



UNIVERSITAS INDONESIA

**Studi Kekuatan Tarik dan Lentur Beton dengan Menggunakan
Kaca Sebagai Filler dan Pengganti Agregat Halus Pada
Campuran Beton**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana

DIAN ALVIS ABDILAH

0405010175

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
KEKHUSUSAN STRUKTUR
DEPOK
JULI 2009**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

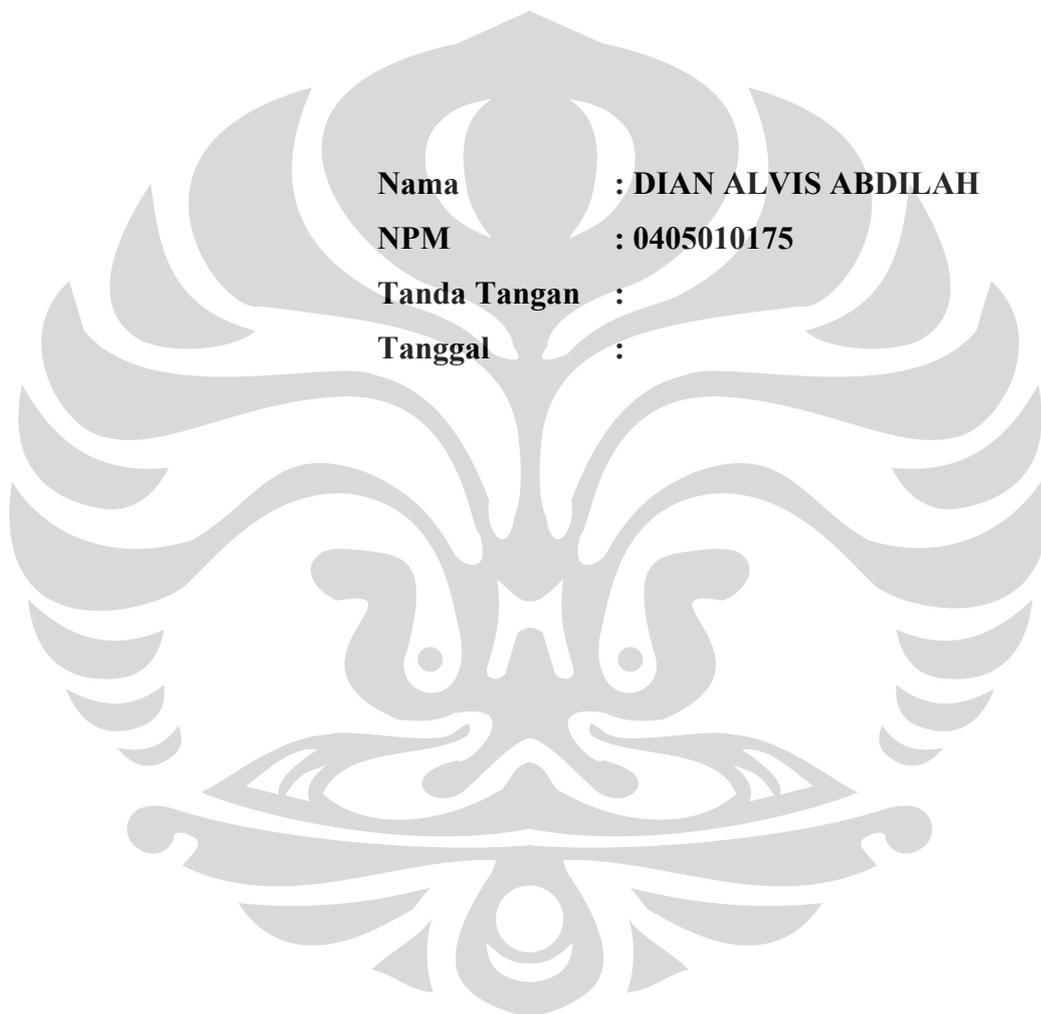
**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar**

Nama : DIAN ALVIS ABDILAH

NPM : 0405010175

Tanda Tangan :

Tanggal :



KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT karena atas limpahan hidayah-Nya penulisan skripsi dengan judul **“Studi Kekuatan Tarik dan Lentur Beton dengan Menggunakan Kaca Sebagai Filler dan Pengganti Agregat Halus Pada Campuran Beton”** dapat diselesaikan dengan baik. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Departemen Sipil pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari semua perkuliahan sampai pada penyusunan seminar ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan seminar ini. Oleh karena itu saya juga mengucapkan terima kasih kepada :

1. Dr.Ir.Elly Tjahjono dan Ir.H. Madsuri, MT sebagai pembimbing dalam penulisan seminar ini.
2. Dosen Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Indonesia yang sudah mendidik penulis.
3. Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan moral; dan
4. Semua pihak yang sudah membantu dengan baik penulisan seminar ini

Saya menyadari bahwa dalam penulisan seminar ini masih terdapat kesalahan karena keterbatasan pengetahuan penulis. Oleh karena itu dimohon saran untuk perbaikan tulisan ini.

Depok, 1 Juli 2009

Penulis

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Dian Alvis Abdilah

NPM : 0405010175

Program Studi : Teknik Sipil

Judul Skripsi : Studi Kekuatan Tarik dan Lentur Beton dengan Menggunakan Kaca Sebagai Filler dan Pengganti Agregat Halus Pada Campuran Beton.

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Elly Tjahjono, DEA ()

Pembimbing : Ir.H.Madsuri, M.T ()

Penguji : Ir. Essy Ariyuni, Msc, Phd ()

Penguji : Dr-Ing. Josia Irwan Rastandi ()

Ditetapkan di :

Tanggal :

ABSTRAK

Nama : Dian Alvis Abdilah
Program Studi : Teknik Sipil
Judul : Studi Kekuatan Tarik dan Lentur Beton dengan Menggunakan Kaca Sebagai Filler dan Pengganti Agregat Halus Pada Campuran Beton.

Limbah Kaca dihasilkan dari kegiatan manusia baik kegiatan sosial ataupun kegiatan industri, pada kebanyakan kota besar seperti Jakarta kebanyakan limbah kaca ini dibuang langsung ke alam tanpa proses pengolahan terlebih dahulu. Seperti kita ketahui alam memerlukan waktu yang lama untuk mendaur ulang kaca, karena alasan itu harus ada inovasi untuk mengurangi limbah kaca ini. Karena alasan itu pula pada penelitian ini kaca akan dijadikan sebagai filler dan pengganti agregat halus pada campuran beton. Pada penelitian ini akan dibuat dua variasi kaca sebagai filler (5 % dan 10 %) dan dibuat dua variasi kaca sebagai agregat halus (20% dan 30%).

Hasil dari pengujian menunjukkan bahwa penggunaan kaca sebagai filler dan agregat halus akan menurunkan kekuatan tarik dari beton, hasil ini didapat dari hasil uji tarik belah dan uji pembebanan tiga titik, dimana uji keduanya berguna untuk mengetahui kekuatan tarik beton secara tidak langsung.

Kata Kunci : *Kuat Tarik Beton, Kuat Lentur Beton, Limbah Kaca, Filler Kaca, Agregat Halus Kaca*

ABSTRACT

Nama : Dian Alvis Abdilah
Program Studi : Teknik Sipil
Judul : Study of Concrete Tensile Strength and Flexural Strength with Glass as Filler and Fine Aggregate Substitution in Mix Design.

Glass waste is produce from human social live or industrial process, specially in big city like jakarta many of this waste have no recovery psocess, but it is fill directly to the earth, as we know the earth can't recover the glass immediately. Because that reason there must be innovation to reduce this glass waste. For that reason, this glass waste will be add to concrete as filler or substitute fine aggregate.

In this research, the glass is make in two variant as filler (5% and 10 %), and two variant as fine aggregate (20 % and 30 %). The result from this research we can see that tensile strength from concrete using glass as filler or fine aggregate is lower than normal concrete. This result is from spliting test and tird point load test, as we know both method is for explain tensile strength undirrectly.

Keyword : *Concrete Tensile Strength, Concrete Flexural Strength, Glass Waste, Glass Filler, Glass Fine Aggregate*

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS
AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Dian Alvis Abdilah
NPM : 0405010175
Program Studi : Teknik Sipil
Departemen : Teknik Sipil
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada universitas indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif** (*Non-exclusive Royalty Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul

STUDI KEKUATAN TARIK dan LENTUR BETON DENGAN
MENGUNAKAN KACA SEBAGAI FILLER dan PENGGANTI AGGREGAT
HALUS PADA CAMPURAN BETON

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian Pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada Tanggal : 1 Juli 2009

Yang menyatakan

(Dian Alvis Abdilah)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
KATA PENGANTAR	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
ABSTRAK.....	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	vi
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Manfaat Penelitian	2
1.5 Batasan Penelitian	3
1.6 Metodologi Penelitian	3
1.7 Sistematika Pembahasan.....	4
DASAR TEORI	5
2.1 Pengertian Beton Secara Umum	5
2.2 Sifat – Sifat Campuran Beton	5
2.2.1 Kemampuan dikerjakan (workability)	5
2.2.2 Waktu pengikatan (setting time).....	6
2.2.3 Kedap air.....	6
2.2.4 Keuntungan dan Kerugian Penggunaan Beton	7
2.3 Bahan-Bahan dalam Campuran Beton.....	8
2.3.1 Agregat.....	8
2.3.2 Semen.....	14
2.3.3 Air	20
2.3.4 Bahan Tambahan.....	20
2.4 Kaca dan Fenomena alkali-silika reaction (ASR).....	21
2.5 Mix Desain	24
2.6 Karakteristik Tarik, dan Kekuatan Lentur Beton.....	26
2.6.1 Kuat tarik beton.....	26
2.6.2 Kuat Lentur	27
METODOLOGI PENELITIAN.....	28
3.1 Prosedur Penelitian	28
3.2 Standar Pengujian	28
3.3 Material yang Digunakan.....	29
3.4 Pemeriksaan Bahan	30
3.4.1 Pemeriksaan Agregat Kasar	30

3.4.2	Pemeriksaan Agregat Halus	36
3.5	Perhitungan Mix Desain.....	42
3.6	Pembuatan Sampel.....	42
3.7	Pengujian Sampel.....	44
3.7.1	Pengujian Slump Beton	44
3.7.2	Pengujian Tarik Belah Beton	45
3.7.3	Pengujian Kuat Lentur Beton.	47
HASIL PENELITIAN DAN ANALISA TARIK DAN LENTUR.....		51
4.1	Properti Agregat.....	51
4.2	Perhitungan Rancang Campur.....	65
4.3	Hasil Tes Tarik Belah dan Analisanya.....	65
4.4	Hasil Tes Kuat Lentur dan Analisanya	73
4.5	Perbandingan Hasil Tes Tarik Belah (<i>Splitting Test</i>) dan Lentur (<i>Flexural Test</i>)	79
4.6	Perbandingan Hasil Tes Tarik Belah (<i>Splitting Test</i>), Tes Lentur (<i>flexural Test</i>) dan Tes Tekan (<i>Crushing Test</i>).....	80
KESIMPULAN DAN SARAN.....		82
5.1.	KESIMPULAN	82
5.2.	SARAN DAN USULAN PENELITIAN SELANJUTNYA.....	82
DAFTAR REFERENSI		84

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Perkembangan peradaban manusia setiap tahunnya selalu meningkat. Perkembangan peradaban ini juga merupakan hasil dari perkembangan ilmu pengetahuan, perkembangan ilmu pengetahuan pada umumnya akan memberikan kemudahan dalam kehidupan manusia. Perkembangan ini memberikan dampak positif dan negatif terhadap kehidupan sehari – hari. Dampak negatif yang paling utama adalah masalah limbah yang dihasilkan dari kegiatan manusia. Limbah ini sebagian besar langsung dibuang ke alam tanpa dilakukan pengolahan, sehingga mengakibatkan kerusakan lingkungan.

Limbah kaca merupakan limbah yang banyak dihasilkan dari kehidupan masyarakat terutama di kota besar seperti Jakarta dan kota lainnya. Limbah kaca setiap hari semakin meningkat volumenya karena banyak kegiatan manusia yang menghasilkan kaca. Kegiatan ini meliputi konsumsi manusia terhadap minuman yang menggunakan kaca sebagai kemasan ataupun kegiatan industri yang ada dimasyarakat. Berdasarkan fakta yang ada di lapangan sebagian besar limbah kaca langsung dibuang ke lahan terbuka yang ada. Hal ini tentu saja akan mencemari lingkungan mengingat kaca merupakan material yang tidak dapat didaur ulang secara alami oleh alam.

Oleh karena itu harus dilakukan suatu inovasi untuk mengurangi limbah kaca. Salah satunya dengan memanfaatkan limbah kaca yang ada sebagai salah satu material campuran beton. Dalam hal ini kaca akan dijadikan sebagai *filler* dan juga sebagai pengganti *aggregate* halus pada campuran beton. Dengan *filler* dan *aggregate* halus kaca diharapkan dapat mengisi rongga yang ada pada beton. Dengan penggunaan kaca sebagai *filler* dan *aggregate* halus diharapkan dapat menghasilkan campuran beton dengan mutu tinggi sehingga limbah kaca dapat dijadikan sebagai material alternatif campuran.

Dari sifat kimia yang ada, kaca merupakan material yang reaktif jika ditambahkan pada campuran beton. Hal ini akan mengakibatkan permasalahan

pada campuran yang akan dibuat, fenomena ini sering disebut dengan *alkali-silika reaction (ASR)*. Akibat dari fenomena ini adalah *ASR gel* akan menyebabkan beton mengembang karena absorpsi uap yang lembab.

ASR merupakan proses kemofisika yang memungkinkan terjadinya kerusakan secara mekanis, pengembangan dan ekspansi. Kerusakan tergantung dari komposisi beton yang akan dibuat. Dimana dengan komposisi kaca (*filler dan aggregate*) yang ditambahkan akan diteliti apakah kuat rencana campuran akan tercapai. Penelitian ini meliputi pengujian tarik, dan lentur pada beton dengan tambahan *filler* kaca dan *aggregate* halus kaca.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan utama yang akan diangkat pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

- Pengaruh penambahan *filler* dan *aggregate* halus kaca pada campuran terhadap kuat tarik, dan lentur pada beton.
- Berapa komposisi yang dapat menghasilkan kekuatan beton yang optimum.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kuat tarik maksimum, dan kuat lentur maksimum yang akan terjadi pada beton dengan tambahan kaca sebagai *filler* dan sebagai pengganti *aggregate* halus pada komposisi tertentu serta mengetahui komposisi yang tepat untuk campuran.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah dapat mengurangi jumlah limbah kaca yang dibuang ke lingkungan serta sebagai alternatif baru pembuatan beton dengan menggunakan limbah kaca sebagai *filler* dan pengganti *aggregate* halus pada campuran.

1.5 Batasan Penelitian

Pada penelitian ini adalah akan dibuat sampel benda uji dengan 4 kadar *filler* kaca yang berbeda, yaitu sebesar 0% , 5% , dan 10 % dari volume semen yang digunakan. Sedangkan sebagai pengganti *aggregate* halus digunakan 2 kadar kaca, yaitu sebesar 10% dan 20%. Batasan-batasan yang akan digunakan dalam penelitian adalah sebagai berikut :

1. Beton didesain dengan f_c' 35 MPa.
2. Kaca digunakan sebagai bahan tambahan (*filler*) dan sebagai pengganti *aggregate* halus dalam beton.
3. Bahan kaca didapatkan dari sisa botol minuman Heineken dan bir Bintang (kaca yang berwarna hijau).
4. Untuk pengujian kuat tarik beton akan dibuat sampel sebanyak 60 buah untuk *filler* kaca dan 30 buah untuk *aggregate* halus kaca.
5. Untuk pengujian kuat lentur akan digunakan sampel sebanyak 36 buah untuk *filler* kaca dan 18 buah untuk *aggregate* halus kaca.
6. Percobaan dilakukan di laboratorium Struktur dan Material Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

1.6 Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian yang digunakan adalah dengan melakukan studi literatur, membuat hipotesa, membuat metode percobaan, melakukan percobaan, membuat pengolahan data percobaan, menganalisa hasil percobaan, dan membuat kesimpulan akhir.

Urutan kegiatan adalah berikut:

1. Studi literatur.
2. Pemahaman karakteristik beton.
3. Pembuatan batasan penelitian.
4. Penentuan jumlah dan komposisi benda uji.
5. Mempersiapkan dan melakukan pengujian terhadap bahan-bahan penyusun benda uji.
6. Merancang campuran untuk benda uji di laboratorium.
7. Melakukan pengujian terhadap benda uji di laboratorium.

8. Mengumpulkan dan Mengolah data percobaan di laboratorium.
9. Membuat analisis hasil dan kesimpulan.

1.7 Sistematika Pembahasan

Sistematika penulisan hasil penelitian ini adalah sebagai berikut :

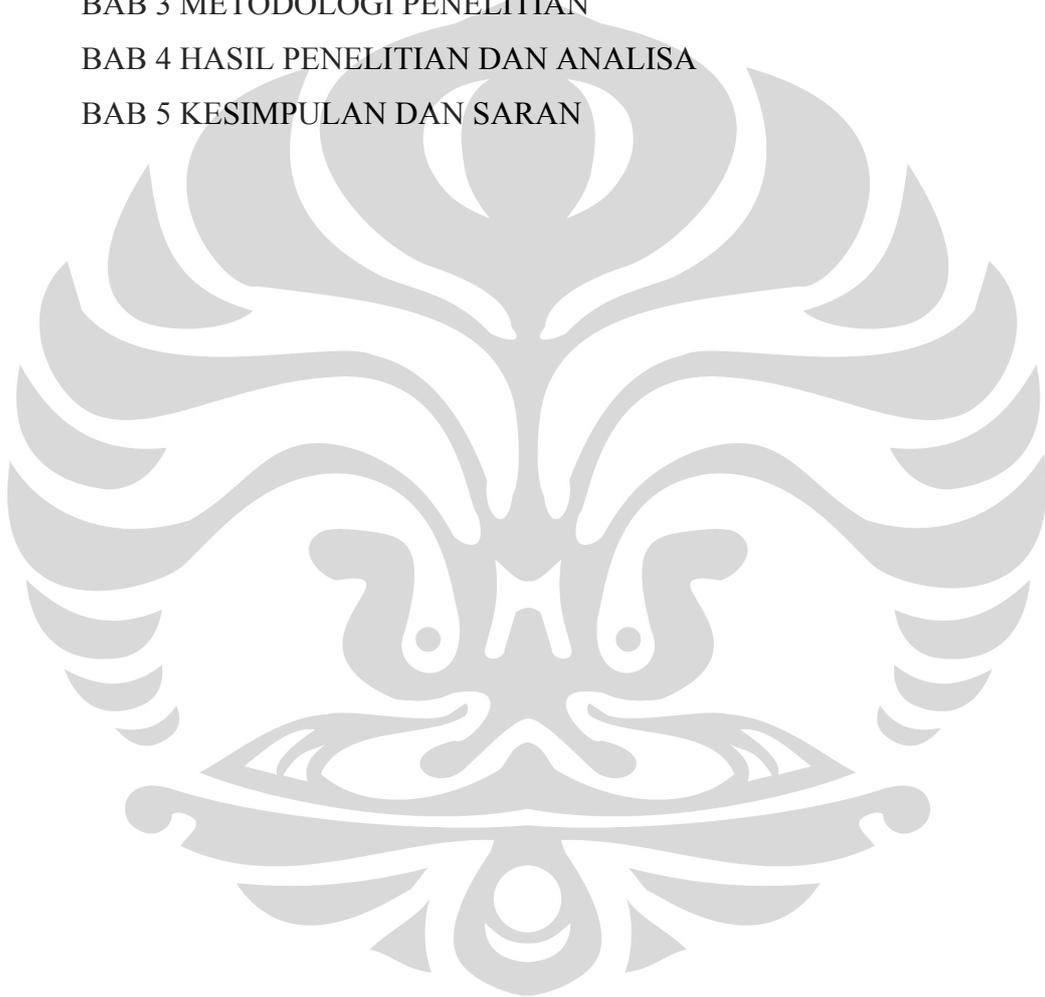
BAB 1 PENDAHULUAN

BAB 2 DASAR TEORI

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

BAB 4 HASIL PENELITIAN DAN ANALISA

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN



BAB 2

DASAR TEORI

2.1 Pengertian Beton Secara Umum

Beton dapat didefinisikan sebagai bahan yang merupakan campuran semen *Portland* atau semen hidraulik yang lain, agregat halus, agregat kasar dan air, dengan atau tanpa bahan tambahan yang membentuk massa padat.

Semen portland adalah semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menggiling terak semen portland terutama terdiri atas Kalsium silikat yang bersifat hidrolis dan digiling bersama-sama dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih bentuk kristal senyawa Kalsium sulfat dan boleh ditambah dengan bahan lain.¹

Agregat adalah material granular, misalnya pasir, kerikil, batu pecah dan kerak tungku besi, yang dipakai bersama-sama dengan suatu media pengikat untuk membentuk suatu beton semen hidraulik atau adukan. Agregat halus adalah pasir alam sebagai hasil desintegrasi 'alami' bantuan atau pasir yang dihasilkan oleh industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir terbesar 5,0 mm. Agregat kasar adalah kerikil sebagai hasil desintegrasi 'alami' dari bantuan atau berupa batu pecah yang diperoleh dari industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir antara 5-40 mm.²

Bahan tambahan adalah suatu bahan berupa bubukan atau cairan, yang dibubuhkan kedalam campuran beton selama pengadukan dalam jumlah tertentu untuk merubah beberapa sifatnya.

2.2 Sifat – Sifat Campuran Beton

2.2.1 Kemampuan dikerjakan (*workability*)

Kemampuan dikerjakan (*workability*) campuran beton adalah suatu nilai yang menunjukkan tingkat kemudahan pekerjaan dari beton tersebut yang dinyatakan dengan *slump* dalam cm. Semakin tinggi nilai *slump* maka

¹ SNI 15-2049-1994

² Standar Kompetensi Bidang Konstruksi Batu/Beton

semakin tinggi juga tingkat kemudahan dalam pekerjaan, semakin tinggi juga kadar air yang diperlukan, dan kuat tekan beton semakin rendah. *Slump* beton sebaiknya ditentukan serendah-rendahnya, tetapi dikerjakan dengan baik.

Dengan demikian sifat *Workability* dari beton sangat dipengaruhi oleh :

- Banyaknya air yang dipakai dalam campuran beton
- Gradasi campuran agregat kasar dan agregat halus
- Konsistensi normal semen
- Mobilitas setelah aliran dimulai
- Kohesi atau perlawanan terhadap pemindahan-pemindahan bahan
- Sifat saling lekat (ada hubungannya dengan kohesi) yang berarti penyusunnya tidak akan terpisah-pisah sehingga akan memudahkan dalam pengerjaan.

2.2.2 Waktu pengikatan (setting time)

Waktu pengikatan adalah waktu yang diperlukan oleh beton untuk mengalami pengikatan antar bahan-bahan pembentuk beton sehingga beton menjadi lebih keras. Waktu pengikatan dapat dipercepat dengan mengurangi kadar air menjadi kadar tertentu sehingga beton menjadi lebih cepat kering dan material pembentuk beton dapat saling berikatan satu sama lain. Waktu ikat beton yang lebih cepat sangat membantu dalam meminimalisasi durasi pekerjaan konstruksi sehingga secara tidak langsung dapat mempercepat waktu selesai proyek.

2.2.3 Kedap air

Beton biasanya mempunyai rongga-rongga yang diakibatkan oleh adanya gelembung udara yang terbentuk selama atau sesudah pencetakan selesai, atau ruangan yang saat pengerjaan mengandung air yang tidak tercampur sempurna dengan semen. Air tentunya akan mengalami penguapan apabila suhu di sekitarnya meningkat yang akan mengakibatkan

terbentuknya rongga udara dalam beton. Rongga udara ini merupakan tempat untuk masuk dan keluarnya air dalam beton.

2.2.4 Keuntungan dan Kerugian Penggunaan Beton

Pemakaian beton dalam bidang konstruksi mempunyai keuntungan dan kerugian, berikut akan diuraikan keuntungan dan kerugian pemakaian beton dalam bidang konstruksi.

a. Keuntungan pemakaian beton

1. Relatif ekonomis dibanding dengan material lain, karena menggunakan bahan-bahan lokal (kecuali semen).
2. Mempunyai kuat tekan tinggi, tahan terhadap korosi dan pengaruh cuaca.
3. Beton segar mudah ditangani dan dicetak dalam bentuk dan ukuran sesuai dengan yang diinginkan dan cetakan dapat dipakai ulang.
4. Dikombinasikan dengan tulangan baja, beton mampu dibuat sebagai struktur berat (keduanya mempunyai koefisien muai yang hampir sama).
5. Beton segar dapat disemprotkan pada permukaan beton lama sekaligus mengisi celah-celah retakan halus sebagai usaha perbaikan.
6. Beton segar dapat dipompakan sehingga memungkinkan dituangkan di tempat-tempat yang sulit.
7. Tahan lama dan tahan kebakaran dan sangat sedikit membutuhkan perawatan.
8. Mampu memikul beban yang berat

b. Kerugian pemakaian beton

1. Kuat tarik rendah sehingga mudah retak, karenanya perlu diberi tulangan baja.
2. Beton segar susut pada saat mengering dan beton keras mengembang jika basah.

3. Beton keras mengembang dan menyusut akibat perubahan suhu, karenanya perlu dibuat dilatasi (“*expansion joint*”) untuk mencegah retak akibat perubahan suhu.
4. Beton tidak dapat kedap air secara sempurna sehingga air yang mengandung garam dapat merusak beton.
5. Beton bersifat getas (daktilitas rendah) sehingga perlu direncanakan (dihitung dan didetail) secara seksama agar setelah dikompositkan dengan baja tulangan menjadi daktail terutama pada struktur tahan gempa.
6. Pelaksanaan pekerjaan membutuhkan ketelitian yang tinggi
7. Berat dan daya pentul suara yang besar.

2.3 Bahan-Bahan dalam Campuran Beton

2.3.1 Agregat

Agregat adalah material granular, misalnya pasir, kerikil, batu pecah dan kerak tungku besi, yang dipakai bersama-sama dengan suatu media pengikat untuk membentuk suatu beton semen hidraulik atau adukan. Jenis-jenis agregat yang digunakan dalam campuran beton akan dijelaskan dibawah ini.

2.3.1.1 Klasifikasi agregat

Berdasarkan sumbernya, agregat dapat dibagi menjadi 2 bagian, yaitu :

1. Agregat alam, yaitu agregat yang berasal dari alam tanpa pengolahan terlebih dahulu, pada umumnya adalah dari batu alam, baik dari batuan beku, batuan endapan atau batuan sedimen maupun dari batuan metamorph (malihan). Batu alam banyak digunakan sebagai bahan agregat karena sangat melimpah jumlahnya terutama di Indonesia yang banyak terdapat gunung api, dimana gunung api merupakan sumber batu alam dengan jumlah yang melimpah sehingga harganya murah. Selain itu, batuan alam juga memiliki sifat kekuatan dan keawetannya yang tinggi, sifat yang sangat dibutuhkan untuk agregat beton.
2. Agregat buatan. Agregat ini sengaja dibuat, contohnya ALWA (Artificial light weight aggregate) atau di Indonesia dikenal dengan nama “

Lempung bekah” Agregat ini dibuat dengan membakar jenis lempung tertentu, sehingga membentuk agregat yang mengembang atau membesar. Agregat ini termasuk agregat ringan, karena memiliki berat jenis ± 1.0 . Pemakaian lempung bekah untuk konstruksi adalah untuk pembuatan beton ringan.

Berdasarkan diameter butiran, agregat dibagi menjadi 2 bagian, yaitu :

1. Agregat halus, yaitu agregat yang lolos saringan No. 4 dan tertahan saringan No. 200. Agregat halus harus terdiri dari bahan-bahan yang berbidang kasar, bersudut tajam dan bersih dari kotoran-kotoran atau bahan-bahan lain yang tidak dikehendaki. Agregat halus bisa terdiri dari pasir bersih, bahan-bahan halus hasil pemecahan batu atau kombinasi dari bahan-bahan tersebut dan dalam keadaan kering, serta memenuhi persyaratan sebagai berikut ;
 - a. Nilai Sand Equivalent minimum 50 (AASHTO-T-1176)
 - b. Penyerapan agregat terhadap air maksimum 3% (ASTM C-128-04)
 - c. Berat jenis curah (Bulk) minimum 2.5 (ASTM C-29M-2003)
2. Agregat kasar, yaitu agregat yang tertahan pada saringan No. 4. Agregat harus terdiri dari batu pecah atau kerikil pecah yang bersih, kering kuat, awet, dan bebas dari bahan lain yang mengganggu serta memenuhi persyaratan sebagai berikut :
 - a. Jumlah butir yang tertahan saringan No. 4 yang mempunyai paling sedikit dua bidang pecah (visual) : minimum 50 % (khusus untuk kerikil pecah)
 - b. Indeks kepipihan butiran yang tertahan saringan 9.5 mm (3/8”) maksimum 25%
 - c. Penyerapan air maksimum 3 % (ASTM C-127-04)
 - d. Berat jenis curah minimum 2.5 % (ASTM C-29M-2003)
 - e. Bagian yang lunak maksimum 5% (AASHTO T-189)

Berdasarkan Berat, agregat dibagi menjadi 3 macam³, yaitu:

³ Teknologi Beton, Ir. Tri mulyono. MT

1. Agregat ringan biasanya digunakan untuk menghasilkan beton ringan dalam sebuah bangunan. Agregat ringan ini biasanya digunakan untuk isolasi atau bahan untuk pratekan dimana paling banyak digunakan untuk beton pra-cetak. Keuntungan dari beton dengan garet ringan ini adalah emepunyai sifat tahan api yang baik sedangkan kekurangannya adalah ukuran pori beton yang dibuat dengan agregat ini sangat besar sehingga penyerapannya akan besar juga.
2. Agregat normal dihasilkan dari pemecahan langsung dari alam. Agregat ini biasanya berasal dari granit, basalt, kuarsa dan sebagainya. Berat jenis rata-ratanya adalah 2.5-2.7 kg/dm³ atau tidak boleh kurang dari 1.2 kg/dm³. Beton yang dibuat dengan agregat ini adalah beton normal yaitu beton dengan berat isi 2200-2500 kg/dm³.
3. Agregat berat. Agregat ini mempunyai berat jenis lebih besar dari 2800 kg/m³. Sebagai contohnya adalah magnetik(FeO₄), barytes (BaSO₄) dan serbuk besi. Berat jenis beton yang dihasilkan dapat mencapai 5 kali berat jenis bahannya. Beton yang dibuat dengan agregat ini biasanya digunakan sebagai pelindung dari radiasi sinar X.

2.3.1.2 Sifat Fisik Agregat

Sifat fisik dari agregat sangat mempengaruhi sifat pada beton segar dan beton keras, beberapa sifat fisik pada agregat yang perlu diketahui adalah sebagai berikut :

Bentuk

Dilihat dari bentuknya agregat ini ada beberapa macam⁴, yaitu :

- a. Bentuk bulat (Rounded) terbentuk karena banyaknya gesekan yang dialami oleh batuan yang terbawa oleh arus sungai dengan batuan yang terdapat di lereng-lereng sungai, sehingga makin semakin sering batu tersebut bergesekan akibatnya menjadi berbentuk bulat. Rongga udaranya minimum 33% sehingga rasio luas permukaanya kecil.

⁴ Teknologi Beton Ir. Tri mulyono. MT

- b. Bentuk tidak beraturan (irregular), agregat ini bentuk permukaan agregatnya hampir sama dengan agregat bentuk bulat yaitu memiliki permukaan yang tidak tajam, hanya bentuknya saja yang tidak beraturan. Rongga udara pada agregat ini sekitar 35%-38% sehingga membutuhkan lebih banyak pasta semen agar mudah dikerjakan.
- c. Bersudut (angular), bentuknya tidak beraturan serta permukaannya tajam. Rongga udara pada agregat ini sekitar 38%-40% sehingga membutuhkan lebih banyak lagi pasta semen agar mudah dikerjakan.
- d. Bentuk pipih, dinamakan pipih karena ketebalannya lebih kecil dibandingkan dengan lebar dan panjangnya
- e. Agregat panjang. Agregat ini panjangnya jauh lebih besar dari pada lebarnya dan lebarnya jauh lebih besar daripada tebalnya. Agregat disebut panjang jika ukuran terbesarnya lebih dari $9/5$ dari ukuran rata-rata. Dimana ukuran rata-rata adalah ukuran ayakan yang meloloskan dan menahan butiran agregat.
- f. Agregat pipih dan panjang. Agregat ini mempunyai panjang yang jauh lebih besar daripada lebarnya, sedangkan lebarnya jauh lebih besar dari tebalnya.

Dari bentuk tersebut pengaruhnya terhadap beton segar adalah dalam sifat pengerjaan beton (Workability). Agregat dengan bentuk yang bersudut sulit untuk dikerjakan berbeda dengan agregat yang berbentuk bulat. Hal ini dikarenakan gesekan antar agregat pada bentuk yang bersudut lebih besar dibandingkan dengan yang bulat. Demikian pula agregat yang pipih dan lonjong akan mengalami kesulitan pada pengecoran, karena akan menghambat masuknya campuran beton ke dalam cetakan yang sempit atau karena rapatnya tulangan.

Pengaruh dari bentuk agregat yang bersudut pada beton keras sangat baik karena bentuknya tidak beraturan, dengan sudut-sudutnya yang tajam akan mempertinggi sifat saling mengunci (interlocking), sehingga kekuatan beton yang menggunakan agregat ini lebih tinggi dibandingkan dengan agregat bentuk bulat.

2.3.1.3 Susunan Butiran (gradasi)

Gradasi dalam agregat berpengaruh terhadap kepadatan beton. Untuk menghasilkan beton yang padat, diantara butiran harus saling mengisi. Untuk itu maka diperlukan variasi butiran agregat dari yang paling besar sampai yang paling kecil. Untuk mengetahui susunan butiran pada agregat dilakukan dengan analisa saringan. Agregat yang akan diuji dimasukkan ke dalam saringan yang telah ditentukan, kemudian saringan tersebut digetarkan selama 10 sampai 15 menit. Agregat yang tertahan pada masing-masing dianalisa, kemudian hasilnya dibandingkan dengan persyaratan atau spesifikasi yang ada. Syarat susunan butiran agregat untuk beton telah diatur dalam peraturan-peraturan seperti SK-SNI, ASTM dan British Standard. Menurut standar tersebut, gradasi agregat harus memenuhi syarat seperti tersebut di bawah ini.

a. Persyaratan gradasi agregat kasar

Menurut ASTM C 33-03 syarat besar butir agregat kasar adalah sebagai berikut :

Tabel 2.1 Syarat besar butir agregat kasar

Size Number	Nominal Size (Sieves with Square Openings)	Amounts Finer than Each Laboratory Sieve (Square-Openings), Mass Percent													
		100 mm (4 in.)	90 mm (3½ in.)	75 mm (3 in.)	63 mm (2½ in.)	50 mm (2 in.)	37.5 mm (1½ in.)	25.0 mm (1 in.)	19.0 mm (¾ in.)	12.5 mm (½ in.)	9.5 mm (¾ in.)	4.75 mm (No. 4)	2.36 mm (No. 8)	1.18 mm (No. 16)	300 µm (No.50)
1	90 to 37.5 mm (3½ to 1½ in.)	100	90 to 100	...	25 to 60	...	0 to 15	...	0 to 5	...	...	...	...	...	...
2	63 to 37.5 mm (2½ to 1½ in.)	...	...	100	90 to 100	35 to 70	0 to 15	...	0 to 5	...	...	...	...	...	...
3	50 to 25.0 mm (2 to 1 in.)	...	...	...	100	90 to 100	35 to 70	0 to 15	...	0 to 5	...	...	...	...	...
357	50 to 4.75 mm (2 in. to No. 4)	...	...	...	100	95 to 100	...	35 to 70	...	10 to 30	...	0 to 5	...	...	...
4	37.5 to 19.0 mm (1½ to ¾ in.)	...	...	...	...	100	90 to 100	20 to 55	0 to 15	...	0 to 5	...	...	...	...
467	37.5 to 4.75 mm (1½ in. to No. 4)	...	...	...	...	100	95 to 100	...	35 to 70	...	10 to 30	0 to 5	...	...	...
5	25.0 to 12.5 mm (1 to ½ in.)	...	...	...	...	...	100	90 to 100	20 to 55	0 to 10	0 to 5	...	...	...	...
56	25.0 to 9.5 mm (1 to ¾ in.)	...	...	...	...	...	100	90 to 100	40 to 85	10 to 40	0 to 15	0 to 5	...	...	...
57	25.0 to 4.75 mm (1 in. to No. 4)	...	...	...	...	...	100	95 to 100	...	25 to 60	...	0 to 10	0 to 5	...	...
6	19.0 to 9.5 mm (¾ to ¾ in.)	...	...	...	...	...	...	100	90 to 100	20 to 55	0 to 15	0 to 5	...	...	...
67	19.0 to 4.75 mm (¾ in. to No. 4)	...	...	...	...	...	...	100	90 to 100	...	20 to 55	0 to 10	0 to 5	...	...
7	12.5 to 4.75 mm (½ in. to No. 4)	...	...	...	...	...	...	...	100	90 to 100	40 to 70	0 to 15	0 to 5	...	...
8	9.5 to 2.36 mm (¾ in. to No. 8)	...	...	...	...	...	...	...	...	100	85 to 100	10 to 30	0 to 10	0 to 5	...
89	9.5 to 1.18 mm (¾ in. to No. 16)	...	...	...	...	...	...	...	...	100	90 to 100	20 to 55	5 to 30	0 to 10	0 to 5
9 ^A	4.75 to 1.18 mm (No. 4 to No. 16)	...	...	...	...	...	...	...	...	...	100	85 to 100	10 to 40	0 to 10	0 to 5

^A Although size 9 aggregate is defined in Terminology C 125 as a fine aggregate, it is included as a coarse aggregate when it is combined with a size 8 material to create a size 89, which is a coarse aggregate as defined by Terminology C 125.

b. Persyaratan gradasi agregat halus

Menurut ASTM C 33-03 syarat besar butir agregat halus adalah sebagai berikut

Tabel 2.2 Syarat besar butir agregat halus

Sieve No.	Percent passing
9.5-mm (3/8-in)	100
4.75-mm (No.4)	95-100
2.36-mm (No.8)	80-100
1.18-mm (No.16)	50-85
600- μm (No.30)	25-60
300- μm (No.50)	5-30
150- μm (No.100)	0-10

2.3.1.4 Berat jenis dan (*specific gravity*) dan Penyerapan air

Berat dari beton sangat dipengaruhi oleh berat jenis agregat yang digunakan. Berat jenis agregat juga sangat menentukan terhadap metode rancangan campuran (mix design) yang akan dipakai. Berat jenis pada agregat ada 3 macam⁵, yaitu :

1. Berat jenis (*bulk specific gravity*) ialah perbandingan antara berat agregat kering dan berat air suling yang isinya sama dengan isi agregat dalam keadaan jenuh pada kondisi suhu tertentu.
2. Berat jenis kering permukaan jenuh (*Saturated Surface Dry = SSD*) yaitu perbandingan antara berat agregat kering permukaan jenuh dan berat air suling yang isinya sama dengan isi agregat dalam jenuh pada suhu tertentu.
3. Berat jenis semu (*apparent specific gravity*) ialah perbandingan antara berat agregat kering dan berat air suling yang isinya sama dengan isi agregat dalam keadaan kering pada suhu tertentu.

Penyerapan air oleh agregat (absorption) adalah kemampuan suatu benda untuk menyerap air dari keadaan kering mutlak menjadi keadaan SSD. Penyerapan air pada agregat dipengaruhi terutama oleh banyaknya pori, diameter pori, serta kontinuitas pori. Agregat yang memiliki porositas yang tinggi, dan memiliki lubang pori besar serta lubang porinya menerus, penyerapan airnya tinggi.

⁵ ASTM D-128-79

2.3.2 Semen

Semen Portland dibuat dari serbuk halus mineral kristalin yang komposisi utamanya adalah kalsium dan alumunium silikat. Penambahan air pada mineral ini menghasilkan suatu pasta yang jika mengering akan mempunyai kekuatan seperti batu.

Bahan baku pembentuk semen adalah sebagai berikut:

1. Kapur (CaO) dari batu kapur
2. Silika (SiO₂) dari lempung
3. Alumunium (Al₂O₃) dari lempung

Kandungan kimia semen adalah sebagai berikut⁶ :

1. Trikalsium Silikat
2. Dikalsium Silikat
3. Trikalsium Aluminat
4. Tetrakalsium Aluminofe
5. Gypsum

2.3.2.1 Komposisi Kimia semen

Tabel 2.3 Komposisi kimia semen

Bahan	Kadar
CaO	60-67
SiO ₂	17-25
Al ₂ O ₂	3-8
Fe ₂ O ₃	0.5-6.0
MgO	0.5-4.0
Alkalis	0.3-1.2
SO ₃	2.0-3.5

Di dalam semen, oksida-oksida tersebut tidak terpisah satu dari yang lainnya melainkan merupakan senyawa-senyawa yang disebut senyawa semen.

⁶ www.wikipedia.com

2.3.2.2 Langkah Utama Proses Produksi Semen⁷

1. Penggalian/*Quarrying*: Terdapat dua jenis material yang penting bagi produksi semen: yang pertama adalah yang kaya akan kapur atau material yang mengandung kapur (*calcareous materials*) seperti batu gamping, kapur, dll., dan yang kedua adalah yang kaya akan silika atau material mengandung tanah liat (*argillaceous materials*) seperti tanah liat. Batu gamping dan tanah liat dikeruk atau diledakkan dari penggalian dan kemudian diangkut ke alat penghancur.
2. Penghancuran: Penghancur digunakan untuk pengecilan ukuran primer untuk material yang digali.
3. Pencampuran Awal: Material yang dihancurkan melewati alat analisis *on-line* untuk menentukan komposisi tumpukan bahan.
4. Penghalusan dan Pencampuran Bahan Baku: Sebuah *belt conveyor* mengangkut tumpukan yang sudah dicampur pada tahap awal ke penampung, dimana perbandingan berat umpan disesuaikan dengan jenis *klinker* yang diproduksi. Material kemudian digiling sampai kehalusan yang diinginkan.
5. Pembakaran dan Pendinginan Klinker: Campuran bahan baku yang sudah tercampur rata diumpukan ke *pre-heater*, yang merupakan alat penukar panas yang terdiri dari serangkaian *siklon* dimana terjadi perpindahan panas antara umpan campuran bahan baku dengan gas panas dari *kiln* yang berlawanan arah. Kalsinasi parsial terjadi pada *pre-heater* ini dan berlanjut dalam *kiln*, dimana bahan baku berubah menjadi agak cair dengan sifat seperti semen. Pada *kiln* yang bersuhu 1350°C -1400°C, bahan berubah menjadi bongkahan padat berukuran kecil yang dikenal dengan sebutan *klinker*, kemudian dialirkan ke pendingin klinker, dimana udara pendingin akan menurunkan suhu *klinker* hingga mencapai 100°C.

⁷ www.wikipedia.com

6. Penghalusan Akhir: Dari *silo klinker*, *klinker* dipindahkan ke penampung *klinker* dengan dilewatkan timbangan pengumpan, yang akan mengatur perbandingan aliran bahan terhadap bahan-bahan aditif. Pada tahap ini, ditambahkan gipsum ke *klinker* dan diumpankan ke mesin penggiling akhir. Campuran *klinker* dan gipsum untuk semen jenis 1 dan campuran *klinker*, gipsum dan posolan untuk semen jenis P dihancurkan dalam sistem tertutup dalam penggiling akhir untuk mendapatkan kehalusan yang dikehendaki. Semen kemudian dialirkan dengan pipa menuju silo semen.

2.3.2.3 Reaksi hidrasi pada semen⁸

Reaksi hidrasi pada semen adalah sebagai berikut:

1. Trikalsium Silikat



2. Dikalsium Silikat



3. Trikalsium Aluminat



4. Tetrakalsium Aluminofe



2.3.2.4 Jenis-jenis Semen

Semen yang diproduksi di Indonesia dibedakan lima jenis :

1. Jenis I (Normal) : semen untuk penggunaan umum yang tidak memerlukan persyaratan khusus.
2. Jenis II (modifikasi) : semen yang mempunyai panas hidrasi sedang atau pelepasan panas yang relative sedikit, untuk penggunaan beton tahan sulfat .
3. Jenis III : semen yang mempunyai panas hidrasi tinggi, untuk penggunaan beton dengan kekuatan awal tinggi (cepat mengeras).

⁸ Concrete admixtures handbook

4. Jenis IV : semen yang mempunyai panas hidrasi rendah, biasa digunakan untuk pengecoran dengan volume yang sangat besar.
5. Jenis V : semen yang mempunyai ketahanan terhadap sulfat.

Tabel 2.4 Komposisi senyawa semen⁹

Jenis semen	Komposisi (%)							Karakteristik Umum
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CasO ₄	CaO	MgO	
Normal, Tipe 1	49	25	12	8	2.9	0.8	2.4	Semen untuk semua tujuan (umum)
Modifikasi, Tipe II	46	29	6	12	2.8	0.6	3	Relatif sedikit, pelepasan panas, digunakan untuk struktur besar
Kekuatan awal tinggi, Tipe III	56	15	12	8	3.9	1.4	2.6	Mencapai kekuatan tinggi pada umur 3 hari
Pemanasan rendah, Tipe IV	30	46	5	13	2.9	0.3	2.7	Dipakai pada bendungan beton (volume cukup besar)
Tahan Sulfat, Tipe V	43	36	4	12	2.7	0.4	1.6	Dipakai pada saluran dan struktur yang diekspos terhadap sulfat

⁹ Concrete for construction. V K Raina 1993

Sedangkan menurut SNI jenis semen yang ada adalah sebagai berikut :

Tabel 2.5 jenis semen berdasarkan SNI¹⁰

No.SNI	Nama
SNI 15-0129-2004	Semen portland putih
SNI 15-0302-2004	Semen portland pozolan / Portland Pozzolan Cement (PPC)
SNI 15-2049-2004	Semen portland / Ordinary Portland Cement (OPC)
SNI 15-3500-2004	Semen portland campur
SNI 15-3758-2004	Semen masonry
SNI 15-7064-2004	Semen portland komposit

2.3.2.5 Kekuatan Semen

Kekuatan semen merupakan hasil dari proses hidrasi. Proses kimiawi ini berupa *ekristalisasi* dalam bentuk *interlocking-Crystal* sehingga membentuk gel semen yang akan mempunyai kekuatan tekan tinggi apabila mengeras. Tabel dibawah ini memperlihatkan kontribusi relatif masing-masing komponen semen dalam mencapai kekuatannya.

Kekuatan awal semen *portland* akan semakin tinggi apabila semakin banyak persentase C₂S. C₂S mempunyai kontribusi terhadap kekuatan selama beberapa hari sesudah pengecoran karena beban ini yang lebih dahulu mengalami hidrasi. Jika semen Portland dicampur dengan air, maka komponen kapur dilepaskan dari senyawanya. Banyaknya kapur yang dilepaskan ini sekitar 20 % dari berat semen.

Tabel 2.6 Sifat-sifat komponen senyawa semen

Komponen	Kelajuan Reaksi	Pelepasan Panas
Trikalsium silikat C ₃ S	Sedang	Sedang
Dikalsium Silikat C ₂ S	Lambat	Sedikit
Trikalsium Aluminat C ₃ A	Cepat	Banyak
Tetra kalsium aluminoferrat C ₄ AF	Lambat	Sedikit

¹⁰ www.wikipedia.com

2.3.2.6 Waktu pengikatan (*setting time*)

Semen memiliki sifat mengeras/mengikat bila dicampur dengan air. Waktu pengerasan semen dilakukan dengan menentukan waktu pengikatan awal (*initial setting*) dan waktu pengikatan akhir (*final setting*). Hal yang lebih penting adalah pengikatan awal, yaitu saat semen mulai terkena air hingga mulai terjadi pengikatan/pengerasan.

Untuk mengukur waktu pengikatan biasanya digunakan alat Vicat. Bagi jenis semen portland waktu pengikatan awalnya tidak boleh kurang dari 60 menit sejak terkena air. Pada kondisi tertentu, semen portland bisa saja mempunyai waktu ikat awal kurang dari 60 menit, dimana setelah semen dicampur dengan air segera tampak mulai mengeras. Hal ini bisa terjadi karena adanya pengikatan awal palsu yang disebabkan oleh pengaruh gips yang dicampur pada semen, sehingga tidak dapat bekerja sesuai dengan fungsinya.

2.3.2.7 Pengaruh kekuatan semen terhadap pencapaian kekuatan

Ukuran partikel semen mempunyai pengaruh yang besar terhadap kelajuan reaksi antara semen dengan air. Untuk suatu berat tertentu semen halus, luas permukaan partikel lebih besar daripada semen yang kasar. Ini menyebabkan kecepatan reaksi antara reaksi semen dengan air lebih tinggi, yang artinya proses pengerasan akan lebih cepat untuk luas permukaan yang lebih besar. Inilah penyebab mengapa semen yang berkekuatan awal tinggi (jenis III) mencapai kekuatannya dalam waktu tiga hari yaitu kekuatan yang dicapai oleh semen jenis I dalam waktu tujuh hari. Juga kekuatan yang dicapai dalam tujuh hari oleh semen jenis III sama dengan kekuatan yang dicapai dalam waktu 28 hari oleh semen jenis I.

2.3.2.8 Pengaruh semen terhadap keawetan beton

Disintegrasi beton akibat pemanasan, pendinginan, pencairan, pengeringan, juga penjalaran retak merupakan hal-hal yang sangat penting. Adanya rongga-rongga udara pada pasta semen semakin menambah daya tahan beton terhadap disintegrasi. Ini dapat diperoleh dengan penambahan

campuran tambahan pada waktu pengadukan yang menghasilkan *air entrained* pada beton.

2.3.3 Air

Air merupakan bahan penyusun beton yang diperlukan untuk bereaksi dengan semen, dan juga berfungsi sebagai pelumas antara butiran-butiran agregat agar dapat dikerjakan dan dipadatkan. Proses hidrasi dalam beton segar membutuhkan air kurang lebih 25% dari berat semen yang digunakan, tetapi dalam kenyataan, jika nilai faktor air semen kurang dari 35%, beton segar menjadi tidak dapat dikerjakan dengan sempurna, sehingga setelah mengeras beton yang dihasilkan menjadi keropos dan memiliki kekuatan yang rendah. Kelebihan air dari proses hidrasi diperlukan untuk syarat-syarat kekentalan (*consistency*) agar dapat dicapai suatu kelecakan (*workability*) yang baik. Kelebihan air ini selanjutnya akan menguap atau tertinggal di dalam beton sehingga menimbulkan pori-pori (*capillary poreous*) di dalam beton yang sudah mengeras.

Hal-hal yang perlu diperhatikan pada air yang akan digunakan sebagai bahan pencampur beton meliputi kandungan lumpur, maksimal 2 gram/liter, kandungan garam yang dapat merusak beton maksimal 15 gram/liter, tidak mengandung *klorida* lebih dari 0.5 gram/liter, serta kandungan senyawa *sulfat* maksimal 1 gram/liter.

Secara umum, air dinyatakan memenuhi syarat untuk dipakai sebagai bahan pencampur beton apabila dapat menghasilkan beton dengan kekuatan lebih dari 90% kekuatan beton yang menggunakan air suling (Tjokrodinuljo, 1996). Secara praktis, air yang baik untuk digunakan sebagai bahan campuran beton adalah air yang layak diminum, tidak berwarna, tidak berbau, dan tidak berasa.

2.3.4 Bahan Tambahan

Bahan tambahan adalah suatu bahan berupa bubukan atau cairan, yang dibubuhkan kedalam campuran beton selama pengadukan dalam jumlah

tertentu untuk merubah beberapa sifatnya¹¹. Contoh bahan tambahan yang biasanya dipakai adalah sebagai berikut :

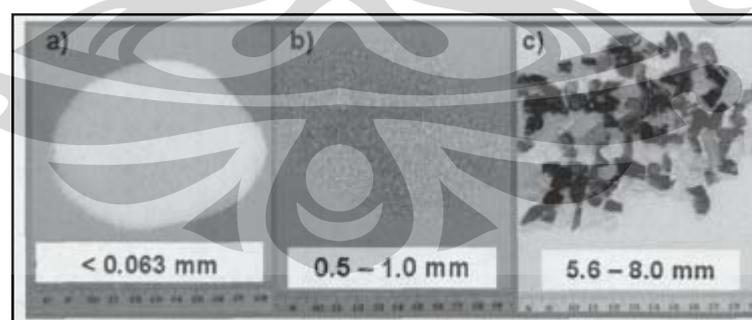
1. *accelerator* adalah bahan tambah untuk mempercepat pengikatan beton.
2. *admixture* adalah bahan tambah untuk campuran beton.
3. *additive* adalah bahan tambah untuk campuran beton.

2.4 Kaca dan Fenomena alkali-silika reaction (ASR)

Limbah kaca biasanya dipisahkan berdasarkan penggunaan akhirnya, dan berdasarkan penggunaan akhirnya itu kaca dipisahkan berdasarkan warna kaca. Secara garis besar kaca dipisahkan menjadi tiga warna:

- Bening / tidak berwarna, biasanya digunakan sebagai botol minuman ringan.
- Hijau, biasanya digunakan sebagai botol bir dan wine.
-

Limbah kaca dapat digunakan sebagai agregat pada campuran beton, hal ini memiliki banyak keuntungan karena dapat mengurangi dampak limbah kaca terhadap lingkungan. Dibawah ini adalah adalah beberapa ukuran partikel dari daur ulang kaca



Gambar 2.7 a.) Type II addition b.) Filler c.) Agregat

Kaca mengandung sodium dan reaktif silika yang sangat banyak. Hal ini memungkinkan terjadinya bahaya Alkali Silica Reaction (ASR), Alkali Silika Reaction (ASR) adalah sebuah reaksi kimia yang terjadi pada partikel agregat

¹¹ Standar Kompetensi Bidang Konstruksi Batu/Beton

antara larutan alkali pada pasta semen dan silika pada partikel agregat (dalam hal ini kaca). Reaksi ini menghasilkan gel dimana pada keadaan lembab akan mengembang sehingga mengakibatkan retak dan kerusakan pada beton. Fenomena ini akan terjadi jika persentase kaca yang digunakan lebih dari 20 % semen yang digunakan dalam campuran¹². Bahaya ini dapat dicegah dengan menggunakan *ground-granular blast furnace slag* (ggbfs) atau metakaolin.

Materials	Oxide mass (%)								
	SiO ₂	Na ₂ O	CaO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	MgO	BaO	B ₂ O ₃
Container	72.8–73.8	12.8–14.4	10.2–11.4	10.2–11.4	0.1–1	0.1–0.3	–	–	0.1–0.3
Flat	71.1–72.7	13.3–14.0	8.6–11.1	0.1–0.6	0.1–0.2	0.1–0.2	3.1–4.1	–	–
Lighting	71.0–72.5	14.2–15.9	5.7–6.5	1.3–2.6	0.5–1.5	–	0–3	0–1.7	–
Fibres	54–67	2–15	8–21	3–14	0.1–1.5	0.5–0.8	2–2.5	–	3.0–7.5
Ggbs	35.0	<1	40	16	1	<1	6	–	–
Pfa	48.0	<1	3.3	38.2	1.7	4.5	1.5	–	–

Ggbs = Ground granulated blastfurnace slag Pfa = Pulverised-fuel ash

Gambar 2.8 kandungan oksida dari kaca dan pozzolan beton

Dari penelitian yang sudah dilakukan diketahui bahwa warna dari kaca yang digunakan juga mempengaruhi terjadinya ASR. Dibawah ini adalah kandungan kimia dari kaca yang diperoleh dari percobaan yang dilakukan :

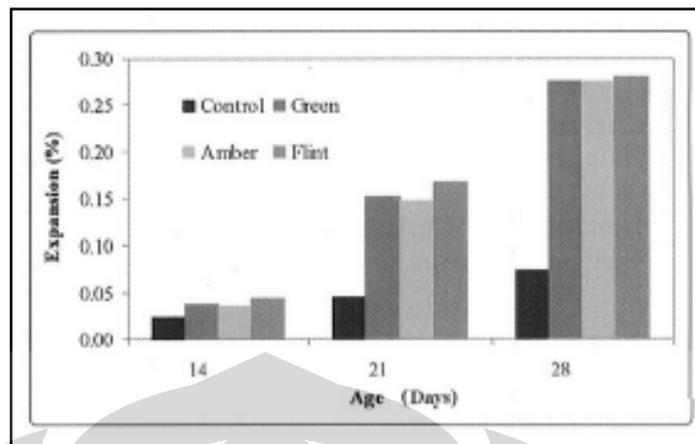
Glass type	Glass details	Oxide mass (%)											LOI (%)
		SiO ₂	Na ₂ O	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	BaO	B ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CoO	Cr ₂ O ₃	
Single-colour container	Blue	72.8	14.0	–	10.2	1.8	0.1	–	–	0.1	0.1	–	0.3
	Flint	73.8	12.8	0.1	11.4	1.4	0.2	–	–	–	–	–	0.3
	Green	72.8	14.4	0.3	10.3	1.7	–	–	–	0.3	–	0.3	0.2
	Amber	72.8	14.0	–	10.2	1.9	1.0	–	–	0.2	–	–	+
Mixed-colour container	Bottle bank	71.5	13.0	1.5	10.8	1.9	0.7	–	–	0.3	–	1.1	0.7
	Club /pub	69.2	12.2	1.2	14.5	1.7	0.6	–	–	0.3	–	0.1	0.8
Flat	Plate	71.1	13.3	3.1	11.1	0.6	0.1	–	–	0.1	–	–	+
	Windscreen	72.7	14.0	4.1	8.6	0.1	0.1	–	–	0.1	–	–	+
Lighting	Fluo. tubes	71.0	14.2	3.0	5.7	2.6	1.5	1.7	–	–	–	–	+
	Light bulbs	72.5	15.9	–	6.5	1.3	0.5	–	–	–	–	–	+

– Below detection limit + Data emerging LOI = Loss on ignition

Gambar 2.9 kandungan kimia kaca berdasarkan warna kaca

¹² Jurnal research informatiom digest

Dibawah ini adalah dampak yang diakibatkan oleh warna kaca terhadap ASR.



Gambar 2.10 pengaruh warna kaca terhadap ASR

Reaksi yang akan terjadi dalam campuran dengan filler kaca dalam hal ini akan digunakan kaca hijau adalah sebagai berikut :

1. Pada beton akan terjadi reaksi yang menghasilkan sodium (Na_2O) dan potassium (K_2O). Reaksinya adalah sebagai berikut :



dimana

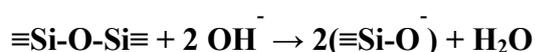
Na_2Oe = Total sodium *oxide equivalent* (or *equivalent soda*), dalam persen

Na_2O = Kandungan sodium oxide, dalam persen

K_2O = Kandungan potassium oxide, dalam persen

2. Reaksi yang terjadi pada silika terjadi antara ion OH^- pada lubang pori dan silika pada agregat. Alkali, khususnya sodium dan potasium tidak secara langsung menyerang reaktif silika. Yang terpenting pada alkali adalah kehadirannya dalam konsentrasi tinggi pada lubang pori mengakibatkan konsentrasi tinggi ion OH^- (Untuk menjaga kesetimbangan) sehingga terjadi reaksi antara ion OH^- dan ikatan *acidic silanol* (Si-OH). Reaksi yang terjadi adalah : $\text{Si-OH} + \text{OH}^- \rightarrow \text{Si-O}^- + \text{H}_2\text{O}$

3. Dan kemudian ion hidroksil OH^- menembus ke dalam beton dan menyerang ikatan *siloxane* (Si-O-Si). Reaksi yang terjadi adalah



4. Dari reaksi ini akan dihasilkan gel yang bisa mengembang jika menyerap air dan mengakibatkan tekanan pada beton.



Hasil Pemecahan kaca dengan mesin Los Angeles adalah sebagai berikut :



Gambar 2.11 Hasil pemecahan kaca dengan mesin Los Angeles

2.5 Mix Desain

Mix design harus dipilih sedemikian rupa sehingga didapatkan campuran beton yang ekonomis, menghasilkan beton yang mempunyai kekuatan, workability (kemudahan pekerjaan), dan durabilitas sesuai yang diinginkan. Ada 2 metode yang biasa digunakan dalam perhitungan Mix Design yaitu Metode American Concrete Institute (ACI) dan US Bureau. Akan tetapi dalam penelitian ini akan digunakan Metode American Concrete Institute (ACI)

Langkah-langkah perencanaan campuran dengan metode ACI :

1. Perhitungan kuat tekan rata-rata beton

Perhitungan kuat tekan rata-rata beton memiliki syarat terhadap nilai margin akibat pengawasan dan jumlah sampel yang ditambahkan pada penjumlahan kuat tekan rencana beton.

2. Menentukan slump

Menentukan besarnya nilai slump ditentukan berdasarkan ukuran maksimum agregat dan penggunaan elemen struktur. Dalam penentuan nilai slump hanya dilihat nilai minimum saja tetapi juga perlu dilihat nilai maksimum agar dapat dihindari segregasi ketika pencampuran. Segregasi biasanya disebabkan oleh penggunaan air campuran yang terlalu banyak, agregatnya mempunyai gradasi yang jelek, terutama bila

jumlah semen kurang, atau cara pengelolaan yang tidak memenuhi syarat.

3. Menentukan agregat maksimum

Kebutuhan air pencampur dapat diturunkan bila ukuran agregat kasar semakin besar, sehingga untuk workability dan isi campuran, serta faktor air semen dapat dikurangi dan mengakibatkan terjadinya peningkatan kekuatan. Tetapi ada batasan ukuran agregat maksimum hingga dapat mengurangi kebutuhan air pencampuran, sehingga tidak terjadi keropos yang dapat berakibat kekuatan beton menjadi rendah. Dalam struktur beton, ukuran maksimum agregat biasanya tertahan antara 25 mm atau 40 mm (1" atau 1½") karena jarak tulangan dalam beton dan jumlah bagian beton. Ukuran agregat maksimum seharusnya lebih kecil dari 5 mm daripada jarak horisontal batang dan lebih kecil daripada 2/3 dari jarak vertikal.

4. Menetapkan jumlah air yang dibutuhkan

Jumlah air yang dibutuhkan dalam setiap 1m³ campuran adukan beton dapat ditentukan berdasarkan diameter maksimum agregat dan nilai slump.

5. Menentukan *Water Cement Ratio* (WCR)

Water Cement Ratio ditentukan dari nilai terendah antara pengaruh kuat desak rata-rata dan pengaruh keawetan elemen struktur terhadap kondisi lingkungan.

6. Menentukan kebutuhan semen dalam adukan beton

Dalam menghitung kebutuhan semen didasarkan hasil penentuan langkah keempat dan kelima dengan membagi kebutuhan air dengan nilai WCR. Dari nilai yang didapat, kemudian dibandingkan dengan kadar semen minimum dan maksimum. Nilai kebutuhan semen diambil bila lebih besar dari kadar semen minimum dan lebih kecil daripada kadar semen maksimum.

7. Memperkirakan volume agregat kasar

Penetapan volume agregat kasar berdasarkan rasio optimum dari berat jenis agregat kasar terhadap total volume agregat yang tergantung pada ukuran agregat maksimum dan zona agregat halus.

8. Menghitung volume agregat halus yang diperlukan

Perhitungan volume agregat halus didasarkan pada pengurangan jumlah volume beton 1 m³ terhadap volume agregat kasar, volume semen, dan volume air.

9. Penyesuaian perbandingan campuran

Dalam bentuk-bentuk umum workability dapat berubah, tetapi kekuatan tetap tidak terpengaruh dan Water Cement Ratio tidak boleh berubah. Perubahan-perubahan dapat dibuat dalam faktor agregat semen.

Metode (ACI) American Concrete Institute mensyaratkan suatu campuran perancangan beton dengan mempertimbangkan sisi ekonomisnya dengan memperhatikan ketersediaan bahan-bahan di lapangan, kemudahan pekerjaan, serta keawetan dan kekuatan pekerjaan beton. Cara ACI melihat dengan ukuran agregat tertentu, jumlah air per kubik akan menentukan tingkat konsistensi dari campuran beton yang pada akhirnya akan mempengaruhi pelaksanaan pekerjaan (workability).

2.6 Karakteristik Tarik, dan Kekuatan Lentur Beton

2.6.1 Kuat tarik beton

Kekuatan tarik beton adalah yang paling penting dalam perencanaan elemen balok struktur dan pelat, karena beton cenderung tidak kuat untuk menahan gaya aksial tarik, oleh karenanya kekuatan tarik beton harus diperhitungkan dalam perhitungan struktur balok dan pelat, agar setidaknya Elemen balok tersebut mampu menahan tegangan-tegangan tarik yang ditimbulkan akibat kontraksi oleh akibat perubahan suhu.

Terdapat 3 metode pengujian dalam menentukan kekuatan tarik beton, yaitu:

- a. Metode pengujian tarik langsung (*the direct tension test*)
- b. Metode kuat tarik beton (*splitting silinder test*)
- c. Metode pengujian lentur (*the modulus of rupture test*)

2.6.2 Kuat Lentur

Pada pengujian lentur bahan-bahan bangunan, permulaan retak biasanya terjadi didaerah tarik sebelah bawah umumnya memiliki arah tegak lurus terhadap garis netral balok, sebab kuat tarik pada beton lebih kecil dibandingkan kuat tekannya. Kuat lentur (f_r) adalah kekuatan tarik beton dalam keadaan lentur akibat momen. Kekuatan yang dikenal sebagai modulus runtuh (*modulus of rupture*) adalah hal yang cukup penting untuk menentukan retak-retak dan lendutan dari suatu balok yang dibebani. Kuat lentur pada beton dapat ditentukan dari balok beton yang mengalami pembebanan arah transversal. Kuat lentur maksimum dialami oleh serat bawah balok beton dan disebut sebagai *Modulus of Rupture*, yang besarnya tergantung dari panjang balok dan jenis pembebanan.

Pada struktur beton bertulang, kuat lentur beton kurang memiliki pengaruh yang lebih karena gaya lentur pada balok telah ditopang oleh tulangan lentur yang ada. Namun kuat lentur dibutuhkan untuk mengetahui batasan dan jenis keretakan pada struktur beton. karena keretakan yang tampak akibat tekanan selalu berkaitan dengan *modulus of rupture* dari beton. Nilai *modulus of rupture* sedikit lebih besar dari nilai kekuatan tarik sesungguhnya. Menurut SNI SNI 03-1726-2002 nilai *modulus of rupture* adalah

$$f_r = 0,7\sqrt{f_c'} \text{ untuk beton normal}$$

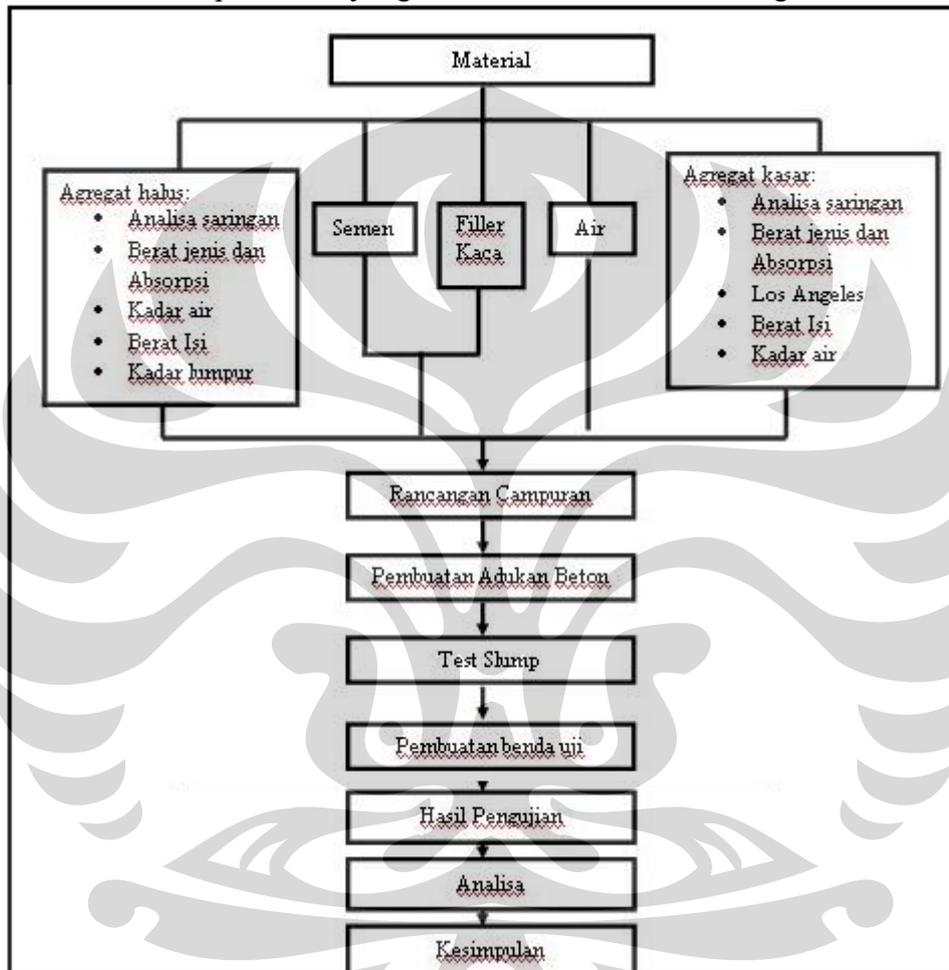
f_r dalam MPa bila f_c' dalam MPa.

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang akan dilakukan adalah sebagai berikut :



Gambar 3.1 Alur Penelitian

3.2 Standar Pengujian

Semua pengujian yang akan dilakukan akan mengacu pada standar *American Society for Testing and Materials (ASTM)*. Adapun standar pengujian yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Pengujian agregat kasar
 - a. Berat jenis dan penyerapan air agregat kasar sesuai dengan ASTM C-127-01

- b. Berat isi agregat kasar sesuai dengan ASTM C 29M-97(2003)
 - c. Analisa saringan agregat kasar sesuai dengan ASTM C-136-01
 - d. Keausan agregat kasar dengan mesin abrasi Los Angeles sesuai dengan ASTM C-131-01
 - e. Kadar air sesuai ASTM
2. Pangujian agregat halus
 - a. Berat jenis dan penyerapan air agregat halus sesuai dengan ASTM C-128-01
 - b. Bahan lolos ayakan no.200 sesuai dengan ASTM C117-03
 - c. Berat isi agregat halus sesuai dengan ASTM C-29M-97(2003)
 - d. Analisa saringan agregat halus sesuai dengan ASTM C-136-01
 - e. Kadar air sesuai ASTM C70-94
 3. Pengujian slum beton
Pengujian mengacu kepada ASTM C-143M-03
 4. Pengujian kuat tekan beton
Pengujian mengacu kepada ASTM C 39/C 39M – 99
 5. Pengujian susut pada beton
Pengujian mengacu kepada ASTM C 490 93A
 6. Pengujian Modulus Elastisitas beton
Pengujian mengacu kepada ASTM C469-02

3.3 Material yang Digunakan

Material yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah

1. Kaca,
2. Semen
3. Agregat kasar
4. Agregat halus
5. Air

3.4 Pemeriksaan Bahan

3.4.1 Pemeriksaan Agregat Kasar

❖ Berat Isi

Tujuan dari pemeriksaan ini adalah untuk menentukan berat isi dan rongga udara dalam agregat kasar. Berat isi adalah perbandingan berat dengan isi.

Peralatan yang digunakan adalah sebagai berikut :

1. Timbangan dengan ketelitian 0.1% berat contoh
2. Talam kapasitas cukup besar untuk mengeringkan contoh agregat
3. Tongkat pemadat diameter 15 mm, panjang 60 cm dengan ujung bulat sebaiknya terbuat dari baja tahan karat.
4. Mistar perata [*straight edge*].
5. Wadah baja yang cukup kaku berbentuk silinder dengan alat pemegang, dengan kapasitas wadah sebagai berikut:

Tabel 3.1 Kapasitas wadah

Kapasitas (liter)	Diameter (mm)	Tinggi (mm)	Tebal wadah minimum (mm)		Ukuran butir maksimum (mm)
			Dasar	Sisi	
2,832	152,4 ± 2,5	154,9 ± 2,5	5,08	2,54	12,7
9,435	203,2 ± 2,5	292,1 ± 2,5	5,08	2,54	25,4
14,158	254,0 ± 2,5	279,4 ± 2,5	5,08	3,00	38,1
28,316	355,6 ± 2,5	284,4 ± 2,5	5,08	3,00	101,6

Prosedur percobaannya adalah sebagai berikut :

Prosedur Berat Isi lepas adalah

1. Timbang dan catat berat wadah (W_1) dan berat wadah + air
2. Masukkan agregat kasar ke dalam wadah baja dengan ketinggian maksimum 5 cm dari atas wadah.
3. Ratakan permukaan benda uji (agregat) dengan mistar perata. Jika wadah belum terisi penuh tambahkan lagi dengan agregat, lalu ratakan.
4. Timbang dan catatlah berat wadah beserta benda uji (W_2).

5. Hitung berat benda uji ($W_3 = W_2 - W_1$).

Prosedur Pemeriksaan berat isi padat agregat dengan butir maksimum 38,1 mm (1 ½") dengan cara Penusukan adalah

1. Timbang dan catat berat wadah (W_1) dan berat wadah + air
2. Isilah wadah dengan benda uji dalam tiga lapis yang sama tebal. Setiap lapis dipadatkan dengan tongkat pemadat sebanyak 25 kali tusukan secara merata ke seluruh permukaan lapisan. Saat pemadatan, tongkat harus tepat masuk sampai lapisan bagian bawah lapisan.
3. Ratakan permukaan benda uji dengan mistar perata.
4. Timbang dan catatlah berat wadah beserta benda uji (W_2).
5. Hitung berat benda uji ($W_3 = W_2 - W_1$).

Prosedur Pemeriksaan berat isi pada agregat ukuran butir antara 38,1 mm (1 ½") sampai 101,6 mm (4") dengan cara penggoyangan adalah

1. Timbang dan catat berat wadah (W_1) dan berat wadah + air
2. Isilah wadah dengan benda uji dalam tiga lapis yang sama tebal.
3. Padatkan setiap lapisan dengan cara menggoyang-goyangkan wadah seperti berikut ;
 - a. Letakkan wadah diatas tempat yang datar, angkat salah satu sisinya kira-kira setinggi 5 cm kemudian lepaskan.
 - b. Ulangi hal ini pada sisi yang berlawanan. Padatkan lapisan sebanyak 25 kali untuk setiap sisi.
4. Ratakan permukaan benda uji dengan mistar perata.
5. Timbang dan catatlah berat wadah beserta benda uji (W_2).
6. Hitung berat benda uji ($W_3 = W_2 - W_1$).

Perhitungannya adalah sebagai berikut :

$$\text{Berat isi agregat} = B = \frac{W_3}{V} \text{ kg/dm}^3$$

$$\text{Rongga Udara} = \frac{(A - W) - B}{(A \times W)} \times 100\%$$

Dimana :

$V =$ Isi Wadah (dm^3)

$A =$ Bulk Specific gravity agregat (kg/ dm^3)

$B =$ Berat isi Agregat (kg/ dm^3)

$W =$ Berat isi Air (kg/ dm^3)

➤ **Kadar Air**

Pemeriksaan ini dimaksudkan untuk menentukan kadar air agregat dengan cara mengeringkan. Kadar air agregat adalah perbandingan antara berat air yang dikandung agregat dengan berat agregat dalam keadaan kering. Percobaan ini digunakan untuk menyesuaikan berat takaran beton apabila terjadi perubahan kadar kelembaban beton. Peralatan yang digunakan adalah :

1. Timbangan dengan ketelitian 0,1 % berat contoh
2. Oven, dilengkapi dengan pengatur suhu
3. Talam logam tahan karat

Sedangkan bahan yang digunakan adalah agregat kasar sebanyak 5000 gram. Prosedur percobaannya adalah sebagai berikut :

1. Timbang dan catatlah berat talam [w_1]
2. Masukkan benda uji ke dalam talam kemudian timbang dan catat beratnya [w_2]
3. Hitunglah berat benda uji [$w_3 = w_2 - w_1$]
4. Keringkan benda uji beserta talam dalam oven dengan suhu [110 ± 5] $^{\circ}\text{C}$ sampai beratnya tetap
5. Setelah kering, timbang dan catatlah benda uji beserta talam [w_4]
6. Hitunglah berat benda uji kering [$w_5 = w_4 - w_1$]

➤ **Analisa Saringan**

Pengujian ini dilakukan berdasarkan standar ASTM C 136 – 95a. Pemeriksaan ini dimaksudkan untuk menentukan pembagian butir (gradasi) agregat kasar dengan menggunakan saringan.

Peralatan yang digunakan adalah

1. Timbangan dan neraca dengan ketelitian 0.2% dari berat benda uji.

2. Satu set saringan: 76.2 mm (3"); 63.5 mm (2 ½"); 50.8 mm (2"); 37.5 mm (1 ½"); 25 mm (1"); 19.1 mm (¾"); 12.5 mm (½"); 9.5 mm (¼").
3. Oven yang dilengkapi dengan pengukur suhu untuk me i sampai (110±5)°C.
4. Alat pemisah contoh (*Sample Splitter*).
5. Mesin penggetar saringan.
6. Talam-talam.
7. Kuas, sikat kuning, sendok, dan alat-alat lainnya.

Bahan yang digunakan memenuhi standar di bawah ini:

- Ukuran maksimum 3.5"; berat minimum 35 kg.
- Ukuran maksimum 3"; berat minimum 30 kg.
- Ukuran maksimum 2.5"; berat minimum 25 kg.
- Ukuran maksimum 2"; berat minimum 20 kg.
- Ukuran maksimum 1.5"; berat minimum 15 kg.
- Ukuran maksimum 1"; berat minimum 10 kg.
- Ukuran maksimum ¾"; berat minimum 5 kg.
- Ukuran maksimum ½"; berat minimum 2.5 kg.
- Ukuran maksimum ¼"; berat minimum 1 kg.

Prosedur percobaannya adalah sebagai berikut :

1. Sediakan benda uji sebanyak 2.5 kg.
2. Benda uji dikeringkan di dalam oven pada suhu (110 ± 5)°C sampai berat tetap.
3. Menyaring benda uji lewat susunan saringan dengan ukuran 1, ¾, ¾, ½, 4, 8, dan pan. Kemudian saringan diguncang dengan tangan atau mesin pengguncang selama 15 menit.
4. Timbang berat agregat halus pada masing-masing saringan

➤ Abrasi

Pemeriksaan ini dimaksudkan untuk menentukan ketahanan agregat kasar terhadap keausan dengan mempergunakan mesin Los Angeles. Keausan agregat tersebut dinyatakan dengan perbandingan antara berat bahan aus lewat saringan no.12 terhadap berat semula, dalam persen.

Peralatan yang digunakan adalah sebagai berikut :

1. Mesin Los Angeles; mesin terdiri dari dari silinder baja tertutup pada kedua sisinya dengan diameter 71 cm (26") panjang dalam 50 cm (20"). Silinder tertumpu pada dua poros pendek yang yang tak menerus dan berputar pada poros mendatar. Silinder berlubang untuk memasukkan benda uji. Penutup lubang terpasang rapat sehingga permukaan dalam silinder bilah baja melintang penuh setinggi 8,9 cm (3,56").
2. Saringan no.12 dan saringan-saringan lainnya seperti tercantum dalam Tabel 3.3 .
3. Timbangan, dengan ketelitian 5 gram.
4. Bola-bola baja dengan diameter rata-rata 4,68 cm (1,84") dan berat masing-masing antara 390 gram sampai 445 gram.
5. Oven, yang dilengkapi dengan pengatur suhu untuk memanasi sampai $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$.

Sedangkan prosedur percobaanya adalah

1. Benda uji dan bola-bola baja dimasukkan kedalam mesin Los Angeles.
2. Putar mesin dengan kecepatan 30 sampai 33 rpm, 500 putaran untuk gradasi A,B,C dan D; 1000 putaran untuk gradasi E,F, dan G.
3. Setelah selesai pemutaran, keluarkan benda uji dari mesin kemudian saring dengan saringan no.12. Butiran yang tertahan datanya dicuci bersih, selanjutnya dikeringkan dalam oven suhu $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ sampai berat tetap.

➤ Berat Jenis dan Penyerapan

Menentukan *bulk* dan *apparent specific gravity* dan absorpsi dari agregat kasar menurut ASTM C 127, guna menentukan volume agregat dalam beton. Bahan yang digunakan adalah 10000 gram (2 x 5000 gram) agregat kasar dalam kondisi SSD, diperoleh dari alat pemisah contoh atau cara perempat. Bahan benda uji lewat saringan no.4 dibuang.

Peralatan yang digunakan adalah :

1. Neraca Timbang jenuh air dengan kepekaan 0,5 gram dan kapasitas minimum 5 kg.
2. Keranjang kawat
3. Oven, dengan ukuran yang mencukupi dan dapat mempertahankan suhu $[110 \pm 5]^{\circ}\text{C}$
4. Handuk
5. Saringan no. 4 (4,75mm)

Prosedur pengujiannya adalah sebagai berikut :

1. Benda uji direndam 24 jam.
2. Benda uji digulung dengan handuk, sampai air permukaannya habis, tetapi harus masih tampak lembab (Kondisi SSD). Timbang.
3. Benda uji dimasukkan ke keranjang dan direndam kembali dalam air. Temperatur air $(73,4 \pm 3)^{\circ}\text{F}$ dan ditimbang. Sebelum ditimbang, container diisi benda uji, lalu digoyang-goyangkan dalam air untuk melepaskan udara yang terperangkap.
4. Benda uji dikeringkan dalam oven pada temperatur $(212 - 230)^{\circ}\text{F}$. Didinginkan, kemudian ditimbang.

Perhitungannya adalah sebagai berikut :

$$\text{Berat jenis curah (Bulk Specific Gravity)} = \frac{A}{B - C}$$

$$\text{Berat jenis kering-permukaan jenuh (SSD)} = \frac{A}{B - C}$$

$$\text{Berat jenis semu (Apparent Specific Gravity)} = \frac{A}{A - C}$$

$$\text{Presentasi Absorpsi} = \frac{B - A}{A} \times 100\%$$

Dimana :

A = Berat (gram) dari benda uji oven dry

B = Berat (gram) dari benda uji pada kondisi SSD

C = Berat (gram) dari benda uji pada kondisi jenuh

3.4.2 Pemeriksaan Agregat Halus

➤ Berat Isi

Tujuan dari pemeriksaan ini adalah untuk menentukan berat isi dan rongga udara dalam agregat kasar. Berat isi adalah perbandingan berat dengan isi.

Peralatan yang digunakan adalah sebagai berikut :

1. Timbangan dengan ketelitian 0.1% berat contoh
2. Talam kapasitas cukup besar untuk mengeringkan contoh agregat
3. Tongkat pemadat diameter 15 mm, panjang 60 cm dengan ujung bulat sebaiknya terbuat dari baja tahan karat.
4. Mistar perata [*straight edge*].
5. Wadah baja yang cukup kaku berbentuk silinder dengan alat pemegang, dengan kapasitas wadah sebagai berikut:

Tabel 3.2 Kapasitas wadah

Kapasitas (liter)	Diameter (mm)	Tinggi (mm)	Tebal wadah minimum (mm)		Ukuran butir maksimum (mm)
			Dasar	Sisi	
2,832	152,4 \pm 2,5	154,9 \pm ,5	5,08	2,54	12,7
9,435	203,2 \pm 2,5	292,1 \pm 2,5	5,08	2,54	25,4
14,158	254,0 \pm 2,5	279,4 \pm 2,5	5,08	3,00	38,1
28,316	355,6 \pm 2,5	284,4 \pm 2,5	5,08	3,00	101,6

Prosedur percobaannya adalah sebagai berikut :

Prosedur Berat Isi lepas adalah :

1. Timbang dan catat berat wadah (W_1) dan berat wadah + air
2. Masukkan agregat kasar ke dalam wadah baja dengan ketinggian maksimum 5 cm dari atas wadah.

3. Ratakan permukaan benda uji (agregat) dengan mistar perata. Jika wadah belum terisi penuh tambahkan lagi dengan agregat, lalu ratakan.
4. Timbang dan catatlah berat wadah beserta benda uji (W_2).
5. Hitung berat benda uji ($w_3 = W_2 - W_1$).

Prosedur Pemeriksaan berat isi dengan cara penusukan adalah :

1. Timbang dan catat berat wadah (W_1) dan berat wadah + air
2. Isilah wadah dengan benda uji dalam tiga lapis yang sama tebal. Setiap lapis dipadatkan dengan tongkat pemadat sebanyak 25 kali tusukan secara merata ke seluruh permukaan lapisan. Saat pemadatan, tongkat harus tepat masuk sampai lapisan bagian bawah lapisan.
3. Ratakan permukaan benda uji dengan mistar perata.
4. Timbang dan catatlah berat wadah beserta benda uji (W_2).
5. Hitung berat benda uji ($W_3 = W_2 - W_1$).

Prosedur Pemeriksaan berat isi dengan cara penggoyangan adalah :

1. Timbang dan catat berat wadah (W_1) dan berat wadah + air
2. Isilah wadah dengan benda uji dalam tiga lapis yang sama tebal.
3. Padatkan setiap lapisan dengan cara menggoyang-goyangkan wadah seperti berikut ;
 - a. Letakkan wadah diatas tempat yang datar, angkat salah satu sisinya kira-kira setinggi 5 cm kemudian lepaskan.
 - b. Ulangi hal ini pada sisi yang berlawanan. Padatkan lapisan sebanyak 25 kali untuk setiap sisi.
4. Ratakan permukaan benda uji dengan mistar perata.
5. Timbang dan catatlah berat wadah beserta benda uji (W_2).
6. Hitung berat benda uji ($W_3 = W_2 - W_1$).

Perhitungannya adalah sebagai berikut :

$$\text{Berat isi agregat} = B = \frac{W_3}{V} \text{ kg/dm}^3$$

$$\text{Rongga Udara} = \frac{(A - W) - B}{(A \times W)} \times 100\%$$

Dimana :

V = Isi Wadah (dm³)

A = Bulk Specific gravity agregat (kg/ dm³)

B = Berat isi Agregat (kg/ dm³)

W = Berat isi Air (kg/ dm³)

➤ **Kadar lumpur**

Pemeriksaan Bahan Lewat Saringan No. 200 sesuai dengan standar ASTM C 117 - 04. Pemeriksaan ini dimaksudkan untuk menentukan jumlah bahan yang terdapat dalam agregat lewat saringan No.200 dengan cara pencucian. Peralatan yang digunakan adalah :

1. Saringan No.16 dan No.200.
2. Wadah pencucian benda uji berkapasitas cukup besar sehingga pada waktu diguncang-guncang, benda uji dan atau air pencuci tidak tumpah.
3. Oven yang dilengkapi dengan pengatur suhu untuk memanasi sampai [110±5]°C.
4. Timbangan dengan ketelitian 0.1 % berat contoh.
5. Talam berkapasitas cukup besar untuk mengeringkan contoh agregat

Prosedur percobaannya adalah :

1. Masukkan contoh agregat lebih kurang 25 kali berat benda uji ke dalam talam, keringkan dalam oven dengan suhu [110 ± 5]°C sampai berat tetap.
2. Siapkan benda uji dengan berat [w₁] sesuai dengan tabel dibawah ini

Tabel 3.3 Ukuran Agregat Kering Minimum

Ukuran Agregat Maksimum		Berat Contoh Agregat Kering Minimum
<i>mm</i>	<i>inci</i>	<i>Gram</i>
2,36	No. 8	100
1,18	No. 4	500
9,5	¼	2000
19,1	¾	2500
38,1	1½	5000

3. Masukkan benda uji ke dalam wadah, dan diberi air pencuci secukupnya sehingga benda uji terendam.
4. Guncang-guncangkan wadah dan tuangkan air cucian ke dalam susunan saringan No.16 dan No.200. Pada waktu menuangkan air cucian, usahakan agar bahan-bahan yang kasar tidak ikut tertuang.
5. Masukkan air pencuci baru, dan ulanglah pekerjaan No.2 sampai air cucian menjadi bersih.
6. Semua bahan yang tertahan No.16 dan No.200 kembalikan ke dalam wadah; kemudian masukkan seluruh bahan tersebut ke dalam talam yang telah diketahui beratnya [w2] dan keringkan dalam oven dengan suhu [110 ± 5]°C sampai berat tetap.
7. Setelah kering timbang dan catatlah beratnya [w3].
8. Hitunglah berat bahan kering tersebut [w4 = w3 – w2].

Perhitungannya adalah :

$$\text{Jumlah bahan lewat saringan No.200} = \frac{w_1 - w_4}{w_1} \times 100\%$$

➤ Kadar Air

Pemeriksaan ini dimaksudkan untuk menentukan kadar air agregat dengan cara mengeringkan. Kadar air agregat adalah perbandingan antara berat air yang dikandung agregat dengan berat agregat dalam keadaan kering. Percobaan ini digunakan untuk menyesuaikan berat takaran beton apabila terjadi perubahan kadar kelembaban beton.

Peralatan yang digunakan adalah :

1. Timbangan dengan ketelitian 0,1 % berat contoh
2. Oven, dilengkapi dengan pengatur suhu
3. Talam logam tahan karat

Agregat halus yang digunakan sebanyak 500 gram. Prosedur percobaannya adalah sebagai berikut :

1. Timbang dan catatlah berat talam [w_1]
2. Masukkan benda uji ke dalam talam kemudian timbang dan catat beratnya [w_2]
3. Hitunglah berat benda uji [$w_3 = w_2 - w_1$]
4. Keringkan benda uji beserta talam dalam oven dengan suhu [110 ± 5] °C sampai beratnya tetap
5. Setelah kering, timbang dan catatlah benda uji beserta talam [w_4]
6. Hitunglah berat benda uji kering [$w_5 = w_4 - w_1$]

➤ **Analisa Saringan**

Pemeriksaan ini dimaksudkan untuk menentukan pembagian butir (gradasi) agregat halus dengan menggunakan saringan.

Peralatan yang digunakan

1. Timbangan dan neraca dengan ketelitian 0.2 % dari berat uji
2. Satu set saringan : No. 4 ; No. 8 ; No. 16 ; No. 30 ; No. 50 ; No. 100 ; No. 200 [Standar ASTM]
3. Oven yang dilengkapi dengan pengukur suhu untuk memanasi sampai [110 ± 5] °C
4. Alat pemisah contoh [*Sample Splitter*]
5. Mesin penggetar saringan
6. Talam-talam
7. Kuas, sikat kuning, sendok, dan alat-alat lainnya

Bahan yang digunakan adalah sebagai berikut

1. Ukuran maksimum No.4 berat minimum 500 gram.
2. Ukuran maksimum No.8 berat minimum 100 gram

Prosedurnya adalah sebagai berikut :

1. Sediakan benda uji sebanyak 500 *gram*.
2. Benda uji dikeringkan di dalam oven pada suhu $(110\pm 5)^{\circ}\text{C}$ sampai berat tetap.
3. Menyaring benda uji lewat susunan saringan dengan ukuran No.8, 16, 30, 50, 100, 200, pan. Kemudian saringan diguncang dengan tangan atau mesin pengguncang selama 15 menit.
4. Timbang berat agregat halus pada masing-masing saringan

➤ **Berat Jenis dan Penyerapan**

Menentukan *bulk* dan *apparent specific gravity* dan absorpsi dari agregat halus menurut ASTM C 128, guna menentukan volume agregat dalam beton. peralatan yang digunakan adalah

1. Neraca timbangan dengan kepekaan 0,1 gram dan kapasitas maksimum 1 kg
2. Piknometer kapasitas 500 gram
3. Cetakan kerucut pasir
4. Tongkat pemadat (*Tamper*) dari logam untuk cetakan kerucut pasir
5. Oven, dengan ukuran yang mencukupi dan dapat mempertahankan suhu $[110\pm 5]^{\circ}\text{C}$.

Prosedurnya adalah sebagai berikut :

1. Agregat halus dibuat jenuh air dengan cara merendam selama 1 hari, kemudian dikeringkan sampai merata (*Free Flowing Condition*).
2. Sebagian benda uji dimasukkan pada *metal sand cone mold*. Benda uji kemudian dipadatkan dengan tongkat pemadat sampai 25 kali tumbukan. Kondisi SSD (*Surface Dry Condition*) diperoleh jika cetakan diangkat, agregat halus runtuh/longsor.
3. Agregat halus dalam keadaan SSD sebanyak 500 *gram* dimasukkan ke dalam piknometer dan diisi air sampai 90 % kapasitas. Gelembung-gelembung udara dihilangkan dengan cara mengoyang-goyangkan piknometer. Rendam dalam air dengan temperatur air

- 73.4 ± 30 °F selama paling sedikit 1 hari. Tentukan berat piknometer benda uji dan air.
4. Pisahkan benda uji dari piknometer dan dikeringkan pada temperatur 212 – 230°F selama 1 hari.
 5. Tentukan berat piknometer berisi air sesuai kapasitas kalibrasi pada temperatur 73.4 ± 30 °F dengan ketelitian 0.1 gram.

Perhitungannya adalah sebagai berikut :

1. *Bulk Specific Gravity* (SSD) : $\frac{500}{B + 500 - C}$
2. *Apparent Specific Gravity* : $\frac{A}{B + A - C}$
3. Prosentasi Absorpsi : $\frac{500 - A}{A} \times 100\%$

Dimana :

A = Berat (gram) dari benda uji oven dry

B = Berat (gram) dari benda uji pada kondisi SSD

C = Berat (gram) dari benda uji pada kondisi jenuh

3.5 Perhitungan Mix Desain

Perhitungan ini dimaksudkan untuk mengetahui komposisi dari penyusun campuran yang akan dibuat. Dari perhitungan ini akan diperoleh jumlah dari masing-masing komponen penyusun campuran yaitu semen, agregat halus, agregat kasar dan air. Perhitungan ini akan dilakukan setelah diketahui properties dari bahan-bahan tersebut.

3.6 Pembuatan Sampel

Prosedur pembuatan sampel ini dibagi kedalam 3 tahap, yaitu :

1. Pengadukan
 - a. Bahan baku disiapkan dan ditimbang sesuai dengan proporsi berat yang telah ditentukan pada masing-masing campuran
 - b. Agregat kasar dan pasir seluruhnya dimasukkan ke dalam mesin pengaduk lalu diaduk hingga merata.

- c. Kemudian matikan mesin, lalu masukkan semen yang sudah diberi campuran *filler* kaca dan $\frac{2}{3}$ bagian air lalu nyalakan kembali mesin pengaduk. Mesin dimatikan setelah 2 menit, lalu material yang berada di dasar mesin pengaduk diaduk dengan sendok semen sehingga teraduk dengan merata.
 - d. Mesin dijalankan kembali setelah 2 menit sambil menuangkan sisa air sedikit demi sedikit
2. Pencetakan sampel
- a. Siapkan cetakan sebelumnya dan beri pelumas pada bagian dinding dalam cetakan
 - b. Untuk nilai slump 25-75 mm pemadatan dapat ditusuk atau digetar, sedangkan untuk nilai slump > 75 mm, pemadatan dilakukan dengan cara ditusuk.
 - c. Adukan dimasukkan ke dalam cetakan dalam 3 lapisan. Setiap pengambilan campuran beton diaduk kembali dengan menggunakan sendok aduk agar tidak terjadi segregasi
 - d. Pada lapisan akhir ditambahkan adukan beton sampai melebihi permukaan sehingga tidak perlu penambahan kembali setelah beton dipadatkan
 - e. Setelah cetakan terisi penuh dan pemadatan telah selesai dilakukan bagian luar cetakan dipukul-pukul dengan palu ringan dengan tujuan untuk menutup lubang-lubang sisa pemadatan dan untuk melepas gelembung-gelembung udara yang ada.
 - f. Lalu permukaan beton diratakan dan dapat ditambahkan lapisan tipis pasta semen untuk merapikan dan meratakan permukaan beton
 - g. Kemudian benda uji didiamkan di udara terbuka kurang lebih 24 jam hingga mengeras dan dihindari adanya hubungan langsung dengan air.
3. Perawatan
- a. Perawatan dilakukan dengan cara merendam benda uji dalam bak air sampai umur 6 hari untuk uji tekan 7 hari, 13 hari untuk uji tekan 14 hari dan 27 hari untuk uji tekan 28 hari.

- b. Suhu air rata-rata pada saat perendaman berkisar 25-27° C
- c. Berikan tanda atau kode pada benda uji untuk memudahkan identifikasi

3.7 Pengujian Sampel

3.7.1 Pengujian Slump Beton

Pengecekan slump bermaksud untuk mengukur kekentalan dari adukan beton yang dihasilkan pada setiap proses pengadukan. Kekentalan beton akan mempunyai pengaruh pada tingkat workability dari beton. Adukan beton untuk keperluan pengujian ini harus diambil langsung dari mesin pengaduk. Prosedurnya adalah sebagai berikut :

1. Peralatan yang digunakan :
 - a. Cetakan berupa kerucut terpancung dengan diameter bagian bawah 20 cm, bagian atas 10 cm dan tinggi 30 cm. Bagian bawah dan atas cetakan terbuka.
 - b. Tongkat pemadat dengan diameter 16 mm, panjang 60 cm, ujung dibulatkan dan sebaiknya dibuatkan dari baja tahan karat.
 - c. Pelat logam dengan permukaan yang kokoh rata dan kedap air.
 - d. Sendok Cekung.
 - e. Mistar ukur
2. Proses pengujian :
 - a. Cetakan dan pelat dibasahi dengan kain basah.
 - b. Letakan cetakan diatas pelat
 - c. Isilah cetakan sampai penuh dengan beton muda dalam 3 lapis, tiap lapis berisi kira-kira 1/3 isi cetakan. Setiap lapis dipadatkan dengan tongkat pemadat sebanyak 25 tusukan secara merata. Pada pemadatan, tongkat harus tepat masuk sampai lapisan bagian bawah tiap-tiap lapisan.
 - d. Pada lapisan pertama penusukan bagian tepi, tongkat dimiringkan sesuai dengan kemiringan cetakan.

- e. Segera setelah selesai pemadatan, ratakan permukaan benda uji dengan tongkat; tunggu selama setengah menit dan dalam jangka waktu ini semua benda uji yang jatuh disekitar cetakan harus disingkirkan.
- f. Kemudian cetakan diangkat perlahan-lahan tegak lurus ke atas.
- g. Baliklah cetakan dan letakkan perlahan-lahan di samping benda uji.
- h. Ukurlah slump yang terjadi dengan menentukan perbedaan tinggi cetakan dengan tinggi rata-rata benda uji.

3.7.2 Pengujian Tarik Belah Beton

Pengujian ini dilakukan mengacu pada ASTM C 496 / C 496M-04 dengan metode *Splitting Test* (Pengujian Tarik Belah Beton Silinder). Adapun tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui *splitting tensile strength*, yaitu kuat tarik belah dari spesimen beton silinder yang mengeras dengan umur 7 hari dan 28 hari. Benda uji silinder beton memiliki ukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm.

Peralatan:

- Mesin tekan, kapasitas sesuai kebutuhan.
- *Supplementary bearing plate*, yang berfungsi sebagai pengunci spesimen silinder yang menyebabkan beban (P) tersalurkan disepanjang daerah tinggi dari silinder.
- *Bearing strips*, diperlukan 2 batang dalam sekali pengujian *splitting test* dengan ketebalan 3,2 mm (1/8 in).

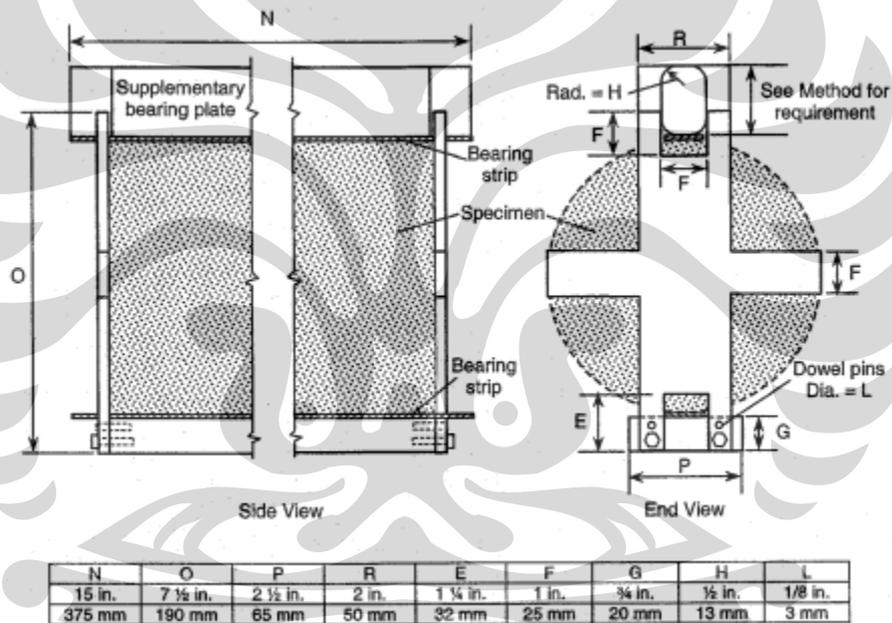
Prosedur pengujiannya adalah sebagai berikut :

- a. Timbang benda uji serta ukur panjang dan diameternya.
- b. Siapkan alat perlengkapan pengujian tarik dan (*splitting test*) berupa pelat dasar yang tebal dan dilengkapi dengan alat untuk menahan benda uji (*Supplementary bearing plate*).
- c. Letakkan benda uji secara mendatar sejajar dengan meja mesin tekan, pasang pada bagian dasar atas dan bawah benda uji dengan bantalan penekan berupa *bearing strips*. Atur posisinya agar tepat sejajar pada bagian dasar atas dan bawah.



Gambar 3.4. Pemasangan posisi silinder beton dengan *bearing strips* yang tepat

- d. Atur kembali posisi silinder yang telah dilengkapi *supplementary bearing plate* hingga tepat ditengah-tengah dan tegak lurus terhadap mesin tekan.
- e. Lakukan pembebanan sampai benda uji terbelah menjadi dua bagian. Catat beban maksimum.



Gambar 3.5. Detail Perencanaan pemasangan silinder beton yang sesuai



Gambar 3.6. Posisi spesimen silinder dalam mesin tekan untuk menentukan *Splitting Tensile Strength*

3.7.3 Pengujian Kuat Lentur Beton.

Pengujian ini dilakukan sesuai dengan ASTM C 78 - 02 dengan metode *Third-Point Loading*. Dengan umur pengujian adalah 28 hari. Adapun tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui *modulus of rupture*, yaitu kuat lentur maksimum yang ditahan oleh serat bawah balok pada beton yang mengeras dengan umur 28 hari. Benda uji balok beton ukuran 15 cm x 15 cm x 60 cm.

Tabel 3.4 Jumlah sampel untuk uji tarik belah

Kadar Filler	Pengujian	
	7 hari	14 hari
0	5 sampel	5 sampel
5	5 sampel	5 sampel
10	5 sampel	5 sampel

Peralatan:

- Mesin Uji Lentur (*Flexural Strength Testing Machine*) Beton Kapasitas 100 kN Laboratorium Beton Universitas Indonesia
- *Beam mold* 15 cm x 15 cm x 60 cm

Langkah Kerja:

1. Benda uji balok yang sudah mengalami proses perawatan dan pengeringan disiapkan, diukur dimensinya (juga untuk mengetahui balok tersebut memenuhi persyaratan keseragaman sampel).
2. Tentukan panjang bentang yaitu tiga kali tinggi balok pada posisi simetris memanjang dan mengatur posisi roda baja bagian bawah untuk meletakkan benda uji.
3. Balok diletakkan di kedua perletakan mesin uji lentur secara simetris dan diberi beban garis sejarak 1/3 bagian dari perletakan secara simetris.
4. Hidupkan mesin dan berikan beban secara tetap dan berkesinambungan tanpa ada beban kejut sampai keruntuhan terjadi.
5. Besar beban maksimum yang terjadi catat untuk perhitungan.

Pada test kuat lentur ini digunakan empat variabel yaitu sebagai berikut :

Perhitungan nilai *modulus of rupture* tergantung dari lokasi patahan yang terjadi pada balok, yaitu:

- Bila patahan terjadi pada 1/3 bagian tengah bentang dari balok, tidak lebih dari 5% panjang bentang balok, maka perhitungannya adalah sebagai berikut:

$$R = \frac{Pl}{bd^2}$$

Dimana :

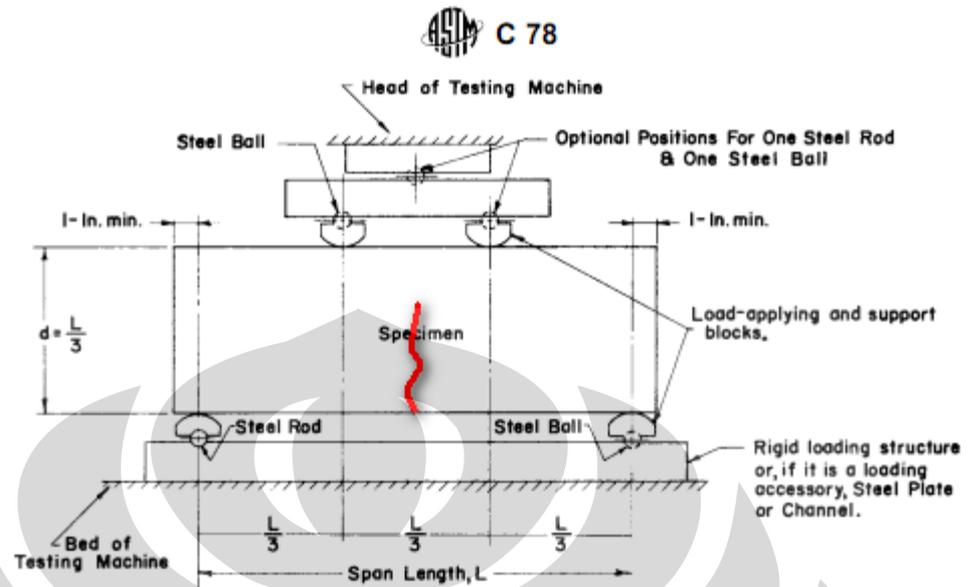
R = Modulus Runtuh, *psi* atau *Mpa*

P = Maksimum Beban, *lbf* atau *N*

l = Panjang bentang, *in* atau *mm*

b = Rata-rata lebar benda uji, *in* atau *mm*

d = Rata-rata ketinggian benda uji, *in* atau *mm*



Gambar 3.7 : Keruntuhan yang terjadi ditengah bentang

- Bila patahan terjadi pada 1/3 bagian tepi bentang, maka perhitungannya adalah sebagai berikut:

$$R = \frac{3Pa}{bd^2}$$

Dimana :

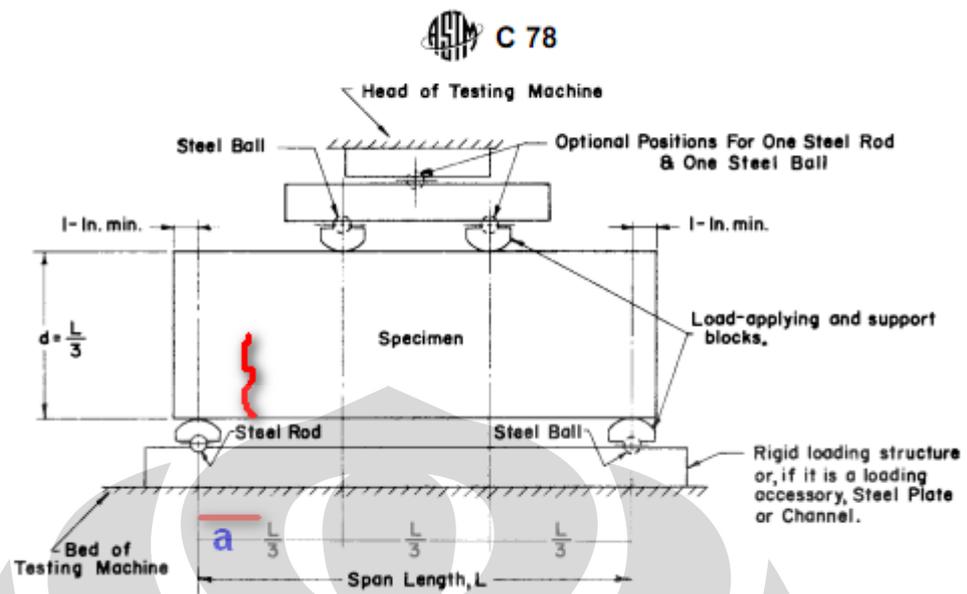
R = Modulus Runtuh, *psi* atau *MPa*

P = Maksimum Beban, *lbf* atau *N*

a = Jarak Rata-rata antara retakan dengan perletakan yang terdekat,
in atau *mm*

b = Rata-rata lebar benda uji, *in* atau *mm*

d = Rata-rata ketinggian benda uji, *in* atau *mm*



Gambar 3.8 : Keruntuhan lentur terjadi pada tepi bentang

Bila patahan terjadi pada $\frac{1}{3}$ bagian tepi bentang balok dengan jarak lebih dari 5 % panjang bentang, hasil ini harus dianulir.

BAB 4

HASIL PENELITIAN DAN ANALISA TARIK DAN LENTUR

4.1 Properti Agregat

Agregat mempunyai proporsi yang cukup besar dalam campuran beton, sekitar $\frac{3}{4}$ volume beton diisi oleh agregat. Oleh sebab itu untuk mendapatkan kekuatan beton yang baik diperlukan kualitas agregat yang baik pula, kualitas agregat ini tidak hanya pada kekuatan agregat saja namun juga ditentukan oleh properti dari agregat tersebut.

Agregat dipandang sebagai bagian yang terpisahkan dengan pasta semen sebab material ini tidak bereaksi dengan pasta semen, penggunaan agregat dalam jumlah yang besar dengan alasan biaya. Namun di satu sisi lainnya, agregat juga merupakan suatu kesatuan yang tidak dapat dipisahkan dengan pasta semen dalam material konstruksi, dan faktanya agregat tidak sepenuhnya terpisah dengan pasta semen, sifat fisik, suhu dan terkadang kandungan kimia dari agregat akan mempengaruhi kinerja dari beton yang dibuat. Memang secara hitungan ekonomi harga agregat lebih murah jika dibandingkan dengan pasta semen, namun alasan ekonomi tidak menjadi satu-satunya alasan dalam pembuatan beton, kinerja dari betonlah yang terlebih dahulu harus menjadi prioritas utamanya.

Untuk mencapai kekuatan beton yang diinginkan diperlukan data-data dari agregat, data-data ini akan mempengaruhi nilai dari rancang campur yang akan dibuat. Untuk mendapatkan data-data tersebut maka dilakukan beberapa penelitian terhadap agregat yang akan dibahas berikut ini.

4.1.1. Agregat Halus

- Pengujian Berat Jenis dan Absorpsi

Pengujian berat jenis dan absorpsi dari agregat halus bertujuan untuk menentukan Berat Jenis Curah, SSD, dan Apparent dari agregat halus, disamping itu dari pengujian ini juga akan diketahui besar nilai absorpsi dari agregat halus.

Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan standar ASTM C-128-01. Pasir yang digunakan merupakan pasir yang Tersedia di laboratorium Material Departemen Teknik Sipil UI yang berasal dari daerah Cimangkok. Percobaan dilakukan dengan menggunakan dua benda uji dengan hasil diperoleh sebagai berikut :

Tabel 4.1 Hasil uji Berat Jenis Agregat Halus

Benda Uji	I	II
berat pasir awal	500	500
berat piknometer + benda uji + air (C)	958	946
berat piknometer + air (B)	659	649
berat benda uji setelah oven (A)	482	483
BJ curah (bulk)	2.39801	2.37931
BJ SSD	2.48756	2.46305
BJ Semu (<i>apparent</i>)	2.63388	2.59677
Absorpsi	3.73444	3.51967

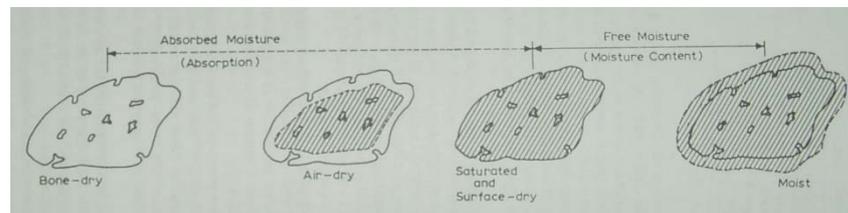
Dari hasil pengujian dua buah sampel tersebut lalu diambil nilai rata-ratanya, nilai inilah yang selanjutnya digunakan dalam perhitungan rancang campur.

Tabel 4.2 Nilai Rata-rata Berat Jenis Agregat Halus

Benda Uji	Rata-rata
BJ curah (bulk)	2.38866
BJ SSD	2.47531
BJ Semu (<i>apparent</i>)	2.61533
Absorpsi	3.62705

Pada tahapan rancang campur, Berat Jenis yang akan digunakan adalah berat jenis SSD, karena pada kondisi ini akan sama dengan kondisi agregat pada saat pengecoran beton. Kondisi SSD digunakan karena pada kondisi ini kandungan air pada agregat jenuh (mengisi seluruh pori-pori) namun air tidak ada yang berada diantara butiran agregat, sehingga pada

saat pengecoran air yang digunakan tidak lagi diserap oleh agregat dan tidak ada air tambahan yang berasal dari celah antar butiran agregat.



Gambar 4.1 Ilustrasi berbagai kondisi pada agregat

- Pengujian Analisa Saringan (*Sieve Analysis*)

Analisa Saringan bertujuan untuk mengetahui pembagian butiran dari agregat halus yang digunakan, pengujian ini sesuai dengan standar ASTM 136-04. Dari hasil pengujian dengan menggunakan saringan ini akan diketahui sebaran dari butiran agregat halus yang akan digunakan. Untuk pengujian ini dibuat dua buah sampel benda uji, dengan hasil pengujian sebagai berikut.

Tabel 4.3 Hasil uji Analisa Saringan Agregat Halus

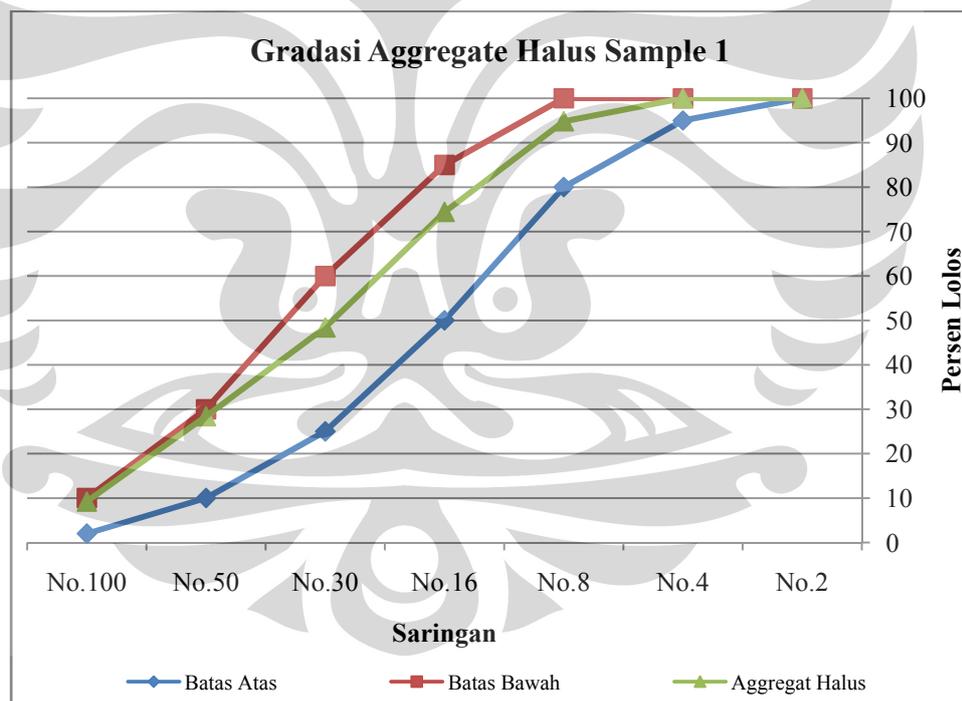
Saringan		Benda Uji 1				Benda Uji 2			
No.	mm	Berat Tertahan	kumulatif	% tertahan	% lolos	Berat Tertahan	kumulatif	% tertahan	% lolos
4	4.75	0	0	0	100	0	0	0	100
8	2.36	26	26	5.2	94.8	28	28	5.6	94.4
16	1.18	102	128	25.6	74.4	100	128	25.6	74.4
30	0.6	130	258	51.6	48.4	130	258	51.6	48.4
50	0.3	100	358	71.6	28.4	100	358	71.6	28.4
100	0.15	96	454	90.8	9.2	96	454	90.8	9.2
200	0.075	31	485	97	3	31	485	97	3
Pan		15	500	100	0	15	500	0	100

Pengujian analisa saringan dilakukan dengan menggunakan dua buah benda uji, dengan hasil yang telah ditampilkan sebelumnya. Menurut ASTM 136-04 pembagian butiran dari agregat halus harus memenuhi persyaratan sebagai berikut:

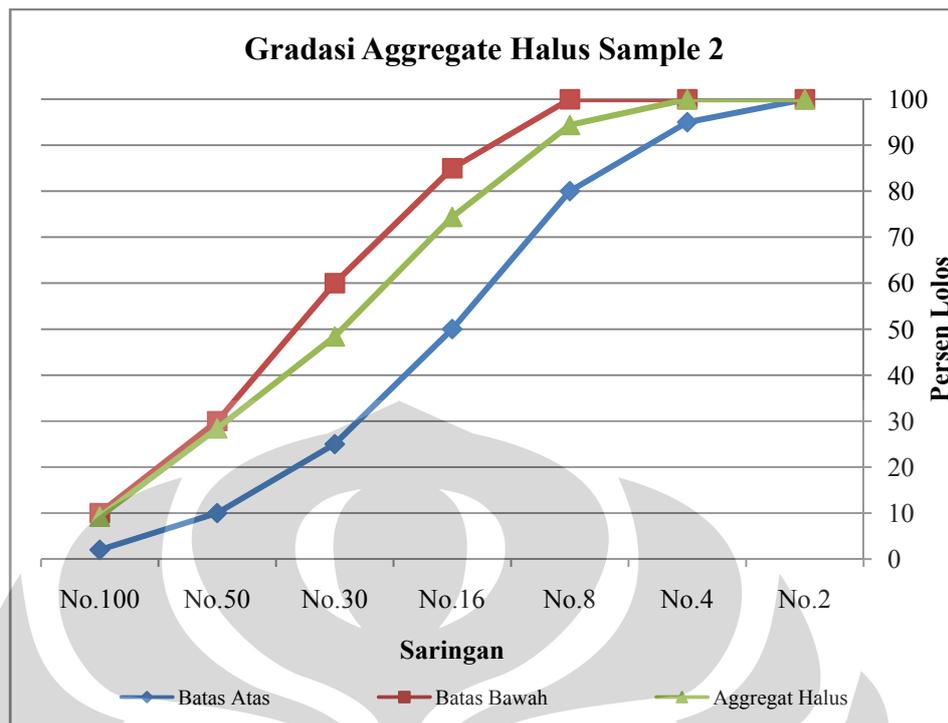
Tabel 4.4 Pesentase Kumulatif lolos Agregat Halus

Saringan		% Lolos			
No.	mm	Min	Max	Uji 1	Uji 2
2		100	100	100	100
4	4.75	95	100	100	100
8	2.36	80	100	94.8	94.4
16	1.18	50	85	74.4	74.4
30	0.6	25	60	48.4	48.4
50	0.3	10	30	28.4	28.4
100	0.15	2	10	9.2	9.2

Data diatas jika disajikan dalam bentuk grafik maka bisa ditampilkan berikut :



Grafik 4.1 Gradasi Agregat Halus Sampel 1



Grafik 4.2 Gradasi Agregat Halus Sampel 2

Hasil dari analisa saringan dapat dilihat dari grafik yang telah disajikan, dapat dilihat bahwa agregat halus yang digunakan berada dalam batasan yang telah disyaratkan oleh ASTM. Gradasi agregat halus terlihat bahwa butiran agregat halus mendekati batas atas pada saringan No.50 sampai saringan No.100. Dari grafik tersebut juga dapat diketahui bahwa gradasi butiran tersebut adalah continuous gradation, gradasi ini memiliki ukuran butiran yang tersebar pada setiap ukurannya, gradasi ini baik karena akan setiap ukurannya akan saling mengisi satu dengan yang lainnya.

Selain untuk mengetahui pembagian butiran dari agregat halus, analisa saringan juga berguna untuk mencari besarnya nilai *finnes modulus*. Jika pada grafik gradasi agregat dapat terlihat pembagian butiran dari agregat halus, maka *finnes modulus* menggambarkan besarnya ukuran butiran rata-rata pada agregat. Nilai *finnes modulus* adalah nilai yang digunakan pada perhitungan rancang campur, namun nilai ini tidak dapat menggambarkan sebaran ukuran butiran agregat

sehingga antara gradasi agregat dan *finnes modulus* merupakan kesatuan yang tidak dapat dipisahkan.

Nilai dari *finnes modulus* adalah jumlah dari persentase kumulatif tertahan dari saringan No.4 sampai saringan No.100 kemudian dibagi dengan 100, semakin besar nilai *finnes modulus* menggambarkan semakin kasar butiran agregatnya.

Untuk hasil perhitungan *finnes modulus* agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini ditampilkan pada tabel berikut :

Tabel 4.5 FM Agregat Halus

Saringan		Benda Uji 1			Benda Uji 2		
No.	mm	Berat Tertahan	kumulatif	% tertahan	Berat Tertahan	kumulatif	% tertahan
4	4.75	0	0	0	0	0	0
8	2.36	26	26	5.2	28	28	5.6
16	1.18	102	128	25.6	100	128	25.6
30	0.6	130	258	51.6	130	258	51.6
50	0.3	100	358	71.6	100	358	71.6
100	0.15	96	454	90.8	96	454	90.8
Jumlah				244.8			245.2
FM				2.448			2.452
Rata-rata							2.45

Hasil dari pengujian dua benda uji memperlihatkan besarnya nilai *finnes modulus* adalah sebesar 2.45, nilai ini akan digunakan pada perhitungan rancang campur.

- Berat Isi

Pengujian berat isi bertujuan untuk menentukan berat isi dan rongga udara dalam agregat halus. Pengujian ini dilakukan dengan standar ASTM C29/ C 29M dengan menggunakan tiga metode yaitu dengan cara jatuh lepas, penusukan dan penggoyangan. Dari percobaan dilaboratorium diperoleh nilai berat isi dan rongga udara dari agregat halus.

Tabel 4.6 Hasil uji Berat Isi Agregat Halus

Kondisi	Lepas	Penusukan	Penggoyangan
Berat Isi Agregat (kg/L)	1.226	1.3575	1.402
Rongga Udara %	48%	42%	44%

Seperti diketahui bahwa berat isi dan berat jenis memiliki satuan yang sama, oleh sebab itu maka pengertian berat isi dan berat jenis adalah berat per satuan volume. Perbedaan antara berat isi dan berat jenis adalah pada volume, jika pada berat jenis volume yang digunakan adalah volume agregat tanpa menghitung rongga udaranya sedangkan pada berat isi volume yang diukur termasuk rongga udara dan celah antara agregat. Maka berat isi adalah berat bagaimana agregat disimpan, nilai dari berat isi sangat dipengaruhi oleh bagaimana cara agregat tersebut disimpan yang tentunya akan mempengaruhi besarnya rongga udara yang didapat.

4.1.2. Kaca

- Pengujian Analisa Saringan (*Sieve Analysis*)

Pada penelitian ini kaca akan digunakan sebagai filler dan juga sebagai pengganti agregat halus. Sebagai filler kaca yang digunakan adalah kaca dengan ukuran butiran lebih kecil dari 0.075 mm, atau kaca yang telah lolos saringan No.200. sedangkan penggunaan kaca untuk agregat halus harus memenuhi ukuran butiran yang telah disyaratkan oleh ASTM 136-04, yaitu persyaratan ukuran butiran untuk agregat halus.

Pengujian sampel kaca yang telah dihaluskan dibuat dua sampel dan hasilnya adalah sebagai berikut :

Tabel 4.7 Hasil uji Analisa Saringan Kaca

Saringan		Benda Uji 1				Benda Uji 2			
No.	mm	Tertahan	Kumulatif	% Tertahan	% Lolos	Tertahan	Kumulatif	% Tertahan	% Lolos
4	4.75	0	0	0	100	0	0	0	100
8	2.36	2	2	0.4	99.6	2	2	0.4	99.6
16	1.18	30	32	6.4	93.6	31	33	6.6	93.4

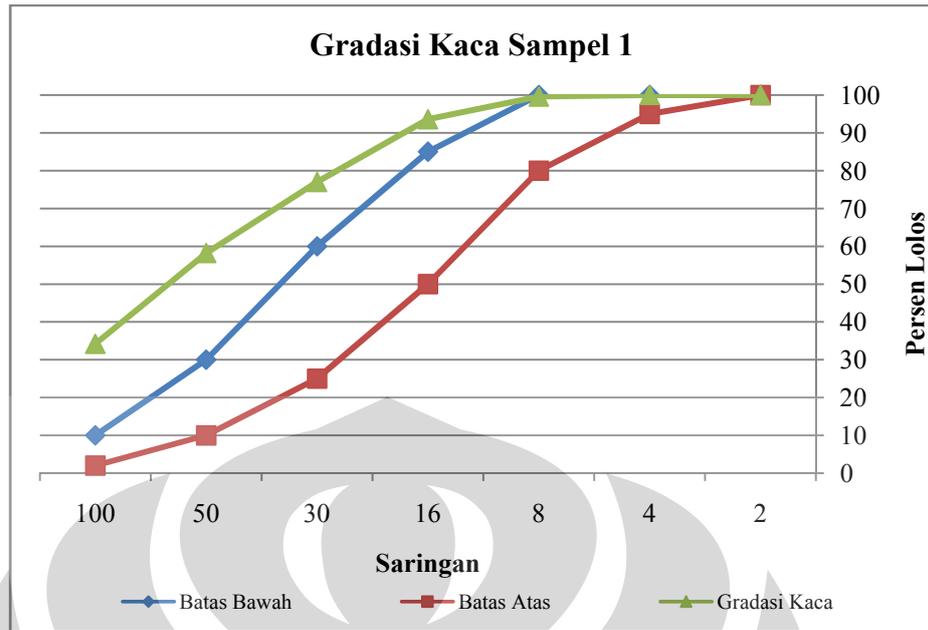
30	0.6	83	115	23	77	86	119	23.8	76.2
50	0.3	94	209	41.8	58.2	94	213	42.6	57.4
100	0.15	120	329	65.8	34.2	120	333	66.6	33.4
200	0.075	75	404	80.8	19.2	80	413	82.6	17.4
Pan		96	500	100	0	87	500	100	0

Pembagian ukuran butiran kaca yang akan dijadikan agregat halus sesuai dengan data di atas harus memenuhi persyaratan gradasi butiran agregat halus berikut ini :

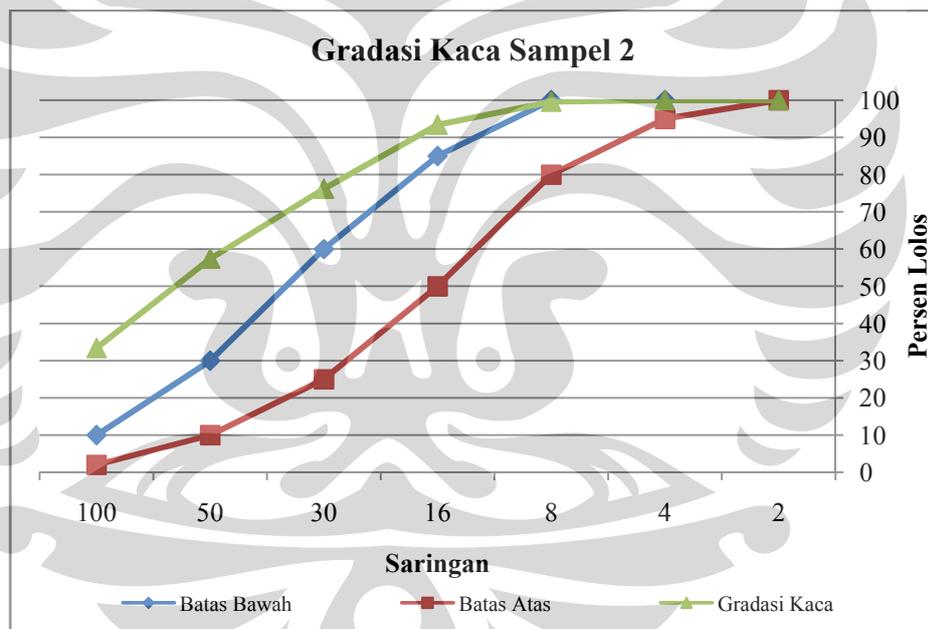
Tabel 4.8 Pesentase Kumulatif lolos Kaca

Saringan		% Lolos			
No.	mm	Min	Max	Uji 1	Uji 2
2		100	100	100	100
4	4.75	95	95	100	100
8	2.36	80	80	99.6	99.6
16	1.18	50	50	93.6	93.4
30	0.6	25	25	77	76.2
50	0.3	10	10	58.2	57.4
100	0.15	2	2	34.2	33.4

Jika data-data di atas disajikan dalam bentuk grafik maka dapat dilihat dalam grafik berikut ini :



Grafik 4.3 Gradasi Kaca Sampel 2



Grafik 4.4 Gradasi Kaca Sampel 2

Dari data dan grafik di atas dapat dilihat bahwa ukuran butiran kaca yang dipakai untuk mengganti agregat halus melewati batas bawah yang disyaratkan oleh ASTM 136-04. Hal ini menunjukkan bahwa ukuran kaca yang digunakan sangat halus.

Untuk melihat ukuran rata-rata butiran kaca yang digunakan dapat dilihat dari besarnya nilai *finnes modulus* kaca, besarnya nilai *finnes modulus* kaca dapat dilihat dari tabel di bawah ini :

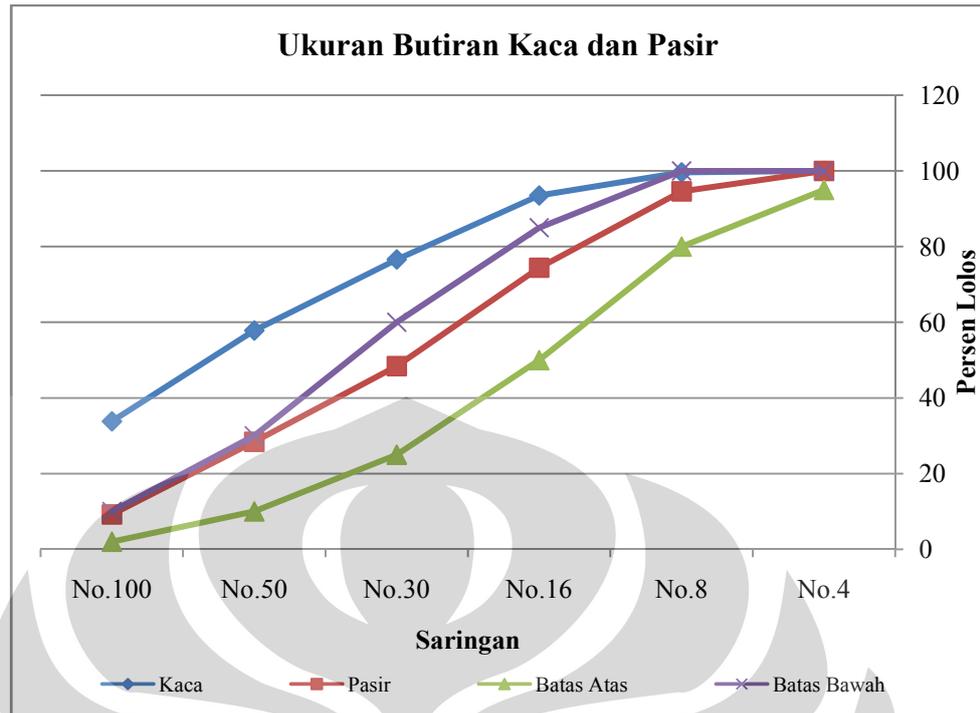
Tabel 4.9 FM Kaca

Saringan		Benda Uji 1			Benda Uji 2		
No.	mm	Tertahan	Kumulatif	% Tertahan	Tertahan	Kumulatif	% Tertahan
4	4.75	0	0	0	0	0	0
8	2.36	2	2	0.4	2	2	0.4
16	1.18	30	32	6.4	31	33	6.6
30	0.6	83	115	23	86	119	23.8
50	0.3	94	209	41.8	94	213	42.6
100	0.15	120	329	65.8	120	333	66.6
Jumlah					137.4		
FM					1.374		
Rata-rata						1.387	

Nilai *finnes modulus* dari kaca didapat sebesar 1.387, hal ini menunjukkan bahwa ukuran butiran kaca sangat halus. Ukuran butiran kaca yang digunakan untuk mengganti pasir sangat berbeda cukup jauh, hal ini bisa dilihat dari perbedaan nilai *finnes modulus* kaca dan pasir (FM pasir 2.45 dan FM kaca 1.387). Perbandingan antara gradasi butiran kaca dan agregat halus dapat dilihat dari tabel dan grafik di bawah ini :

Tabel 4.10 Hasil uji Analisa Saringan Kaca dan Pasir

Saringan		Kaca				Pasir			
No.	mm	Tertahan	Kumulatif	% Tertahan	% Lolos	Tertahan	Kumulatif	% Tertahan	% Lolos
4	4.75	0	0	0	100	0	0	0	100
8	2.36	2	2	0.4	99.6	27	27	5.4	94.6
16	1.18	30.5	32.5	6.5	93.5	101	128	25.6	74.4
30	0.6	84.5	117	23.4	76.6	130	258	51.6	48.4
50	0.3	94	211	42.2	57.8	100	358	71.6	28.4
100	0.15	120	331	66.2	33.8	96	454	90.8	9.2
200	0.075	77.5	408.5	81.7	18.3	31	485	97	3
Pan		91.5	500	100	0	15	500	100	0

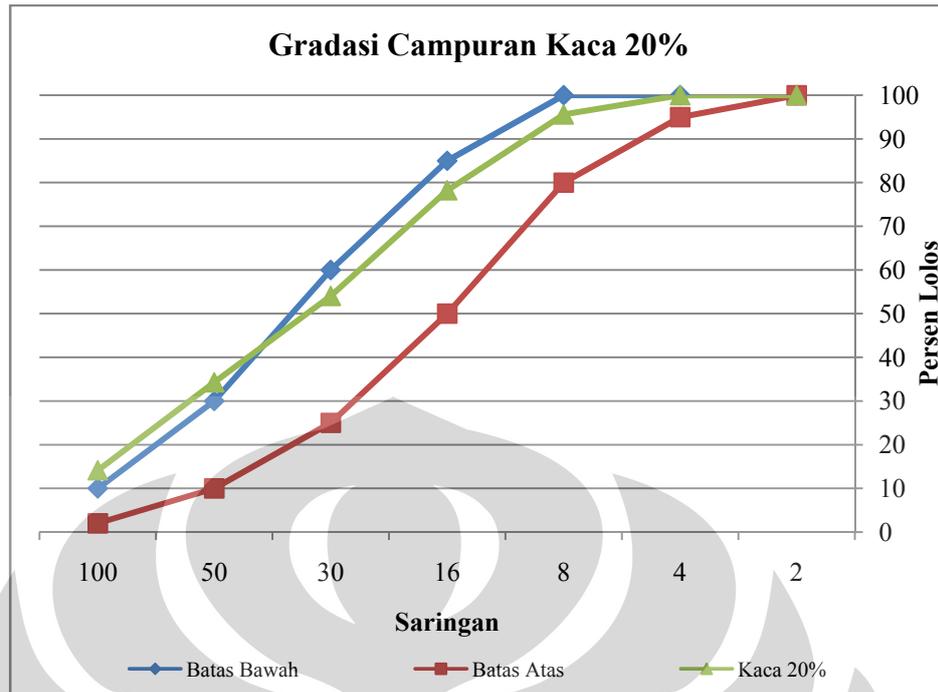


Grafik 4.5 Gradasi Pasir dan Kaca

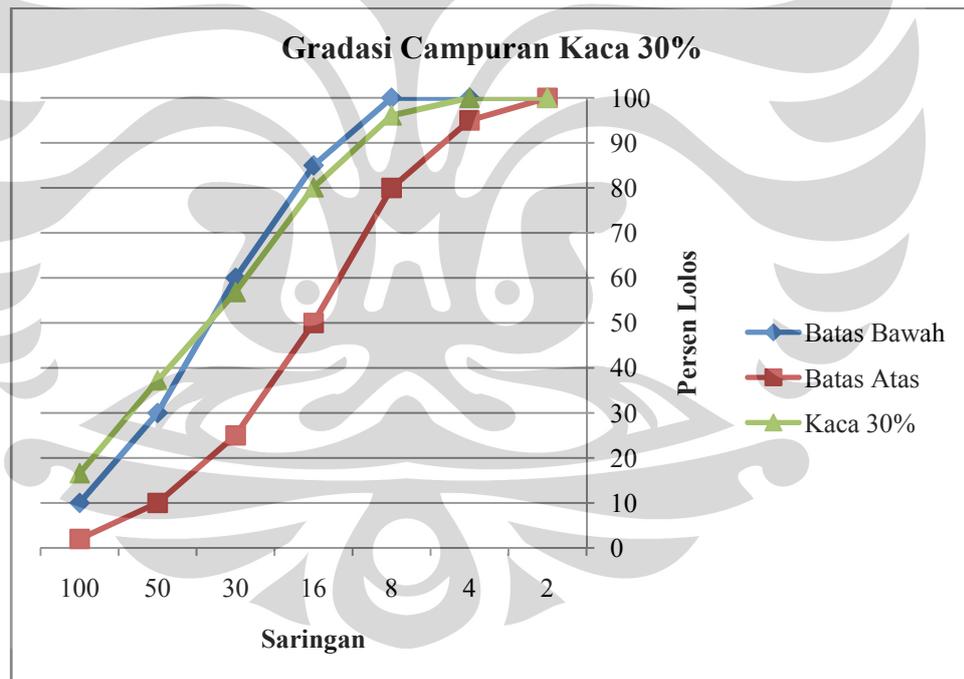
Kaca yang akan digunakan sebagai pengganti agregat halus merupakan campuran kaca dengan pasir, variasi yang akan dibuat yaitu 20 % kaca dan 30 % kaca, gradasi dari campuran kaca dan pasir dengan variasi tersebut adalah sebagai berikut :

Saringan		Kaca 20% + Pasir 80 %				Kaca 30% + Pasir 70 %			
No.	mm	Tertahan	Kumulatif	% Tertahan	% Lolos	Tertahan	Kumulatif	% Tertahan	% Lolos
4	4.75	0	0	0	100	0	0	0	100
8	2.36	22	22	4.4	95.6	19.5	19.5	3.9	96.1
16	1.18	86.9	108.9	21.78	78.22	79.85	99.35	19.87	80.13
30	0.6	120.9	229.8	45.96	54.04	116.35	215.7	43.14	56.86
50	0.3	98.8	328.6	65.72	34.28	98.2	313.9	62.78	37.22
100	0.15	100.8	429.4	85.88	14.12	103.2	417.1	83.42	16.58
200	0.075	40.3	469.7	93.94	6.06	44.95	462.05	92.41	7.59
Pan		30.3	500	100	0	37.95	500	100	0

Tabel 4.11 Hasil uji Analisa Saringan Campuran Kaca dan Pasir



Grafik 4.6 Gradasi Campuran Pasir 80 % dan Kaca 20 %



Grafik 4.7 Gradasi Campuran Pasir 70 % dan Kaca 30 %

Terlihat bahwa ukuran butiran agregat halus melewati batas bawah yang disyaratkan oleh ASTM 136-04 pada saringan lebih kecil dari No.30, hal ini menunjukkan bahwa ukuran butiran kaca pada umumnya lebih kecil daripada ukuran saringan No.30 (0.6 mm).

Nilai finnes modulus untuk campuran kaca dan pasir yang akan digunakan sebagai agregat halus dapat dilihat pada tabel berikut ini :

Tabel 4.12 FM Campuran Kaca dan Pasir

Saringan		Kaca 20% + Pasir 80 %			Kaca 30% + Pasir 70 %			
No.	mm	Tertahan	Kumulatif	%	Tertahan	Kumulatif	%	
4	4.75	0	0	0	0	0	0	
8	2.36	22	22	4.4	19.5	19.5	3.9	
16	1.18	86.9	108.9	21.78	79.85	99.35	19.87	
30	0.6	120.9	229.8	45.96	116.35	215.7	43.14	
50	0.3	98.8	328.6	65.72	98.2	313.9	62.78	
100	0.15	100.8	429.4	85.88	103.2	417.1	83.42	
Jumlah					223.74			213.11
FM					2.2374			2.1311

Nilai FM yang didapat adalah 2.24 untuk campuran kaca 20 %, dan 2.13 untuk campuran kaca 30 %. Dari nilai finnes modulus tersebut dapat diketahui bahwa semakin banyak campuran kaca yang digunakan maka akan semakin kecil ukuran butiran rata-rata agregat halus nya.

- Pengujian Berat Jenis dan Absorpsi Agregat Halus Kaca

Pengujian berat jenis dan absorpsi dari kaca bertujuan untuk menentukan Berat Jenis Curah, SSD, dan Apparent dari kaca, disamping itu dari pengujian ini juga akan diketahui besar nilai absorpsi dari kaca. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan standar ASTM C-128-01. Percobaan dilakukan dengan menggunakan dua benda uji dengan hasil diperoleh sebagai berikut:

Tabel 4.13 Hasil uji Berat Jenis Kaca

Benda Uji	I	II
berat kaca awal	500	500
berat piknometer + benda uji + air (C)	935	958
berat piknometer + air (B)	631	659
berat benda uji setelah oven (A)	404	403
BJ curah (bulk)	2.06122	2.00498
BJ SSD	2.55102	2.48756
BJ Semu (<i>apparent</i>)	4.04	3.875
Absorbsi	23.7624	24.0695

Dari hasil pengujian dua buah sampel tersebut lalu diambil nilai rata-ratanya, nilai inilah yang selanjutnya digunakan dalam perhitungan rancang campur.

Tabel 4.14 Nilai Rata-rata Berat Jenis Kaca

Benda Uji	Rata-rata
BJ curah (bulk)	2.0331
BJ SSD	2.51929
BJ Semu (<i>apparent</i>)	3.9575
Absorbsi	23.9159

Pada nilai rata-rata terlihat bahwa nilai absorpsi kaca sangat besar, ini dikarenakan sangat halusnya ukuran butiran kaca, hal inilah yang menyebabkan sangat besarnya nilai absorpsi dari kaca.

Pada tahapan rancang campur, Berat Jenis yang akan digunakan adalah berat jenis SSD, karena pada kondisi ini akan sama dengan kondisi kaca pada saat pengecoran beton. Kondisi SSD digunakan karena pada kondisi ini kandungan air pada kaca jenuh (mengisi seluruh pori-pori) namun air tidak ada yang berada diantara butiran kaca, sehingga pada saat

pengecoran air yang digunakan tidak lagi diserap oleh kaca dan tidak ada air tambahan yang berasal dari celah antar butiran kaca.

4.2 Perhitungan Rancang Campur

Untuk perhitungan rancang campur menggunakan metode dari *US Beureau of Reclamation*. Untuk pembuatan 1 m³ beton diperlukan material sebagai berikut :

Tabel 4.15 Kebutuhan Material

Material	Perlu	
Semen	405.36	kg
Air	195	kg
Agregat Kasar	966.6	kg
Agregat Halus	706.173	kg

4.3 Hasil Tes Tarik Belah dan Analisanya

Hasil kuat tarik beton didapat dengan menguji sampel silinder dengan metode tarik belah (*spliting tensile test*), masing- masing variasi terdiri dari 5 sampel silinder beton. Beton dengan kadar kaca 0 % dijadikan kontrol untuk beton dengan variasi kaca lainnya.

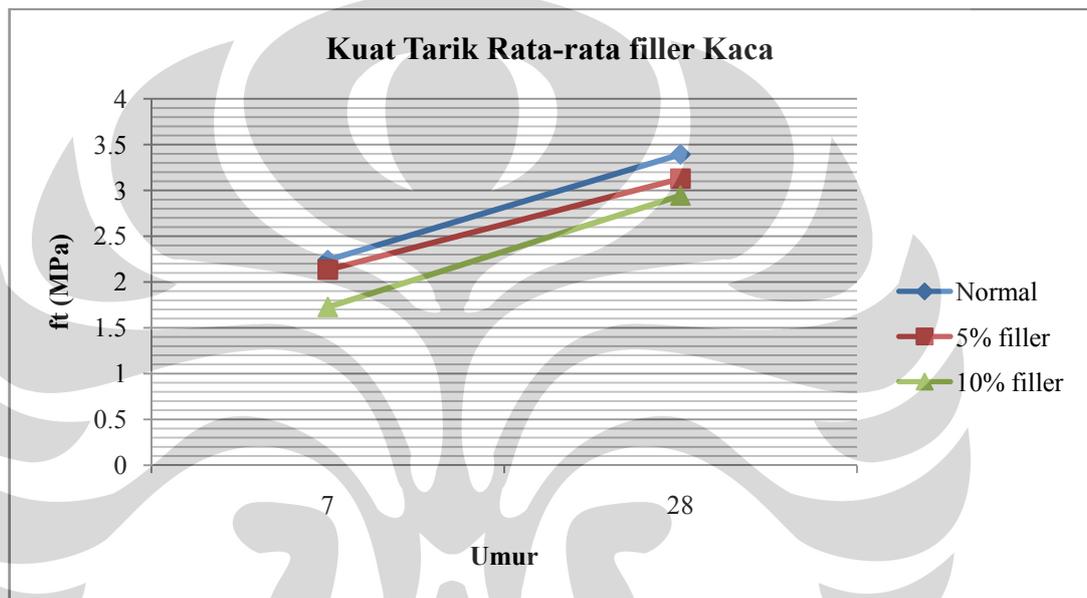
Dengan filler kaca

Penggunaan *filler* kaca pada beton dibuat 2 (dua) variasi kadar *filler* kaca yaitu sebesar 5 %, dan 10 %. Pengujian dilakukan pada umur 7 hari dan 28 hari, hal ini untuk mengetahui pengaruh waktu terhadap kekuatan tarik dari beton. Dari hasil pengujian yang telah dilakukan dapat dilihat bahwa penggunaan *filler* kaca akan mengurangi kekuatan tarik dari beton, dengan pengurangan kekuatan sekitar 0.1 MPa – 0.4 MPa. Pengurangan ini sebanding dengan penambahan kaca yang dilakukan, semakin besar kadar *filler* kaca yang ditambahkan pada beton akan menghasilkan kuat tarik yang semakin kecil. Pada beton dengan normal kekuatannya mencapai 3.39 MPa (9.7 % dari f_c'), sedangkan pada beton dengan kadar filler 10 % hanya menghasilkan kuat tarik sebesar 2.94 MPa (8.4 % dari f_c').

Hasil dari kuat tarik rata-rata benda uji silinder dapat dirangkum kedalam tabel dan grafik berikut ini :

Tabel 4.16 Hasil Tarik Belah Rata-rata Filler Kaca

Umur	0%	5%	10%
7	2.24	2.134	1.726
28	3.394	3.128	2.944



Grafik 4.8 Kuat Tarik Rata-rata filler Kaca

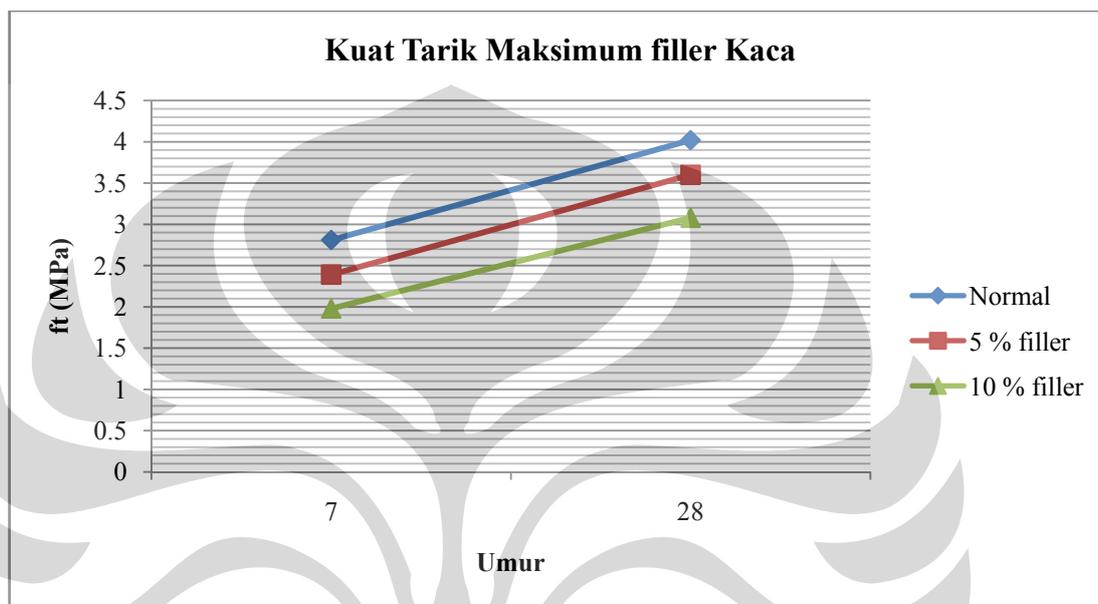
Jika diambil nilai maksimum

Dari hasil pengujian sampel beton didapat hasil yang bervariasi dari masing – masing variasi, jika dari masing- masing variasi diambil nilai terbesarnya untuk mendapatkan nilai yang lebih besar dari nilai rata-ratanya. Pada beton normal (kadar kaca 0 %) didapat kekuatan tarik sebesar 4.02 MPa (11.48 % dari f_c'), pada beton dengan kadar *filler* 5 % didapat kekuatan tarik sebesar 3.6 MPa (10.28 % dari f_c'), dan pada kadar *filler* 10 % didapat nilai kekuatan tarik sebesar 3.08 MPa (8.8 % dari f_c').

Hasil kuat tarik dengan variasi kaca sebagai *filler* jika diambil nilai maksimumnya jika disajikan dalam bentuk tabel dan grafik adalah sebagai berikut :

Tabel 4.17 Hasil Tarik Belah Maksimum Agregat Halus Kaca

Umur	0%	5%	10%
7	2.81	2.39	1.98
28	4.02	3.6	3.08



Grafik 4.9 Kuat Tarik Maksimum filler Kaca

Dari hasil kuat tarik kaca sebagai *filler* dapat dilihat bahwa penambahan kadar kaca sebagai *filler* akan menurunkan nilai kuat tariknya, baik nilai rata-rata maupun nilai maksimumnya. Pada beton normal dan kadar *filler* kaca 5 % dapat dilihat terdapat perbedaan nilai kuat tarik yang cukup besar antara nilai rata-rata dan nilai maksimumnya, sedangkan pada beton dengan kadar *filler* kaca 10 % perbedaan nilai kuat tarik antara nilai rata – rata dengan nilai maksimumnya tidak terlalu berbeda, perbedaan ini dihasilkan karena ketidak homogenan antara satu sampel dengan sampel lainnya. Pembahasan tentang sebaran nilai kuat tarik beton akan dibahas lebih lanjut pada sub-bab analisa nilai hasil tes tarik.

Hasil kuat tarik beton dengan *filler* kaca ternyata memperkecil nilai kuat tariknya sesuai dengan penambahan kadar *filler*, namun pada kadar filler 5 % dan 10 % penurunannya tidak terlalu signifikan. Kuat tarik beton dengan *filler*

kaca masih berada pada rentang kuat tarik beton untuk beton normal yaitu sebesar (8 % - 15 % dari f_c' kontrol). Dari hasil tersebut maka kaca sebagai *filler* dengan kadar *filler* kaca 5 % dan 10 % akan memberikan kerugian, dalam hal ini menurunkan kekuatan tarik dari beton namun masih dalam batas kekuatan tarik dari beton kontrol.

Dengan penggantian agregat halus.

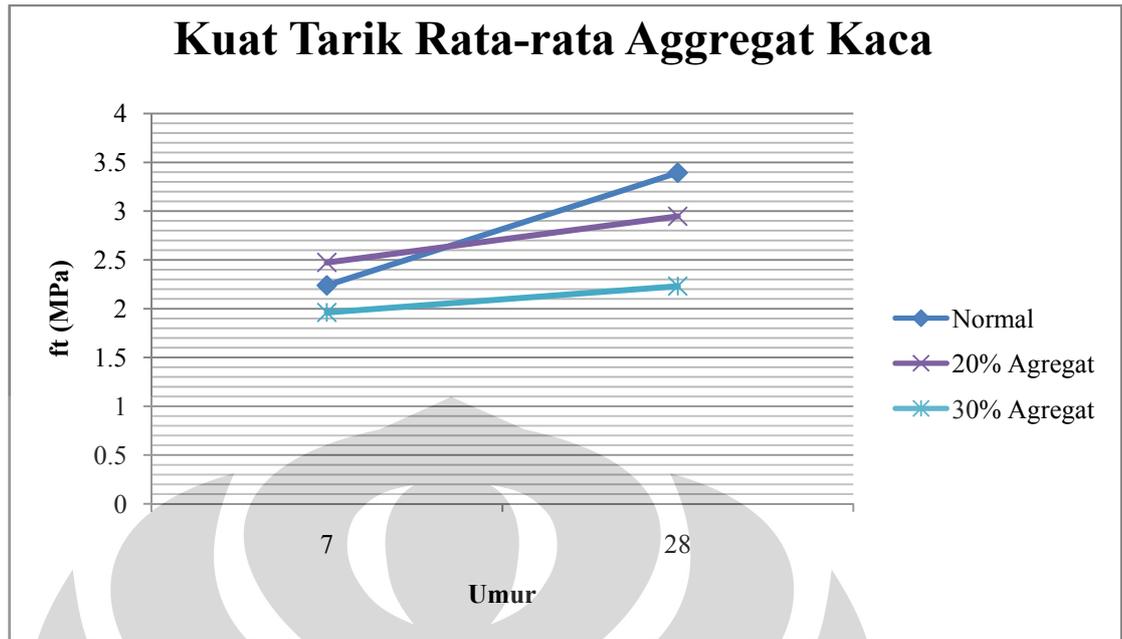
Penggantian agregat halus dengan menggunakan agregat halus kaca dibuat dalam dua variasi, yaitu 20 % dan 30 %. Pengujian sampel tarik belah dilakukan pada umur 7 hari dan 28 hari, hal ini untuk mengetahui pengaruh waktu terhadap kekuatan tarik dari beton. Penggunaan agregat halus kaca sangat berguna untuk mengurangi ketergantungan pada agregat alam yang keberadaannya semakin menipis. Dari hasil pengujian kekuatan tarik beton dengan penggunaan agregat halus kaca sebagai pengganti agregat halus didapat hasil bahwa agregat halus kaca memberikan hasil kekuatan tarik yang lebih kecil dari beton kontrol. Pengurangan ini bervariasi antara 0.2 MPa – 1.1 MPa dengan variasi yang berbeda sesuai dengan variasi penggantian agregat halus kaca pada beton, dapat dilihat pula bahwa semakin banyak penggantian agregat halus yang dilakukan maka kekuatan tarik beton akan semakin menurun.

Kekuatan tarik beton kontrol yang dibuat didapat sebesar 3.394 MPa (9.7 % dari f_c'), sedangkan kekuatan tarik beton dengan penggantian agregat halus sebesar 20 % didapat sebesar 2.948 MPa dan kekuatan tarik beton dengan penggantian agregat halus sebesar 30 % didapat sebesar 2.232 MPa (8.4 % dan 6.37 % dari f_c' beton kontrol).

Hasil kekuatan tarik beton dengan penggantian agregat halus pada campuran beton dapat dirangkum dalam tabel dan grafik dibawah ini :

Tabel 4.18 Hasil Tarik Belah Rata-rata Agregat Halus Kaca

Umur	0%	20%	30%
7	2.24	2.474	1.962
28	3.394	2.948	2.232



Grafik 4.10 Kuat Tarik Rata-rata Agregat Halus Kaca

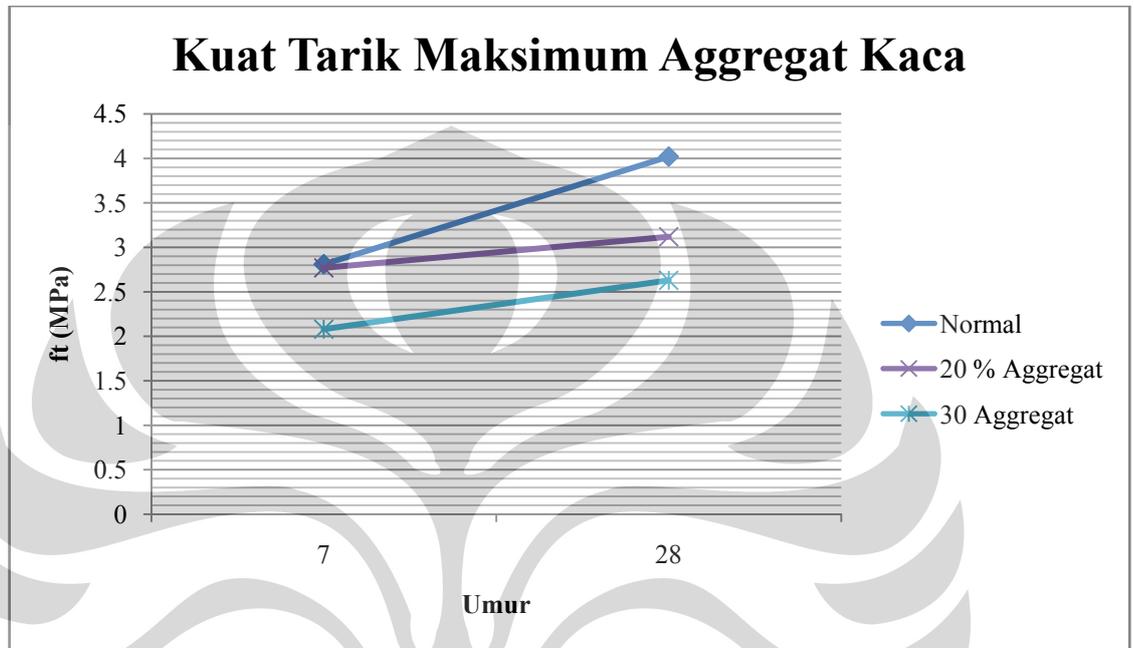
Jika diambil nilai maksimum

Hasil yang ditampilkan sebelumnya adalah hasil kekuatan tarik beton yang didapatkan dengan mengambil nilai rata-rata dari hasil uji tarik belah (*splitting tensile test*). Jika diambil nilai maksimum dari hasil uji tarik belah (*splitting tensile test*) tersebut, maka akan didapat pula hasil yang menunjukkan penurunan kekuatan tarik beton dengan penggantian agregat halus kaca pada campuran beton. Penurunan kekuatan tarik beton ini bervariasi sesuai dengan perbedaan kadar kaca sebagai pengganti agregat halus alam. Kekuatan tarik dari beton kontrol yang dibuat didapat sebesar 4.02 MPa (11.48 % dari f_c'), sedangkan kekuatan tarik dari beton dengan penggantian 20 % agregat halus didapat sebesar 3.12 MPa (8.91 % dari f_c' kontrol) dan kekuatan tarik beton dengan penggantian 30 % agregat halus didapat sebesar 2.63 MPa (7.51 % dari f_c' kontrol).

Hasil kekuatan tarik dengan penggantian agregat halus kaca pada campuran beton jika diambil nilai maksimumnya dapat dirangkum dalam tabel dan grafik berikut:

Tabel 4.19 Hasil Tarik Belah Maksimum Agregat Halus Kaca

Umur	0%	20%	30%
7	2.81	2.77	2.08
28	4.02	3.12	2.63



Grafik 4.11 Kuat Tarik Maksimum Agregat Halus Kaca

Dari hasil test tarik belah (*splitting tensile test*) didapat beberapa data dari hasil pengujian beberapa sampel beton, hasil yang telah disajikan sebelumnya baik hasil kuat tarik rata – rata maupun kuat tarik dengan mengambil nilai maksimum menunjukkan bahwa dengan penggantian agregat halus dengan menggunakan agregat halus kaca akan didapat nilai kuat tarik yang lebih kecil dibanding dengan nilai kuat tarik beton normal.

Pada hasil nilai kuat tarik dengan mengambil nilai rata-rata dan nilai kuat tarik dengan nilai maksimum terdapat perbedaan, perbedaan ini sangat besar pada beton kontrol (0.626 MPa), sedangkan pada beton dengan penggantian agregat halus kaca sebesar 20 % dan 30 % didapat perbedaan nilai kuat tarik dengan mengambil nilai rata-rata dan nilai maksimum didapat perbedaan sebesar 0.172 MPa dan 0.398 MPa, lebih lanjut tentang sebaran nilai hasil tes tarik akan dibahas pada subbab analisa nilai hasil tes tarik.

Hasil kuat tarik beton dengan penggantian agregat halus kaca ternyata memperkecil nilai kuat tariknya sesuai dengan penambahan kadar agregat halus kaca, penurunan kuat tarik yang terjadi cukup signifikan terutama pada penggantian agregat halus kaca sebesar 30 %, penurunan yang terjadi sebesar 34.24 % atau sebesar 1.162 MPa. Kuat tarik beton dengan agregat halus kaca akan memberikan kerugian yaitu dengan hasil kuat tarik yang lebih rendah dengan penggunaan agregat halus alam, namun untuk kadar agregat halus kaca sebesar 20 % kuat tarik yang didapat masih berada dalam rentang kuat tarik beton untuk beton normal yaitu sebesar 8 % - 15 % dari f_c' kontrol.

Analisa Nilai Hasil Tes Tarik

Dari hasil penelitian yang dijelaskan di atas dapat dilihat bahwa penambahan *filler* kaca dan penggantian pasir dengan kaca menyebabkan penurunan nilai kuat tarik beton. Hal ini disebabkan oleh kemungkinan banyaknya microcrack pada beton, ini sesuai dengan postulat yang dikeluarkan oleh griffith bahwa salah satu penyebab rendahnya kuat tarik beton adalah karena ketidak sempurnaan beton, ketidaksempurnaan inilah yang menyebabkan beton memiliki banyak rongga-rongga kecil, rongga kecil ini menjadi awal dari keruntuhan beton akibat tarik. Akibat beban tarik yang diberikan rongga ini akan menjadi besar dan pada akhirnya terjadi keruntuhan pada beton, pada pembebanan tekan rongga-rongga kecil ini tidak terlalu berpengaruh besar karena beban tekan menyebabkan rongga ini menutup dan terjadinya penyaluran tekanan (McCormac, 2001).

Kegunaan dari tambahan *filler* kaca pada beton adalah untuk menutup rongga-rongga kecil yang terjadi pada beton, namun dari hasil penelitian menunjukkan bahwa hasil uji tarik belah dengan tambahan *filler* kaca adalah lebih rendah dibanding dengan beton tanpa filler kaca. Menurut Griffith rongga kecil ini disebabkan oleh hidrasi beton, susut beton atau oleh ikatan yang tidak baik, dari ketiga alasan yang diemukakan oleh griffith dapat dimengerti mengapa dengan penambahan *filler* kaca kuat tarik yang dihasilkan menjadi turun.

Alasan pertama terjadinya rongga pada beton adalah akibat hidrasi, pada proses hidrasi ini akan terbentuk rongga yang dinamakan gel pores dan capillary pores. Gel pores adalah rongga yang terbentuk akibat penguapan air pada saat proses hidrasi berlangsung, sedangkan capillary pores adalah rongga yang terbentuk akibat pasta produk hidrasi tidak mengisi seluruh volume beton, keduanya dipengaruhi oleh banyaknya air yang digunakan untuk membentuk pasta semen, semakin banyak air yang digunakan maka akan semakin banyak rongga yang terbentuk (Neville, 2003). Hal ini sejalan dengan tingginya nilai absorpsi kaca yang menyebabkan tingginya penyerapan air pada saat pengecoran.

Alasan kedua adalah rongga yang terbentuk akibat susut beton, hasil penelitian menunjukkan bahwa susut beton dengan penambahan *filler* kaca lebih besar dibanding dengan beton tanpa *filler* kaca. Hal ini yang mungkin menjadi penyebab munculnya rongga-rongga kecil dalam beton.

Kemungkinan terakhir turunnya nilai kuat tarik beton dengan penambahan *filler* kaca dan penggunaan agregat halus kaca adalah, tidak mengikatnya pasta semen dengan agregat. Hasil pengujian tarik belah menunjukkan bahwa pada retakan yang terjadi tidak terjadi kegagalan pada agregat kasar, bahkan pada beton dengan agregat halus kaca dapat dilihat kegagalan terjadi pada sisi kaca. Hal ini menunjukkan bahwa ikatan antara pasta semen dengan agregat kasar tidak baik sehingga tidak adanya ikatan yang baik antara pasta dan agregat kasar.

Hasil pengujian tarik belah memperlihatkan hasil yang bervariasi pada setiap sampel beton yang ditest, tabel berikut memperlihatkan seluruh hasil test tarik belah dan setiap variasinya :

Tabel 4.20 Hasil Tes Tarik Belah dan Nilai deviasi

No.Sampel	7 Hari					28 Hari				
	0%	5%	10%	20%	30%	0%	5%	10%	20%	30%
1	2.15	1.97	1.94	2.43	2.04	3.46	2.63	2.98	3.12	2.63
2	1.94	2.01	1.49	2.77	2.08	3.6	3.6	2.77	2.88	2.22
3	2.08	1.94	1.63	2.63	2.08	3.12	3.11	3.08	2.95	2.08
4	2.22	2.39	1.98	2.11	1.98	4.02	3.19	2.91	2.88	2.15
5	2.81	2.36	1.59	2.43	1.63	2.77	3.11	2.98	2.91	2.08
Rata-rata	2.10	1.97	1.57	2.50	2.05	3.39	3.14	2.94	2.95	2.13
Deviasi	8.75%	2.44%	5.33%	8.89%	3.50%	18.22%	3.56%	8.32%	6.96%	5.25%

Hasil pengujian dengan angka merah memperlihatkan nilai yang menyimpang dibanding nilai yang lainnya pada variasi yang sama, oleh sebab itu nilai tersebut tidak dimasukkan ke dalam perhitungan nilai rata-rata dan nilai deviasi.

Penyebab menyimpangnya nilai kuat tarik pada uji tarik belah adalah akibat pembebanan yang tidak tepat pada sumbu simetri beton. Pada pengujian tarik belah beton silinder terlebih dahulu diberi tanda untuk menentukan garis simetrinya, pada saat pemberian tanda inilah dimungkinkan terjadi kesalahan yang mengakibatkan hasil pengujian menjadi menyimpang. Hasil pengujian yang menyimpang ini juga dapat dilihat dari sampel yang telah diuji, diantaranya adalah patahan dari benda uji tidak rata dengan garis simetri, benda uji tidak patah seluruhnya, dan benda uji mengalami patan dua kali. Hasil yang menyimpang dari uji ini tidak dapat dipakai karena akan mempengaruhi nilai rata-rata dan deviasinya.

4.4 Hasil Tes Kuat Lentur dan Analisanya

Test kuat lentur yang dilakukan menggunakan metode third point load mengikuti standar ASTM C 78 – 02, test ini berguna untuk mendapatkan nilai modulus runtuh beton (*modulus of rupture*). Pada metode ini pembebanan dari mesin dibagi menjadi dua dan ditempatkan masing-masing pada $\frac{1}{3}$ bentang balok. Pada test kuat lentur ini dibuat beton dengan campuran filler kaca 5 % dan 10 %, serta dengan penggantian agregat halus kaca dengan kadar 20 %

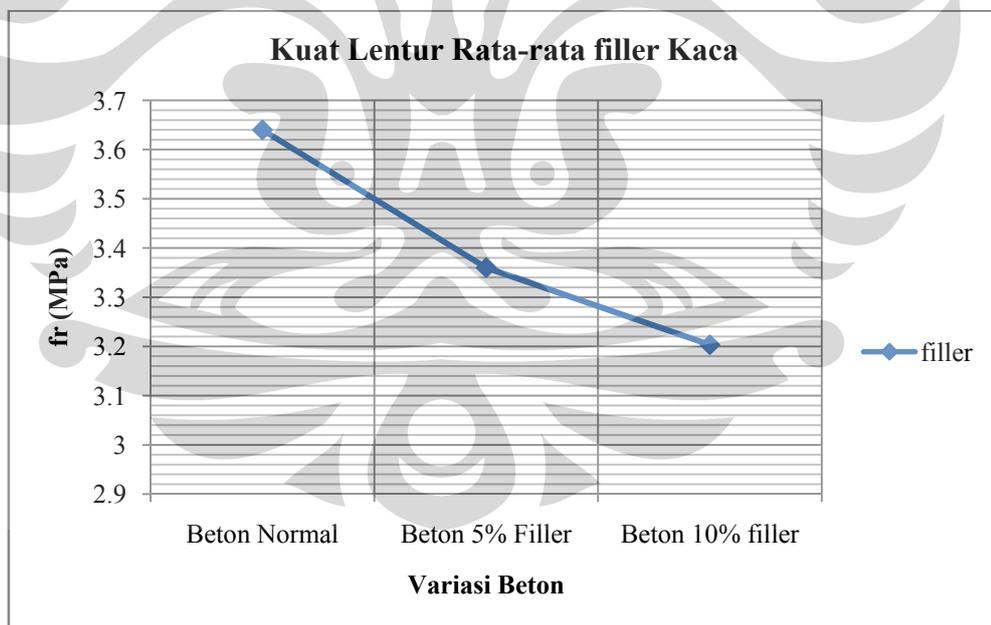
dan 30 % selain itu juga dibuat beton normal sebagai kontrol. Masing-masing variasi beton dibuat tiga buah sampel.

Dengan filler kaca

Penggunaan filler kaca dibuat dua variasi berbeda yaitu sebesar 5 % dan 10 %, hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan filler kaca akan menurunkan nilai modulus runtuh beton. Pada beton normal nilai modulus of rupture yang didapat sebesar 3.64 MPa, sedangkan pada beton dengan campuran filler kaca 5 % didapat modulus runtuh sebesar 3.36 MPa, dan pada beton dengan campuran filler kaca 10 % didapat nilai modulus runtuhnya sebesar 3.2 MPa. Hasil dari uji lentur beton dengan tambahan filler kaca selengkapnya dapat dilihat dari tabel dan grafik berikut :

Tabel 4.21 Hasil Tes Lentur Rata-rata Filler Kaca

Kuat Lentur Pada Umur 28 Hari (MPa)		
0%	5%	10%
3.64	3.36	3.203333



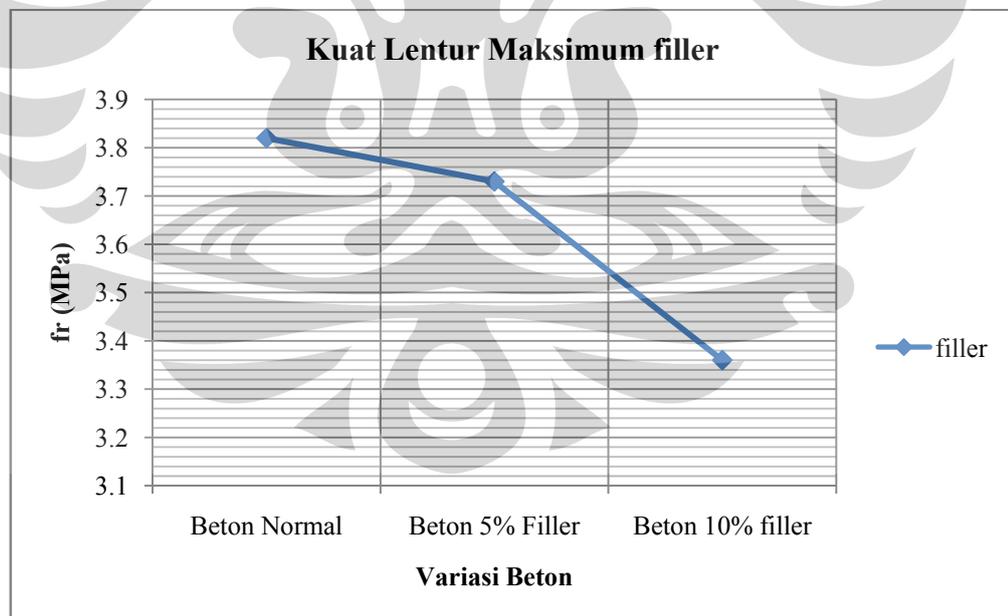
Grafik 4.12 Kuat Lentur Rata-rata Filler Kaca

Jika Diambil Nilai Maksimum

Hasil yang ditampilkan sebelumnya adalah hasil uji lentur dengan mengambil nilai rata-rata dari tiga buah sampel benda uji, jika diambil nilai maksimum dari hasil uji yang bervariasi maka akan didapat hasil yang menyerupai hasil uji dengan nilai rata-rata. Pada nilai maksimum dapat dilihat bahwa nilai modulus runtuh akibat penambahan filler kaca pada campuran beton akan menurunkan nilai modulus runtuhnya. Nilai maksimum dari hasil uji lentur untuk beton normal didapat sebesar 3.82 MPa, sedangkan pada beton dengan campuran filler kaca sebesar 5 % didapat nilai modulus runtuh sebesar 3.73 MPa, dan pada beton dengan campuran filler kaca sebesar 10 % didapat nilai modulus runtuh sebesar 3.36 MPa.

Tabel 4.22 Hasil Tes Lentur Maksimum Filler Kaca

Kuat Lentur Pada Umur 28 Hari (MPa)		
0%	5%	10%
3.82	3.73	3.36



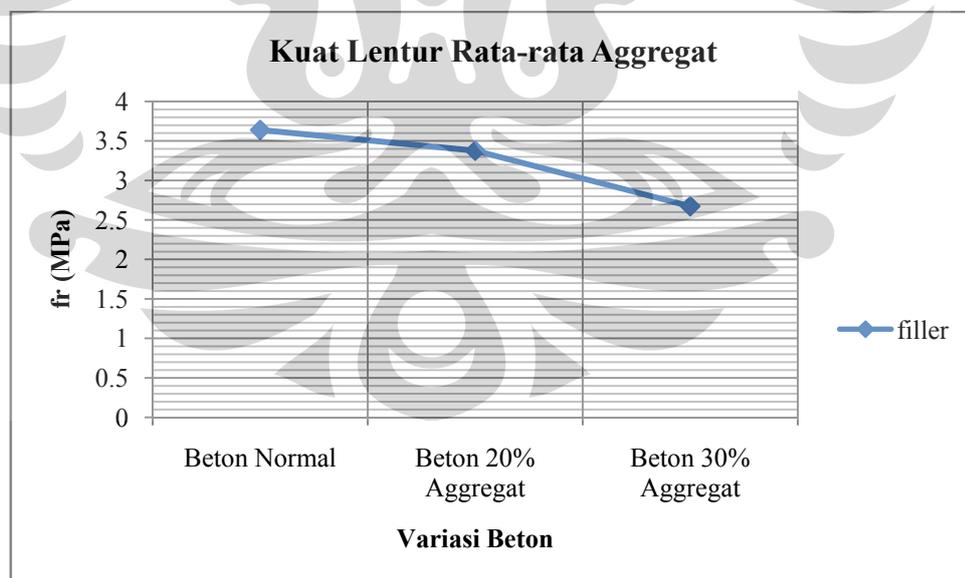
Grafik 4.13 Kuat Lentur Maksimum Filler Kaca

Dengan Agregat kaca

Variasi lain yang dilakukan pada penelitian ini adalah dengan mengganti agregat halus dengan kaca, dalam hal ini pasir akan digantikan dengan kaca. Variasi yang dibuat adalah dengan 20 % dan 30 % pasir digantikan dengan kaca. Pada uji kuat lentur ini masing-masing variasi dibuat tiga buah benda uji, dari hasil penelitian dapat dilihat bahwa semakin besar variasi kaca yang dibuat untuk menggantikan pasir maka semakin kecil nilai modulus runtuhnya. Nilai modulus runtuh untuk beton kontrol didapat sebesar 3.64 MPa, sedangkan beton dengan agregat halus kaca sebesar 20 % didapat nilai modulus runtuhnya sebesar 3.37 MPa, dan beton dengan agregat halus kaca sebesar 30 % didapat nilai modulus runtuhnya sebesar 2.67 MPa. Hasil penelitian beton dengan variasi agregat halus kaca dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 4.23 Hasil Tes Lentur Rata-rata Agregat Halus Kaca

Kuat Lentur Pada Umur 28 Hari (MPa)		
0%	20%	30%
3.64	3.376667	2.673333



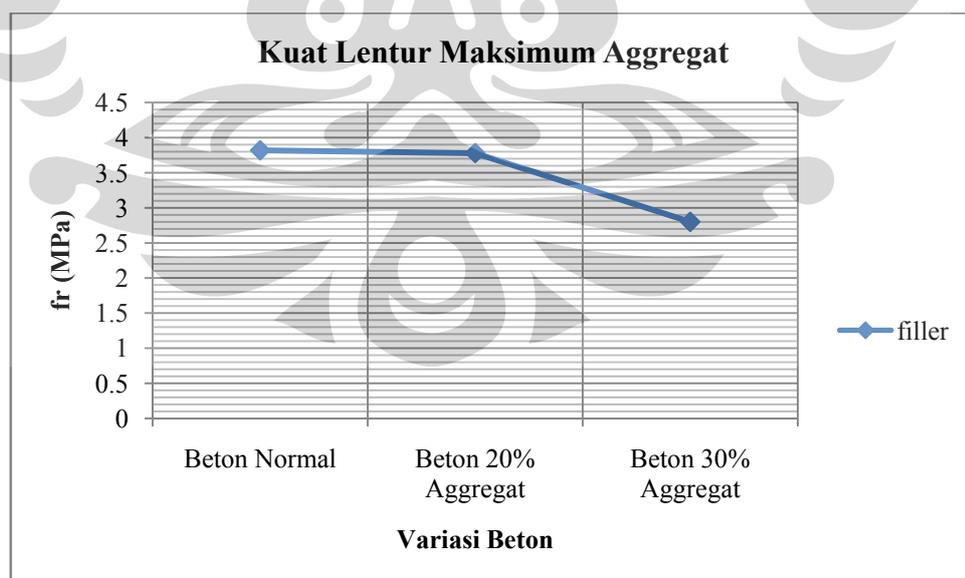
Grafik 4.14 Kuat Lentur Rata-rata Agregat Halus Kaca

Jika Diambil Nilai Maksimum

Nilai yang ditampilkan sebelumnya adalah nilai modulus runtuh rata-rata beton dengan agregat halus yang digantikan dengan kaca, dari beberapa nilai modulus runtuh yang didapat dari hasil uji kuat lentur jika diambil nilai maksimumnya maka akan didapat hasil yang menyerupai nilai rata-rata. Modulus runtuh yang didapat dengan menggunakan agregat halus kaca didapat lebih kecil daripada beton kontrol, pada beton kontrol nilai modulus runtuh maksimum didapat sebesar 3.82 MPa, sedangkan modulus runtuh untuk beton yang menggunakan kaca 20 % sebagai agregat halus didapat sebesar 3.78 MPa, dan untuk beton dengan menggunakan kaca 30 % sebagai agregat halus didapat sebesar 2.8 MPa. Hasil uji lentur beton dengan variasi kaca sebagai pengganti agregat halus kaca dengan mengambil nilai maksimum dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 4.24 Hasil Tes Lentur Maksimum Agregat Halus Kaca

Kuat Lentur Pada Umur 28 Hari (MPa)		
0%	20%	30%
3.82	3.78	2.8



Grafik 4.15 Kuat Lentur Maksimum Agregat Halus Kaca

Analisa Hasil Nilai Tes Kuat Lentur

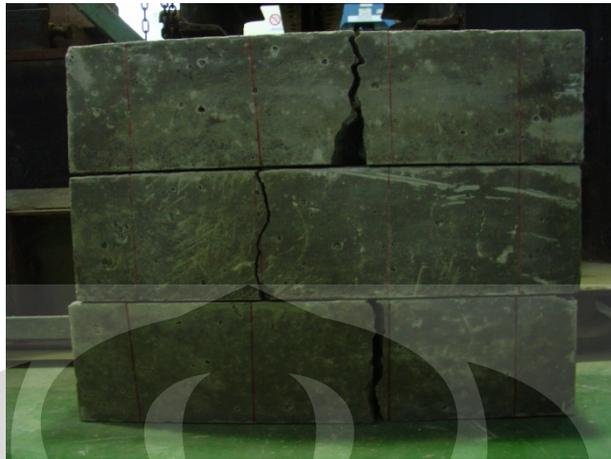
Telah dijelaskan sebelumnya bahwa uji kuat lentur ini bertujuan untuk mencari nilai modulus runtuh dari beton, besarnya nilai modulus runtuh ini menggambarkan besarnya kuat tarik yang dapat dipikul oleh suatu balok beton tanpa tulangan tarik, oleh sebab itu nilai modulus runtuh beton juga dipengaruhi oleh nilai kuat tarik beton.

Hasil dari uji kuat lentur ini semakin memperkuat hasil dari tarik belah, bahwa beton dengan campuran filler kaca dan penggunaan agregat halus kaca akan memperkecil nilai kuat tarik beton, dalam uji kuat lentur digambarkan dengan nilai modulus runtuh beton. Seperti telah disebutkan bahwa nilai modulus runtuh menggambarkan nilai kuat tarik dari balok beton, maka alasan mengapa nilai modulus runtuh dengan tambahan filler kaca dan agregat halus kaca adalah sama dengan kuat tarik beton dengan tambahan filler kaca dan agregat halus kaca. Seperti telah disebutkan bahwa penyebab keruntuhan beton akibat beban tarik adalah diakibatkan oleh adanya microcracks pada beton, microcrack ini yang menjadi penyebab awal keruntuhan beton. Microcrack ini sangat dipengaruhi oleh banyaknya air yang digunakan pada campuran beton, karena air yang pada proses hidrasi menguap akan menjadi rongga-rongga kecil pada beton.

Pada beton dengan penggantian agregat halus dengan kaca sebesar 20 % dapat dilihat nilai modulus runtuhnya tidak terlalu jauh turun dibanding variasi lainnya, hal ini dikarenakan pada agregat halus ukuran butiran kaca tidak sekecil filler yang mengakibatkan nilai absorpsinya juga tidak sebesar filler, selain itu juga persentasi penggunaannya yang tidak terlalu banyak. Nilai absorpsi kaca sangat berpengaruh terhadap penggunaan air pada campuran beton, semakin besar nilai absorpsi kaca maka akan semakin besar pula air yang digunakan pada campuran beton.

Pengamatan terhadap hasil pengujian sampel kuat lentur juga sangat penting, sebab patahan yang terjadi pada sampel harus diamati apakah patahan tersebut diakibatkan oleh momen lentur atau oleh geser. Pada pengujian sampel yang telah dilakukan terlihat bahwa seluruh patahan yang terjadi pada sepertiga kedua balok, hal ini menunjukkan bahwa patahan yang terjadi pada

balok adalah murni diakibatkan oleh momen lentur, karena pada bagian ini gaya dalam yang ada hanyalah momen lentur tanpa ada geser.



Gambar 4.2 Sampel Hasil Tes Lentur Dengan *Third Point Load Test*

4.5 Perbandingan Hasil Tes Tarik Belah (*Splitting Test*) dan Lentur (*Flexural Test*)

Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa tes tarik belah adalah dua tes secara tidak langsung untuk mengetahui kuat tarik dari beton, hasil yang didapat dari dua tes ini adalah kekuatan tarik yang dapat dipikul oleh beton tanpa tulangan tarik, namun begitu hasil yang didapat dari kedua tes ini tidaklah sama.

Hasil yang didapat dari tes lentur selalu menunjukkan hasil lebih besar dari hasil yang ditunjukkan oleh hasil tarik belah, hal ini dikarenakan pada tes lentur beton runtuh karena memikul momen lentur, pada saat sisi bawah yang mengalami kegagalan akibat tarik sisi atas masih mampu menahan tekanan tekan akibatnya beton tidak langsung runtuh namun akan bertahan sedikit untuk menahan momen lentur. Selain itu beton yang mengalami tekanan tarik, grafik tegangan regangannya tidaklah linear, akibatnya hukum hooke tidaklah berlaku dan pada perhitungan kekuatan tarik akibat momen lentur menggunakan rumus yang mengikuti hukum hooke akibatnya nilai yang didapat sedikit lebih besar (Spetla dan Kadleck, 1966).

Berikut adalah perbandingan antara kekuatan tarik yang didapat dari hasil tes tarik belah dan tes kuat lentur :

Tabel 4.25 Perbandingan Tes Tarik Belah dan Tes lentur

Variasi Beton		f_{sp}	f_{fl}	f_{sp}/f_{fl}
Kontrol	0	3.394	3.64	0.93
Filler	5%	3.128	3.36	0.93
	10%	2.944	3.203333	0.92
Aggregat	20%	2.948	3.376667	0.87
	30%	2.232	2.673333	0.83

4.6 Perbandingan Hasil Tes Tarik Belah (*Splitting Test*), Tes Lentur (*flexural Test*) dan Tes Tekan (*Crushing Test*).

Beton merupakan material yang kuat untuk menahan gaya tekan namun tidak kuat untuk menahan gaya tarik. Hasil yang didapat dari tes tarik belah dan tes lentur adalah kekuatan beton untuk menahan tegangan tarik, untuk itu hasil yang didapat perlu dibandingkan dengan tes tekan.

Hasil perbandingan kuat tarik beton dengan tes tarik belah dan kuat tekan beton dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 4.26 Perbandingan Tes Tarik Belah dan Tes tekan

Variasi Beton		f_c'	f_t	f_t/f_c'
Kontrol	0	34.25	3.394	9.91%
Filler	5%	36.38	3.128	8.60%
	10%	27.95	2.944	10.53%
Aggregat	20%	29.65	2.948	9.94%
	30%	26.61	2.232	8.39%

Hasil yang ada menunjukkan perbandingan langsung antara kuat tarik beton dengan tes tarik belah dan kuat tekanya, kuat tarik beton adalah 8 % - 15 % dari kekuatan tekanya (McCormac, 2001).

Kenyataan di lapangan beton jarang sekali yang memikul tegangan tarik murni, tegangan tarik yang diderita oleh beton biasanya didapat dari susut, perubahan temperatur, atau akibat menahan momen lentur. Akibat kenyataan tersebut kekuatan tarik beton lebih sering dites dengan tes lentur, hasil dari tes lentur adalah untuk mendapatkan nilai modulus runtuh. Berdasarkan Standarisasi Nasional Indonesia 03-2847-2002 didapat hubungan antara kuat

tekan dan kuat lentur untuk beton normal yang dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$\sigma_{lentur} = 0,7 \sqrt{\sigma_{tekan}}$$

Hasil perbandingan kuat lentur dan kuat tekan yang didapat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

Tabel 4.27 Perbandingan Tes Lentur dan Tes Tekan (SNI 03-2847-2002)

Variasi Beton		fc'	$\sqrt{fc'}$	ffl	K
Kontrol	0	34.25	5.85	3.64	0.62
Filler	5%	36.38	6.03	3.36	0.56
	10%	27.95	5.29	3.203333	0.61
Aggregat	20%	29.65	5.45	3.376667	0.62
	30%	26.61	5.16	2.673333	0.52

Angka konstanta K menunjukkan hasil yang semakin kecil dengan adanya penambahan kadar *filler* maupun agregat halus kaca. Sedangkan jika hasil tes kuat lentur dibandingkan langsung dengan kuat tekanya akan menghasilkan nilai dengan besar 0.09 – 0.12 (Waltz dan Wischers). Untuk perbandingan langsung kuat lentur dan kuat tekan dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 4.28 Perbandingan Langsung Tes Lentur dan Tes Tekan

Variasi Beton		fc'	ffl	ffl/fc'
Kontrol	0	34.25	3.64	0.11
Filler	5%	36.38	3.36	0.10
	10%	27.95	3.203333	0.10
Aggregat	20%	29.65	3.376667	0.11
	30%	26.61	2.673333	0.09

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan efek penambahan filler kaca dan penggantian agregat halus kaca terhadap kekuatan tarik dan lentur dari beton, beberapa hal yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

- Penambahan filler kaca pada beton akan menurunkan nilai kuat tarik beton.
- Penambahan filler kaca pada beton akan menurunkan nilai kuat lentur beton.
- Penggunaan agregat halus kaca akan menurunkan nilai kuat tarik beton.
- Penggunaan agregat halus kaca akan menurunkan nilai kuat lentur beton.
- Semakin halus kaca akan semakin besar nilai absorpsinya.
- Kekuatan tarik beton sangat dipengaruhi oleh microcrack yang ada pada beton.

Demikianlah hasil-hasil yang didapat dari penelitian ini. Penggunaan kaca sebagai filler dan agregat halus dapat digunakan dan dapat menjadi bahan alternatif dalam campuran beton.

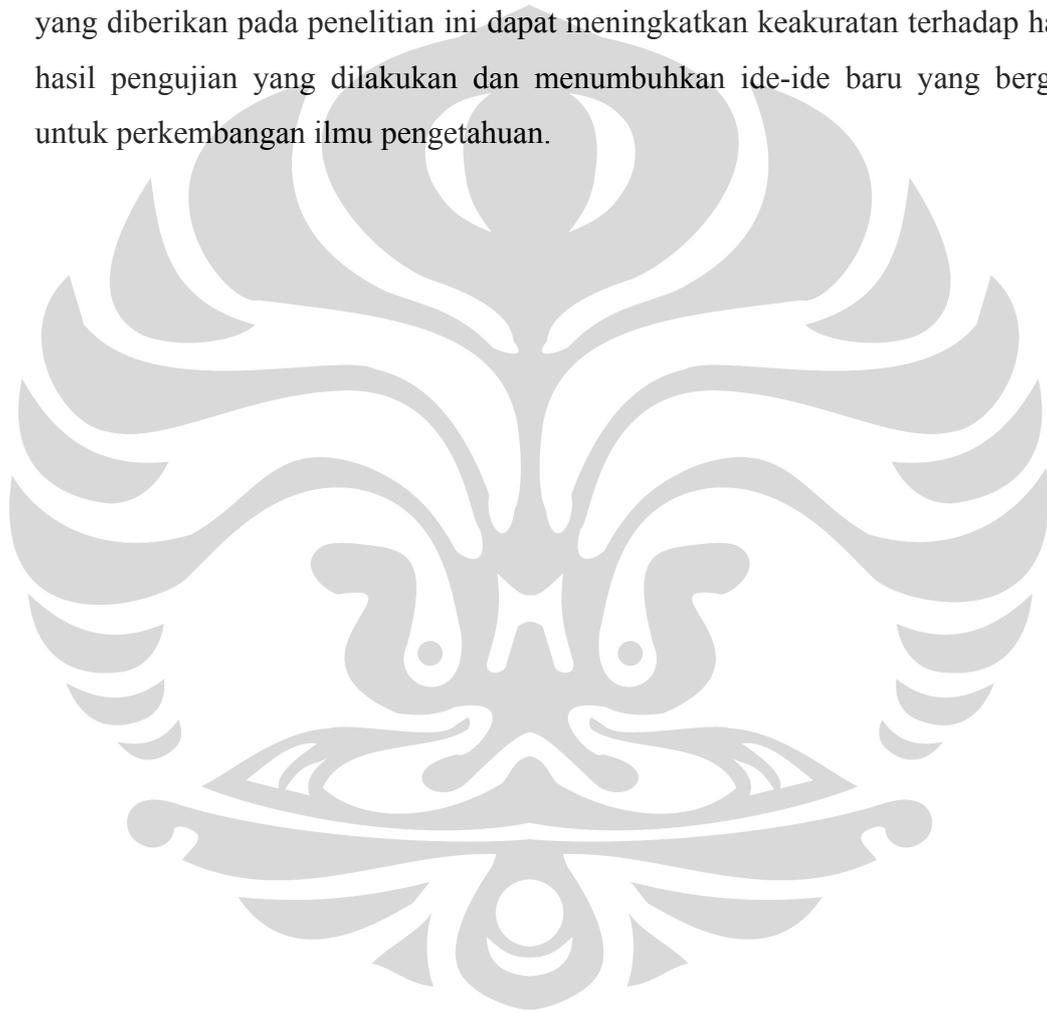
5.2. SARAN DAN USULAN PENELITIAN SELANJUTNYA

Adapun saran yang dapat disampaikan dalam hal penyempurnaan dan kelanjutan riset yang serupa dengan topik penelitian ini dapat dirangkum pada poin-poin berikut:

- Untuk penelitian selanjutnya diperlukan penggunaan katalis agar kaca dapat bereaksi dengan semen dan memberikan kekuatan kepada pasta semen.
- Untuk penggunaan secara luas diperlukan alat yang dapat memproduksi filler kaca atau agregat halus kaca secara efisien.

- Untuk penelitian selanjutnya harus dibuat sampel dengan variasi yang lebih beragam dari penggunaan kaca sebagai filler ataupun sebagai agregat halus, sehingga pengaruhnya akan lebih terlihat.
- Untuk penelitian selanjutnya penggunaan mesin uji lentur untuk beton haruslah dengan perletakan balok yang lebih presisi karena akan mempengaruhi hasil penelitian.

Demikianlah saran yang didapat dari penelitian ini. Semoga dengan saran yang diberikan pada penelitian ini dapat meningkatkan keakuratan terhadap hasil-hasil pengujian yang dilakukan dan menumbuhkan ide-ide baru yang berguna untuk perkembangan ilmu pengetahuan.



DAFTAR REFERENSI

(2008). *Buku Panduan Pedoman Praktikum Pemeriksaan Bahan Beton Dan Mutu Beton*. Depok: Laboratorium Struktur Dan Material Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Hibbeler, R.C. *Mechanics Of Materials Fifth Edition*. USA : Pearson.

Neville, A.M. (1995). *Properties of Concrete*. England : Longman Group Limited.

Mulyono, Tri. (2003). *Teknologi Beton* . Yogyakarta : Andi.

Popovics, Sandor. (1982). *Fundamental Of Portland Cement Concrete : A Quantitive Approach Vol 1 : Fresh Concrete*. USA : John Willey And Sons.

Young, Francis. (1999). *The Science And Technology Of Civil Engineering Material*. USA : Prentice-Hall International.