelah beban puncak. Hal ini diakibatkan oleh lemahnya ketegaran retak dan bertambahnya jumlah bidang temu, yang memperlemah ikatan antara agregat kasar dan mortar. Disamping itu, hubungan tegangan-regangan puncak multi aksial juga menjadi menurun. Perbedaan sifat-sifat material beton agregat daur ulang tersebut mengakibatkan beberapa persamaan yang menggambarkan hubungan antara kuat tarik dan kuat tekan, modulus elastisitas dan kuat tekan, dan model konstitutif tegangan-regangan beton uniaksial, tegangan-regangan puncak multiaksial. Beberapa persamaan dan model konstitutif telah diperoleh dari hasil studi eksperimental untuk menggambarkan perbedaan sifat-sifat dan perilaku mekanik beton agregat daur ulang.

Perbedaan sifat-sifat dan perilaku mekanik material beton agregat daur ulang juga berpengaruh pada kinerja dan perilaku mekanik elemen struktur yang dibentuknya (Suharwanto, 2005 dalam Susanto, 2008). Perbedaan kinerja dan perilaku mekanik elemen struktur tersebut diantaranya adalah kemampuan deformabilitas, nilai daktilitas, nilai kekakuan, dan pola retak. Deformabilitas elemen struktur beton agregat daur ulang menjadi lebih besar pada saat beban yang sama, nilai daktilitas dan kekakuan menjadi kecil, dan pola retak menjadi lebih banyak hingga ke daerah momen dan geser (antara perletakan dan titik beban), bila dibandingkan dengan kinerja dan perilaku beton agregat alam.

Proses produksi agregat daur ulang hampir sama dengan proses produksi agregat alami. Perbedaan yang mendasar terletak pada proses memisahkan agregat dari komponen yang tidak diinginkan, seperti besi tulangan, kayu, kertas, dan sebagainya. Seperti tampak pada Gambar 2.4. langkah utama pada proses produksi agregat daur ulang yaitu: pemilihan pendahuluan (*preliminary sorting*), penghancuran awal (*primary crushing*), pemisahan dari komponen yang tidak diinginkan (*impurity removal process*), penghancuran tahap kedua (*secondary crushing*) dan pengayakan menjadi ukuran tertentu (*sieving into different sizes*).



Gambar 2.4. Proses produksi agregat daur ulang di Tuen Mun Area 38 (Fong dan Yeung, 2003)

Proses *preliminary sorting* bertujuan untuk memisahkan material yang dapat didaur ulang dan yang tidak. Material yang dapat didaur ulang selanjutnya akan dihancurkan ke dalam ukuran tertentu, sedangkan yang tidak dapat didaur ulang dapat digunakan sebagai bahan timbunan / reklamasi.

Setelah melalui *preliminary sorting*, kemudian dilakukan *primary crushing*, yaitu menghancurkan material hingga berukuran ± 200 mm. Alat yang dapat digunakan adalah *jaw crusher* atau *impact crusher*. Kebanyakan tempat produksi agregat daur ulang di Britania menggunakan *jaw crusher* sedangkan di beberapa negara eropa lainnya menggunakan *impact crusher* (Lindsell & Mulheron, 1985 dalam O'Mahony, 1990). Perbedaan mendasar antara *jaw crusher* dan *impact crusher* adalah pada faktor reduksinya, secara umum *impact crusher* memiliki faktor reduksi yang besar. Faktor reduksi adalah perbandingan antara ukuran partikel yang masuk dengan ukuran partikel yang keluar (Lindsell & Mulheron, 1985 dalam O'Mahony, 1990). Gambar *jaw crusher* dan *impact crusher* masing-masing dapat dilihat pada Gambar 2.5 dan Gambar 2.6.



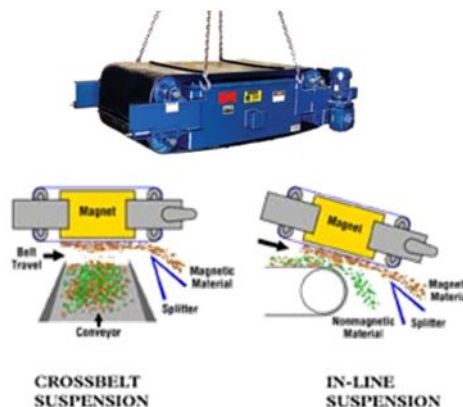
Gambar 2.5. Jaw crusher
(www.mine-engineer.com dan www.indonetwork.co.id)



Gambar 2.6. Impact crusher
(www.iconcrusher.org dan www.sbmcrusher.com)

Proses yang dilakukan setelah *primary crushing* adalah pemisahan komponen yang tidak diinginkan (*impurity removal process*). Pada proses ini, komponen yang tidak diinginkan akan dibuang. Menurut O'Mahony (1990), yang termasuk dalam *impurity removal process* adalah: membuang bagian yang mengandung besi menggunakan elektromagnet (*electromagnetic removing steel*), menyaring (*dry sieving*), dan pemisahan dengan menggunakan air (*wet separation*).

Pada proses *electromagnetic removing steel* umumnya magnet berada di atas *conveyor belt* di antara *primary crusher* dan *secondary crusher* seperti tampak pada Gambar 2.7. Pada proses *dry sieving*, partikel yang sangat halus dipisahkan, dan nantinya dapat dikombinasikan kembali untuk membuat agregat bergradasi baik. Kerugian utama pada proses *dry sieving* adalah banyaknya jumlah debu yang dihasilkan.



Gambar 2.7. Electromagnetic removing steel
(www.ratetechnologysystems.com)

Komponen lain yang memiliki berat jenis rendah misalnya : kayu, kertas, dan lain-lain, dipisahkan dengan metode *wet separation* yakni pemisahan dengan menggunakan air seperti tampak pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8. *Wet separation*
(www.moerschengmbh.de)

Apabila setelah melalui proses di atas masih terdapat komponen yang tidak diinginkan (tidak terangkat magnet dan tidak terapung di air, contohnya: kaca, porselen, keramik dan lain-lain), maka dilakukan pemilihan secara manual menggunakan tangan operator pada agregat yang berjalan di atas *conveyor belt*. Hal ini penting dilakukan mengingat adanya standar spesifikasi di beberapa negara mengenai jumlah maksimal dari komponen yang tidak diinginkan (*impurities*) ini, sebagai contoh:

- 1) Jepang : maksimal 3% (Dosho, 2007)
- 2) Australia : maksimal 2% (CSIRO, 1998)
- 3) Inggris : untuk keramik maksimal 5%,
untuk aspal maksimal 5%,
untuk kaca, plastik, dan lainnya maksimal 1% (BS 8500-2:02)
- 4) Brasil : kandungan non mineral (kayu, plastik, kaca, keramik, dan lainnya) maksimal 2-3% (Oliveira et. al., 2004)
- 5) RILEM : kurang dari 1% untuk kaca, aspal, material lunak lainnya (RILEM, 1994).

Proses *secondary crushing* dilakukan dengan menggunakan alat bernama *cone crusher* yang dapat menghancurkan agregat hingga ukuran < 40 mm. Gambar dan potongan *cone crusher* dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9. Cone crusher
(<http://www.mine-engineer.com> dan www.iconcrusher.org)

Agregat dari hasil *secondary crushing* kemudian diayak ke dalam ukuran yang berbeda-beda (40 mm, 20 mm, 10 mm, 5 mm) dan selanjutnya dikumpulkan pada tempat penimbunan agregat (*stockpile*) berdasarkan ukurannya.

Sampai saat ini, produksi agregat daur ulang secara massal dan komersial belum dilakukan di Indonesia, sehingga pada penelitian ini, sumber agregat daur ulang yang digunakan berasal dari sisa benda uji kuat tekan berbentuk silinder berdiameter 15 cm dan tinggi 30 cm dari Laboratorium Bahan dan Material Universitas Sebelas Maret Surakarta. Sisa benda uji tersebut kemudian ditumbuk secara manual dan ditetapkan ukuran terbesarnya adalah 20 mm.

2.2.3.3. Air

Air merupakan bahan dasar pembuat dan perawatan beton, penting namun harganya paling murah. Air diperlukan untuk bereaksi dengan semen, serta untuk menjadi bahan pelumas antara butir-butir agregat agar mudah dikerjakan dan dipadatkan. Air yang memenuhi syarat sebagai air minum, memenuhi syarat pula untuk bahan campuran beton. Tetapi tidak berarti air harus memenuhi persyaratan air minum. Jika diperoleh air dengan standar air minum, maka dapat dilakukan pemeriksaan secara visual yang menyatakan bahwa air tidak berwarna, tidak

commit to user

berbau, dan cukup jernih. Menurut Tjokrodimuljo (1996), dalam pemakaian air untuk beton sebaiknya air memenuhi syarat sebagai berikut:

- a. Tidak mengandung lumpur (benda melayang lainnya) lebih dari 2 gram/liter.
- b. Tidak mengandung garam-garam yang merusak beton (asam, zat organik, dll) lebih dari 15 gram/liter.
- c. Tidak mengandung klorida (Cl) lebih dari 0,5 gram/liter.
- d. Tidak mengandung senyawa sulfat lebih dari 1 gram/liter.

Menurut Tjokrodimuljo (1996) kekuatan beton dan daya tahannya berkurang jika air mengandung kotoran. Pengaruh pada beton diantaranya pada lamanya waktu ikatan awal serta kekuatan beton setelah mengeras. Adanya lumpur dalam air diatas 2 gram/liter dapat mengurangi kekuatan beton. Air dapat memperlambat ikatan awal beton sehingga beton belum mempunyai kekuatan dalam umur 2-3 hari. *Sodium karbonat* dan *potasium* dapat menyebabkan ikatan awal sangat cepat dan konsentrasi yang besar akan mengurangi kekuatan beton.

2.2.3.4. Bahan Tambah

a. Pengertian Bahan Tambah

Bahan tambah merupakan bahan selain air, agregat, semen dan perkuatan dengan menggunakan serat yang digunakan sebagai bahan campuran semen untuk memodifikasi sifat beton segar, waktu pengerasan, dan kinerja beton saat keras dan ditambahkan ke dalam adukan sebelum atau selama proses pencampuran (*mixing*) (ASTM C 125, 2003)

b. *Superplasticizer*

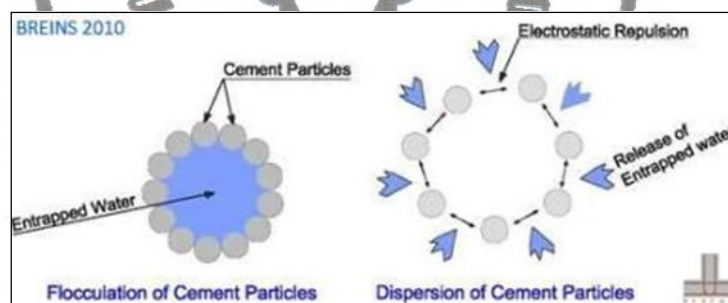
Dalam penelitian ini digunakan bahan tambah *superplasticizer*, yaitu Sika Viscocrete 10. Bahan ini merupakan *superplasticizer* untuk beton dan mortar, dan digunakan untuk menghasilkan beton dengan tingkat *flowability* yang tinggi. Biasanya digunakan pada beton mutu tinggi (*High Performance Concrete*), beton

memadat mandiri (*Self Compacting Concrete*), beton massa (*Mass Concrete*), dan beton yang menuntut *workability time* lebih lama terutama untuk perjalanan jauh. Adapun spesifikasi (*technical data*) dari Sika Viscocrete 10 dapat dilihat pada Tabel 2.5.

Tingginya *flowability* karena penambahan *superplasticizer* dikarenakan partikel-partikel semen lebih tersebar sehingga air yang menggumpal atau “terperangkap” pada semen menjadi lebih sedikit. Terdapat dua macam mekanisme penyebaran partikel-partikel semen akibat penambahan *superplasticizers* yaitu:

1) Gaya tolak-menolak elektrostatis (*electrostatic repulsion*)

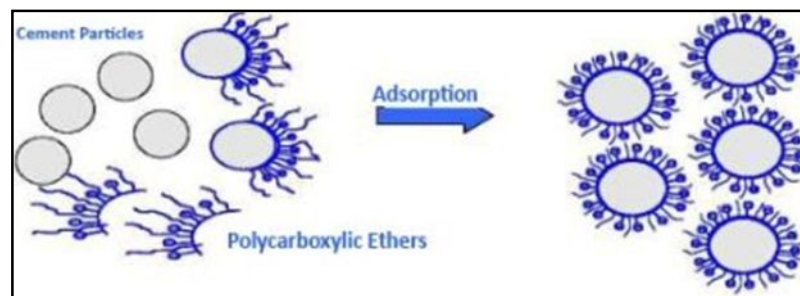
Proses ini menjadikan nilai potensial zeta lebih negatif sehingga dapat memperbesar gaya tolak-menolak dari partikel-partikel yang bermuatan negatif (www.buildingresearch.com). Ilustrasi mengenai proses *electrostatic repulsion* dapat dilihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10. Mekanisme penyebaran partikel semen berdasarkan gaya tolak-menolak elektrostatis (*electrostatic repulsion*) (www.buildingresearch.com)

2) Proses pencegahan bentuk (*steric hindrance*)

Non ionic polymer yang terserap akan memperlemah gaya tarik-menarik antara partikel-partikel padat. Hal ini menyebabkan kemampuan penyebaran semen lebih stabil sehingga dapat menahan ketersebaran tersebut dalam waktu yang lama dan mengakibatkan campuran beton mempunyai ketahanan alir (*slump retention*) untuk waktu yang cukup lama pula (www.buildingresearch.com). Proses *steric hindrance* dapat dilihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11. Mekanisme *steric hindrance*

(www.buildingresearch.com)

Penambahan *superplasticizers* secara tidak langsung dapat menambah kuat tekan pada beton. Hal ini disebabkan karena dengan jumlah air yang sedikit, telah dicapai *workability* yang memadai. Jumlah air yang sedikit tersebut berpengaruh terhadap faktor air-semen (fas), yang mana semakin kecil nilai fas semakin besar kuat tekan yang dapat dicapai.

Tabel 2.5. Data teknis *Sika Viscocrete 10*

Bentuk	Cair
Warna	<i>Pale Straw</i>
Kerapatan relatif @ 20°C	1,06
Kandungan material kering %	30
Dosis % berat semen	0,2-1,5
pH	4,5
<i>Water Soluble Chloride Content %</i>	<0,1 <i>Chloride free</i>
<i>Equivalent Sodium Oxide as Na₂O</i>	0,30

Sumber: www.sika.co.id

c. Silika (*Silicafume*)

Silicafume yang digunakan adalah SikaFume produksi PT Sika Indonesia. *Silicafume* merupakan bahan tambah untuk beton yang berbentuk debu halus dan memiliki ukuran partikel sangat kecil (sekitar 1/100 ukuran rata-rata partikel semen) dan merupakan hasil sampingan abu pembakaran dari proses pembuatan *silicon metal* atau *silicon alloy* dalam tungku pembakaran listrik.

Fungsi dari *silicafume* adalah untuk mengurangi porositas beton, sehingga memiliki pengaruh pada kekuatan beton dan sering digunakan untuk menghasilkan beton dengan mutu tinggi.

Mikrosilika ini bersifat *pozzolan*, dengan kadar kandungan senyawa *silica-dioksida* (SiO_2) yang sangat tinggi ($> 90 \%$).

Kegunaan dari *silicafume* pada dasarnya untuk menaikkan kepadatan beton, meningkatkan durabilitas beton, dan juga kuat tekan beton.

Manfaat penggunaan debu silika (*silicafume*) di antaranya:

- 1) Meningkatkan *workability* dengan waktu pengerjaan yang lebih lama.
- 2) Meningkatkan *cohesiveness* dan *stability*.
- 3) Meningkatkan durabilitas beton.
- 4) Permeabilitas beton sangat berkurang.
- 5) Meningkatkan ketahanan beton terhadap reaksi karbonasi.
- 6) Mengurangi infiltrasi klorida atau garam.
- 7) Meningkatkan kekuatan beton pada umur awal.

d. Abu Terbang (*Fly ash*)

Pengertian *fly ash* adalah serbuk halus sisa hasil pembakaran batu bara yang dibuang melalui cerobong. Sisa hasil pembakaran selain dari batu bara tidak dapat dikatakan sebagai *fly ash*. Pembakaran pada industri pengolahan sampah kota dikatakan sebagai *incinerator ash* (ASTM C 618)

Menurut ASTM C 618, *fly ash* dibagi menjadi 3 kelas yaitu :

- 1) Kelas N

Material yang memenuhi kriteria kelas ini antara lain abu vulkanik dan batuan apung (*pumicities*).

2) Kelas F

Didapat dari pembakaran batu bara *anthracite*, memiliki sifat *pozzolanic*.

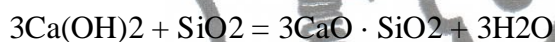
3) Kelas C

Didapat dari pembakaran batu bara *lignite*, selain memiliki sifat *pozzolanic* juga sedikit bersifat *cementitious*. Kandungan kapur (*lime*) yang dimiliki dapat mencapai lebih dari 10% .

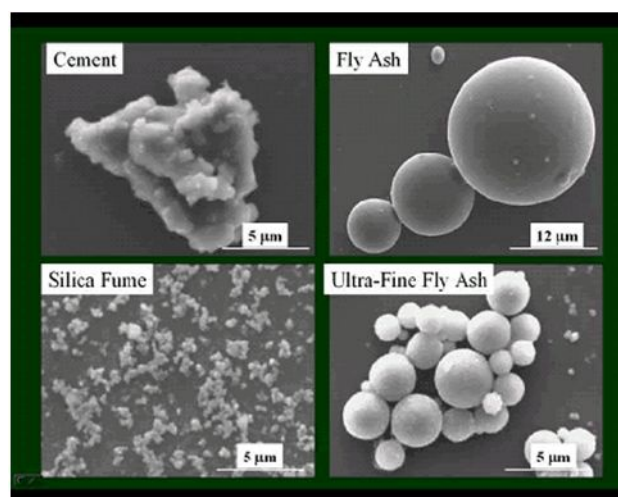
Ketika *fly ash* dicampurkan ke beton, reaksi *pozzolanic* terjadi antara *silica* (SiO_2) dan kalsium hidroksida (Ca(OH)_2) atau kapur yang merupakan produk hidrasi dari semen *Portland*. Penambahan *fly ash* pada semen *Portland* meningkatkan penyebaran partikel semen dan semen menjadi lebih reaktif (Dhir *et al*, 1986 pada *Advanced Concrete Technology*, 2003) .

Reaksinya adalah sebagai berikut:

Kalsium hidroksida + *silica* = trikalsium silikat + air



Pada Gambar 2.12 terlihat jelas perbedaan bentuk dan ukuran partikel dari semen, *fly ash*, dan *silicafume*. Bentuk partikel semen dan *silicafume* bersudut dan tidak bulat, sedangkan untuk *fly ash* cenderung bulat. Untuk ukuran partikel, berturut-turut dari yang terbesar hingga yang terkecil adalah: semen, *fly ash*, dan *silicafume*.



Gambar 2.12. Bentuk dan ukuran partikel semen, *fly ash*, dan *silicafume* menurut hasil SEM (Scanning Electronic Microscope).

(www.fhwa.dot.gov)

2.2.4. Kuat Tekan Beton

Kuat tekan adalah besarnya beban persatuan luas, yang menyebabkan benda uji hancur bila dibebani dengan gaya tekan tertentu pada mesin uji. Kuat tekan beton ditentukan oleh perbandingan semen dan agregat halus, agregat kasar dan air dari berbagai jenis campuran. Perbandingan air terhadap semen merupakan faktor utama dalam penentuan kuat tekan beton.

Kuat tekan beton biasanya berhubungan dengan sifat-sifat lain. Apabila kuat tekan beton tinggi, sifat-sifat lainnya juga cenderung baik, misalnya kuat lentur, modulus elastisitas, dan lain-lain. Kekuatan tekan beton dapat mencapai 2000 kg/cm² atau lebih, tergantung pada jenis campuran, sifat-sifat agregat, serta kualitas perawatan. Kekuatan tekan beton yang paling umum digunakan di Indonesia adalah sekitar 200 kg/cm² sampai 500 kg/cm².

Beton relatif kuat menahan tekan. Keruntuhan beton sebagian disebabkan karena rusaknya ikatan pasta dan agregat. Falahudin (2010) menyatakan bahwa besarnya kuat tekan beton dipengaruhi oleh sejumlah faktor, antara lain:

- a. Faktor air semen. Hubungan faktor air semen dan kuat tekan beton secara umum adalah bahwa semakin rendah nilai faktor air semen, semakin tinggi kuat tekan betonnya. Namun kenyataannya, pada suatu nilai faktor air semen semakin rendah, maka beton semakin sulit dipadatkan. Dengan demikian, ada suatu nilai faktor air semen yang optimal dan menghasilkan kuat tekan yang maksimal.
- b. Jenis semen dan kualitasnya mempengaruhi kekuatan rata-rata dan kuat batas beton.
- c. Jenis dan lekuk-lekuk (*relief*) bidang permukaan agregat. Kenyataan menunjukkan bahwa penggunaan agregat batu pecah akan menghasilkan beton dengan kuat tekan yang lebih besar daripada agregat bulat.
- d. Efisiensi dari perawatan (*curing*). Kehilangan kekuatan sampai 40% dapat terjadi bila pengeringan terjadi sebelum waktunya. Perawatan adalah hal yang sangat penting pada pekerjaan di lapangan dan pada pembuatan benda uji.

- e. Suhu. Pada umumnya kecepatan pengerasan beton bertambah dengan bertambahnya suhu. Pada titik beku kuat tekan akan tetap rendah untuk waktu yang lama.
- f. Umur pada keadaan yang normal. Kekuatan beton bertambah dengan bertambahnya umur, tergantung pada jenis semen. Misalnya semen dengan kadar alumina tinggi menghasilkan beton yang kuat hancurnya pada 24 jam, mendekati kuat hancur semen *Portland* biasa pada 28 hari. Pengerasan berlangsung terus secara lambat sampai beberapa tahun.

Nilai kuat tekan beton didapat melalui pengujian standar menggunakan mesin uji dengan cara memberikan beban tekan bertingkat dengan kecepatan peningkatan beban tertentu atas benda uji silinder beton (diameter 150 mm, tinggi 300 mm) sampai hancur.

Kuat tekan beton dapat dihitung dengan Persamaan 2.1

$$f_c' = \frac{P_{\max}}{A} \dots\dots\dots(2.1)$$

dengan :

f_c' = kuat tekan beton yang didapat dari benda uji (MPa)

P_{\max} = beban tekan maksimum (N)

A = luas permukaan benda uji (mm^2)

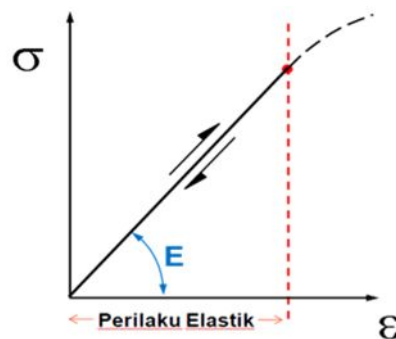
2.2.5. Modulus Elastisitas Beton

Modulus elastisitas merupakan suatu ukuran yang menunjukkan kekakuan dan ketahanan beton untuk menahan deformasi (perubahan bentuk). Suatu bahan apabila dibebani maka akan mengalami deformasi. Perbandingan nilai deformasi dengan ukuran awal benda uji disebut regangan. Modulus elastisitas merupakan perbandingan antara tegangan dan regangan dalam arah aksial. Semakin tinggi modulus elastisitas suatu bahan maka bahan tersebut semakin kuat menahan tegangan aksial akibat pembebanan dengan regangan yang sekecil mungkin.

Biasanya struktur yang mempunyai nilai modulus elastisitas yang besar akan bersifat getas atau kaku, umumnya material itu akan memiliki kuat tekan yang tinggi. Parameter ini sangat penting karena menunjukkan kemampuan beton untuk menahan beban maksimal sebelum struktur mengalami regangan atau lendutan.

Pada umumnya bahan, termasuk beton, memiliki daerah awal pada diagram tegangan-regangannya dimana bahan berkelakuan secara elastis dan linier. Kemiringan diagram tegangan-regangan dalam daerah elastis linier itulah yang dinamakan Modulus Elastisitas (E) atau *Modulus Young* (Timoshenko dan Gere, 2000).

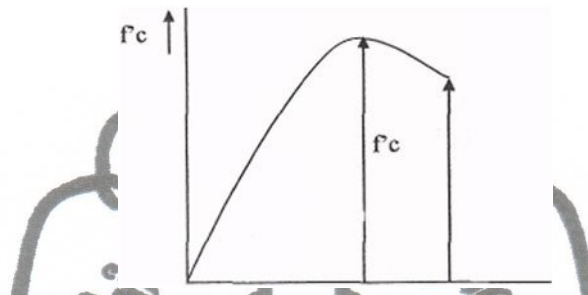
Kajian tentang hubungan tegangan-regangan beton perlu diketahui untuk menurunkan persamaan analisis dan perencanaan suatu bagian struktur. Kemampuan bahan untuk menahan beban yang didukungnya dan perubahan bentuk yang terjadi pada bahan itu amat tergantung pada sifat tegangan dan regangan tersebut.



Gambar 2.13. Kurva tegangan-regangan

Berdasarkan Gambar 2.13., modulus elastisitas yang besar menunjukkan kemampuan menahan tegangan yang cukup besar dalam kondisi regangan yang masih kecil, artinya bahwa beton tersebut mempunyai kemampuan menahan tegangan yang cukup besar akibat beban-beban yang terjadi pada suatu regangan (kemungkinan terjadi retak) yang kecil.

Pada baja terjadi perubahan bentuk secara elastis pada pembebanan di bawah elastis, sehingga beban uji kembali pada bentuk semula bila pembebanan ditiadakan. Beton berubah bentuk mengikuti regangan elastis dan sebagian mengalami regangan plastis. Hal ini digambarkan pada Gambar 2.14. yang memperlihatkan kurva tegangan-regangan tipikal yang diperoleh dari percobaan benda uji silinder beton dan diberi beban tekan uniaksial selama beberapa menit.



Gambar 2.14. Kurva tegangan regangan beton yang diberi tekanan
(Nawy, 1990: 44)

Bagian kurva pada Gambar 2.14. (sampai sekitar 40% f_c') pada umumnya dapat dianggap linier untuk tujuan praktis. Setelah mendekati 70% tegangan hancur, material banyak kehilangan kekakuannya sehingga kurva tidak linier lagi.

Menurut Murdock dan Brook (1991), faktor yang mempengaruhi modulus elastisitas adalah :

a. Kelembaban

Beton dengan kandungan air yang lebih tinggi mempunyai modulus elastisitas yang lebih tinggi daripada beton dengan spesifikasi yang sama.

b. Agregat

Nilai modulus dan proporsi volume agregat dalam campuran mempengaruhi modulus elastisitas beton. Semakin tinggi modulus agregat dan semakin besar proporsi agregat dalam beton, semakin tinggi pula modulus elastisitas beton tersebut.

c. Umur beton

Modulus elastisitas semakin besar seiring dengan bertambahnya umur beton seperti kuat tekannya, namun modulus elastisitas bertambah lebih cepat daripada kekuatan.

d. *Mix Design* beton

Jenis beton memberikan nilai modulus elastisitas yang berbeda pada umur dan kekuatan yang sama.

Murdock dan Brook (1991) menjelaskan bahwa modulus elastisitas dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.2 - 2.4

$$\text{Modulus elastisitas } (E) = \frac{\sigma}{\varepsilon} \dots\dots\dots(2.2)$$

$$\text{Tegangan } (\sigma) = \frac{P}{A} \dots\dots\dots(2.3)$$

$$\text{Regangan } (\varepsilon) = \frac{\Delta l}{l} \dots\dots\dots(2.4)$$

dengan :

E = modulus elastisitas (N/mm²)

σ = tegangan (N/mm²)

ε = regangan (tanpa satuan)

P = beban yang diberikan (N)

A = luas tampang melintang (mm²)

Δl = perubahan panjang akibat beban P (mm)

l = panjang semula (mm)

Berdasarkan rekomendasi ASTM C 469-94, perhitungan modulus elastisitas beton yang digunakan adalah *modulus chord*, adapun perhitungan modulus elastisitas *chord* (Ec) dapat dilihat pada Persamaan 2.5.

$$\text{Modulus elastisitas } (E_c) = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0,00005} \dots\dots\dots(2.5)$$

dimana:

Ec = modulus chord (MPa)

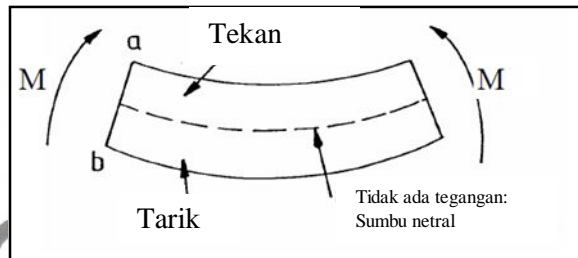
S₂ = tegangan sebesar 40% x fc' (MPa)

S₁ = tegangan yang bersesuaian dengan regangan arah longitudinal akibat tegangan sebesar 0,00005 (MPa)

ε_2 = regangan longitudinal akibat tegangan S₂

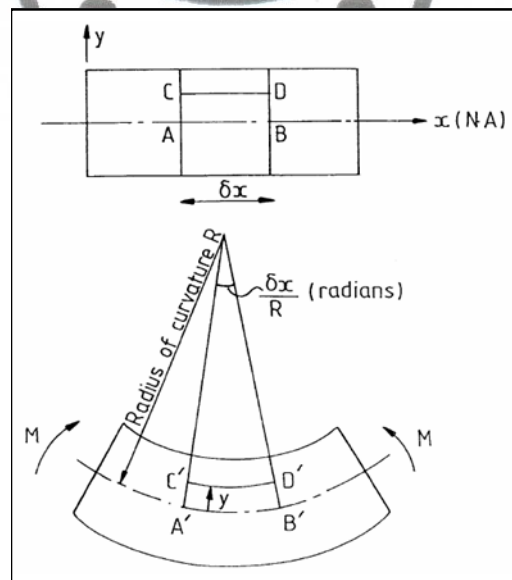
2.2.6. Kuat Lentur Beton (*Modulus of Rupture*)

Pengertian *modulus of rupture* adalah kuat tarik maksimum yang secara teoritis dicapai pada serat bagian bawah dari sebuah balok uji. Nilainya bergantung pada dimensi dari balok uji dan susunan beban (Neville, 1987).



Gambar 2.15. Balok yang melengkung karena momen
(spatargiri.files.wordpress.com/2010/04/sm_lecture_6.pdf)

Pada Gambar 2.15. balok melengkung / melentur karena mengalami momen. Pada bagian bawah, balok mengalami gaya tarik sedangkan pada bagian atas mengalami tekan, sementara pada garis netral tidak terjadi gaya/tegangan.



Gambar 2.16. Jari-jari kelengkungan balok.
(spatargiri.files.wordpress.com/2010/04/sm_lecture_6.pdf)

Dari Gambar 2.16. mengenai jari-jari kelengkungan balok, maka:

$$AB = CD = A'B' = \delta x$$

$$C'D' = (R-y) \frac{\delta x}{R}$$

dimana :

R = jari-jari kelengkungan.

y = jarak sumbu netral ke serat yang ditinjau.

$$\text{Regangan di } C'D' = \frac{C'D' - CD}{CD} = \frac{(R-y) \frac{\delta x}{R} - \delta x}{\delta x} = -\frac{y}{R} \quad (2.6)$$

$\therefore \epsilon = -\frac{y}{R}$ tanda negatif hanya menunjukkan letak serat tinjauan)

Oleh karena itu dapat dikatakan bahwa besar regangan (ϵ) pada suatu serat berbanding lurus dengan jarak serat tersebut dari sumbu netral (y).

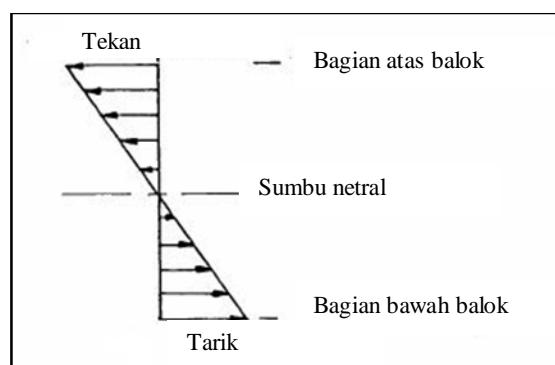
Untuk material yang sifatnya elastik linear, digunakan Persamaan 2.2:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}, \text{ sehingga}$$

$$\sigma = E\epsilon \quad (2.7)$$

Untuk suatu lengkungan/lenturan tertentu pada bahan tertentu, modulus elastisitas (E) dan kurva kelengkungan (R) adalah konstan, maka tegangan pada suatu serat tertentu merupakan fungsi linear jarak serat tersebut terhadap sumbu netral.

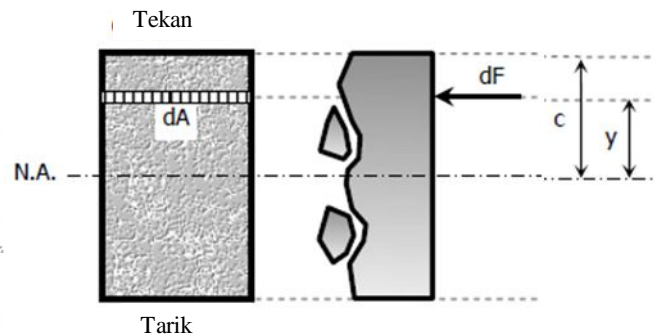
Distribusi tegangan normal sepanjang sumbu y ditunjukkan pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17. Distribusi tegangan pada balok yang melentur.
(spatargiri.files.wordpress.com/2010/04/sm_lecture_6.pdf)

Apabila sebagian penampang lintang balok diambil elemen sembarang dA yang berjarak y dari sumbu netral, seperti pada Gambar 2.18., besar elemen gaya yang bekerja pada luasan tersebut adalah:

$$dF = \sigma \cdot dA \dots \dots \dots (2.8)$$



Gambar 2.18. Gaya pada elemen dA yang berjarak y dari sumbu netral.
(www.mathalino.com)

Gaya yang bekerja memiliki jarak terhadap sumbu netral sehingga menimbulkan elemen momen. Proses perumusan tegangan lentur dengan menggunakan besarnya momen yang terjadi terhadap sumbu netral akibat elemen gaya tersebut dijabarkan pada Persamaan 2.9 – 2.13.

$$\begin{aligned} dM &= y \cdot dF \\ &= y \cdot \sigma \cdot dA \\ &= y \left(\frac{E y}{c} \right) dA \dots \dots \dots (2.9) \end{aligned}$$

$$M = \frac{E}{c} \int y^2 \cdot dA \dots \dots \dots (2.10)$$

Sedangkan $\int y^2 \cdot dA =$ momen inersia (I) maka,

$$M = \frac{E \cdot I}{c} \dots \dots \dots (2.11)$$

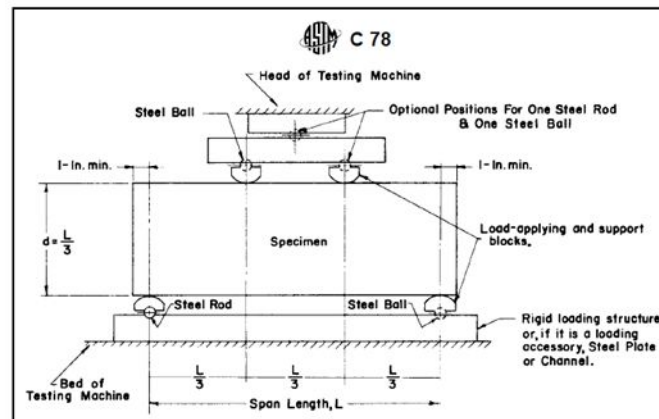
Dari Persamaan 2.7 dan Persamaan 2.11 maka:

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I} \dots \dots \dots (2.12)$$

Persamaan 2.12 menunjukkan rumusan tegangan lentur. Tegangan lentur maksimum terjadi ketika serat yang ditinjau adalah serat yang terluar/terjauh dari sumbu netral, dan biasanya dinotasikan dengan c .

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I} \dots \dots \dots (2.13)$$

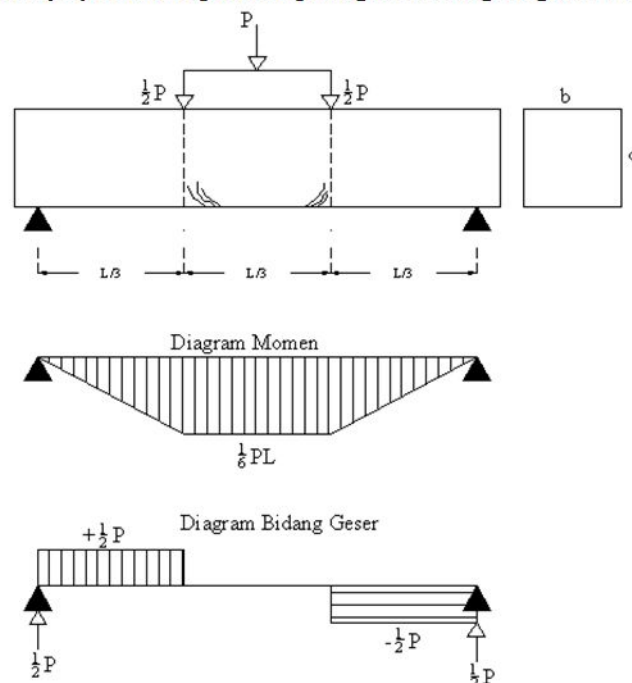
Pengujian kuat lentur (*modulus of rupture*) yang akan dilakukan adalah pengujian kuat lentur sepertiga bentang yang mengacu pada ASTM C 78 seperti pada Gambar 2.19.



Gambar 2.19. Pengujian lentur dengan beban di sepertiga bentang (ASTM C 78)

Berdasarkan letak *fracture*, perhitungan besar kuat lentur metode pembebanan sepertiga bentang dibagi menjadi tiga kondisi yaitu:

- 1) Apabila terjadinya *fracture* pada sepertiga bentang bagian tengah



Gambar 2.20. Diagram momen dan geser akibat *fracture* yang terletak di sepertiga bentang tengah

Proses perumusan tegangan lentur dapat dilihat pada Persamaan 2.14 – 2.18.

Berdasarkan perhitungan dengan analisis struktur statis tertentu, momen yang terjadi pada titik sepertiga bentang adalah:

$$M = \frac{1}{3} P \cdot \frac{1}{3} L = \frac{1}{9} PL \dots \dots \dots (2.14)$$

Benda uji berupa balok, maka momen inersia:

$$I = \frac{1}{12} b \cdot d^3 \dots \dots \dots (2.15)$$

Jarak dari sumbu netral terhadap serat terluar benda uji:

$$c = \frac{1}{2} d \dots \dots \dots (2.16)$$

Dari Persamaan 2.13 sampai dengan Persamaan 2.16 didapat:

$$\sigma = \text{MOR} = \frac{PL}{bd^2} \dots \dots \dots (2.17)$$

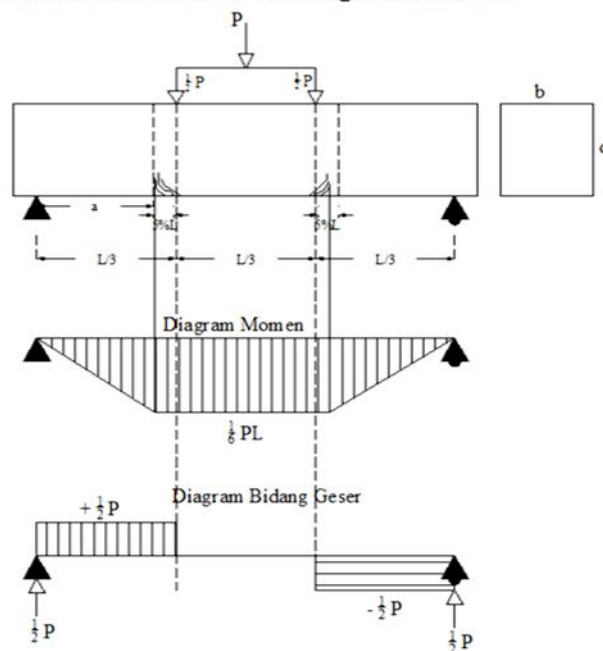
dimana :

L = panjang bentang (mm)

b = lebar benda uji (mm)

d = tinggi benda uji (mm)

- 2) Apabila terjadinya *fracture* lebih dari sepertiga bentang bagian tengah namun tidak lebih dari 5% dari bentang keseluruhan



Gambar 2.21. Diagram momen dan geser akibat *fracture* yang terletak lebih dari sepertiga bentang tengah namun kelebihannya $< 5\% L$

Berdasarkan perhitungan dengan analisis struktur statis tertentu, momen yang terjadi pada titik berjarak a dari tumpuan terdekat adalah :

$$M = \frac{1}{2} P \cdot a - \frac{1}{2} Pa \dots\dots\dots (2.18)$$

Dari Persamaan 2.13, 2.15, 2.16, 2.18 maka didapat:

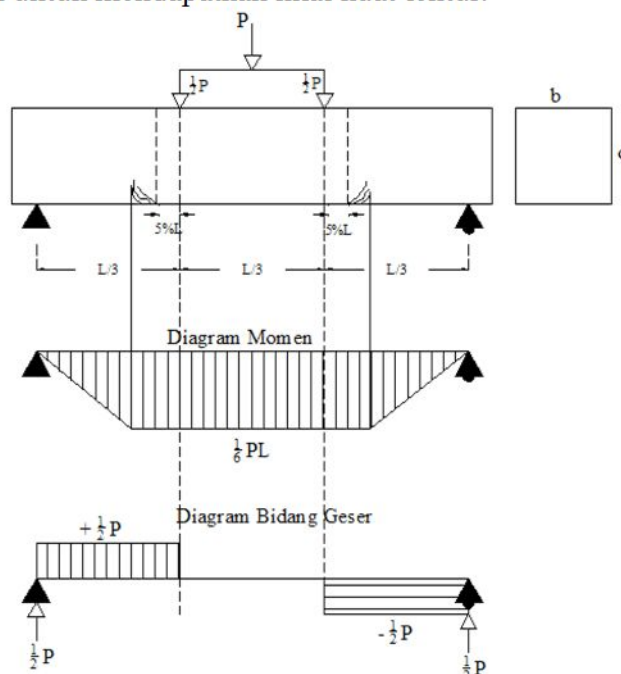
$$\sigma = \text{MOR} = \frac{3 Pa}{bd^2} \dots\dots\dots (2.19)$$

Dimana :

a = jarak dari titik terjadinya *fracture* ke tumpuan terdekat (mm).

Pada Gambar 2.21 terlihat bahwa momen maksimal pada balok bekerja pada daerah bidang geser, namun belum memasuki daerah kritis ($<5\%L$) sehingga masih dapat diperhitungkan sebagai momen lentur.

- 3) Apabila terjadinya *fracture* lebih dari sepertiga bentang tengah dan lebih dari $5\%L$ seperti ditunjukkan pada Gambar 2.22, maka hasil dari pengujian tersebut tidak dapat digunakan (*rejected*). Hal ini dikarenakan letak momen berada pada daerah kritis bidang geser, sehingga nilainya tidak mewakili apabila digunakan untuk mendapatkan nilai kuat lentur.



Gambar 2.22. Diagram momen dan geser akibat *fracture* yang terletak di lebih dari sepertiga bentang tengah dan lebihnya $>5\%L$

BAB 4
HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Pengujian Agregat

perpustakaan.uns.ac.id

digilib.uns.ac.id

Pengujian bahan dan benda uji dilaksanakan sesuai dengan tata cara dan standar pengujian yang terdapat pada standar ASTM. Waktu pelaksanaan percobaan disesuaikan dengan jadwal penelitian dan ijin penggunaan Laboratorium Bahan dan Material Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik UNS Surakarta.

Dalam bab ini akan disajikan hasil penelitian dan pembahasan terhadap hasil yang diperoleh. Sedangkan data rinci hasil pemeriksaan bahan dasar dan penyusun beton disajikan dalam Lampiran A.

4.1.1. Hasil Pengujian Agregat Halus

Pengujian terhadap agregat halus yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi pengujian kadar lumpur, kandungan zat organik, *specific gravity*, gradasi agregat dan berat jenis dengan hasil yang disajikan dalam Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Hasil pengujian agregat halus

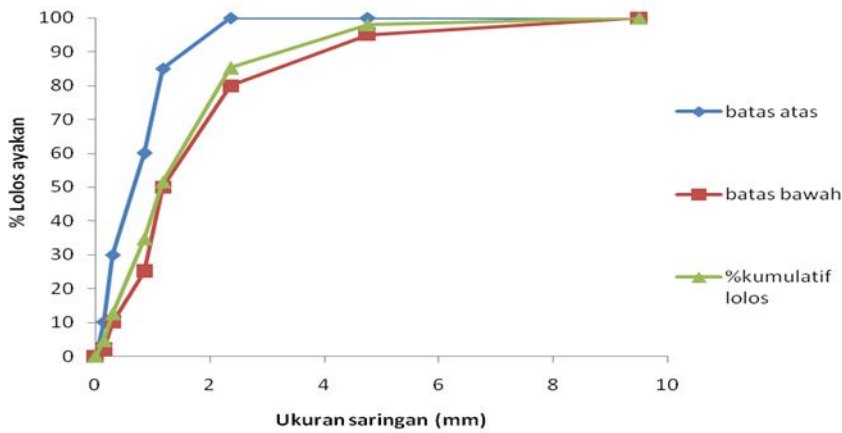
Jenis Pengujian	Hasil Pengujian	Standar	Kesimpulan
Kandungan Zat Organik	Kuning muda	Kuning	Memenuhi syarat
Kandungan Lumpur	3 %	Maks 5 %	Memenuhi syarat
Bulk Specific Gravity	2,475 gr/cm ³	-	-
Bulk Specific SSD	2,5 gr/cm ³	-	-
Apparent Specific Gravity	2,54 gr/cm ³	-	-
Absorbtion	1 %	-	-
Modulus Halus	3,1	2,3 – 3,1	Memenuhi syarat

Hasil pengujian gradasi agregat halus dan syarat batas dari ASTM C-33 dapat dilihat pada Tabel 4.2. dan Gambar 4.1.

Tabel 4.2. Hasil pengujian gradasi agregat halus

Diameter Ayakan (mm)	Berat Tertahan			Berat Lolos Kumulatif (%)	ASTM C-33
	Gram	%	Kumulatif (%)		
9,5	0	0	0	100	100
4,75	60,81	2,0288	2,0288	97,9712	95 - 100
2,36	381,52	12,7284	14,7571	85,2429	80 - 100
1,18	1009,45	33,6775	48,4346	51,5654	50 - 85
0,85	507,15	16,9197	65,3543	34,6457	25 - 60
0,3	660,52	22,0364	87,3907	12,6093	10 - 30
0,15	238,15	7,9452	95,3360	4,6640	2 - 10
0	139,8	4,6640	100,0000	0	0
Jumlah	2997,4	100	413,3015	-	-

Dari Tabel 4.2 didapatkan kurva gradasi beserta batas gradasi yang disyaratkan ASTM C-33 yang ditunjukkan dalam Gambar 4.1. sedangkan secara visual agregat halus dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.1. Gradasi agregat halus



Gambar 4.2. Agregat halus

4.1.2. Hasil Pengujian Agregat Kasar Alami Pecah

Pengujian terhadap agregat kasar alami pecah yang dilaksanakan dalam penelitian ini meliputi pengujian berat jenis (*specific gravity*), keausan (*abrasi*) dan gradasi agregat kasar. Hasil-hasil pengujian tersebut disajikan dalam Tabel 4.3, sedangkan Tabel 4.4 menyajikan hasil analisis ayakan terhadap sampel agregat kasar sehingga dapat diketahui gradasinya. Data hasil pengujian secara lengkap disajikan dalam Lampiran A.

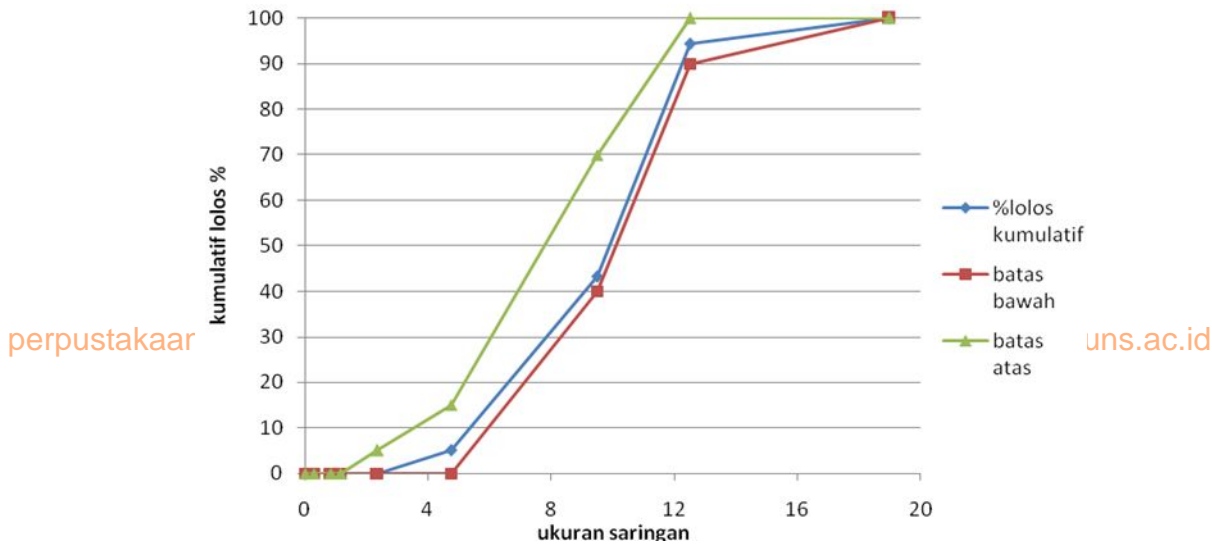
Tabel 4.3. Hasil pengujian agregat kasar alami pecah

Jenis Pengujian	Hasil Pengujian	Standar	Kesimpulan
<i>Bulk Specific Gravity</i>	2,54 gr/cm ³	-	-
<i>Bulk Specific SSD</i>	2,57 gr/cm ³	-	-
<i>Apparent Specific Gravity</i>	2,67 gr/cm ³	-	-
<i>Absorbtion</i>	1 %	-	-
Abrasi	44,2%	Maksimum 50 %	Memenuhi syarat
Modulus Halus Butir	5,54	5 - 8	Memenuhi syarat

Tabel 4.4. Hasil pengujian gradasi agregat kasar alami pecah

Diameter Ayakan (mm)	Berat Tertahan			Berat Lolos Kumulatif (%)	ASTM C-33
	Gram	%	Kumulatif (%)		
19	0	0	0	100	100
12,5	170	5,695	5,695	94,3049	90 – 100
9,5	1410	47,236	52,931	47,0687	20 – 55
4,75	1255	42,044	94,975	5,0251	0 – 10
2,36	150	5,025	100	0	0 – 5
1,18	0	0	100	0	-
0,85	0	0	100	0	-
0,3	0	0	100	0	-
0	0	0	100	0	-
Jumlah	2985	100	653,601	-	-

Dari Tabel 4.4 didapatkan kurva gradasi beserta batas gradasi yang disyaratkan ASTM C-33 yang ditunjukkan dalam Gambar 4.3.



Gambar 4.3. Gradasi agregat kasar alami pecah

Agregat kasar batu pecah memiliki tekstur dan kualitas lebih baik bila dibandingkan agregat kasar daur ulang dari limbah beton. Secara visual agregat kasar batu pecah dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4. Agregat kasar alami pecah

4.1.3. Hasil Pengujian Agregat Kasar Alami Bulat

Pengujian terhadap agregat kasar alami bulat yang dilaksanakan dalam penelitian ini meliputi pengujian berat jenis (*specific gravity*), keausan (*abrasi*) dan gradasi agregat kasar. Hasil-hasil pengujian tersebut disajikan dalam Tabel 4.5., sedangkan Tabel 4.6. menyajikan hasil analisis ayakan sehingga dapat diketahui gradasinya. Data hasil pengujian secara lengkap disajikan dalam Lampiran A.

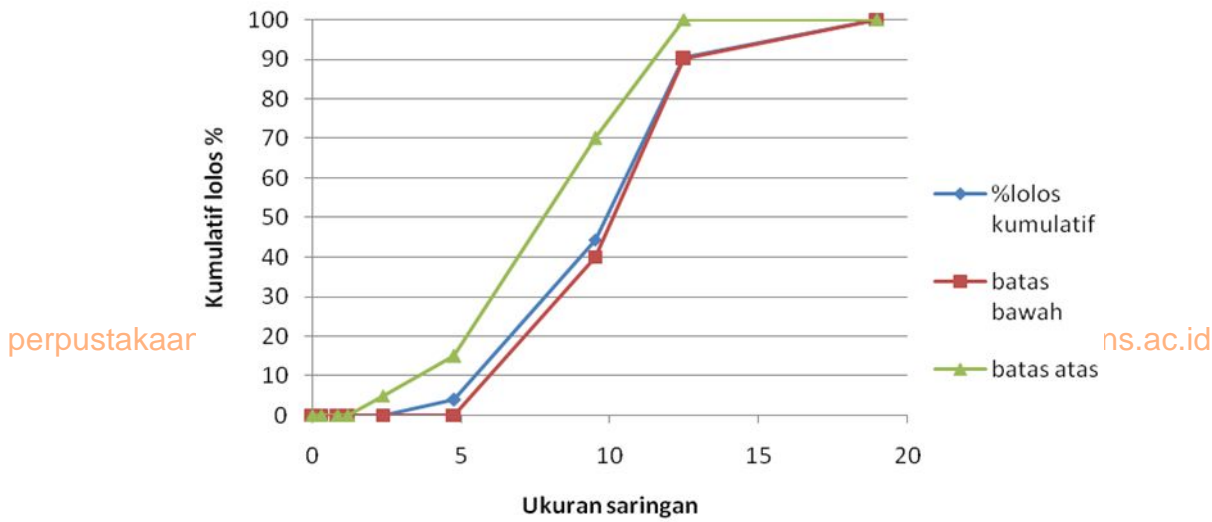
Tabel 4.5. Hasil pengujian agregat kasar alami bulat

Jenis Pengujian	Hasil Pengujian	Standar	Kesimpulan
<i>Bulk Specific Gravity</i>	2,43 gr/cm ³	-	-
<i>Bulk Specific SSD</i>	2,52 gr/cm ³	-	-
<i>Apparent Specific Gravity</i>	2,65 gr/cm ³	-	-
<i>Absorbtion</i>	3,23 %	-	-
Abrasi	45,33%	Maksimum 50 %	Memenuhi syarat
Modulus Halus Butir	5,66	5 - 8	Memenuhi syarat

Tabel 4.6. Hasil pengujian gradasi agregat kasar alami bulat

Diameter Ayakan (mm)	Berat Tertahan			Berat Lolos Kumulatif (%)	ASTM C-33
	Gram	%	Kumulatif (%)		
19	0	0	0	100	100
12,5	287	9,608	9,608	94,3049	90 – 100
9,5	1477	49,448	59,056	47,0687	20 – 55
4,75	1139	38,132	97,188	5,0251	0 – 10
2,36	84	2,812	100	0	0 – 5
1,18	0	0	100	0	-
0,85	0	0	100	0	-
0,3	0	0	100	0	-
0	0	0	100	0	-
Jumlah	2987	100	665,852	-	-

Dari Tabel 4.6 didapatkan kurva gradasi beserta batas gradasi yang disyaratkan ASTM C-33 yang ditunjukkan dalam Gambar 4.5.



Gambar 4.5. Gradasi agregat kasar alami bulat

Agregat kasar alami bulat diperoleh dari penambangan batu kali di daerah Karanganyar. Secara visual memiliki pori-pori yang banyak dan lebih besar dari pada batu pecah sehingga agregat batu bulat lebih *porous* dan memiliki nilai *absorpsi* besar. Batu bulat memiliki sifat lebih rapuh dibandingkan agregat batu pecah, hal ini dimungkinkan karena batu bulat bercampur dengan batu padas (*clay*) dari sungai. Agregat kasar alami bulat dapat dilihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6. Agregat kasar alami bulat

4.1.4. Hasil Pengujian Agregat Kasar Daur Ulang

Pengujian terhadap agregat kasar daur ulang yang dilaksanakan dalam penelitian ini meliputi pengujian berat jenis (*specific gravity*), keausan (*abrasi*) dan gradasi agregat kasar. Hasil-hasil pengujian tersebut disajikan dalam Tabel 4.7 dan Tabel 4.8. menyajikan hasil analisis ayakan sehingga dapat diketahui gradasinya. Data hasil pengujian secara lengkap disajikan dalam Lampiran A.

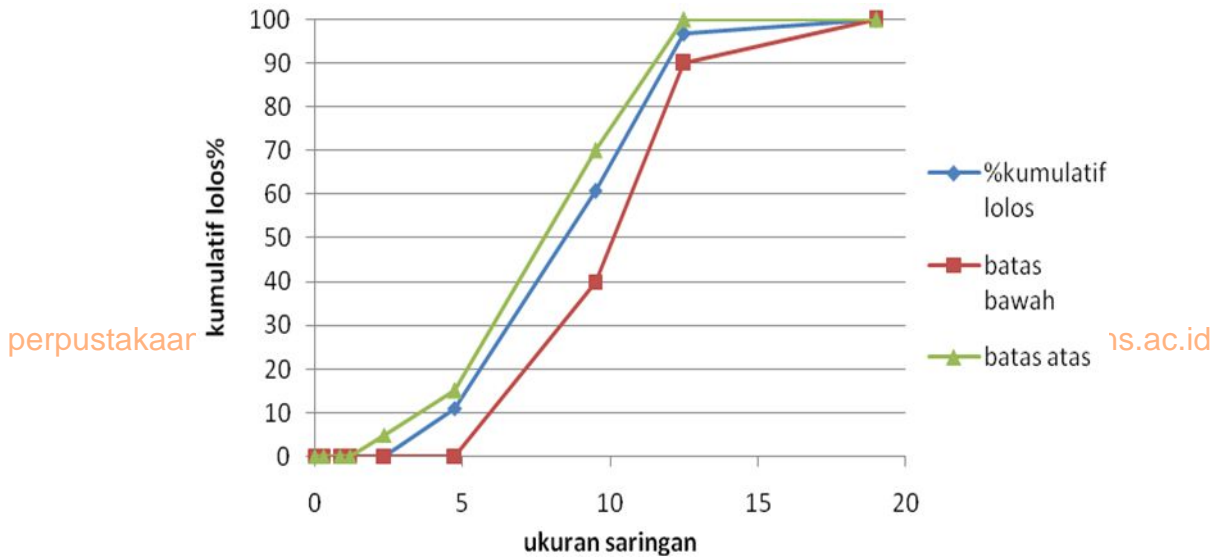
Tabel 4.7. Hasil pengujian agregat kasar daur ulang

Jenis Pengujian	Hasil Pengujian	Standar	Kesimpulan
Bulk Specific Gravity	2,2 gr/cm ³	-	-
Bulk Specific SSD	2,32 gr/cm ³	-	-
Apparent Specific Gravity	2,52 gr/cm ³	-	-
Absorbtion	5,6 %	-	-
Abrasi	38,33 %	Maksimum 50 %	Memenuhi syarat
Modulus Halus Butir	5,37	5 - 8	Memenuhi syarat

Tabel 4.8. Hasil pengujian gradasi agregat kasar daur ulang

Diameter Ayakan (mm)	Berat Tertahan			Berat Lolos Kumulatif (%)	ASTM C-33
	Gram	%	Kumulatif (%)		
19	0	0	0	100	100
12,5	97,000	3,246	3,246	96,754	90 – 100
9,5	1076,000	36,011	39,257	60,743	20 – 55
4,75	1487,000	49,766	89,023	10,977	0 – 10
2,36	328	10,977	100	0	0 – 5
1,18	0	0	100	0	-
0,85	0	0	100	0	-
0,3	0	0	100	0	-
0	0	0	100	0	-
Jumlah	2988	100	631,526	-	-

Dari Tabel 4.8 didapatkan kurva gradasi beserta batas gradasi yang disyaratkan ASTM C-33 yang ditunjukkan dalam Gambar 4.7.



Gambar 4.7. Gradasi agregat kasar daur ulang

Agregat kasar daur ulang diperoleh dari pemecahan limbah beton sehingga memiliki kualitas lebih rendah bila dibandingkan agregat kasar alami. Agregat kasar daur ulang tampak lebih *porous* karena adanya retak mikro akibat proses pembuatannya dan adanya lekatan pasta semen yang masih menempel pada agregatnya bila dibandingkan agregat normal. Secara visual agregat kasar normal dapat dilihat pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8. Agregat kasar daur ulang

4.2. Rancang Campuran Adukan Beton

Dari perhitungan, diperoleh kebutuhan agregat kasar, agregat halus, *OPC* (*Ordinary Portland Cement*), *FA* (*Fly Ash*), *Sf* (*Silicafume*), *Sp* (*Superplasticizers*) dan air untuk 1 m³ beton seperti pada Tabel 4.9. dan untuk satu kali adukan pada Tabel 4.10.

Tabel 4.9. Proporsi campuran adukan untuk setiap variasi per 1 m³

% Agregat Daur Ulang	Jenis Agregat (kg)	Agregat Kasar Alami (kg)	Agregat Kasar Daur Ulang (kg)	Agregat Halus (kg)	OPC (kg)	FA (kg)	Sf (kg)	Sp (kg)	Air (kg)
0%	Alami (Pecah)	514,0	-	800	660,984	165,246	9,915	12,393	217,705
	Alami (Bulat)								
20%	Alami (Pecah)	411,2	102,8	800	660,984	165,246	9,915	12,393	217,705
	Alami (Bulat)								
40%	Alami (Pecah)	308,4	205,6	800	660,984	165,246	9,915	12,393	217,705
	Alami (Bulat)								
60%	Alami (Pecah)	205,6	308,54	800	660,984	165,246	9,915	12,393	217,705
	Alami (Bulat)								
80%	Alami (Pecah)	102,8	411,2	800	660,984	165,246	9,915	12,393	217,705
	Alami (Bulat)								
100%	Daur Ulang	-	514,0	800	660,984	165,246	9,915	12,393	217,705

Tabel 4.10. Proporsi campuran adukan untuk setiap 1 kali adukan

% Agregat Daur Ulang	Jenis Agregat (kg)	Agregat Kasar Alami (kg)	Agregat Kasar Daur Ulang (kg)	Agregat Halus (kg)	OPC (kg)	FA (kg)	Sf (kg)	Sp (kg)	Air (kg)
0%	Alami (Pecah)	25,7	-	40	33,049	8,262	0,496	0,620	10,885
	Alami (Bulat)								
20%	Alami (Pecah)	20,56	5,1	40	33,049	8,262	0,496	0,620	10,885
	Alami (Bulat)								
40%	Alami (Pecah)	15,42	10,28	40	33,049	8,262	0,496	0,620	10,885
	Alami (Bulat)								
60%	Alami (Pecah)	10,28	15,42	40	33,049	8,262	0,496	0,620	10,885
	Alami (Bulat)								
80%	Alami (Pecah)	5,1	20,56	40	33,049	8,262	0,496	0,620	10,885
	Alami (Bulat)								
100%	Daur Ulang	-	25,7	40	33,049	8,262	0,496	0,620	10,885

4.3. Hasil Pengujian

4.3.1. Hasil Pengujian Beton Segar (*Slump Flow Test*)

Hasil pengujian beton segar yang ditampilkan yaitu hasil pengujian *slump flow test* yang merujuk pada penelitian Setiana (2011). Untuk hasil pengujian beton segar metode lainnya ditampilkan pada Lampiran C.

Pengujian *slump flow* dilakukan dengan cara meletakkan kerucut *Abrams* di atas *flow table*, memasukkan campuran beton ke dalam kerucut *Abrams* hingga penuh, kemudian mengangkat kerucut *Abrams* hingga campuran mengalir di atas *flow table*. Data yang dicatat adalah lama waktu campuran untuk mencapai diameter 50 cm pada *flow table*, dan diameter campuran setelah stabil (diukur pada kedua sisi, lihat Gambar 4.9). Hasil pengukuran *slump flow* dapat dilihat pada Tabel 4.11 dan Tabel 4.12.



Gambar 4.9. Pengukuran nilai *slump flow*

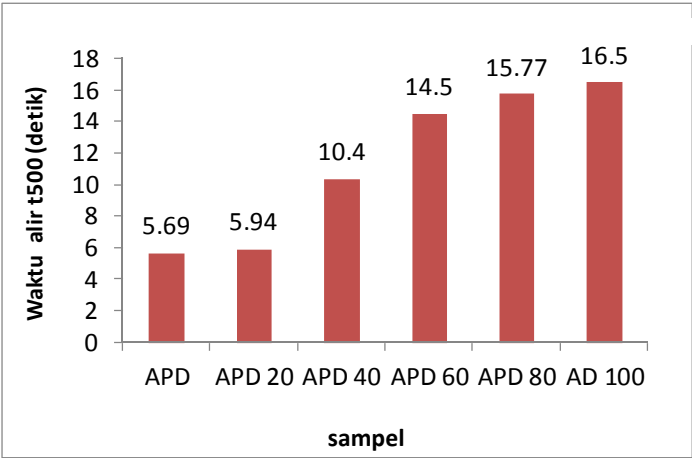
Tabel 4.11. Hasil *Slump Flow Test* SCC variasi agregat alami pecah dan daur ulang

% Agregat Daur Ulang	Data <i>Slump Flow Test</i>		
	t_{500}	Diameter sebaran	Kecepatan aliran
	(dt)	(mm)	(mm/dt)
0%	5,69	760	133,57
20%	5,94	760	127,95
40%	10,4	735	70,67
60%	14,5	740	51,03
80%	15,77	730	46,29
100%	16,5	680	40,91

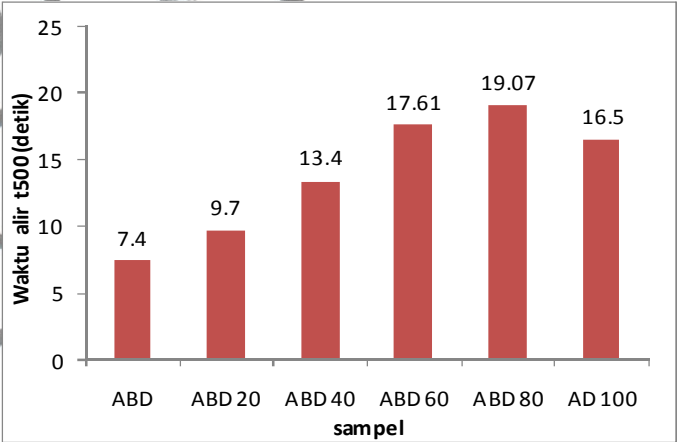
Tabel 4.12. Hasil *Slump Flow Test* SCC variasi agregat alami bulat dan daur ulang

% Agregat Daur Ulang	Data <i>Slump Flow Test</i>		
	t ₅₀₀	Diameter sebaran	Kecepatan aliran
	(dt)	(mm)	(mm/dt)
0%	7,4	745	100,68
20%	9,7	735	75,77
40%	13,4	690	51,49
60%	17,61	680	38,62
80%	19,07	665	34,87
100%	16,5	675	40,91

Grafik hubungan t₅₀₀ *slump flow* terhadap persentase jumlah agregat daur ulang dapat dilihat pada Gambar 4.10 dan Gambar 4.11

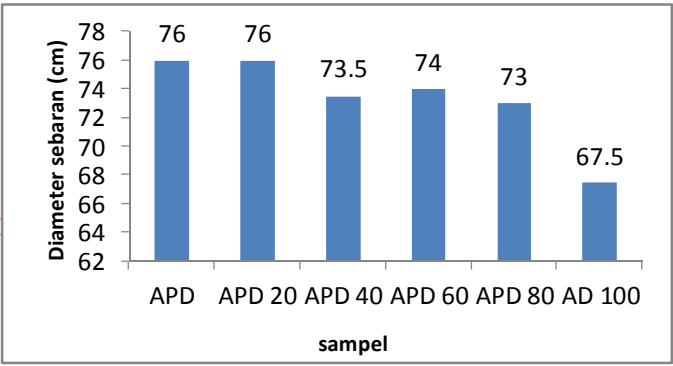


Gambar 4.10. Hubungan t₅₀₀ *slump flow test* SCC dengan variasi jumlah agregat batu pecah dan daur ulang

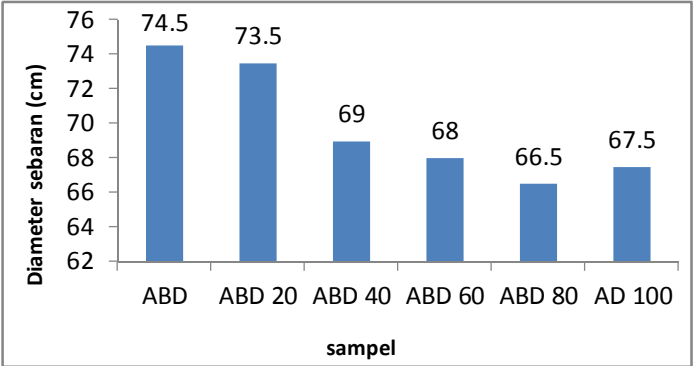


Gambar 4.11. Hubungan t₅₀₀ *slump fow test* SCC dengan variasi jumlah agregat batu bulat dan daur ulang

Grafik hubungan diameter *slump flow* terhadap persentase jumlah agregat daur ulang dapat dilihat pada Gambar 4.12 dan Gambar 4.13

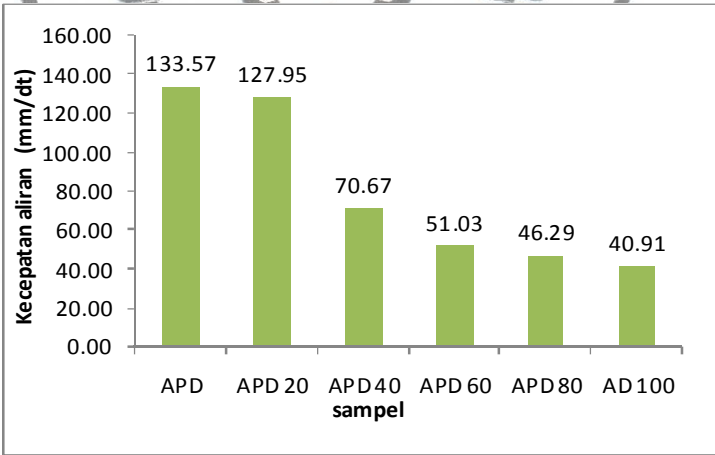


Gambar 4.12. Hubungan diameter *slump flow test* SCC dengan variasi jumlah agregat batu pecah dan daur ulang

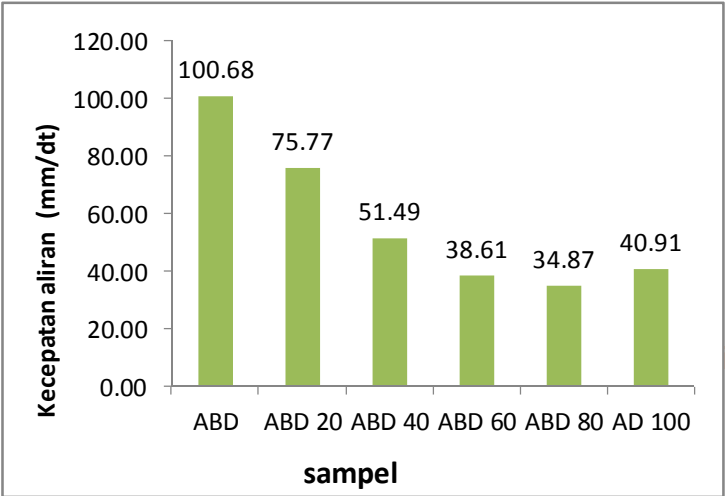


Gambar 4.13. Hubungan diameter *slump flow test* SCC dengan variasi jumlah agregat batu bulat dan daur ulang.

Grafik hubungan kecepatan aliran *slump flow* terhadap persentase jumlah agregat daur ulang dapat dilihat pada Gambar 4.14 dan Gambar 4.15



Gambar 4.14. Hubungan kecepatan aliran *slump flow test* SCC dengan variasi jumlah agregat batu pecah dan daur ulang.



Gambar 4.15. Hubungan kecepatan aliran *slump flow test* dengan variasi jumlah agregat batu bulat dan daur ulang.

4.3.2. Hasil Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan dilakukan pada saat benda uji berumur 28 hari dengan menggunakan *Compression Testing Machine* untuk mendapatkan beban maksimum yaitu beban pada saat beton hancur ketika menerima beban tersebut (P_{max}).

Dari data pengujian kuat tekan dapat diperoleh kuat tekan maksimum beton. Sebagai contoh perhitungan kuat tekan diambil data dari benda uji AAP 1 (beton SCC 100% agregat alami pecah, tanpa agregat daur ulang). Dari hasil pengujian dan dengan menggunakan Persamaan 2.1 didapatkan hasil :

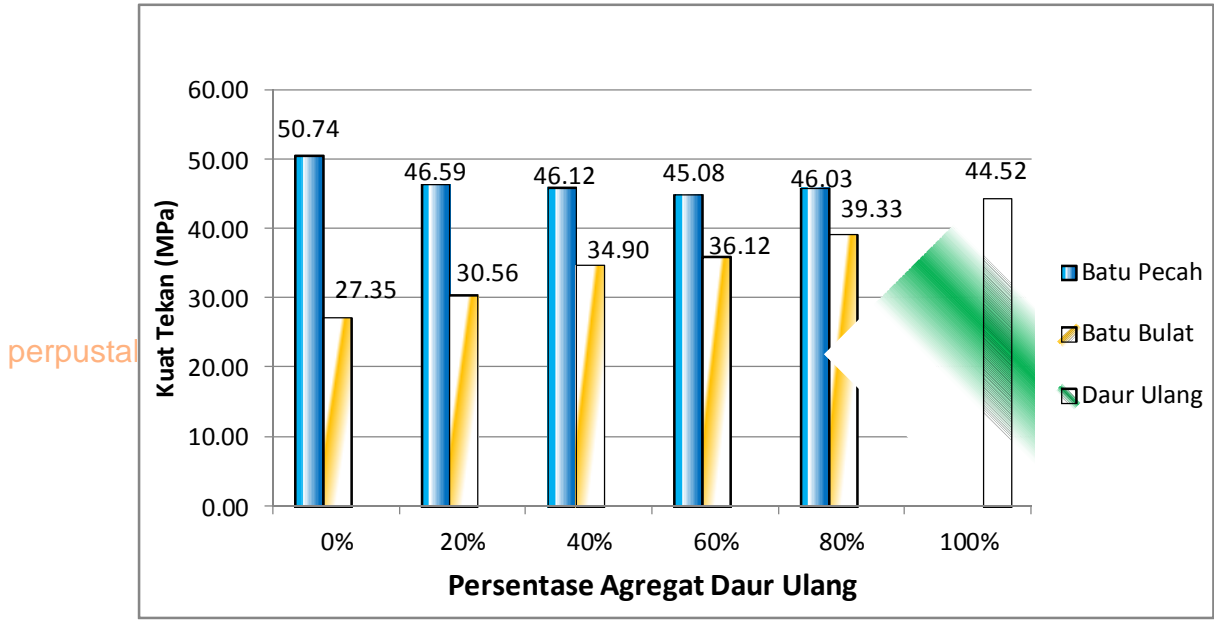
$$\begin{aligned} P_{max} &= 820 \text{ kN} = 820000 \text{ N} \\ A &= 0,25 \times \pi \times D^2 = 0,25 \times \pi \times 150^2 \text{ mm}^2 \\ &= 17671,46 \text{ mm}^2 \\ \text{Maka } f'_c &= \frac{P}{A} = \frac{820000 \text{ N}}{17671,46 \text{ mm}^2} = 46,40 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Hasil pengujian kuat tekan beton menggunakan benda uji silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm pada umur 28 hari dapat dilihat pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13. Hasil pengujian kuat tekan beton umur 28 hari

Agregat Kasar	% Agregat Daur Ulang	Kode Benda Uji	P maks (kN)	f'c (MPa)	f'c' rata-rata (MPa)
Agregat Alami Pecah dan Agregat Daur Ulang	0%	AAP 1	820	46,40	50,74
		AAP 2	800	45,27	
		AAP 3	1070	60,55	
	20%	P-AD0,2 1	890	50,36	46,59
		P-AD0,2 2	820	46,69	
		P-AD0,2 3	755	42,72	
	40%	P-AD0,4 1	965	54,61	46,12
		P-AD0,4 3	665	37,63	
	60%	P-AD0,6 1	820	46,40	45,08
		P-AD0,6 2	680	38,48	
		P-AD0,6 3	790	50,38	
	80%	P-AD0,8 1	600	33,95	46,03
		P-AD0,8 2	1010	57,15	
		P-AD0,8 3	830	46,97	
Agregat Daur Ulang	100%	AD 1	840	47,53	44,52
		AD 2	780	44,14	
		AD 3	740	41,88	
Agregat Alami Bulat dan Agregat Daur Ulang	0%	AAB 1	295	16,69	27,35
		AAB 2	460	26,03	
		AAB 3	695	39,33	
	20%	B-AD0,2 2	650	36,78	30,56
		B-AD0,2 3	430	24,33	
	40%	B-AD0,4 1	410	23,20	34,90
		B-AD0,4 2	820	46,40	
		B-AD0,4 3	620	35,08	
	60%	B-AD0,6 1	460	26,03	36,12
		B-AD0,6 2	850	48,10	
		B-AD0,6 3	605	34,24	
	80%	B-AD0,8 2	805	45,55	39,33
		B-AD0,8 3	585	33,10	

Pada Tabel 4.13 terdapat beberapa nilai kuat tekan yang tidak disertakan dalam proses perhitungan karena selisih nilainya cukup jauh dengan nilai kuat tekan lainnya dalam satu variasi yang sama. Hasil pengujian kuat tekan secara lengkap dapat dilihat pada Lampiran C. Grafik yang menggambarkan hubungan jumlah agregat daur ulang terhadap kuat tekan dapat dilihat pada Gambar 4.16.



Gambar 4.16. Hasil pengujian kuat tekan pada berbagai variasi jumlah agregat daur ulang

4.3.3. Hasil Pengujian Modulus Elastisitas

Pengujian dilakukan pada silinder beton uji dengan menggunakan CTM dengan pembebanan secara konstan untuk mengetahui besar beban yang diterima sampai dengan beban maksimum (saat beton mulai retak) dan *extensometer* untuk mengetahui perubahan panjang yang terjadi sehingga dapat diketahui nilai tegangan dan regangan yang terjadi pada setiap pembebanan dengan persamaan-persamaan sebagai berikut :

Menghitung regangan (ϵ) yang terjadi dengan Persamaan 2.5

$$\text{Regangan } (\epsilon) = \frac{\Delta l}{l} \times 25,4 \cdot 10^{-3}$$

Dimana :

- Δl = Penurunan arah longitudinal ($1 \cdot 10^{-3}$ inchi)
- l = Tinggi beton relatif (jarak antar dua *ring dial*) = 200 mm
- $25,4 \cdot 10^{-3}$ = Konversi satuan *dial extensometer* dari inchi ke mm

Sebagai contoh perhitungan diambil dari data benda uji AAP-1 (beton SCC 100% agregat alami pecah, tanpa agregat daur ulang) pada saat menerima beban (P) = 20 kN

Menghitung regangan yang terjadi

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \times 25,4 \cdot 10^{-3}$$

$$= \frac{0,5}{200} \times 25,4 \cdot 10^{-3}$$

$$= 0,00006$$

Menghitung tegangan (σ) yang terjadi :

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

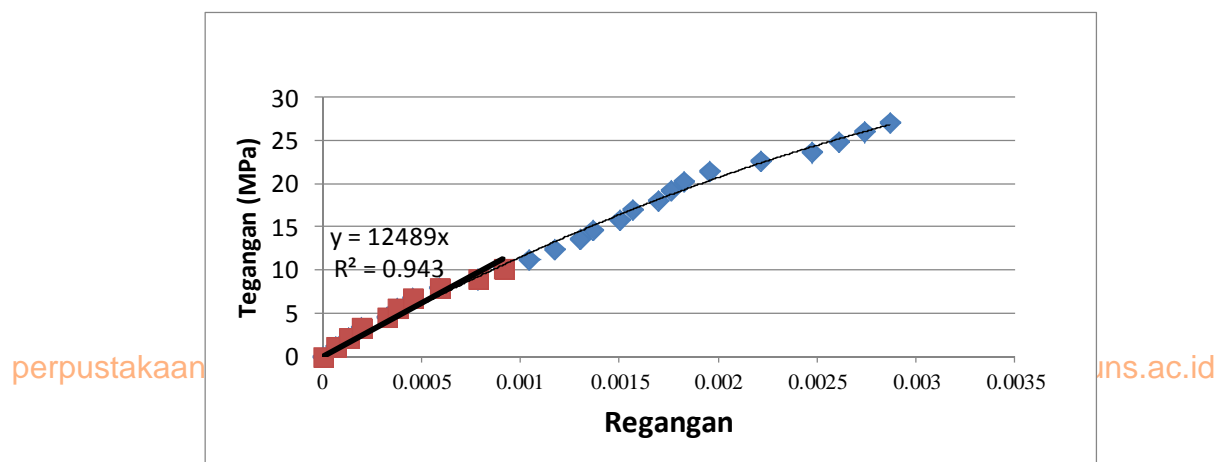
$$= \frac{20000}{0,25 \times \pi \times 150^2} \text{ N/mm}^2$$

$$= 1,13 \text{ MPa}$$

Kurva tegangan regangan diperoleh dengan memplotkan data tegangan pada setiap kenaikan 2 ton beban aksial dengan regangan yang terjadi pada setiap benda uji. Data selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran C, dengan analisa regresi pada program *Microsoft excel*, didapatkan grafik tegangan regangan dan persamaan regresi linier.

Menurut Nawy (1990), nilai modulus elastisitas beton didapat dari kemiringan suatu garis lurus (linier) yang menghubungkan titik pusat dengan suatu harga tegangan (sekitar 40 % f'_c)

Sebelum mendapatkan nilai persamaan regresi linier, terlebih dahulu dibuat kurva regresi *polynomial* orde-2 dari nilai tegangan-regangan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.17.



Gambar 4.17. Hubungan tegangan regangan benda uji AAP-1 (beton SCC 100% agregat alami pecah, tanpa agregat daur ulang)

Selanjutnya dari persamaan regresi linier seperti terlihat pada Gambar 4.17. dapat dihitung nilai modulus elastisitas. Sebagai contoh diambil persamaan regresi tegangan-regangan pada benda uji AAP-1 (beton SCC 100% agregat alami pecah, tanpa agregat daur ulang). Perhitungannya adalah:

Diketahui :

Persamaan regresi linier: $y = 12489 x$ (4.1)

y = Tegangan

x = Regangan

Kemudian dihitung nilai modulus elastisitas (E_c) menggunakan Persamaan 2.5

$$E_c = \frac{S_2 - S_1}{\epsilon_2 - 0,00005}$$

$$\begin{aligned} S_2 &= 0,4 \cdot f'c \\ &= 0,4 \cdot 46,40 \\ &= 18,56 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

Dengan persamaan tegangan-regangan (4.1), maka:

Untuk: $S_2 = 18,56 \text{ MPa}$ didapat $\epsilon_2 = 0,001486$

$$\epsilon_1 = 0,00005 \quad \text{didapat } S_1 = 0,62445 \text{ MPa}$$

S_1 diperoleh pada nilai regangan sebesar 0,00005.

Sehingga nilai modulus elastisitasnya adalah:

$$\begin{aligned} E_c &= \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0,00005} \\ &= \frac{18,56 - 0,62445}{0,001486 - 0,00005} \\ &= 12489 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Validasi Modulus elastisitas beton dengan formula SK SNI-T-15-1991.

perpustakaan.uns.ac.id

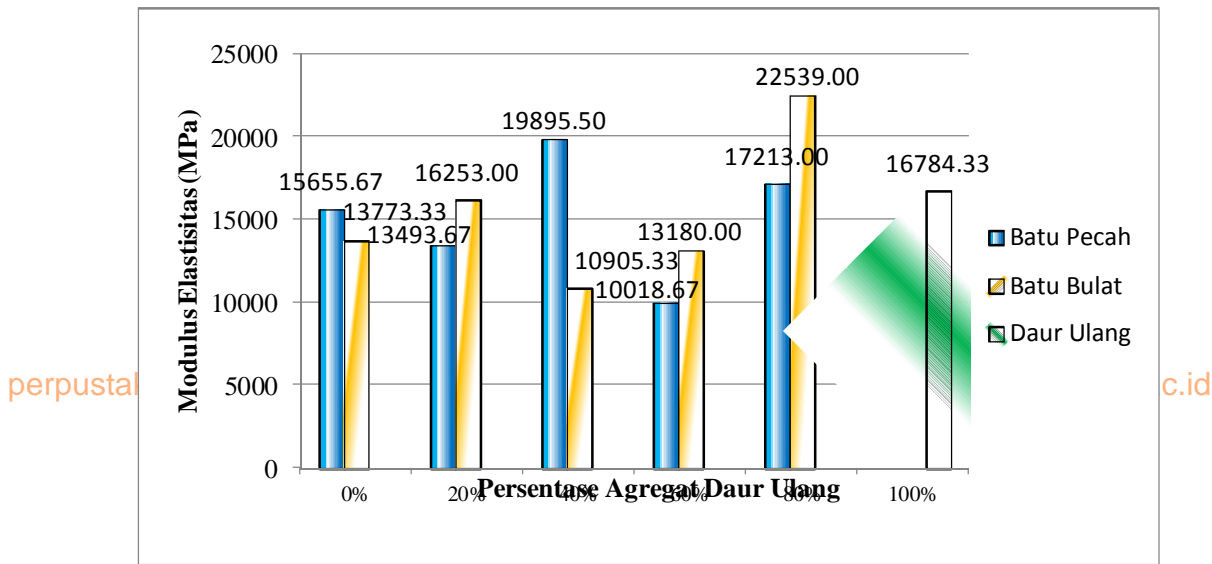
digilib.uns.ac.id

$$\begin{aligned} E &= 4700 \times \sqrt{f'c} \dots\dots\dots (4.2) \\ &= 4700 \times \sqrt{46,40} \\ &= 32016,112 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Hasil perhitungan selanjutnya disajikan pada Tabel 4.14. dan disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.18.

Tabel 4.14. Hasil perhitungan modulus elastisitas

Agregat Kasar	% Agregat Daur Ulang	Kode Benda Uji	Ec perhitungan (MPa)	Ec perhitungan rata-rata (MPa)	E validasi SNI (MPa)	Selisih perhitungan dengan validasi SNI
Agregat Alami Pecah dan Agregat Daur Ulang	0%	AAP 1	12489	15655,67	33479,36	53,24%
		AAP 2	18903			
		AAP 3	15575			
	20%	P-AD0,2 1	12904	13493,67	32081,12	57,94%
		P-AD0,2 2	16094			
		P-AD0,2 3	11483			
	40%	P-AD0,4 1	23083	19895,50	31918,35	37,67 %
		P-AD0,4 3	16708			
		P-AD0,6 1	10175			
	60%	P-AD0,6 2	8165	10018,67	31557,31	68,25%
		P-AD0,6 3	11716			
		P-AD0,8 1	12441			
	80%	P-AD0,8 2	25578	17213,00	31885,70	46,02%
		P-AD0,8 3	13620			
		AD 1	12750			
Agregat Daur Ulang	100%	AD 2	16081	16784,33	31358,63	46,48%
		AD 3	21522			
		AD 3	21522			
Agregat Alami Bulat dan Agregat Daur Ulang	0%	AAB 1	7019	13773,33	24580,18	43,97%
		AAB 2	16282			
		AAB 3	18019			
	20%	B-AD0,2 2	18787	16253,00	25981,16	37,44%
		B-AD0,2 3	13719			
		B-AD0,4 1	6979			
	40%	B-AD0,4 2	13950	10905,33	27764,31	60,72%
		B-AD0,4 3	11787			
		B-AD0,6 1	9502			
	60%	B-AD0,6 2	20302	13180,00	28247,85	53,34%
		B-AD0,6 3	9736			
		B-AD0,8 2	11458			
	80%	B-AD0,8 3	33620	22539,00	29475,02	23,53%
		B-AD0,8 3	33620			



Gambar 4.18. Hasil perhitungan modulus elastisitas pada berbagai variasi jumlah agregat daur ulang

4.3.4. Hasil Pengujian Kuat Lentur

Pengujian kuat lentur beton pada benda uji balok dengan ukuran 100 mm x 100 mm x 500 mm dilakukan pada umur 28 hari. Letak *fracture* untuk semua benda uji berada pada sepertiga bentang tengah, sehingga persamaan yang digunakan adalah Persamaan 2.17. Sebagai contoh untuk perhitungan kuat lentur beton pada benda uji P-0,2AD 1 (beton SCC menggunakan agregat alami pecah dengan 20% agregat daur ulang) adalah sebagai berikut:

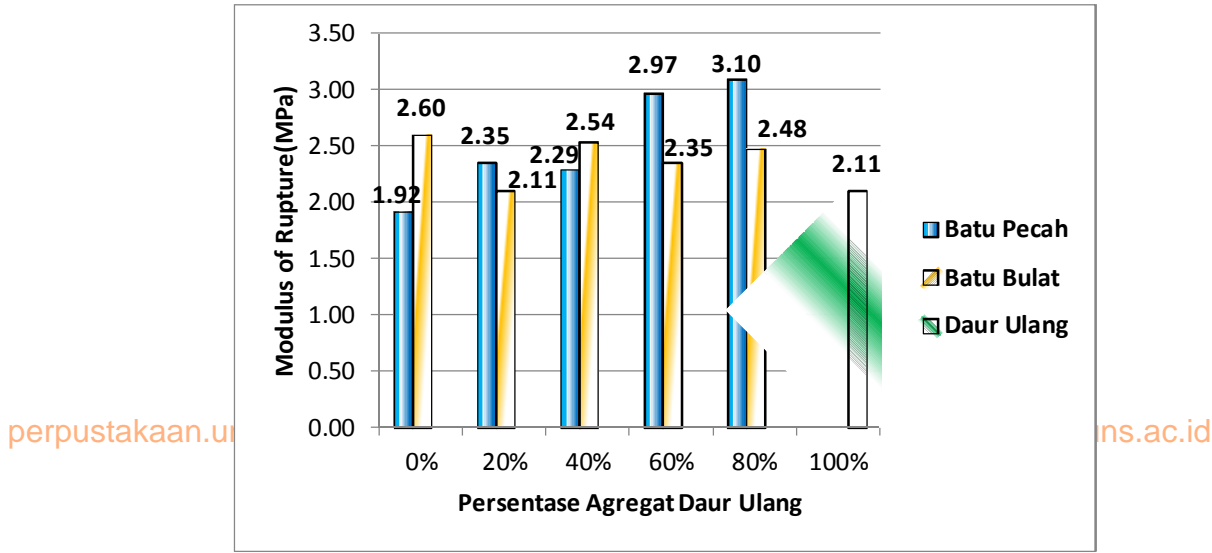
$$\begin{aligned} P_{maks} &= 65 \text{ kgf/cm}^2 \\ \text{Luas hidraulik} &= - .4,01 = 12,62928 \text{ cm}^2 \\ P_{maks} &= 65 \text{ kgf/cm} \times 12,62928 \text{ cm} \times 9,81 = 8053,1 \text{ N} \\ \frac{PL}{00} &= \frac{80 \ 3 \ 300}{00 \ 00} = 2,4159 \text{ Mpa} \\ \text{Maka Modulus of Rupture :} \\ \text{MOR} &= \frac{PL}{00} = 2,4319 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Hasil perhitungan kuat lentur seluruh benda uji dapat dilihat pada Tabel 4.15.

Tabel 4.15. Hasil pengujian kuat lentur (*modulus of rupture*) beton

Agregat Kasar	% Agregat Daur Ulang	Kode Benda Uji	Beban Maks (kgf/cm ²)	Beban Maks (N)	MOR (MPa)	MOR rata-rata (MPa)
Agregat Alami Pecah dan Agregat Daur Ulang	0%	AAP 1	55	6814,13	2,04	1,92
		AAP 2	50	6194,66	1,86	
		AAP 3	50	6194,66	1,86	
	20%	P-AD0,2 1	65	8053,06	2,42	2,35
		P-AD0,2 2	60	7433,59	2,23	
		P-AD0,2 3	65	8053,06	2,42	
	40%	P-AD0,4 1	65	8053,06	2,42	2,29
		P-AD0,4 2	55	6814,13	2,04	
		P-AD0,4 3	65	8053,06	2,42	
	60%	P-AD0,6 1	75	9291,99	2,79	2,97
		P-AD0,6 2	80	9911,46	2,97	
		P-AD0,6 3	85	10530,93	3,16	
	80%	P-AD0,8 1	85	10530,93	3,16	3,10
		P-AD0,8 2	85	10530,93	3,16	
		P-AD0,8 3	80	9911,46	2,97	
Agregat Daur Ulang	100%	AD 1	55	6814,13	2,04	2,11
		AD 2	65	8053,06	2,42	
		AD 3	50	6194,66	1,86	
Agregat Alami Bulat dan Agregat Daur Ulang	0%	AAB 1	60	7433,59	2,23	2,60
		AAB 2	70	8672,53	2,60	
		AAB 3	80	9911,46	2,97	
	20%	B-AD0,2 1	70	8672,53	2,60	2,11
		B-AD0,2 2	50	6194,66	1,86	
		B-AD0,2 3	50	6194,66	1,86	
	40%	B-AD0,4 1	75	9291,99	2,79	2,54
		B-AD0,4 2	70	8672,53	2,60	
		B-AD0,4 3	60	7433,59	2,23	
	60%	B-AD0,6 1	65	8053,06	2,42	2,35
		B-AD0,6 2	70	8672,53	2,60	
		B-AD0,6 3	55	6814,13	2,04	
	80%	B-AD0,8 1	70	8672,53	2,60	2,48
		B-AD0,8 2	60	7433,59	2,23	
		B-AD0,8 3	70	8672,53	2,60	

Grafik hubungan antara persentase agregat daur ulang dengan kuat lentur beton berdasarkan Tabel 4.15. dapat dilihat pada Gambar 4.19.



Gambar 4.19. Hasil pengujian kuat lentur pada berbagai variasi jumlah agregat daur ulang

4.4. Pembahasan

4.4.1. Beton Segar

Dari data hasil pengujian *slump flow* pada Tabel 4.11. dan Tabel 4.12. menunjukan bahwa pemakaian agregat daur ulang dalam SCC, baik ketika dikombinasikan dengan agregat alami pecah maupun agregat alami bulat dapat menurunkan *workability*, dan sebaran diameter.

Nilai absorpsi agregat daur ulang yang tinggi (5,6%) dibandingkan agregat alami pecah (1 %) dan agregat alami bulat (3,23 %). Apabila agregat memiliki nilai absorpsi yang tinggi, maka jumlah air yang bereaksi dengan semen akan berkurang, dan menyebabkan beton menjadi lebih sulit dikerjakan (*workability* rendah).

4.4.2. Kuat Tekan

Dari hasil penelitian ini dapat diketahui seberapa besar pengaruh variasi jumlah agregat daur ulang terhadap nilai kuat tekan SCC. Dari Gambar 4.16. dapat dilihat bahwa kuat tekan SCC fluktuatif namun nilainya cenderung naik seiring semakin besarnya persentase agregat daur ulang yang digunakan.

perpustakaan.uns.ac.id digilib.uns.ac.id

Hal yang mempengaruhi turunnya kuat tekan pada SCC dengan kombinasi agregat alami pecah dan agregat daur ulang seiring dengan bertambahnya persentase agregat daur ulang adalah kemampuan agregat daur ulang untuk menyerap air lebih banyak (3,23%) dibandingkan agregat alami pecah (1%). Semakin banyak jumlah air yang terserap dalam suatu agregat akan membuat agregat tersebut semakin mudah hancur dan mengurangi jumlah air yang akan bereaksi dengan semen. Persentase penurunan kuat tekan SCC kombinasi agregat alami pecah dengan agregat daur ulang dapat dilihat pada Tabel 4.16.

Persentase kenaikan kuat tekan SCC kombinasi agregat alami pecah dengan agregat daur ulang dapat dilihat pada Tabel 4.16.

Tabel 4.16. Pengaruh jumlah agregat daur ulang terhadap kuat tekan SCC dengan kombinasi agregat alami pecah dengan agregat daur ulang

Kuat Tekan SCC 100% Agregat Alami Pecah (MPa)	Persentase Agregat Daur Ulang	Kuat Tekan Rata-rata (MPa)	Selisih Kuat Tekan	
			MPa	%
50,74	20 %	46,59	- 4,15	8,18
	40 %	46,12	- 4,62	9,10
	60 %	45,08	- 5,66	11,15
	80 %	46,03	- 4,71	9,28
	100 %	44,52	- 6,22	12,26

Untuk SCC dengan kombinasi agregat alami bulat dengan agregat daur ulang, kuat tekan juga fluktuatif, namun cenderung naik seiring naiknya persentase jumlah agregat daur ulang. Selain karena sifat keausan agregat daur ulang yang lebih kecil (38,33%) bila dibandingkan dengan agregat alami bulat (45,33%), kenaikan kuat tekan juga disebabkan karena bentuk agregat daur ulang yang cenderung bersudut

dan kasar, sehingga mengakibatkan ikatan antara agregat dengan pasta semen menjadi lebih kuat dibandingkan dengan agregat alami bulat yang permukaannya bulat dan halus. Persentase kuat tekan SCC kombinasi agregat alami bulat dengan agregat daur ulang dapat dilihat pada Tabel 4.17.

Tabel 4.17. Pengaruh jumlah agregat daur ulang terhadap kuat tekan SCC dengan kombinasi agregat alami bulat dengan agregat daur ulang

Kuat Tekan SCC 100% Agregat Alami Bulat (MPa)	Persentase Agregat Daur Ulang	Kuat Tekan Rata-rata (MPa)	Selisih Kuat Tekan	
			MPa	%
27,35	20 %	30,56	+ 3,21	11,74
	40 %	34,90	+ 7,55	27,61
	60 %	36,12	+ 8,77	32,07
	80 %	39,33	+ 11,98	43,80
	100 %	44,52	+ 17,17	62,78

4.4.3. Modulus Elastisitas

Nilai modulus elastisitas beton pada umumnya berbanding lurus dengan nilai kuat tekannya. Apabila nilai kuat tekan beton tinggi, maka modulus elastisitasnya cenderung tinggi. Namun berdasarkan Tabel 4.14. dan Gambar 4.18. dapat dilihat nilai modulus elastisitas tidak berbanding lurus dengan nilai kuat tekannya dan cenderung fluktuatif.

Fluktuasi nilai modulus elastisitas dapat disebabkan oleh kurang seragamnya sifat agregat daur ulang, karena proses pemecahan dan pemilihan beton yang sederhana (manual). Selain itu, agregat daur ulang yang berasal dari sisa benda uji yang masih baru juga mempengaruhi sifat agregat tersebut sehingga kekuatannya hampir sama, bahkan melebihi agregat alami.

Nilai modulus elastisitas pada SCC kombinasi agregat alami pecah dengan agregat daur ulang dapat dilihat pada Tabel 4.18.

Tabel 4.18. Pengaruh jumlah agregat daur ulang terhadap modulus elastisitas SCC dengan kombinasi agregat alami pecah dengan agregat daur ulang

Modulus Elastisitas Rata-Rata SCC 100% Agregat Alami Pecah (MPa)	Persentase Agregat Daur Ulang	Modulus Elastisitas Rata-rata (MPa)	Selisih Modulus Elastisitas	
			MPa	%
15655,67	20 %	13493,67	-2162,00	-13,81%
	40 %	19898,50	4239,83	27,08%
	60 %	10018,67	-5637,00	-36,01%
	80 %	17213,00	1557,33	9,95%
	100 %	16784,33	1128,67	7,21%

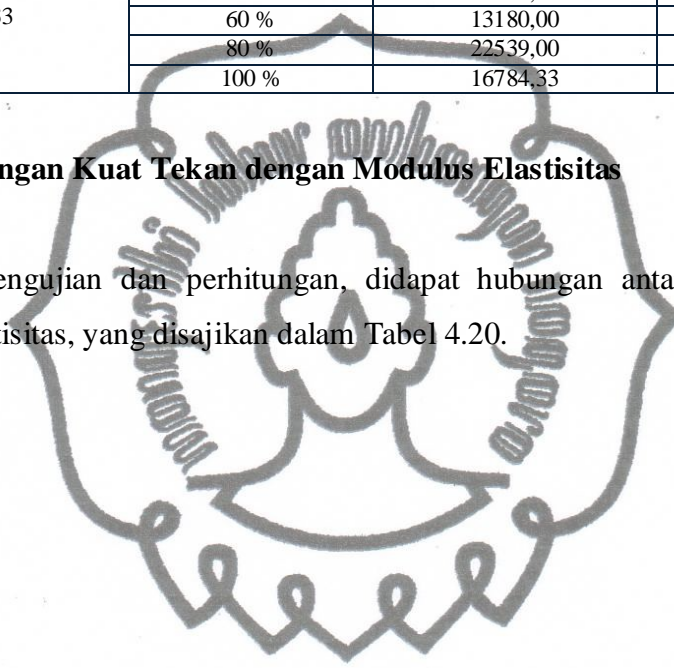
Nilai modulus elastisitas pada SCC kombinasi agregat alami bulat dengan agregat daur ulang dapat dilihat pada Tabel 4.19.

Tabel 4.19. Pengaruh jumlah agregat daur ulang terhadap modulus elastisitas SCC dengan kombinasi agregat alami bulat dengan agregat daur ulang

Modulus Elastisitas SCC 100% Agregat Alami Bulat (MPa)	Persentase Agregat Daur Ulang	Modulus Elastisitas (MPa)	Selisih Modulus Elastisitas	
			MPa	%
13773,33	20 %	16253,00	2479,67	18,00
	40 %	10905,33	- 2868,00	-21,82
	60 %	13180,00	- 593,33	-4,31
	80 %	22539,00	8765,67	63,64
	100 %	16784,33	3011,00	21,86

4.4.4. Hubungan Kuat Tekan dengan Modulus Elastisitas

Dari hasil pengujian dan perhitungan, didapat hubungan antara kuat tekan dan modulus elastisitas, yang disajikan dalam Tabel 4.20.



Tabel 4.20. Hubungan antara kuat tekan dan modulus elastisitas

Agregat Kasar	% Agregat Daur Ulang	f'c rata-rata (MPa)	Ec perhitungan rata-rata (MPa)	Rumus Empiris Hasil Perhitungan
Agregat Alami Pecah dan Agregat Daur Ulang	0%	50,74	15655,67	$2197,82 \times \sqrt{f'c}$
	20%	46,59	13493,67	$1976,87 \times \sqrt{f'c}$
	40%	46,12	19895,00	$2929,63 \times \sqrt{f'c}$
	60%	45,08	10018,67	$1492,13 \times \sqrt{f'c}$
	80%	46,03	17213,00	$2537,22 \times \sqrt{f'c}$
Agregat Daur Ulang	100%	44,52	16784,33	$2515,62 \times \sqrt{f'c}$
Agregat Alami Bulat dan Agregat Daur Ulang	0%	27,35	13773,33	$2633,61 \times \sqrt{f'c}$
	20%	30,56	15211,00	$2751,67 \times \sqrt{f'c}$
	40%	34,90	10905,33	$1846,08 \times \sqrt{f'c}$
	60%	36,12	13180,00	$2192,95 \times \sqrt{f'c}$
	80%	39,33	22539,00	$3594,00 \times \sqrt{f'c}$

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 4.20 didapatkan bahwa nilai modulus elastisitas semua variasi lebih kecil dari formula SK SNI-T-15-1991 pada Persamaan 4.2.

4.4.5. Kuat Lentur (*Modulus of Rupture*)

Hasil penelitian mengenai pengaruh agregat daur ulang terhadap kuat lentur SCC menunjukkan bahwa apabila dikombinasikan dengan agregat alami pecah, kuat lentur SCC cenderung semakin meningkat, dan peningkatan tertinggi terjadi pada penggunaan 80% agregat daur ulang yakni naik 61,29% , namun untuk penggunaan 100% daur ulang, peningkatan kuat lentur yang terjadi hanya 9,68% .

Kuat lentur SCC yang menggunakan kombinasi agregat bulat dengan agregat daur ulang menunjukkan nilai yang fluktuatif, dengan nilai kuat lentur tertinggi didapatkan pada penggunaan 0% agregat daur ulang dan nilai terendah pada penggunaan 20% dan 100% agregat daur ulang.

Penelitian sebelumnya oleh Limbachiya, dkk (2004) mengenai beton daur ulang (non SCC) yang dilakukan, menunjukkan bahwa kuat lentur juga mengalami nilai yang fluktuatif. Kuat lentur pada beton tanpa agregat daur ulang adalah 4,4 MPa, untuk penggunaan agregat daur ulang 30% dan 50% nilainya turun menjadi 4,3MPa, sedangkan dengan 100% agregat daur ulang kuat lentur naik menjadi 4,5 MPa.

Pengaruh agregat daur ulang pada SCC terhadap kuat lentur tidak sesuai dengan perkiraan awal, yakni berbanding lurus dengan kuat tekan. Faktor yang dapat mempengaruhi fluktuatifnya nilai kuat lentur adalah metode pengujian yang menerapkan sistem penambahan tegangan dengan interval 5 kgf/cm². Tegangan kritis pada saat beton mengalami retak mungkin saja berada pada titik di antara interval tersebut (tidak tepat bernilai kelipatan 5 kgf/cm²), namun nilai *dial* yang dapat terbaca adalah kelipatan 5 kgf/cm² yang nilainya lebih kecil dari tegangan beban kritis, sehingga tidak mewakili tegangan kritis tersebut. Selain itu homogenitas campuran dan sebaran agregat di dalam cetakan juga dapat mempengaruhi kuat lentur. Pengaruh agregat daur ulang terhadap kuat lentur SCC dapat dilihat pada Tabel 4.21. dan Tabel 4.22.

Tabel 4.21. Pengaruh agregat daur ulang terhadap kuat lentur SCC kombinasi agregat alami pecah dan agregat daur ulang

MOR SCC 100 % Agregat Kasar Alami Pecah (MPa)	% Agregat Daur Ulang	MOR (MPa)	Selisih MOR	
			(MPa)	(%)
1,9203	20%	2,3540	+0,4337	22,59
	40%	2,2920	+0,3717	19,356
	60%	2,9734	+1,0531	54,84
	80%	3,0973	+1,177	61,29
	100%	2,1062	+0,1859	9,68

Tabel 4.22. Pengaruh agregat daur ulang terhadap kuat lentur SCC kombinasi agregat alami bulat dan agregat daur ulang

MOR SCC 100 % Agregat Kasar Alami Bulat (MPa)	% Agregat Daur Ulang	MOR (MPa)	Selisih MOR	
			(MPa)	(%)
2,6018	20%	2,1062	0,4956	19,05
	40%	2,5398	- 0,062	- 2,37
	60%	2,3540	-0,2478	- 9,52
	80%	2,4779	-0,1239	- 4,76
	100%	2,1062	- 0,49	- 19,05

4.4.6. Hubungan Kuat Tekan dengan Kuat Letur (*Modulus of Rupture*)

Pada umumnya kuat tekan berbanding lurus dengan kuat lentur. Namun pada penelitian ini, nilai kuat lentur tidak berbanding lurus dengan kuat tekan, namun cenderung fluktuatif. Menurut ACI hubungan kuat lentur dengan kuat tekan dinyatakan dengan:

$$MOR = 0,23 f'c^{0,75} \dots\dots\dots (4.3)$$

Perbandingan kuat tekan dan kuat lentur mengacu pada standar yang dibuat oleh ACI dapat dilihat pada Tabel 4.23. dan Tabel 4.24.

Tabel 4.23. Hubungan kuat tekan dan kuat lentur SCC kombinasi agregat alami pecah dan agregat daur ulang

% Agregat Daur Ulang	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Lentur (MPa)	Hubungan Kuat Tekan dan Kuat Lentur
0%	50,74	1,92	MOR = 0,10 f'c ^{0,75}
20%	46,59	2,35	MOR = 0,13 f'c ^{0,75}
40%	46,12	2,29	MOR = 0,13 f'c ^{0,75}
60%	45,08	2,97	MOR = 0,17 f'c ^{0,75}
80%	46,03	3,10	MOR = 0,18 f'c ^{0,75}
100%	44,52	2,11	MOR = 0,12 f'c ^{0,75}

Tabel 4.24. Perbandingan kuat tekan dan kuat lentur SCC kombinasi agregat alami bulat dan agregat daur ulang

% Agregat Daur Ulang	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Lentur (MPa)	Hubungan Kuat Tekan dan Kuat Lentur
0%	27,35	2,60	MOR = 0,17 f'c ^{0,75}
20%	30,56	2,11	MOR = 0,16 f'c ^{0,75}
40%	34,90	2,54	MOR = 0,18 f'c ^{0,75}
60%	36,12	2,35	MOR = 0,16 f'c ^{0,75}
80%	39,33	2,48	MOR = 0,16 f'c ^{0,75}
100%	44,52	2,11	MOR = 0,12 f'c ^{0,75}

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 4.23 dan Tabel 4.24 didapatkan bahwa nilai kuat lentur semua variasi lebih kecil dari formulasi ACI pada Persamaan 4.3.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

perpustakaan.uns.ac.id

digilib.uns.ac.id

Dari hasil pengujian, analisis data dan pembahasan maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- a) Penggunaan material daur ulang pada beton SCC berpengaruh pada kuat tekan. Pada beton SCC kombinasi agregat alami pecah dan agregat daur ulang, kuat tekan cenderung menurun seiring dengan bertambahnya persentase agregat daur ulang dengan persentase penurunan 12,26% (dari 50,74 MPa menjadi 44,52 MPa). Hal ini disebabkan oleh sifat material daur ulang yang nilai serapan airnya lebih tinggi (5,6%) bila dibandingkan dengan agregat alami pecah (1%).

Untuk SCC kombinasi agregat alami bulat dengan agregat daur ulang, kuat tekan cenderung naik seiring dengan bertambahnya persentase agregat daur ulang dengan persentase kenaikannya 62,78% (dari 27,35 MPa menjadi 44,52 MPa). Hal ini disebabkan oleh bentuk agregat daur ulang yang bersudut menyebabkan ikatan antara agregat dan pasta semen menjadi lebih kuat. Selain itu, keausan dari agregat daur ulang juga lebih rendah (38,33%) apabila dibandingkan dengan agregat alami bulat (45,33%).

- b) Pengaruh agregat daur ulang pada SCC terhadap modulus elastisitas tidak berbanding lurus dengan kuat tekannya. Hal ini tidak sesuai dengan perkiraan awal. Hal yang menyebabkan nilai modulus elastisitas menjadi fluktuatif adalah sifat dari material daur ulang yang tidak *homogen*, karena masih diproses secara manual. Untuk SCC kombinasi agregat alami pecah dan agregat daur ulang, nilai modulus elastisitas cenderung fluktuatif dengan nilai optimal terjadi pada penggunaan 40% agregat daur ulang dengan peningkatan modulus elastisitas

hingga 27,08% sedangkan untuk penggunaan 100% peningkatan yang terjadi 7,21%.

Sedangkan pada SCC kombinasi agregat alami bulat dan agregat daur ulang nilai modulus elastisitas juga fluktuatif, dengan nilai optimal pada penggunaan 80% agregat daur ulang dengan kenaikan hingga 63,64% sedangkan untuk penggunaan 100% peningkatan yang terjadi 21,86%.

- c) Penambahan persentase material daur ulang pada SCC kombinasi agregat kasar alami pecah dan daur ulang cenderung meningkatkan kuat lentur. Kuat lentur optimal terjadi pada penggunaan 80% agregat daur ulang, yakni meningkat 61,29% sedangkan pada penggunaan 100% daur ulang, peningkatan yang terjadi 9,68%.

Untuk SCC kombinasi agregat alami bulat dengan agregat daur ulang, kuat lentur cenderung fluktuatif, namun hasil dari penggunaan 100% material daur ulang menunjukkan terjadinya penurunan kuat lentur sebesar 19,05%.

5.2. Saran

Untuk menindaklanjuti penelitian ini kiranya perlu dilakukan beberapa koreksi yang diperlukan agar penelitian-penelitian selanjutnya dapat lebih baik. Adapun saran-saran untuk penelitian selanjutnya antara lain:

- Melakukan penelitian lanjutan mengenai material daur ulang yang digunakan sebagai agregat halus.
- Memilih sumber material daur ulang dari berbagai tempat, seperti reruntuhan bangunan dan limbah sisa proyek.
- Dapat melakukan penelitian lanjutan dengan menggunakan semen selain *OPC*.
- Melakukan penelitian dengan jumlah benda uji yang lebih banyak.