



**STUDI EKSPERIMENTAL PERILAKU MEKANIK BETON  
NORMAL DENGAN SUBSTITUSI LIMBAH DEBU  
PENGOLAHAN BAJA (*DRY DUST COLLECTOR*)**

**TESIS**

**Disusun dalam rangka memenuhi salah satu persyaratan dalam  
menyelesaikan Studi Program Magister Teknik Sipil**

**Oleh :**

**AMALIA**

**NIM : L4A007006**

**PROGRAM PASCA SARJANA  
UNIVERSITAS DIPONEGORO  
SEMARANG**

**2009**

**STUDI EKSPERIMENTAL PERILAKU MEKANIK BETON  
NORMAL DENGAN SUBSTITUSI LIMBAH DEBU PENGOLAHAN  
BAJA (*DRY DUST COLLECTOR*)**

Disusun Oleh :

**A M A L I A**

**NIM : L4A007006**

Dipertahankan di depan Tim Penguji pada tanggal : 20 Juni 2009

Tesis ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh  
gelar Magister Teknik Sipil

Tim Penguji

- |               |                            |         |
|---------------|----------------------------|---------|
| 1. Ketua      | : Ir. Purwanto, MT, M.Eng. | (.....) |
| 2. Sekretaris | : Dr. Ir. Antonius, MT.    | (.....) |
| 3. Anggota 1  | : Ir. Himawan Indarto, MS. | (.....) |
| 4. Anggota 2  | : Ir. Han Ay Lie, M.Eng    | (.....) |

Semarang, Juni 2009  
Universitas Diponegoro  
Program Pascasarjana  
Magister Teknik Sipil  
Ketua,

Dr. Ir. Suripin, M.Eng  
NIP. 131 668 51

**STUDI EKSPERIMENTAL PERILAKU MEKANIK BETON  
NORMAL DENGAN SUBSTITUSI LIMBAH DEBU PENGOLAHAN  
BAJA (*DRY DUST COLLECTOR*)**

Oleh : Amalia

**ABSTRAK**

Bahan tambah mineral berbutiran halus diperlukan pada beton untuk mencegah terjadinya *bleeding* dan mengurangi porositas beton. Limbah *dry dust collector* mempunyai komposisi  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 41,76\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 20,05\%$ ,  $\text{SiO}_2 = 2,26\%$ ,  $\text{MgO} = 1,66\%$ , BJ = 3,06 dan tingkat kehalusan 94,25 % lolos ayakan 75 mesh mempunyai potensi untuk digunakan sebagai bahan tambah pada beton. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perilaku mekanik beton yaitu: kuat tekan, modulus elastisitas, poisson ratio, hubungan tegangan regangan dan kuat lentur serta mencari komposisi optimum substitusi limbah *dry dust collector* pada campuran beton normal.

Program eksperimen dilakukan dengan membuat 9 jenis campuran beton yang berbeda berdasarkan faktor air semen (fas) dan jumlah substitusi limbah pada beton. Komposisi campuran beton yang diteliti adalah beton dengan  $w/c = 0,68$ ,  $w/c = 0,57$  dan  $w/c = 0,51$  dengan substitusi limbah sebesar 0 %, 10 % dan 20 % dari berat pasir. Perilaku mekanik beton diuji pada umur 28 hari.

Hasil penelitian diantaranya yaitu : substitusi limbah sebesar 10 % pada beton dengan fas 0,68 dapat meningkatkan perilaku mekanik beton, penambahan limbah pada beton menurunkan nilai slump, pada beton dengan fas 0,68 kadar limbah 10 % kuat tekan beton meningkat sebesar 21,21 %, modulus elastisitas beton naik sebesar 3,69 %, poisson's ratio sebesar 0,21, kuat lentur beton meningkat sebesar 3,48 % dan regangan beton pada beban puncak naik sebesar 36,96 %.

*Kata kunci : beton normal, limbah dry dust collector, perilaku mekanik*

# **AN EXPERIMENTAL STUDY OF MECHANICAL BEHAVIOR OF NORMAL STRENGTH CONCRETE WITH THE SUBSTITUTION OF STEEL PROCESSING DUST WASTE (*DRY DUST COLLECTOR*)**

By: Amalia

## **ABSTRACT**

The fine-grained mineral additive material is required in the concrete in order to prevent *bleeding* and porosity of concrete. The *dry dust collector* waste has the composition of  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 41.76\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 20.05\%$ ,  $\text{SiO}_2 = 2.26\%$ ,  $\text{MgO} = 1.66\%$ , specific gravity = 3.06, and refinement rate of 94.25% with sieving pass of 75 mesh and it has a potency to be used as an additive material in concrete. This research has the objectives of finding out an optimum composition of *dry dust collector* substitution in the normal concrete mixture and finding out the concrete mechanical behavior, which are, compressive strength, elasticity modulus, Poisson's ratio, stress-strain relation and flexural strength.

In this research, 9 different kinds of concrete mixture were created based on the water to cement ration (w/c) and the amount of waste substitution in the concrete. The examined concrete mixture compositions were the concrete with w/c = 0.68, w/c = 0.57, and w/c = 0.51 with the waste substitution as much as 0%, 10%, and 20% of sand weight. The mechanical behavior of the concrete was tested at the age of 28 days.

The research results show that, waste substitution as much as 10% in the concrete with w/c of 0.68 can improve concrete mechanical behavior, an addition of waste in the concrete influence concrete workability, in the concrete with w/c of 0.68 and amount of waste as much as 10%, compressive strength of the concrete increases as much as 21.21%, elasticity modulus increases as much as 3.69%, Poisson's ratio as much as 0.21, flexural strength of the concrete increases as much as 3.48%, and concrete strain at the peak load increases as much as 36.96%.

*Keywords: normal concrete, dry dust collector waste, mechanical behavior*

## **KATA PENGANTAR**

Puji syukur kami panjatkan kepada Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga kami dapat menyelesaikan penelitian dengan judul **“STUDI EKSPERIMENTAL PERILAKU MEKANIK BETON NORMAL DENGAN SUBSTITUSI LIMBAH DEBU PENGOLAHAN BAJA (*DRY DUST COLLECTOR*)”**.

Maksud dan tujuan penulisan tesis ini adalah sebagai persyaratan kelulusan bagi mahasiswa Magister Teknik Sipil Universitas Diponegoro Semarang. Selama pelaksanaan penelitian dan penyusunan tesis ini penyusun banyak mendapatkan bantuan dari semua pihak terutama dosen pembimbing, laboran pada Laboratorium Bahan dan Konstruksi UNDIP serta rekan-rekan mahasiswa S1 dan S2 yang bersama-sama mengerjakan penelitian. Oleh karena itu dalam kesempatan ini penyusun mengucapkan banyak terima kasih.

Penyusun menyadari bahwa tesis ini masih banyak kekurangan, untuk itu kami mengharapkan masukan dan saran dari dosen pembimbing, dosen pembahas serta semua pihak demi kesempurnaannya tesis ini. Kami berharap semoga hasil penelitian ini nantinya dapat bermanfaat bagi kami khususnya dan bagi pengembangan penelitian selanjutnya.

Semarang, Juni 2009

Penyusun

## DAFTAR ISI

Halaman Judul .....	i
Halaman Pengesahan .....	ii
Abstrak .....	iii
Kata Pengantar.....	iv
Daftar Isi.....	v
Daftar Tabel.....	vii
Daftar Gambar.....	viii
Daftar Lampiran.....	x
<b>BAB I. PENDAHULUAN</b>	
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan Penelitian.....	2
1.4. Batasan Masalah.....	3
<b>BAB II. KAJIAN PUSTAKA</b>	
2.1. Sifat-Sifat Beton Segar.....	4
2.2. Perilaku Mekanik Beton .....	5
2.3. Penggunaan Bahan Tambah Pada Beton.....	10
2.4. Jenis-Jenis Bahan Tambah Mineral Pada Beton.....	11
2.5. Hasil-Hasil Penelitian yang Mendukung.....	14
<b>BAB III. METODE PENELITIAN</b>	
3.1. Variabel Penelitian.....	17
3.2. Bahan Penelitian .....	18
3.3. Proporsi Campuran Beton (Mix Desain).....	19
3.4. Tempat Penelitian.....	19
3.5. Metode Pengujian Bahan.....	19
3.6. Skema Tahapan Penelitian.....	25
<b>BAB IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN</b>	
4.1. Workability Beton Segar .....	26
4.2. Berat Isi Beton.....	27
4.3. Kuat tekan Beton.....	31
4.4. Modulus Elastisitas Beton.....	34

	4.5. Poisson's Ratio Beton.....	38
	4.6. Kuat Lentur Beton.....	40
	4.7. Hubungan Tegangan Regangan Beton.....	44
BAB V.	KESIMPULAN DAN SARAN	
	5.1. Kesimpulan.....	49
	5.2. Saran-Saran.....	52

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Perkiraan Kuat tekan Beton Pada Berbagai Umur.....	7
Tabel 2.2. Komposisi Kimia Limbah Debu Pengolahan Baja ( <i>Dry Dust Collector</i> ).....	13
Tabel 3.1. Variasi Benda Uji.....	17
Tabel 3.2. Jenis Pengujian dan Jumlah Benda Uji.....	18
Tabel 3.3. Sifat-sifat Bahan Penyusun Beton.....	18
Tabel 3.4. Kebutuhan Bahan Campuran Benda Uji Beton.....	19
Tabel 4.1. Nilai Slump Beton dengan Substitusi Limbah Dry Dust Collector.....	26
Tabel 4.2. Berat Isi Rata-Rata Beton dengan Substitusi Limbah Dry Dust Collector.....	27
Tabel 4.3. Hubungan Antara Modulus Elastisitas dan Berat Isi Beton dengan Limbah Dry Dust Collector.....	29
Tabel 4.4. Kuat Tekan Rata-Rata Beton dengan Substitusi Limbah Dry Dust Collector.....	31
Tabel 4.5. Modulus Elastisitas Rata-Rata Beton dengan Substitusi Limbah Dry Dust Collector.....	35
Tabel 4.6. Poisson's Ratio Rata-Rata Beton dengan Substitusi Limbah Dry Dust Collector.....	39
Tabel 4.7. Kuat Lentur Rata-Rata Beton dengan Substitusi Limbah Dry Dust Collector.....	40
Tabel 4.8. Tegangan dan Regangan Rata-Rata pada Beban Puncak Beton dengan Substitusi Limbah Dry Dust Collector.....	44

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Idealisasi Hubungan Tegangan-Regangan Beton yang diusulkan Hognestad.....	9
Gambar 3.1. Set up Pengujian Kuat Tekan Beton.....	20
Gambar 3.2. Set up Pengujian Modulus Elastisitas.....	22
Gambar 3.3. Set up Pengujian Hubungan Tegangan Regangan.....	23
Gambar 3.4. Set up Pengujian Kuat Lentur.....	24
Gambar 3.5. Skema Tahapan Penelitian.....	25
Gambar 4.1. Berat Isi Rata-Rata Beton dengan Substitusi Limbah Dry Dust Collector.....	28
Gambar 4.2. Pola Retak Beton dengan W/C 0,51.....	31
Gambar 4.3. Kuat Tekan Rata-Rata Beton dengan Substitusi Limbah Dry Dust Collector.....	32
Gambar 4.4. Modulus Elastisitas Rata-Rata Beton dengan Substitusi Limbah Dry Dust Collector.....	36
Gambar 4.5a. Hubungan Modulus Elastisitas dengan Kuat Tekan Beton Normal, 0 % Limbah Dry Dust Collector.....	37
Gambar 4.5b. Hubungan Modulus Elastisitas dengan Kuat Tekan Beton Normal, 10 % Limbah Dry Dust Collector.....	37
Gambar 4.5c. Hubungan Modulus Elastisitas dengan Kuat Tekan Beton Normal, 20 % Limbah Dry Dust Collector.....	38
Gambar 4.6. Poisson's Ratio Rata-Rata Beton dengan Substitusi Limbah Dry Dust Collector.....	39
Gambar 4.7. Kuat Lentur Rata-Rata Beton dengan Substitusi Limbah Dry Dust Collector.....	41
Gambar 4.8a. Hubungan Kuat Lentur dengan Kuat Tekan Beton Normal, 0 % Limbah Dry Dust Collector.....	42
Gambar 4.8b. Hubungan Kuat Lentur dengan Kuat Tekan Beton Normal, 10 % Limbah Dry Dust Collector.....	42

Gambar 4.8c. Hubungan Kuat Lentur dengan Kuat Tekan Beton Normal, 20 % Limbah Dry Dust Collector.....	43
Gambar 4.9. Permukaan Beton yang Fraktur Akibat Pengujian Lentur.....	44
Gambar 4.10. Regangan pada Tegangan Maksimum Beton dengan Substitusi Limbah Dry Dust Collector.....	45
Gambar 4.11a. Perbandingan Hubungan Tegangan Regangan Beton w/c 0,68 dengan Limbah Dry Dust Collector Menurut Hognestad.....	46
Gambar 4.11b. Perbandingan Hubungan Tegangan Regangan Beton w/c 0,57 dengan Limbah Dry Dust Collector Menurut Hognestad.....	46
Gambar 4.11c. Perbandingan Hubungan Tegangan Regangan Beton w/c 0,51 dengan Limbah Dry Dust Collector Menurut Hognestad.....	47

## DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1. Data Hasil Pengujian Sifat Agregat dan Mix Desain Beton
- Lampiran 2. Data Hasil Pengujian Kuat Tekan dan Berat Isi Beton
- Lampiran 3. Data Hasil Pengujian Modulus Elastisitas dan Poisson's Ratio
- Lampiran 4. Data Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton
- Lampiran 5. Data Hasil Pengujian Hubungan Tegangan Regangan Beton
- Lampiran 6. Data Hasil Pengujian SEM limbah *Dry Dust Collector* PT.  
Krakatau Steel
- Lampiran 7. Foto-Foto Limbah *Dry Dust Collector* di tempat penampungan

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1. Latar Belakang

Material yang berbahan dasar semen seperti mortar dan beton harus memiliki distribusi ukuran butiran yang baik dan tidak seragam sehingga dapat memperbaiki workability dan kekuatan beton. Beton yang kekurangan butiran halus dalam agregat menjadi tidak kohesif, mudah bleeding, *workability*nya rendah serta mengurangi kepadatan beton. Untuk mengatasi hal ini, beton ditambahkan bahan tambah mineral (*additive*) berbentuk butiran padat dan halus. Bahan tambah berfungsi sebagai filler yang mengisi rongga-rongga di antara agregat. Penambahan *additive* biasanya dilakukan pada beton kurus, dimana betonnya kekurangan agregat halus dan beton dengan kadar semen yang biasa tetapi perlu dipompa pada jarak yang jauh. Penggunaan bahan tambah dalam jumlah besar terutama digunakan pada jenis beton modern seperti *self compacting concrete* (SCC), dimana pada beton jenis ini harus mempunyai kemampuan memadatkan sendiri.

Limbah debu pengolahan baja (*dry dust collector*) merupakan limbah yang berasal dari proses peleburan baja dengan bahan baku besi bekas. Debu ini merupakan limbah hasil pemisahan baja dari unsur pengotor. Debu-debu baja yang berterbangan ini ditampung di tempat pembuangan limbah. Jumlah limbah yang dibuang cukup besar, yaitu  $\pm 2 \text{ m}^3$  per hari dan jumlahnya terus bertambah setiap hari. Sampai saat ini limbah dibiarkan begitu saja di tempat pembuangan dan belum dimanfaatkan secara optimal. Jumlah limbah yang semakin banyak akan berdampak buruk bagi kesehatan terutama pernafasan.

Dari hasil uji laboratorium debu limbah ini mempunyai ukuran butiran 20 -75 mesh, mengandung unsur utama Fe, karbon (C), oksigen (O), natrium (Na), magnesium (Mg), silika (Si), kalsium (Ca), mangan (Mn) dan element lainnya. Secara fisik dan kimia, debu limbah mempunyai potensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan tambah pada beton. Beberapa hasil penelitian terdahulu menyebutkan bahwa debu limbah pengolahan baja ini dapat digunakan sebagai bahan pengisi pada conblock (Murdiani, dkk : 2006), bahan pengisi pada mortar (Amalia dan Handi, 2007) dan filler pada aspal beton (Broto, dkk : 2006).

Dari latar belakang di atas, limbah tersebut sangat potensial untuk dimanfaatkan sebagai bahan tambah pada beton. Penelitian tentang proses hidrasi dan perilaku mekanik beton dengan bahan tambah limbah debu baja akan memberikan kontribusi pada penggunaan limbah sebagai salah satu bahan tambah beton.

## 1.2. Rumusan Masalah

Limbah debu pengolahan baja berpotensi untuk digunakan sebagai filler dan bahan additive pada beton. Namun demikian perilaku mekanik material beton

dengan bahan tambah ini secara lebih komprehensif belum banyak diteliti. Komposisi optimum substitusi limbah dalam campuran beton yang dapat menghasilkan sifat-sifat beton sesuai standar yang dapat digunakan dalam struktur perlu diketahui lebih mendalam.

### **1.3. Tujuan Penelitian**

Penelitian ini bertujuan untuk :

1. Mengetahui workability beton segar yang menggunakan bahan substitusi limbah debu pengolahan baja.
2. Mengetahui perilaku mekanik beton normal yang menggunakan bahan substitusi limbah debu pengolahan baja dan membandingkannya dengan beton normal tanpa bahan substitusi limbah. Perilaku mekanik yang diteliti meliputi: kuat tekan, modulus elastisitas, poisson ratio dan kuat lentur.
3. Mengetahui perilaku tegangan regangan beton normal yang menggunakan bahan substitusi limbah debu pengolahan baja dan membandingkannya dengan beton normal tanpa bahan substitusi limbah.
4. Mencari komposisi optimum substitusi limbah pengolahan baja pada campuran beton normal.

### **1.4. MANFAAT PENELITIAN**

Kontribusi dan manfaat hasil penelitian ini bagi masyarakat, industri dan pengembangan ilmu adalah sebagai berikut :

1. Dapat diperoleh bahan bangunan dengan harga murah dan berkualitas baik, terutama untuk masyarakat di sekitar pabrik.
2. Bagi pengusaha industri pengolahan baja, dengan dimanfaatkannya limbah ini maka pengusaha tidak akan kesulitan lagi dalam membuang dan mengelola limbah .
3. Dapat mengurangi pencemaran lingkungan (dampak negatif) yang dapat ditimbulkan limbah ini.
4. Bagi masyarakat kampus, hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai bahan pengayaan dalam pengajaran dan untuk melakukan penelitian lebih lanjut tentang pemanfaatan limbah debu pengolahan baja.

### **1.5. BATASAN MASALAH**

Parameter pengujian yang diteliti terdiri dari :

- Kuat tekan yang ditargetkan pada penelitian ini adalah  $f_c' = 20$  MPa ( $f_{as} = 0,68$ ),  $27,5$  MPa ( $f_{as} = 0,57$ ) dan  $f_c' = 35$  MPa ( $f_{as} = 0,51$ ).
- Komposisi limbah yang diteliti adalah 0%, 10 % dan 20%.
- Pengujian mekanik beton dilakukan pada umur 28 hari.
- Sifat-sifat beton yang diteliti meliputi sifat beton segar yaitu: workability (slump). Perilaku mekanik beton yang diteliti meliputi: kuat tekan, modulus elastisitas, angka poisson, hubungan tegangan regangan dan kuat lentur.

## **BAB II**

### **KAJIAN PUSTAKA**

#### **2.1. Sifat-Sifat Beton Segar**

Beton segar adalah beton dalam kondisi plastis (sebelum mengeras), dan akan segera mengeras dalam beberapa jam setelah beton diaduk. Beton segar harus mempunyai kinerja tinggi yaitu: kelecakan atau kemudahan dikerjakan, kohesivitas dan kemudahan pemompaan ke tempat yang tinggi, panas hidrasi rendah, susut yang relative rendah pada proses pengerasan dan percepatan maupun penundaan waktu ikat awal. Sifat-sifat yang perlu diperhatikan pada beton segar adalah:

##### **a. Sifat Kemudahan dikerjakan (Workability)**

Sifat ini merupakan ukuran dari tingkat kemudahan adukan beton untuk diaduk, diangkut, dituang dan dipadatkan. Sifat kemudahan dikerjakan pada beton segar dipengaruhi oleh: (1) Jumlah air yang dipakai dalam campuran adukan beton. Semakin banyak air yang dipakai, semakin mudah beton segar dikerjakan tetapi jumlah air yang banyak dapat menurunkan kuat tekan beton. (2) Penambahan semen ke dalam adukan. Makin banyak jumlah semen, maka beton segar makin mudah dikerjakan. (3) Gradasi agregat halus dan kasar. Apabila agregat yang digunakan mempunyai gradasi sesuai dengan persyaratan, maka adukan beton akan mudah

dikerjakan. (4) Bentuk butiran agregat. Bentuk butiran agregat bulat akan lebih mempermudah pengerjaan beton. (5) Penggunaan admixture dan bahan tambah mineral.

Tingkat kemudahan pengerjaan berkaitan erat dengan kelecakan beton. Untuk mengukur kelecakan beton dilakukan pengujian *slump*. Semakin besar nilai slump berarti adukan beton encer dan ini berarti beton semakin mudah dikerjakan. Nilai slump berkisar antara 5 – 120 cm.

Pada beton segar harus dihindari terjadinya segregasi dan ketidakkohesifan campuran. Segregasi terjadi disebabkan karena beton kekurangan butiran halus, butir semen kasar dan adukan sangat encer. Ketidakkohesifan beton disebabkan oleh: kekurangan semen, kekurangan pasir, kekurangan air dan susunan besar butir agregat tidak baik. Untuk menghindari terjadinya segregasi dan ketidakkohesifan campuran dilakukan dengan cara memperbaiki susunan campuran beton yaitu : memperbaiki kadar air, kadar pasir, ukuran maksimum butir agregat dan penambahan jumlah butiran halus/filler.

#### **b. Berat Isi**

Berat isi beton merupakan perbandingan antara berat bersih beton segar terhadap volumenya (volume silinder untuk pengujian). Berat isi beton berfungsi untuk mengoreksi susunan campuran beton apabila hasil perencanaan berbeda dengan pelaksanaan. Angka koreksi di peroleh dari perbandingan antara berat isi beton perencanaan dengan berat isi beton pelaksanaan. Harga angka koreksi ini kemudian dikalikan dengan kebutuhan masing-masing bahan dalam perencanaan. Selain itu, berat isi beton juga berfungsi untuk mengkonversi dari satuan berat ke satuan volume dan mengoreksi kelebihan maupun kekurangan bahan pada saat pembuatan beton yang akan mempengaruhi volume pekerjaan secara keseluruhan.

#### **c. Waktu Ikat**

Waktu ikat beton merupakan waktu yang dibutuhkan oleh beton untuk mengeras, mulai dari keadaan plastis yang mudah dikerjakan menjadi bentuk yang kaku (keras). Waktu ikat berfungsi untuk mengetahui kapan saat yang tepat untuk membuka cetakan (bekesting) beton sehingga beton tidak mengalami perubahan bentuk, tetapi beton tersebut belum diperbolehkan menerima beban, baik berat sendiri maupun beban yang berasal dari luar.

### **2.2. Perilaku Mekanik Beton**

Perilaku mekanik beton keras merupakan kemampuan beton di dalam memikul beban pada struktur bangunan. Kinerja beton keras yang baik ditunjukkan oleh kuat tekan beton yang tinggi, kuat tarik yang lebih baik, perilaku yang lebih daktail, kekedapan air dan udara, ketahanan terhadap sulfat dan klorida, penyusutan rendah dan keawetan jangka panjang.

### a. Kuat Tekan Beton

Kuat tekan beton merupakan kekuatan tekan maksimum yang dapat dipikul beton per satuan luas. Kuat tekan beton normal antara 20 – 40 MPa. Kuat tekan beton dipengaruhi oleh : faktor air semen (water cement ratio = w/c), sifat dan jenis agregat, jenis campuran, kelecakan (*workability*), perawatan (*curing*) beton dan umur beton.

Faktor air semen (water cement ratio = w/c) sangat mempengaruhi kuat tekan beton. Semakin kecil nilai w/c nya maka jumlah airnya sedikit yang akan menghasilkan kuat tekan beton yang besar.

Sifat dan jenis agregat yang digunakan juga berpengaruh terhadap kuat tekan beton. Semakin tinggi tingkat kekerasan agregat yang digunakan akan dihasilkan kuat tekan beton yang tinggi. Selain itu susunan besar butiran agregat yang baik dan tidak seragam dapat memungkinkan terjadinya interaksi antar butir sehingga rongga antar agregat dalam kondisi optimum yang menghasilkan beton padat dan kuat tekan yang tinggi.

Jenis campuran beton akan mempengaruhi kuat tekan beton. Jumlah pasta semen harus cukup untuk melumasi seluruh permukaan butiran agregat dan mengisi rongga-rongga diantara agregat sehingga dihasilkan beton dengan kuat tekan yang diinginkan.

Untuk memperoleh beton dengan kekuatan seperti yang diinginkan, maka beton yang masih muda perlu dilakukan perawatan dengan tujuan agar proses hidrasi pada semen berjalan dengan sempurna. Pada proses hidrasi semen dibutuhkan kondisi dengan kelembaban tertentu. Apabila beton terlalu cepat mengering, akan timbul retak-retak pada permukaannya. Retak-retak ini akan menyebabkan kekuatan beton turun, juga akibat kegagalan mencapai reaksi hidrasi kimiawi penuh.

Kuat tekan beton mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya umur beton. Kuat tekan beton dianggap mencapai 100 % setelah beton berumur 28 hari. Menurut SNI T-15-1991, perkembangan kekuatan beton dengan bahan pengikat PC type 1 berdasarkan umur beton disajikan pada Tabel 2.1 sebagai berikut:

**Tabel 2.1. Perkiraan Kuat tekan beton pada berbagai umur**

Umur beton (Hari)	3	7	14	21	28	90	365
PC type I	0,46	0,70	0,88	0,96	1,0	-	-

### b. Kuat Tarik Beton

Salah satu kelemahan beton adalah mempunyai kuat tarik yang sangat kecil dibandingkan dengan kuat tekannya yaitu 10%–15% f'c. Kuat tarik beton berpengaruh terhadap kemampuan beton di dalam mengatasi retak awal sebelum dibebani. Pengujian terhadap Kekuatan

tarik beton dapat dilakukan dengan cara: (1) Pengujian tarik langsung, (2) Pengujian tarik belah (pengujian tarik beton tak langsung) dengan menggunakan “Split cylinder test”. Dengan membelah silinder beton terjadi pengalihan tegangan tarik melalui bidang tempat kedudukan salah satu silinder dan silinder beton tersebut terbelah sepanjang diameter yang dibebaninya.

#### **c. Kuat Lentur**

Kekuatan lentur merupakan kuat tarik beton tak langsung dalam keadaan lentur akibat momen (*flexure/modulus of rupture*). Dari pengujian kuat lentur dapat diketahui pola retak dan lendutan yang terjadi pada balok yang memikul beban lentur. Kuat lentur beton juga dapat menunjukkan tingkat daktilitas beton. Kuat lentur beton dihitung berdasarkan rumus  $\sigma_{lt} = \frac{M}{Z}$ , dimana M merupakan momen maksimum pada saat benda uji runtuh dan Z merupakan modulus penampang arah melintang. Menurut pasal 11.5 SNI-03-2847 (2002) nilai kuat lentur beton bila dihubungkan dengan kuat tekannya adalah  $f_r = 0,7\sqrt{f'_c}$  Mpa.

#### **d. Modulus Elastisitas**

Modulus elastisitas beton merupakan kemiringan garis singgung (slope dari garis lurus yang ditarik) dari kondisi tegangan nol ke kondisi tegangan 0,45  $f'_c$  pada kurva tegangan-regangan beton. Modulus elastisitas beton dipengaruhi oleh jenis agregat, kelembaban benda uji beton, faktor air semen, umur beton dan temperaturnya. Secara umum, peningkatan kuat tekan beton seiring dengan peningkatan modulus elastisitasnya. Menurut pasal 10.5 SNI-03-2847 (2002) hubungan antara nilai modulus elastisitas beton normal dengan kuat tekan beton adalah  $E_c = 4700\sqrt{f'_c}$ .

#### **d. Poisson's Ratio**

Poisson's ratio merupakan perbandingan regangan arah lateral dengan regangan aksial akibat pembebanan aksial dalam kondisi batas elastis. Nilai poisson ratio beton normal berkisar antara 0,15 - 0,20. Namun demikian beberapa hasil penelitian mendapatkan nilai poisson ratio beton normal antara 0,10 – 0,30 (R.Park dan T.Paulay, 1975).

#### **e. Perilaku Tegangan-Regangan Beton Normal**

Hubungan tegangan-regangan beton perlu diketahui untuk menurunkan persamaan dalam analisis maupun desain struktur beton. Untuk mengetahui perilaku hubungan tegangan-regangan beton didapat dari hasil pengujian tekan terhadap silinder beton. Hubungan tegangan-

regangan beton normal pada pembebanan uniaksial yang diusulkan oleh E. Hognestad diperlihatkan pada Gambar 2.1. Pada daerah  $0 < \varepsilon_c < \varepsilon_0$ , E. Hognestad memberikan persamaan

$$\text{sebagai berikut : } f_c = f_c'' \left[ \frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right]; \varepsilon_0 = 2f_c'/E_c, \text{ dimana}$$

$f_c$ : tegangan beton,

$f_c''$ : Tegangan maksimum beton,

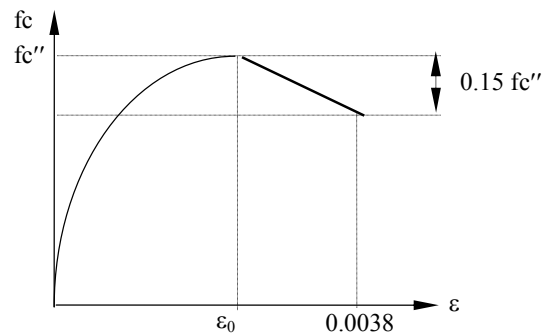
$\varepsilon_0$ : Regangan yang terjadi pada saat terjadi tegangan maksimum,

$\varepsilon_c$ : Regangan yang terjadi pada saat tegangan mencapai 85 % tegangan maksimum.

Pada daerah  $\varepsilon_c > \varepsilon_0$ , persamaan hubungan tegangan regangannya merupakan persamaan linier yang bergantung pada nilai  $\varepsilon_0$  dan  $f_c'$ .

Dari gambar 2.1 terlihat bahwa pada kondisi tegangan mencapai  $\pm 40\%$   $f_c'$  pada umumnya berbentuk linier. Pada saat tegangan mencapai  $\pm 70\%$   $f_c'$  material beton banyak kehilangan kekakuannya yang menyebabkan diagram menjadi tidak linier. Dari beberapa hasil penelitian menyebutkan bahwa tegangan maksimum beton dicapai pada regangan tekan 0,002-0,0025. Regangan ultimit pada saat beton hancur 0,003 – 0,008. Untuk perencanaan, SNI 03-2847 (2002) menggunakan regangan tekan maksimum beton sebesar 0,003.

Thorendfeldt mengusulkan formulasi hubungan tegangan-regangan beton normal pada pembebanan uniaksial yang sedikit berbeda dengan Hognestad, yaitu :



**Gambar 2.1 Idealisasi Hubungan Tegangan-Regangan pada Beton yang diusulkan oleh E. Hognestad**

$$f_c = f_c' \left\{ \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^n \left[ \frac{n}{(n-1) + (\varepsilon_c/\varepsilon_0)^{n.k}} \right] \right\}, \text{ dimana}$$

$f'c$  = tegangan maksimum beton

$\epsilon_0$  = regangan pada saat tegangan maksimum

$$n = 1 + \left( \frac{f'c}{17} \right)$$

$K = 1$  untuk  $(\epsilon_c/\epsilon_0) < 1$

$$k = 0,67 + \left( \frac{f'c}{62} \right) \text{ untuk } (\epsilon_c/\epsilon_0) > 1$$

Popovic juga mengusulkan formulasi hubungan tegangan-regangan untuk beton normal yaitu :

$$f'c = \left\{ \frac{f'c_0 (\epsilon_c/\epsilon_0)^r}{(r-1) + (\epsilon_c/\epsilon_0)^r} \right\}, \text{ dimana}$$

$f'c$  = tegangan maksimum beton

$\epsilon_0$  = regangan pada saat tegangan maksimum

$$r = \left( \frac{E_c}{E_c - (f'c/\epsilon_0)} \right)$$

$$E_c = 3400 \times (f'c)^{0.5} + 4800$$

### 2.3. Penggunaan Bahan Tambah Pada Beton

Bahan tambah mineral (*additive*) yang ditambahkan pada beton dimaksudkan untuk meningkatkan kinerja beton. Beton yang kekurangan butiran halus dalam agregat menjadi tidak kohesif dan mudah bleeding. Untuk mengatasi kondisi ini biasanya ditambahkan bahan tambah additive yang berbentuk butiran padat yang halus. Penambahan additive biasanya dilakukan pada beton kurus, dimana betonnya kekurangan agregat halus dan beton dengan kadar semen yang biasa tetapi perlu dipompa pada jarak yang jauh.

Penggunaan additive di dalam campuran beton mempunyai beberapa keuntungan yaitu: memperbaiki workability beton, mengurangi panas hidrasi, mengurangi biaya pekerjaan beton, mempertinggi daya tahan terhadap serangan sulfat, mempertinggi daya tahan terhadap serangan reaksi alkali-silika, menambah keawetan (durabilitas) beton, meningkatkan kuat tekan beton,

meningkatkan usia pakai beton, mengurangi penyusutan, membuat beton lebih kedap air, porositas dan daya serap air pada beton rendah (Mulyono T, 2003).

Beberapa jenis mineral yang dapat digunakan sebagai bahan tambah beton yaitu : puzzollan, fly ash, steel slag, copper slag dan silica fume. Bahan-bahan ini biasanya mengandung CaO, SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, MgO and MnO.

## **2.4. Jenis-Jenis Bahan Tambah Mineral Pada Beton**

### **a. Fly ash**

Fly ash merupakan butiran halus hasil residu dari proses pembakaran batubara yang mengandung CaO, SiO<sub>2</sub> dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Fly ash yang ditambahkan pada campuran beton akan bereaksi dengan Ca(OH)<sub>2</sub> yang dihasilkan dari proses hidrasi C<sub>3</sub>S dan C<sub>2</sub>S untuk menghasilkan gel CSH baru. Pembentukan CSH baru pada beton akan dapat memperbaiki kinerja beton. Hal ini terbukti dengan penambahan fly ash sampai 20 % dari berat semen ke dalam campuran beton akan dapat meningkatkan kinerja beton (Supartono, 2005).

Penggunaan fly ash bersama-sama dengan silicafume menghasilkan beton yang mempunyai kinerja lebih baik seperti: meningkatkan workability, meningkatkan kuat tekan, beton lebih kedap air dan lebih tahan terhadap serangan sulfat dibandingkan dengan beton yang menggunakan ordinary portland cement (Indrawati, 2005).

### **b. Silicafume**

Silicafume merupakan limbah industri silicon metal yang mengandung 85 % - 95 % SiO<sub>2</sub> dengan ukuran butiran 0,1 µm – 1 µm lebih halus dibanding semen portland yang berkisar 5 µm – 50 µm. Kadar silica yang tinggi pada silicafume dapat menjadi aditif mineral yang sangat baik pada pasta semen di dalam campuran beton.

Penambahan silicafume pada campuran beton akan bereaksi dengan Ca(OH)<sub>2</sub> yang dihasilkan dari proses hidrasi C<sub>3</sub>S dan C<sub>2</sub>S untuk menghasilkan CSH baru. Pembentukan CSH baru ini dapat membentuk ikatan gel yang padat dan sangat kuat di dalam beton. Selain itu ukuran butiran yang sangat halus silicafume akan dapat mengisi rongga-rongga di antara butiran semen sehingga beton menjadi lebih kompak dan padat sehingga kekuatan beton meningkat. Hasil penelitian Supartono (2001) menyebutkan bahwa silicafume sebagai substitusi semen pada campuran beton dapat meningkatkan kuat tekan beton.

### **c. Copper Slag**

Copper slag merupakan salah satu jenis Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) yang berasal dari limbah pemurnian tembaga. GGBFS dapat berupa iron slag (terak besi), steel slag (terak baja), nickel slag (terak nikel) dan copper slag (terak tembaga). Komposisi GGBFS terdiri dari CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Copper slag dapat digunakan sebagai bahan aditif dan

bahan substitusi semen sampai 20 % karena mempunyai komposisi mendekati semen dan harganya lebih murah.

Dari beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa Copper slag sebagai substitusi semen sebesar 5% - 15% dapat meningkatkan kuat tekan dan kuat lentur beton (B.Mobasher, dkk, 1996). Substitusi copper slag sebesar 10% - 40 % pada w/c 0,30 di dalam campuran beton dapat menghasilkan beton dengan kuat tekan 60 – 70 MPa (Supartono, 2005).

**d. Limbah Debu Pengolahan Baja (*dry dust collector*)**

Limbah ini berupa debu yang berasal dari proses peleburan baja pada tahap akhir untuk membersihkan kotoran-kotoran pada baja yang sedang diolah. Proses terbentuknya limbah karena pada tungku tanur tinggi diberikan tekanan gas sehingga debu-debu baja terpisah kemudian ditampung di tempat pembuangan.

Secara fisik limbah buangan berupa serbuk/debu yang berbutir halus, berwarna coklat dan memadat seperti tanah bila bercampur dengan air. Dari hasil pengujian di laboratorium, limbah mempunyai berat jenis 3,06, berat isi padat 1070 kg/m<sup>3</sup>, kadar air 6,20 % dan tingkat kehalusan 94,25 % lolos ayakan 75 mesh. Komposisi kimia limbah disajikan pada Tabel 2.2 (Amalia, 2005).

**Tabel 2.2 Komposisi Kimia Limbah Debu Pengolahan Baja (Dry Dust Collector)**

<b>Komposisi Kimia</b>	<b>Persentase (%)</b>
C	1,24
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,05
Na	4,50
MgO	1,66
SiO <sub>2</sub>	2,26
Cl	6,45
K	5,50
CaO	4,09
Mn	2,20
FeO	41,76
Zn	8,19
Pb	3,64

Beberapa hasil penelitian tentang limbah debu PT. Krakatau Steel menunjukkan kinerja yang baik. Hasil penelitian Murdiani,dkk (2006) menyebutkan bahwa dengan penambahan limbah sebesar 8 % pada conblock yang berfungsi sebagai bahan pengisi, menghasilkan conblock dengan kuat tekan paling tinggi (sebesar 35,2 kg/cm<sup>2</sup>) dibandingkan dengan conblock tanpa limbah. Limbah yang sama, digunakan sebagai filler pada campuran beton aspal menghasilkan campuran yang memenuhi standar Bina Marga (Broto,dkk : 2006). Penggunaan limbah yang sama sebagai substitusi pasir sebesar 2-10 % pada mortar dapat memperbaiki workability dan kuat tekan mortar. Pada komposisi limbah 10 % menghasilkan kuat tekan lebih tinggi 16,25 % dibandingkan mortar tanpa limbah (Amalia dan Handi , 2007).

Limbah debu pengolahan baja yang digunakan sebagai filler pada beton sebesar 10 % - 30 % dapat meningkatkan kuat tekan dan durabilitas beton (H. Moosberg-Bustnes, 2004). Selain meningkatkan kinerja beton, limbah debu baja juga memperlambat proses hidrasi awal pada beton sehingga pengerasan beton lebih lambat (HU Shuguang dkk, 2006). Penggunaan limbah debu baja bersama-sama dengan fly ash pada *self compacting concrete* (SCC) ternyata juga menghasilkan kuat tekan paling tinggi dan penyusutan lebih rendah dibandingkan dengan beton yang hanya menggunakan substitusi fly ash (A Borsoi dkk, 2007).

## **2.5. Hasil-hasil Penelitian Yang Mendukung**

### **a. Penelitian H-Moosberg dan Bustnes (2004)**

Penelitian ini menggunakan limbah pengolahan baja (*steel slag* jenis AOD) sebagai filler pada beton. Limbah yang digunakan mempunyai ukuran butiran lolos ayakan 45  $\mu\text{m}$  mengandung unsur SiO<sub>2</sub> sebanyak 27%, CaO sebesar 54 % dan FeO sebesar 2,6 %. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *steel slag* sebagai filler menggantikan semen sebesar 20 % dan 40 % terhadap berat semen, factor air semen 0,48 menghasilkan beton dengan kuat tekan 44,7 MPa dan 34,1 MPa. Kuat tekan ini lebih rendah dibandingkan beton tanpa limbah yang mencapai kuat tekan 52,9 MPa. Namun demikian penggunaan limbah *steel slag* sebagai filler pada beton menghasilkan kuat tekan lebih tinggi dibandingkan beton yang menggunakan filler quartz.

### **b. Penelitian B. Mobasher M. ASCE, R. Devaguptapu, A.M. Arino (1996)**

Penelitian ini menggunakan debu *copper slag* sebagai cementitious pada beton. Komposisi kimia limbah terdiri dari SiO<sub>2</sub> sebanyak 27,23%, CaO sebesar 5,14 % dan FeO sebesar 51,3 %. Debu *copper slag* ini memiliki komposisi kimia mirip dengan *dry dust collector* PT. Krakatau Steel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kuat tekan beton pada umur 1 dan 7 hari lebih rendah dibandingkan beton tanpa copper slag, tetapi setelah umur 28 dan 90 hari kuat tekan beton copper slag meningkat lebih tinggi dibanding beton normal. Pada kadar 15 % debu copper

slag dengan aktivator kapur sebanyak 1,5 % menghasilkan kuat tekan beton 30 Mpa pada umur 28 hari dan 61 Mpa pada umur 90 hari. Pada penelitian ini kuat tekan tertinggi dihasilkan oleh beton dengan kadar debu *copper slag* optimum sebesar 10 % dari berat PC dengan aktivator kapur sebesar 1 %.

**c. Penelitian HU Shuguang HE Yongjia LU Linnu DING Qingjun (2006)**

Penelitian ini menggunakan *fine steel slag powder* dengan kehalusan 5000 cm<sup>2</sup>/gram dengan komposisi kimia SiO<sub>2</sub> sebanyak 13,5%, CaO sebesar 44,3 % dan FeO sebesar 20,8 %. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *fine steel slag powder* sebagai bahan tambah beton akan memperlambat proses hidrasi sehingga pada umur muda kuat tekan beton lebih rendah dan terus mengalami peningkatan setelah beton berumur 28 dan 90 hari.

**d. Penelitian Suryadi, Akhmad (2007)**

Penelitian ini menggunakan debu pasir besi sebagai substitusi semen pada beton. Debu pasir besi yang digunakan mempunyai ukuran butiran 80-100 mesh, berat jenis 4,18 dengan komposisi kimia, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sebesar 54,3 %, SiO<sub>2</sub> sebesar 29,95 % dan MgO sebesar 5,12 %. Hasil penelitian menunjukkan bahwa beton dengan substitusi 10 % debu pasir besi pada umur 28 hari kuat tekannya meningkat sebesar 9,34 %, tegangan dan regangan meningkat sebesar 10,25 %, modulus elastisitas sebesar 7,65 % dan poisson ratio sebesar 14,16 % dibandingkan beton normal tanpa pasir besi.

**e. Penelitian Amalia dan Handi (2007)**

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan limbah debu pengolahan baja, *dry dust collector* PT. Krakatau Steel sebagai substitusi pasir pada mortar menghasilkan perilaku mekanik mortar yang lebih baik dibandingkan mortar tanpa limbah. Mortar dengan substitusi limbah 10 % menghasilkan kuat tekan mortar sebesar 178,67 kg/cm<sup>2</sup> lebih tinggi dibandingkan kuat tekan mortar tanpa limbah yaitu sebesar 160,67 kg/cm<sup>2</sup>.

## **BAB III**

### **METODE PENELITIAN**

#### **3.1. Variabel Penelitian**

Variabel penelitian ini terdiri dari variabel bebas dan terikat. Sebagai variabel terikat adalah perilaku beton segar dan beton keras yang terdiri dari : workability (slump), kuat tekan, modulus elastisitas, angka poisson, hubungan tegangan regangan dan kuat lentur. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah jumlah limbah debu pengolahan baja yang menggantikan pasir pada beton dan mutu beton. Mutu beton yang ditargetkan adalah beton dengan  $f_c' = 20$  Mpa (fas = 0,68), 27,5 MPa (fas = 0,57) dan  $f_c' = 35$  Mpa (fas = 0,51).

Variasi jumlah limbah sebagai bahan pengisi beton yang diteliti seperti pada Tabel 3.1 sebagai berikut:

---

**Tabel 3.1. Variasi Benda Uji**

Kode Benda Uji	Mutu Beton Target (Mpa)	Faktor air semen (fas)	Jumlah Limbah (%)
A0	20	0,68	0
A1	20	0,68	10
A2	20	0,68	20
B0	27,5	0,57	0
B1	27,5	0,57	10
B2	27,5	0,57	20
C0	35	0,51	0
C1	35	0,51	10
C2	35	0,51	20

Adapun jenis pengujian dan jumlah benda uji yang dibuat untuk masing-masing variasi ditunjukkan pada Tabel 3.2 sebagai berikut:

**Tabel 3.2. Jenis Pengujian dan Jumlah Benda Uji**

Jenis Pengujian	Bentuk benda Uji	Jumlah Benda Uji (buah)	Umur Pengujian (hari)
Kuat tekan	silinder 15/30	3	28
Modulus Elastisitas & poisson ratio	silinder 15/30	3	28
Tegangan-regangan	silinder 15/30	3	28
Kuat Lentur	balok 15/15/60	3	28

Semua benda uji beton keras di *curing* dengan direndam di dalam air pada suhu ruangan sampai dilakukan pengujian perilaku mekaniknya.

### 3.2. Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah Semen gresik jenis OPC, agregat halus dari jenis pasir alam berasal dari quarry muntilan, agregat kasar jenis batu pecah berasal dari Pudak Payung, limbah debu pengolahan baja (*dry Dust Collector*) PT. Krakatau Steel dan air dari sumber di laboratorium uji bahan UNDIP. Adapun sifat-sifat bahan penyusun beton yang digunakan disajikan pada Tabel 3.3 sebagai berikut :

**Tabel 3.3. Sifat-Sifat Bahan Penyusun Beton**

Sifat-Sifat Bahan	Jenis Bahan		
	Agregat Halus	Agregat Kasar	Limbah Dry Dust Collector
Berat Jenis SSD	2.67	2.67	3.06
Berat Jenis Asli	2.56	2.64	3.03
Berat Isi asli padat, (kg/lt)	1.37	1.49	1.07
Berat Isi asli gembur, (kg/lt)	1.33	1.41	0.93
Berat Isi SSD padat, (kg/lt)	1.63	1.56	-
Berat Isi SSD gembur, (kg/lt)	1.51	1.46	-
Penyerapan Air, %	0.50	0.50	2.20
Kadar Air, %	4.30	1.10	6.20
Analisa Ayak	Zone 2	Butiran mak 20 mm	-
Modulus Halus Butir	2.84	6.73	Kehalusan butir = 94.29 %
Kadar Lumpur, %	1.25	0.50	-

**3.3. Proporsi Campuran Beton (Mix Desain)**

Di dalam penelitian ini dibuat 9 jenis campuran beton yang berbeda berdasarkan water cement ratio dan jumlah substitusi limbah pada beton. Jumlah bahan yang dibutuhkan untuk membuat benda uji beton masing-masing variasi disajikan pada Tabel 3.4 sebagai berikut :

**Tabel 3.4. Kebutuhan Bahan Campuran Benda Uji Beton**

Kuat tekan target dan Variasi Limbah	Kode Benda Uji	Volume beton (m <sup>3</sup> )	fas	KEBUTUHAN BAHAN SETELAH KOREKSI				
				PC (gr)	Air (gr)	Ag. Kasar (gr)	Ag. Halus (gr)	Lim bah (gr)
1. fc' 20 Mpa 0 % Limbah	A0	0.10142	0.68	31000	17199	115301	79312	0
2. fc' 20 Mpa 10 % Limbah	A1	0.10142	0.68	31000	17795	115301	72000	7335
3. fc' 20 Mpa 20 % Limbah	A2	0.10142	0.68	31000	18391	115301	64000	14670
4. fc' 27.5 Mpa 0 % Limbah	B0	0.10142	0.57	37000	17310	111739	76863	0
5. fc' 27.5 Mpa 10 % Limbah	B1	0.10142	0.57	37000	17888	111739	70000	7109
6. fc' 27.5 Mpa 20 % Limbah	B2	0.10142	0.57	37000	18465	111739	62000	14217
7. fc' 35 Mpa 0 % Limbah	C0	0.10142	0.51	41000	17391	109149	75081	0

8. fc' 35 Mpa 10 % Limbah	C1	0.10142	0.51	41000	17955	109149	68000	6944
9. fc' 35 Mpa 20 % Limbah	C2	0.10142	0.51	41000	18519	109149	61000	13888

### 3.4. Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Bahan dan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Universitas Diponegoro Semarang.

### 3.5. Metode Pengujian Bahan

Sebelum dilakukan pembuatan benda uji beton, dilakukan pengujian terhadap mutu agregat kasar dan halus serta sifat fisik limbah debu. Untuk sifat-sifat PC tidak dilakukan pengujian karena digunakan PC yang memenuhi standar SNI. Adapun jenis dan standar pengujian yang digunakan meliputi :

- Pengujian agregat halus meliputi : berat jenis dan penyerapan air sesuai standar pengujian **ASTM C – 128 - 93**, berat isi asli (**ASTM C – 29/C 29 M – 91a** ), analisa ayak (**ASTM C – 136 – 96a**), Kadar air (**ASTM C – 566 – 97**), Kadar lumpur (**ASTM C 117 – 95**).
- Pengujian agregat kasar meliputi : berat jenis dan penyerapan air sesuai standar pengujian **ASTM C – 127 – 88 (1993)**, berat isi asli (**ASTM C – 29/C 29 M – 91a** ), analisa ayak (**ASTM C – 136 – 96a**), Kadar air (**ASTM C – 566 – 97**), Kadar lumpur (**ASTM C 117 – 95**).
- Pengujian limbah debu meliputi : berat jenis dan penyerapan air, berat isi dan analisa ayak.

Pengujian terhadap perilaku beton keras meliputi :

#### a. Pengujian Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan dilakukan dengan pembebanan uniaksial dengan kecepatan pembebanan 2 – 4 kg/cm<sup>2</sup> per detik pada umur 28 hari (Gambar 3.1). Kuat tekan beton dihitung dengan rumus:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \text{N/mm}^2 \text{ atau kgf/cm}^2$$

Dimana :

$\sigma$  = Kuat tekan beton (N/mm<sup>2</sup>)

P = beban maksimum dalam Newton

A = luas bidang tekan benda uji, mm<sup>2</sup>

Mesin Uji Tekan Beton

Benda Uji



### Gambar 3.1. Set up Pengujian Kuat Tekan Beton

#### b. Pengujian Modulus Elastisitas dan poisson ratio

Pengujian dilakukan dengan menggunakan alat *dial gauge* untuk mengukur modulus elastisitas beton dan *LVDT* untuk mengukur nilai poisson ratio yang dipasang pada silinder beton. Prosedur pengujian dilakukan dengan cara melakukan penekanan benda uji pada mesin uji tekan dengan kecepatan 1,25 mm/menit (Gambar 3.2). Pada saat regangan longitudinal mencapai 5 % (bacaan pada *dial gauge* menunjukkan 1 div) beban P1 dicatat untuk menghitung tegangan S1 dan regangan transversal (dial *LVDT* pada *data logger*,  $\epsilon_{t1}$ ) juga dicatat. Pembebanan dilanjutkan sampai mencapai beban P2 (40 % P mak), regangan longitudinal pada *dial gauge* ( $\epsilon_2$ ) dan regangan transversal pada LVDT ( $\epsilon_{t2}$ ) dicatat.

Modulus elastisitas beton dihitung dengan rumus :  $E = \frac{(S_2 - S_1)}{(\epsilon_2 - 0,000050)}$ , dimana :

E = Modulus elastisitas beton (N/mm<sup>2</sup>)

S<sub>2</sub> = Tegangan yang terjadi saat beban 40 % P maksimum,  $S_2 = \frac{P_2}{A}$

P<sub>2</sub> = Beban pada saat 40 % Pmak

S<sub>1</sub> = Tegangan yang terjadi saat regangan longitudinal mencapai 0,000050,  $S_1 = \frac{P_1}{A}$

P<sub>1</sub> = Beban pada saat regangan mencapai 0,00005.

$\epsilon_2$  = Regangan longitudinal pada saat beban mencapai 40 % Pmak (P<sub>2</sub>).

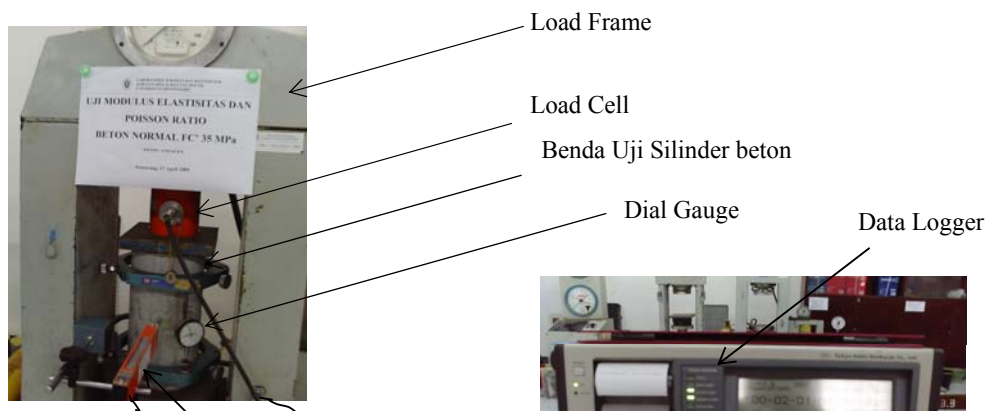
Poisson ratio dihitung dengan rumus :  $\mu = \frac{(\epsilon_{t2} - \epsilon_{t1})}{(\epsilon_2 - 0,000050)}$ , dimana :

$\mu$  = Poisson ratio

$\epsilon_{t1}$  = Regangan transversal akibat S<sub>1</sub>

$\epsilon_{t2}$  = Regangan transversal akibat S<sub>2</sub>

$\epsilon_2$  = Regangan longitudinal pada saat beban mencapai 40 % Pmak (P<sub>2</sub>).



**Gambar 3.2. Set up Pengujian Modulus Elastisitas**

**c. Hubungan Tegangan - Regangan**

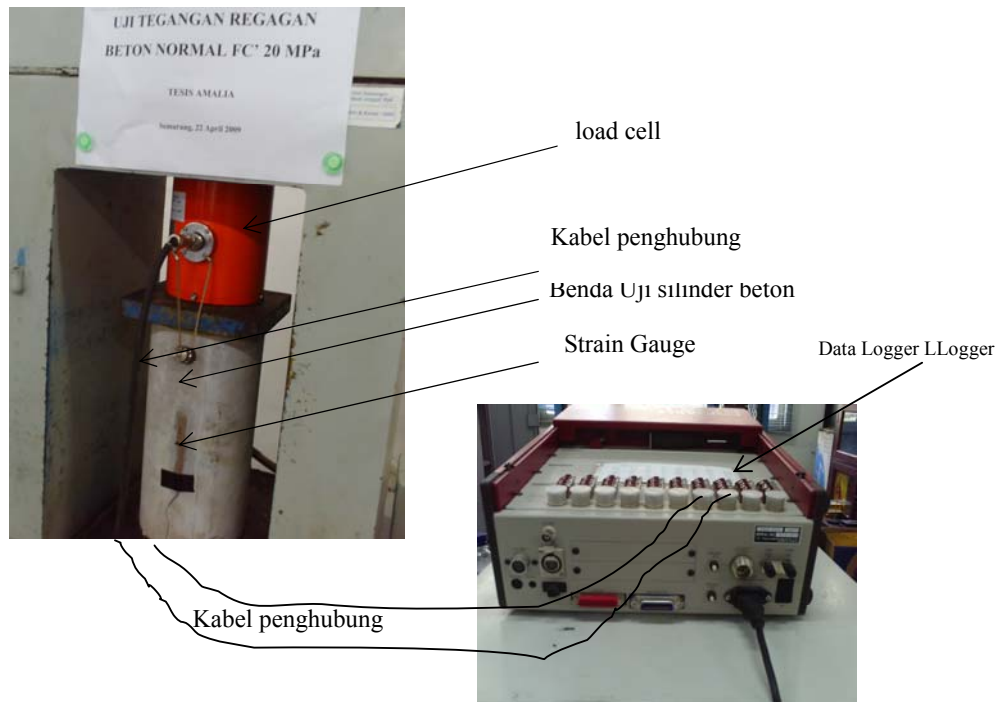
Pengujian dilakukan dengan memasang *strain gauge* pada benda uji kemudian diberi beban monotonic (Gambar 3.3). Pembebanan dilakukan secara bertahap sampai benda uji hancur. Setiap kenaikan beban dicatat regangannya pada data logger kemudian dibuat grafik hubungan tegangan-regangan beton. Tegangan dihitung dengan rumus :

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \text{N/mm}^2 \text{ atau kgf/cm}^2, \text{ dimana :}$$

$\sigma$  = Kuat tekan beton (N/mm<sup>2</sup>),

P = beban , Newton,

A = luas bidang tekan benda uji, mm<sup>2</sup>



### Gambar 3.3. Setup Pengujian Hubungan Tegangan-Regangan

#### d. Pengujian Kuat Lentur

Benda uji berupa balok ukuran 15 x 15 x 60 cm diberi beban terpusat 2 titik masing-masing dengan jarak 1/3 L, seperti gambar 3.4. Kuat lentur dihitung dengan rumus :

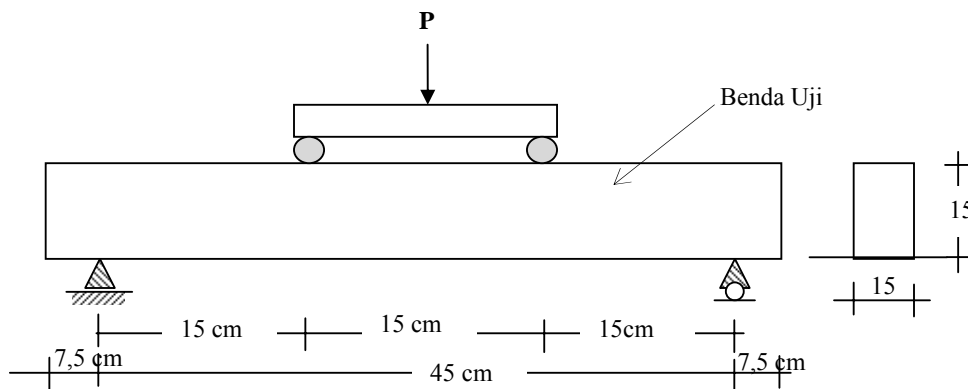
$$\text{Kuat lentur beton} = \sigma_{lt} = \frac{PL}{bh^2}, \text{ dimana :}$$

P = beban lentur maksimum (Kg)

L = Jarak tumpu (cm)

b = lebar benda uji (cm)

h = tinggi benda uji (cm)



Perekam Beban

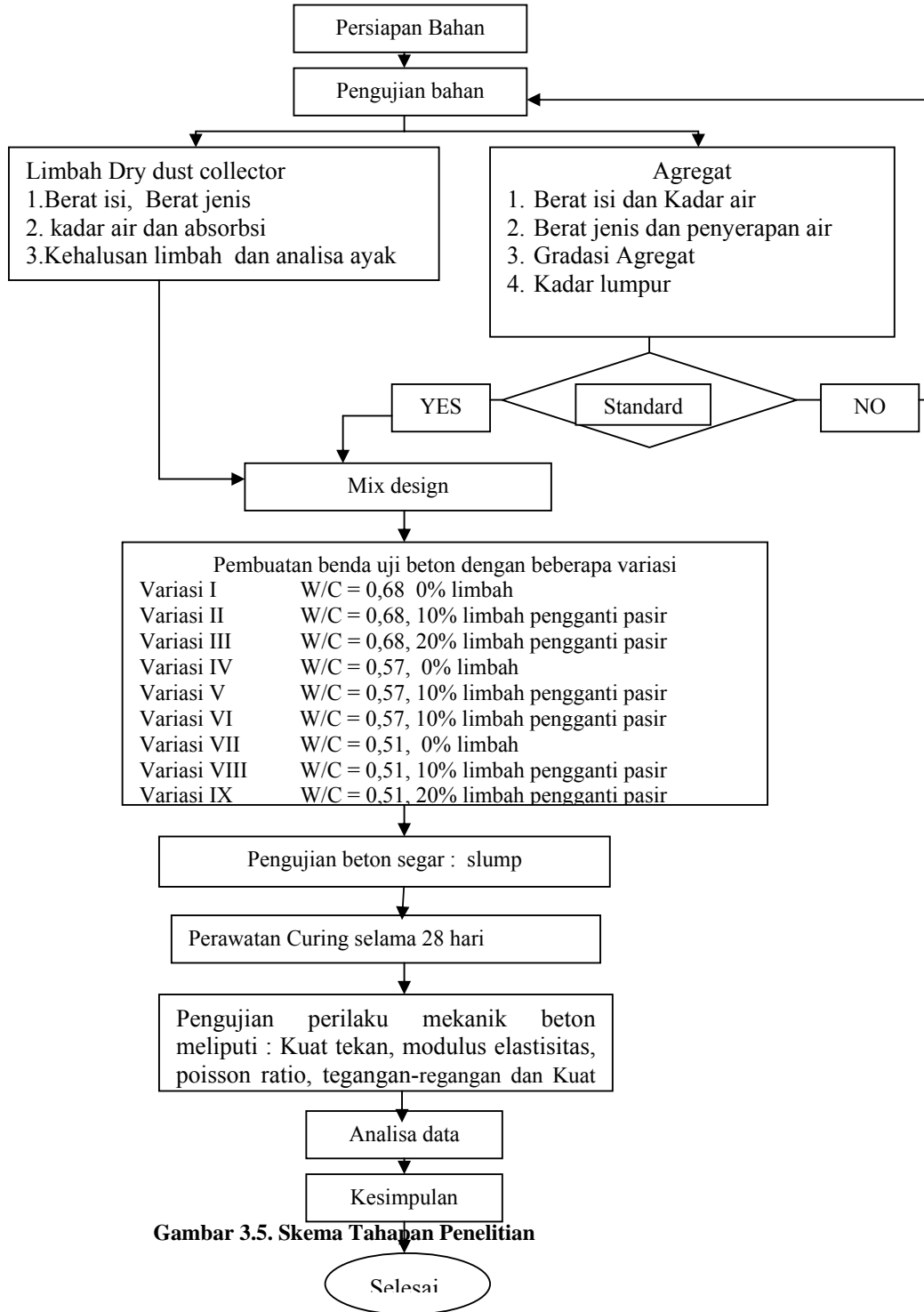
Beban P

Benda Uji

Mesin UTM

**Gambar 3.4. Setup Pengujian Kuat lentur**

**3.6. Skema Tahapan Penelitian**



**Gambar 3.5. Skema Tahapan Penelitian**

**BAB IV**  
**HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN**

**4.1. Workability Beton Segar**

Tingkat kemudahan beton untuk dikerjakan (*workability*) ditunjukkan dengan nilai slump. Hasil penelitian nilai slump beton disajikan pada Tabel 4.1 sebagai berikut :

**Tabel 4.1. Nilai Slump Beton dengan Substitusi Limbah *Dry Dust Collector***

<b>Perlakuan</b>	<b>Faktor air semen (fas)</b>	<b>Kadar Limbah</b>	<b>Nilai Slump (mm)</b>
A0	0,68	0%	80
A1	0,68	10%	70
A2	0,68	20%	70
B0	0,57	0%	50
B1	0,57	10%	50
B2	0,57	20%	50
C0	0,51	0%	45
C1	0,51	10%	45
C2	0,51	20%	40

Salah satu parameter untuk mengukur *workability* beton adalah nilai slump. Variasi nilai slump disajikan pada Tabel 4.1. Penambahan limbah *dry dust collector* sebesar 10 % dan 20 % pada beton dengan fas 0,68 ternyata menurunkan nilai slump dari 80 mm menjadi 70 mm, tetapi pada beton dengan fas 0,57 tidak mempengaruhi nilai slump beton. Untuk beton dengan fas 0,51 kadar limbah 10 % menghasilkan nilai slump yang sama dengan beton tanpa limbah tetapi pada kadar limbah 20 % nilai slump turun menjadi 40 mm.

Penurunan nilai slump beton disebabkan karena bentuk kristal limbah yang cenderung pipih dan tidak conical seperti fly ash sehingga tidak memberikan efek pelumasan pada agregat. Namun demikian penurunan nilai slump sebesar 5 – 10 mm pada beton dengan substitusi limbah dan fas lebih besar dari 0,51 secara umum tidak mempengaruhi *workability* beton. Penambahan limbah sebesar 20 % pada beton dengan fas 0,51 sangat mempengaruhi *workability* beton dimana pada saat pencetakan benda uji, beton cepat mengental sehingga sulit untuk dituang dan dipadatkan. Rendahnya *workability* beton menyebabkan beton keropos sehingga akan sangat berpengaruh terhadap perilaku mekaniknya.

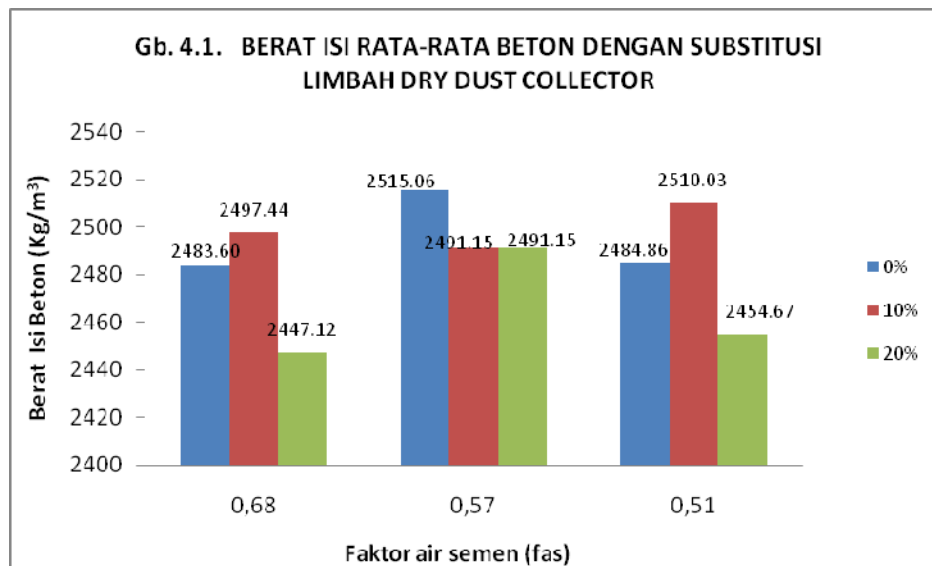
#### 4.2. Berat Isi Beton

Hasil penelitian berat isi beton kaku disajikan pada Tabel 4.2 sebagai berikut :

**Tabel 4.2. Berat Isi Rata-Rata Beton dengan Substitusi Dry Dust Collector**

KODE BENDA UJI	fas	KADAR LIMBAH	BERAT ISI RATA-RATA BETON (Kg/m <sup>3</sup> )
A0	0,68	0%	2483.60
A1		10%	2497.44
A2		20%	2447.12
B0	0,57	0%	2515.06
B1		10%	2491.15
B2		20%	2491.15
C0	0,51	0%	2484.86
C1		10%	2510.03
C2		20%	2454.67

Untuk memperjelas pengaruh penambahan limbah terhadap berat isi beton dibuat diagram seperti pada Gambar 4.1 sebagai berikut :



Dari Gambar 4.1. terlihat penambahan limbah sebesar 10 % pada beton dengan fas 0,68 dan 0,51 menyebabkan peningkatan berat isi beton sebesar 13,84 kg/m<sup>3</sup> dan 25,16 kg/m<sup>3</sup>, sedangkan pada beton dengan fas 0,57 penambahan limbah 10 % justru menurunkan berat isi beton sebesar 23,91 kg/m<sup>3</sup>. Berat isi pada beton dengan fas 0,68 dan 0,51 kadar limbah 20 % nilainya lebih rendah dibandingkan beton tanpa limbah, tetapi pada beton dengan fas 0,57 penambahan limbah 20 % mempunyai berat isi sama dengan beton dengan kadar limbah 10 %.

Berat isi beton berhubungan erat dengan kepadatan beton yang sangat tergantung pada pembuatan dan pemadatan benda uji. Peningkatan nilai berat isi pada beton dengan kadar limbah 10 % disebabkan karena butiran halus limbah mengisi secara optimum rongga diantara agregat halus dan semen sehingga beton menjadi lebih padat. Selain itu berat jenis limbah yang cukup tinggi (3,03) juga membuat beton lebih berat. Penurunan berat isi pada beton dengan kadar limbah 20 % disebabkan karena proporsi butiran halus pada beton cukup besar justru membuat beton segar cepat mengental sehingga proses pencetakan dan pemadatan benda uji terganggu. Dilihat dari berat isinya beton tanpa limbah maupun dengan penambahan limbah masih termasuk dalam batasan berat isi beton normal yaitu sebesar 2400 – 2500 kg/m<sup>3</sup>.

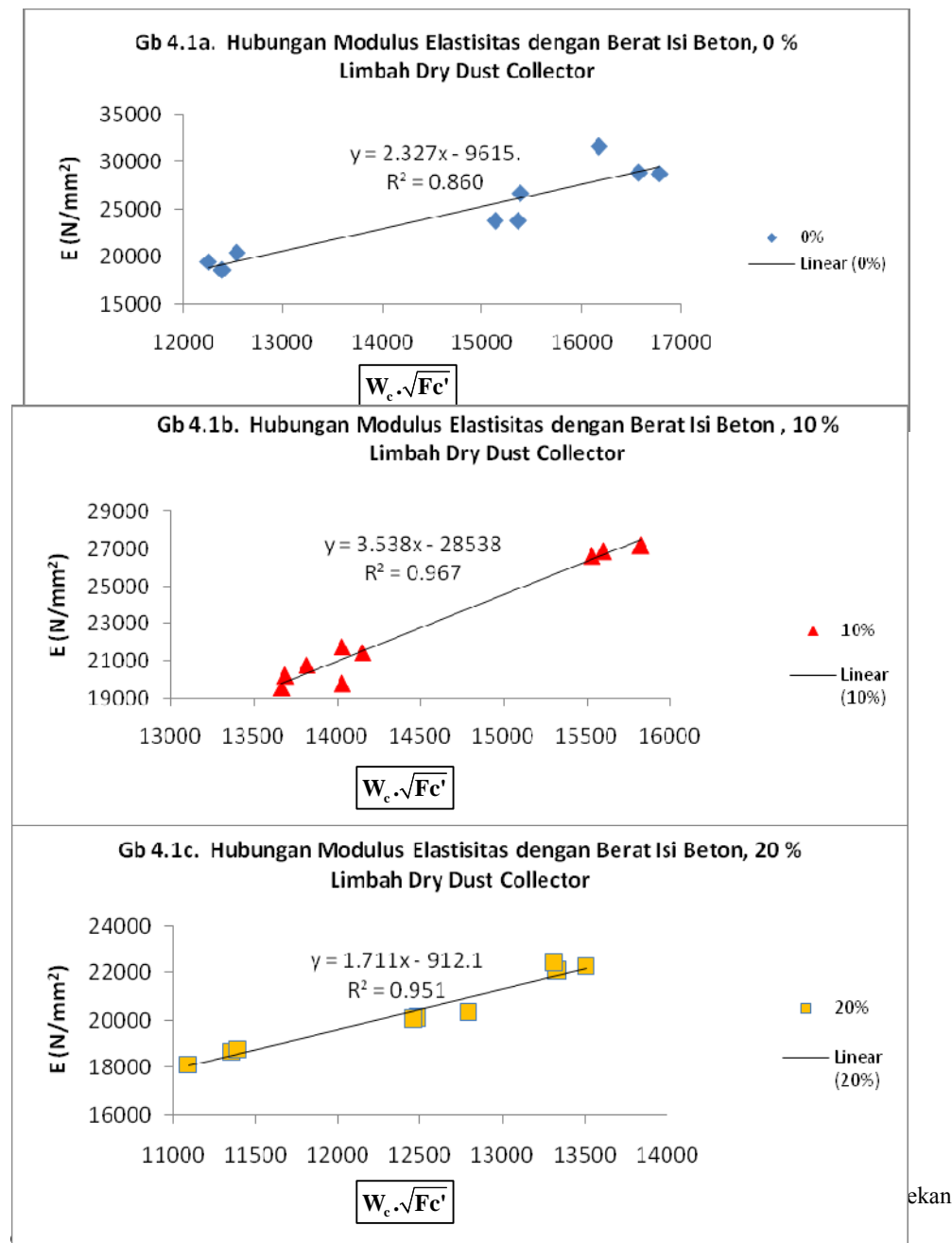
Hubungan antara berat isi dengan modulus elastisitas beton menurut SNI 03-2847-2002 pasal 10.5 untuk berat isi beton 1500 kg/m<sup>3</sup> – 2500 kg/m<sup>3</sup> adalah  $E_c = (W_c)^{1,5} \cdot 0,043 \cdot \sqrt{f'c}$ . Perbandingan antara modulus elastisitas hasil eksperimen dengan formulasi SNI disajikan pada Tabel 4.3. sebagai berikut :

**Tabel 4.3 Hubungan Antara Modulus Elastisitas (E) Rata-Rata dengan Berat Isi Beton Limbah Dry Dust Collector**

KODE BENDA UJI	BERAT ISI BETON (Kg/m <sup>3</sup> )	MODULUS ELASTISITAS RATA-RATA BETON (MPa)	MODULUS ELASTISITAS BETON MENURUT SNI 03-2847-2002 Ps 10.5 (MPa) $E = (W_c)^{1,5} \cdot \sqrt{f'c}$	$\frac{E_{Exp}}{E_{SNI}}$
A0	2483.60	19492.63	26562.79	0.73
A1	2497.44	20211.56	29490.51	0.69
A2	2447.12	20183.46	26755.84	0.75
B0	2515.06	24768.44	32985.44	0.75
B1	2491.15	21015.76	30194.10	0.70
B2	2491.15	22269.40	28726.87	0.78
C0	2484.86	29764.69	35398.80	0.84
C1	2510.03	26889.66	33715.37	0.80
C2	2454.67	18554.67	24040.25	0.77

Dari tabel di atas terlihat hubungan antara berat isi dan modulus elastisitas formulasi SNI nilainya lebih tinggi dibandingkan hasil eksperimen. Dari data hasil penelitian ini dibuat

grafik hubungan antara modulus elastisitas dengan berat isi dan akar kuat tekan beton seperti ditunjukkan pada Gambar 4.1a sampai 4.1c. sebagai berikut :



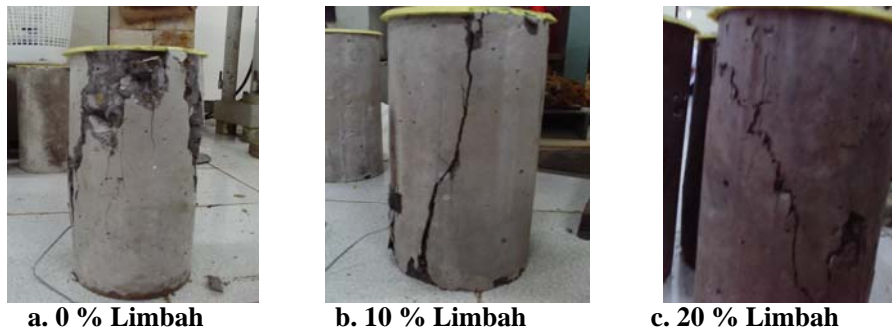
Beton tanpa limbah :  $E_c = 2,327.W_c \cdot \sqrt{f_c'} - 9615$ , dimana  $F_c' \geq 24,35$  MPa dengan tingkat ketelitian 86 % ( $R^2 = 0,86$ ).

Beton dengan 10 % Limbah :  $E_c = 3,538.W_c.\sqrt{f_c} - 28538$ , dimana  $F_c' \geq 24,35$  MPa dengan tingkat ketelitian 96,7 % ( $R^2 = 0,967$ ).

Beton dengan 20 % Limbah :  $E_c = 1,711.W_c.\sqrt{f_c} - 912,1$ , dimana  $F_c' \geq 20,38$  MPa dengan tingkat ketelitian 95,1 % ( $R^2 = 0,951$ ).

#### 4.3. Kuat Tekan Beton

Pola keruntuhan beton pada pengujian tekan untuk beton dengan fas 0,51 0 % Limbah, 10 % dan 20 % limbah disajikan pada Gambar 4.2a sampai 4.2c. sebagai berikut :



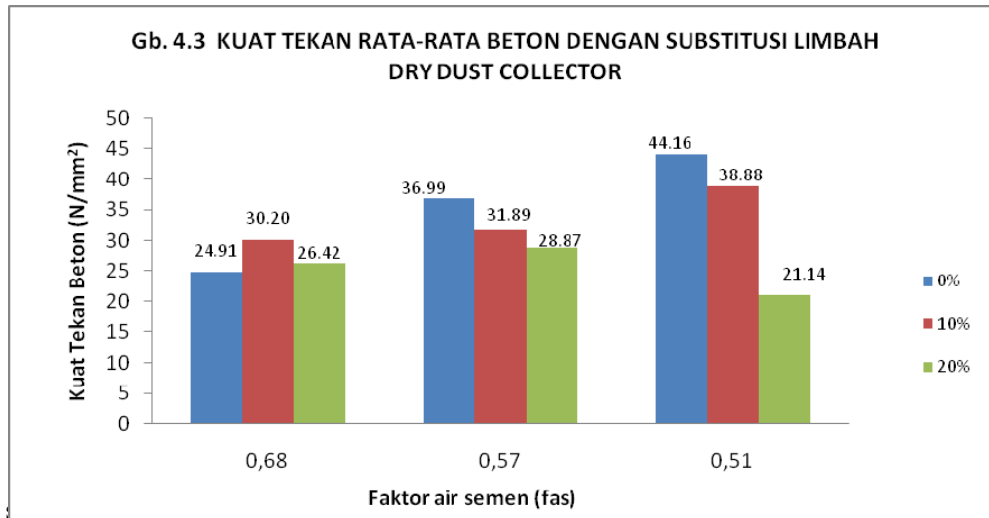
**Gambar 4.2. Pola Retak Beton dengan fas 0,51**

Hasil penelitian kuat tekan beton rata-rata disajikan pada Tabel 4.4 sebagai berikut :

**Tabel 4.4 Kuat Tekan Rata-Rata Beton dengan Substitusi Dry Dust Collector**

KODE BENDA UJI	fas	KADAR LIMBAH	KUAT TEKAN RATA-RATA BETON (MPa)
A0	0,68	0%	24.91
A1		10%	30.20
A2		20%	26.42
B0	0,57	0%	36.99
B1		10%	31.89
B2		20%	28.87
C0	0,51	0%	44.16

C1	10%	38.88
C2	20%	21.14



pola retak beton berubah drastis. Semakin banyak jumlah limbah yang ditambahkan pola keruntuhan beton semakin daktail dibandingkan dengan beton tanpa limbah dimana pola keruntuhan beton bersifat getas yang ditandai dengan pecahnya benda uji (Gb. 4.2a). Beton dengan limbah 10 % untuk fas 0,68, 0,57 dan 0,51 menunjukkan pola retak yang hampir sama yaitu keruntuhan beton ditandai dengan retak utama (Gb 4.2b) disertai retak kecil di beberapa bagian benda uji. Pola retak beton dengan limbah 20 % bersifat lebih daktail, dimana keruntuhan beton ditandai dengan retak-retak kecil yang menyebar pada seluruh bagian benda uji.

Kuat tekan beton tanpa limbah dengan fas 0,68 sebesar 24,91 Mpa. Dari Gambar 4.3 terlihat nilai kuat tekan beton meningkat menjadi 30,20 Mpa pada penambahan limbah sebesar 10 % atau meningkat sebesar 21,21 % dibandingkan beton tanpa limbah, tetapi pada kadar limbah 20 % kuat tekan beton turun menjadi 26,42 MPa. Namun demikian nilai kuat tekan ini lebih tinggi sebesar 6,06 % dibandingkan beton tanpa limbah. Kondisi ini terjadi karena karena butiran halus limbah mengisi secara optimum rongga diantara agregat halus dan semen sehingga beton menjadi lebih padat dan kuat tekannya naik.

Hasil penelitian ini sejalan dengan hasil penelitian B. Mobasher M. ASCE, R. Devaguptapu, A.M. Arino (1996) yang menyatakan bahwa kuat tekan tertinggi dihasilkan oleh beton dengan kadar debu *copper slag* optimum sebesar 10 % dari berat PC dengan activator kapur sebesar 1 %. Hal yang sama juga dihasilkan oleh penelitian Suryadi, Akhmad (2007) yang menggunakan debu pasir besi dengan kadar  $Fe_2O_3$  sebesar 54,3 %,  $SiO_2$  sebesar 29,95 % dan MgO

sebesar 5,12 % sebagai filler pada beton. Hasil penelitian menunjukkan bahwa beton dengan substitusi 10 % debu pasir besi pada umur 28 hari kuat tekannya meningkat sebesar 9,34 %. Penelitian pada mortar yang menggunakan limbah *dry dust collector* sebagai bahan pengisi juga menghasilkan kadar optimum limbah sebesar 10 %, dimana mortar dengan substitusi limbah 10 % menghasilkan kuat tekan mortar sebesar 178,67 kg/cm<sup>2</sup> lebih tinggi dibandingkan kuat tekan mortar tanpa limbah yaitu sebesar 160,67 kg/cm<sup>2</sup> (Amalia dan Handi, 2007).

Dari Gambar 4.3 juga terlihat semakin kecil nilai fas, kuat tekan beton tanpa limbah semakin tinggi nilai kuat tekannya. Penambahan limbah pada beton dengan fas yang semakin kecil ternyata justru menurunkan kuat tekan beton. Pada beton dengan fas 0,57 kadar limbah 10 % kuat tekan beton turun dari 36,99 Mpa menjadi 31,89 Mpa (turun sebesar 15,98 %), sedangkan pada beton dengan fas 0,51 kuat tekan beton juga turun sebesar 16,57 % dari 44,16 Mpa menjadi 38,88 Mpa.

Semakin kecil nilai fas dan semakin besar jumlah limbah yang ditambahkan, kuat tekan beton semakin turun. Penurunan kuat tekan terbesar terjadi pada beton dengan fas 0,51 dengan kadar limbah 20 % yaitu sebesar 72,19 % dari 44,16 Mpa menjadi 21,14 Mpa. Hal ini terjadi karena rendahnya workability beton dimana pada saat pencetakan benda uji, beton cepat mengental sehingga sulit untuk dituang dan dipadatkan. Rendahnya workability ini menyebabkan beton keropos sehingga kuat tekan beton menjadi sangat rendah. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian H-Moosberg dan Bustnes (2004) yang menyatakan bahwa penggunaan *steel slag* sebagai filler sebesar 20 % dan 40 % factor air semen 0,48 menghasilkan beton dengan kuat tekan 44,7 MPa dan 34,1 MPa lebih rendah dibandingkan beton tanpa limbah yang mencapai kuat tekan 52,9 MPa.

Penurunan kuat tekan pada beton limbah dengan fas yang kecil kemungkinan juga disebabkan karena pengaruh kadar Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pada limbah yang cukup tinggi, sedangkan kadar semennya juga tinggi. Nilai Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pada limbah akan menyebabkan senyawa C<sub>4</sub>AF (Tetrakalsium alumino forit 4CaOAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) menjadi tinggi. Senyawa ini tidak membahayakan bagi semen, tetapi bila jumlahnya terlalu banyak akan memperlambat pengerasan semen. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian HU Shuguang HE Yongjia LU Linnu DING Qingjun (2006) yang menyatakan bahwa penggunaan *fine steel slag powder* sebagai bahan tambah beton akan memperlambat proses hidrasi sehingga pada umur muda kuat tekan beton lebih rendah dan terus mengalami peningkatan setelah beton berumur 90 hari. Hasil Penelitian B. Mobasher M. ASCE, R. Devaguptapu, A.M. Arino (1996) juga menyebutkan bahwa kuat tekan beton pada umur 1 dan 7 hari lebih rendah dibandingkan beton tanpa copper slag, tetapi setelah umur 28 dan 90 hari kuat tekan beton copper slag meningkat lebih tinggi dibanding beton normal yaitu sebesar 30 Mpa pada umur 28 hari dan 61 Mpa pada umur 90 hari.

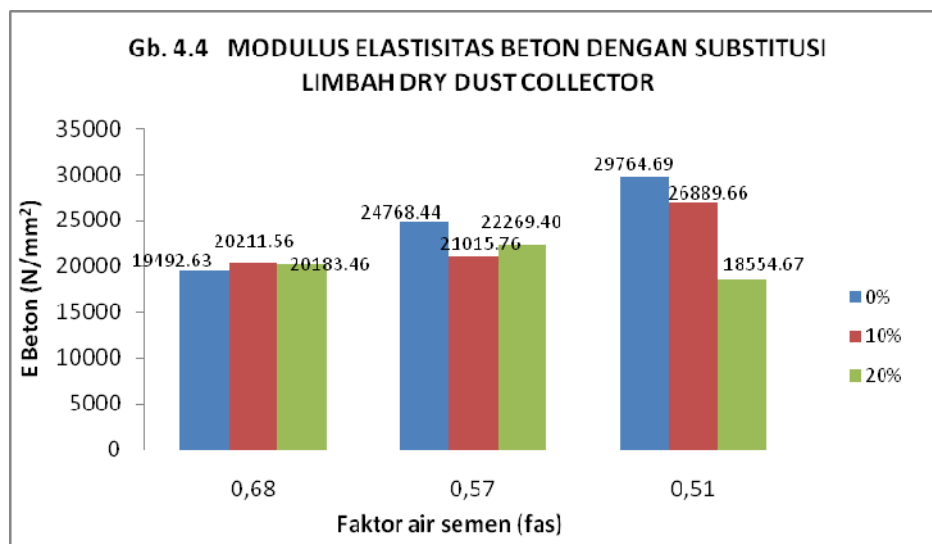
#### **4. 4. Modulus Elastisitas Beton**

Pengujian modulus elastisitas beton dilakukan dengan cara memberikan beban secara bertahap sampai mencapai beban 40 % beban puncak. Pemendekan benda uji ( $\Delta L$ ) untuk menghitung regangan longitudinal diperoleh dari hasil pembacaan pada *dial gauge* yang dipasang pada benda uji. Nilai modulus elastisitas beton hasil pengujian dibandingkan dengan modulus elastisitas yang dipersyaratkan SNI 03-2846 (2002) pasal 10.5 yaitu sebesar  $E_c = 4700\sqrt{f'c}$ .

Hasil penelitian modulus elastisitas beton disajikan pada Tabel 4.5 sebagai berikut :

**Tabel 4.5 Modulus Elastisitas (E) Rata-Rata Beton dengan Substitusi Limbah Dry Dust Collector**

KODE BENDA UJI	MODULUS ELASTISITAS RATA-RATA BETON (MPa)	MODULUS ELASTISITAS BETON (MPa) MENURUT SNI 03-2847-2002 Ps 10.5 $E = 4700\sqrt{f'c}$	$\frac{E_{Exp}}{E_{SNI}}$
A0	19492.63	23458.38	0.83
A1	20211.56	25826.83	0.78
A2	20183.46	24158.79	0.84
B0	24768.44	28585.06	0.87
B1	21015.76	26543.27	0.79
B2	22269.40	25255.55	0.88
C0	29764.69	31233.39	0.95
C1	26889.66	29305.20	0.92
C2	18554.67	21608.28	0.86



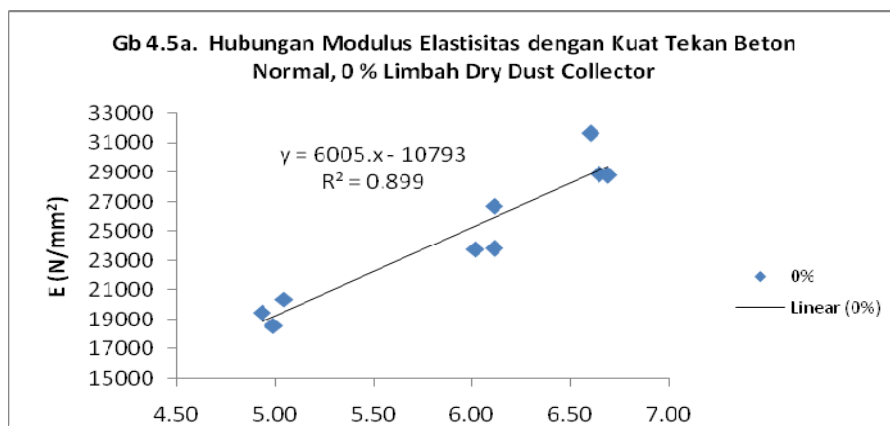
Pengaruh jumlah limbah dan faktor air semen disajikan pada Gambar 4.4. Nilai modulus elastisitas beton tanpa limbah semakin tinggi seiring dengan kenaikan kuat tekan beton. Semakin kecil nilai fas beton maka modulus elastisitas beton semakin tinggi. Pada beton dengan fas 0,68 modulus elastisitas tertinggi dihasilkan oleh beton dengan penambahan limbah sebesar 10 % yaitu 20211,56 Mpa. Modulus elastisitas beton naik sebesar 3,69 % dibandingkan beton tanpa limbah, sedangkan pada kadar limbah 20 % modulus elastisitas beton turun menjadi 20183,46 Mpa (turun 0,14 %). Nilai ini masih lebih tinggi dibandingkan beton tanpa limbah yaitu sebesar 19492,63 Mpa.

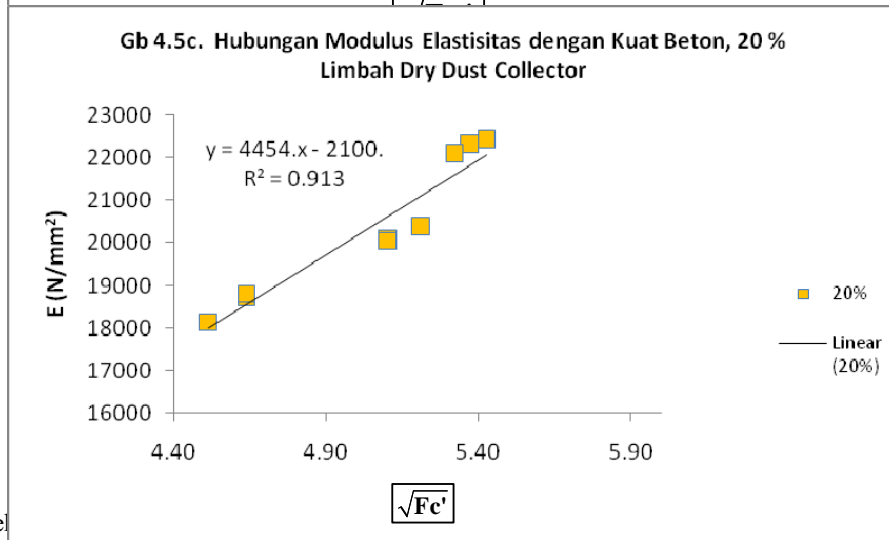
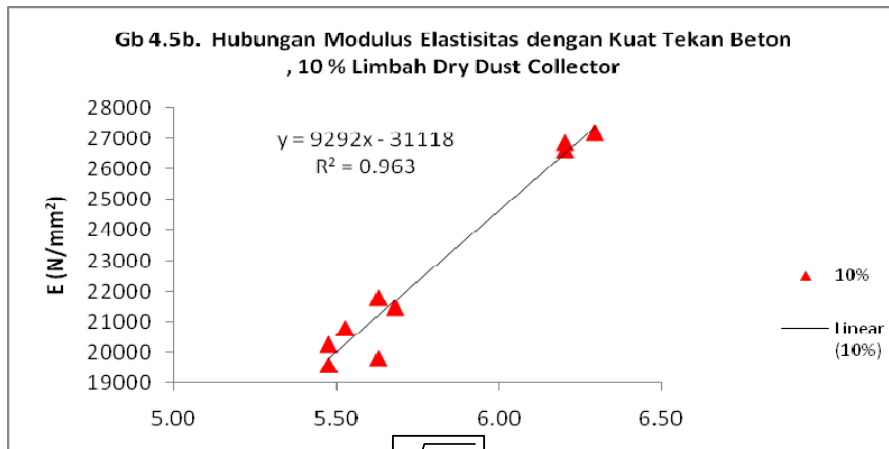
Modulus elastisitas beton berkaitan erat dengan kepadatan dan kuat tekan beton. Beton dengan fas 0,68 yang mengandung limbah mempunyai kuat tekan lebih tinggi dibandingkan dengan beton tanpa limbah sehingga dengan energi yang sama dihasilkan pemendekan dan regangan longitudinal yang lebih kecil dibandingkan dengan beton tanpa limbah. Regangan longitudinal yang kecil ini akan membuat nilai modulus elastisitas beton menjadi lebih tinggi.

Pada beton dengan fas 0,57 penambahan limbah 10 % justru menurunkan modulus elastisitas beton dari 24768,44 Mpa menjadi 21015,76 Mpa (turun sebesar 17,86 %). Penurunan nilai modulus elastisitas juga terjadi pada penambahan limbah sebesar 20 % menjadi 22269,40 Mpa, turun sebesar 11,22 % dibandingkan modulus elastisitas beton tanpa limbah. Nilai modulus elastisitas paling kecil dihasilkan oleh beton dengan fas 0,51 kadar limbah 20 % yaitu sebesar 18554,67 Mpa.

Penurunan nilai modulus elastisitas beton limbah dengan fas 0,57 dan 0,51 disebabkan karena penambahan limbah pada kedua nilai fas justru menurunkan kuat tekan beton. Beton dengan kuat tekan rendah akan menghasilkan pemendekan dan regangan longitudinal yang besar sehingga modulus elastisitas beton juga rendah.

Nilai modulus elastisitas beton untuk semua perlakuan pada penelitian ini lebih kecil bila dibandingkan dengan modulus elastisitas menurut formulasi yang ditetapkan SNI-03-2847 (2002) pasal 10.5 yaitu sebesar  $E_c = 4700\sqrt{f'c}$ . Dari data hasil penelitian ini dibuat grafik hubungan antara modulus elastisitas dengan kuat tekan beton seperti ditunjukkan pada Gambar 4.5a sampai 4.5c.





kuat te

kar

Beton tanpa limbah :  $E_c = 6005.\sqrt{f_c'} - 10793$ , dimana  $F_c' \geq 24,35$  MPa dengan tingkat ketelitian 89,9 % ( $R^2 = 0,889$ ).

Beton dengan 10 % Limbah :  $E_c = 9292.\sqrt{f_c'} - 31118$ , dimana  $F_c' \geq 24,35$  MPa dengan tingkat ketelitian 96,3 % ( $R^2 = 0,963$ ).

Beton dengan 20 % Limbah :  $E_c = 4454.\sqrt{f_c'} - 2100$ , dimana  $F_c' \geq 20,38$  MPa dengan tingkat ketelitian 91,3 % ( $R^2 = 0,913$ ).

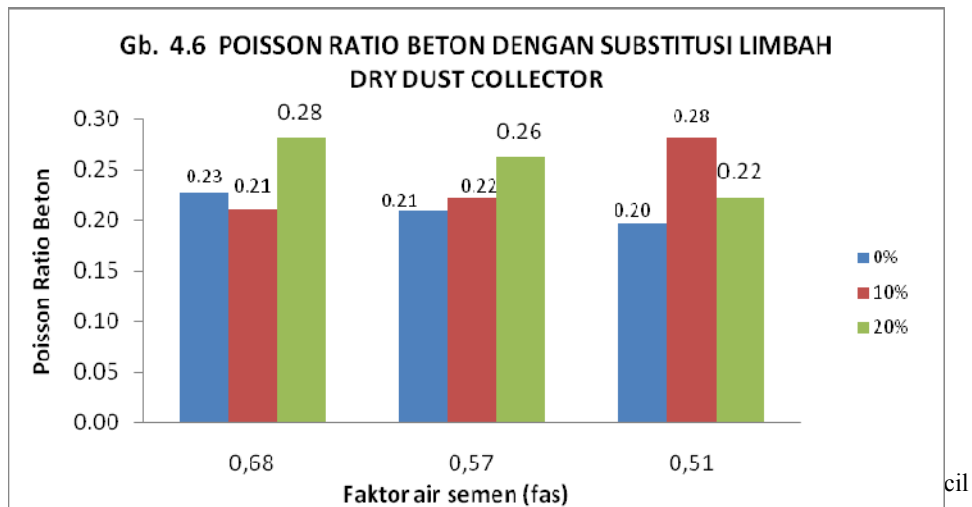
#### 4.5. Poisson's Ratio Beton

Poisson's ratio beton merupakan perbandingan antara regangan transversal dengan regangan longitudinal searah dengan pembebanan uniaksial. Pada penelitian ini regangan transversal diperoleh dari perbandingan pembesaran benda uji dari hasil bacaan LVDT yang direkam pada *data logger* dengan diameter awal silinder beton. Hasil penelitian poisson's ratio beton disajikan pada Tabel 4.6 sebagai berikut :

**Tabel 4.6 Poisson Ratio Rata-Rata Beton dengan Substitusi Dry Dust Collector**

KODE BENDA UJI	fas	KADAR LIMBAH	POISSON RATIO RATA-RATA BETON
A0	0,68	0%	0.23
A1		10%	0.21
A2		20%	0.28
B0	0,57	0%	0.21
B1		10%	0.22
B2		20%	0.26
C0	0,51	0%	0.20
C1		10%	0.28
C2		20%	0.22

Untuk mengetahui pengaruh penambahan limbah terhadap nilai poisson's ratio disajikan pada Gambar 4.6.



dihasilkan oleh beton dengan kadar limbah 10 % yaitu 0,21, sedangkan untuk beton dengan fas 0,57 dan 0,51 nilai terkecil dihasilkan oleh beton tanpa limbah yaitu sebesar 0,21 dan 0,20. Nilai

poisson's ratio berkaitan erat dengan kuat tekan beton. Semakin tinggi kuat tekan beton maka nilai poisson's ratio semakin kecil. Pada tegangan tekan yang tinggi, regangan transversal meningkat dengan cepat yang disebabkan oleh retak internal yang paralel dengan arah beban sehingga pembesaran benda uji menjadi kecil, regangan transversal juga kecil.

Penambahan jumlah limbah pada beton dengan fas 0,57 dan 0,51 akan meningkatkan nilai poisson's ratio beton. Namun demikian penambahan limbah pada beton terutama beton dengan fas 0,51 menghasilkan nilai poisson's ratio yang tidak konsisten. Nilai poisson's ratio beton normal biasanya 0,15 – 0,20, tetapi beberapa penelitian kadang-kadang menghasilkan nilai 0,10 – 0,30. Pada penelitian ini menghasilkan nilai poisson's ratio 0,20 – 0,28.

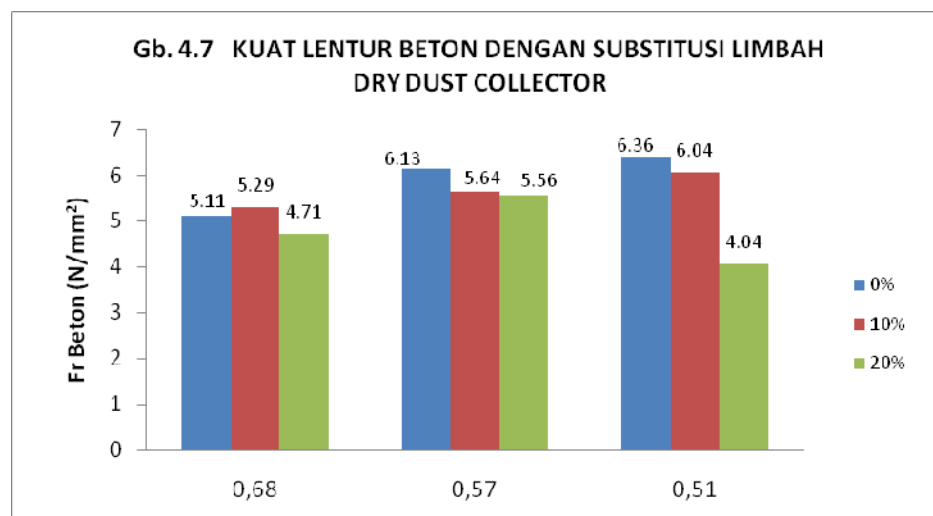
#### 4.6. Kuat Lentur Beton

Kuat lentur beton merupakan kemampuan beton di dalam menahan momen. Nilai kuat lentur beton hasil penelitian dibandingkan dengan kuat lentur yang dipersyaratkan SNI 03-2846 (2002) pasal 11.5 yaitu sebesar  $F_r = 0,7\sqrt{f'c}$ .

Hasil penelitian kuat lentur beton disajikan pada Tabel 4.7 sebagai berikut :

**Tabel 4.7 Kuat Lentur Rata-Rata Beton dengan Substitusi Dry Dust Collector**

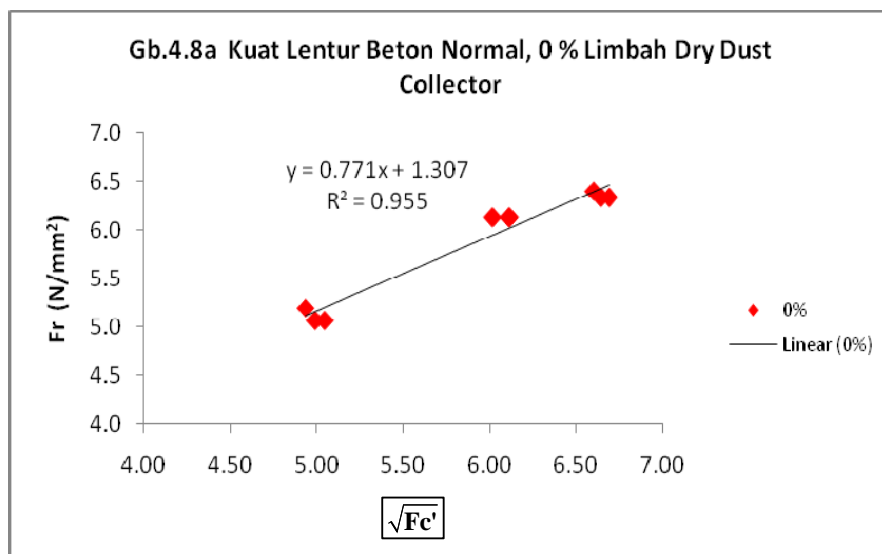
KODE BENDA UJI	KUAT LENTUR RATA-RATA BETON (N/mm <sup>2</sup> )	KUAT LENTUR BETON (MPa) MENURUT SNI 03-2847-2002 Ps 11.5 $F_r = 0,7\sqrt{f'c}$	$\frac{F_{r\_Exp}}{F_{r\_SNI}}$
A0	5.11	3.49	1.46
A1	5.29	3.85	1.37
A2	4.71	3.60	1.31
B0	6.13	4.26	1.44
B1	5.64	3.95	1.43
B2	5.56	3.76	1.48
C0	6.36	4.65	1.37
C1	6.04	4.36	1.38
C2	4.04	3.22	1.26

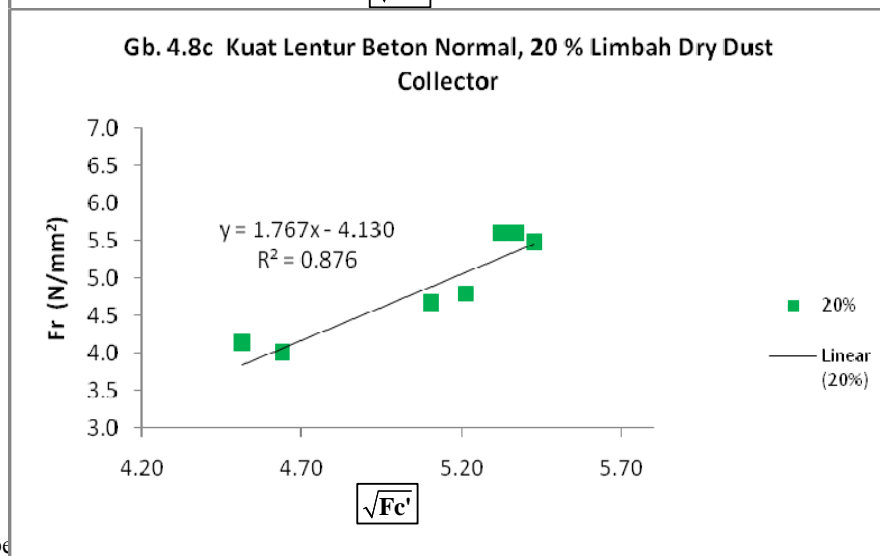
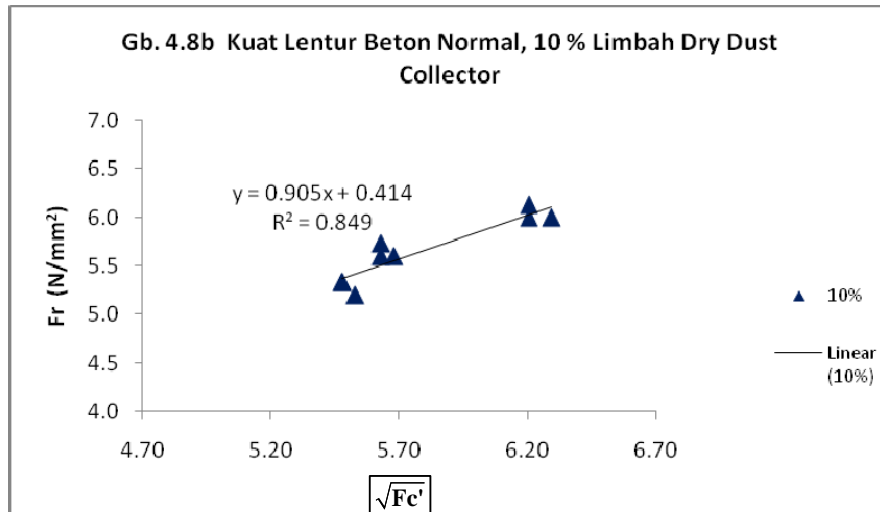


Dari pengujian kuat lentur dapat diketahui pola retak beton akibat momen dan lendutan yang terjadi. Untuk mengetahui pengaruh penambahan limbah terhadap kuat lentur beton disajikan pada Gambar 4.6. Kuat lentur beton dihitung berdasarkan beban maksimum yang bekerja pada balok sampai runtuh.

Dari Gambar 4.7 terlihat bahwa semakin kecil nilai fas kuat lentur beton semakin tinggi. Pada beton dengan fas 0,68 kadar limbah 10 % kuat lentur beton mengalami peningkatan dari 5,11 MPa menjadi 5,29 MPa naik sebesar 3,48 % dari beton tanpa limbah. Pada penambahan limbah 20 % kuat lentur beton turun sebesar 8,49 % menjadi 4,71 MPa dibandingkan beton tanpa limbah. Penambahan limbah sebesar 10 % dan 20 % pada beton dengan fas 0,57 dan 0,51 ternyata menyebabkan kuat lentur beton turun. Kuat lentur beton terkecil dihasilkan oleh beton dengan fas 0,51 kadar limbah 20 % yaitu sebesar 4,04 Mpa.

Peningkatan kuat lentur beton berhubungan erat dengan kuat tekan beton. Beton dengan kuat tekan tinggi cenderung mempunyai kuat lentur tinggi. Hal ini terbukti dari hasil penelitian ini ternyata kuat lentur beton tertinggi dicapai oleh beton dengan fas 0,68 kadar limbah 10 % dimana kuat tekan beton pada komposisi ini juga paling tinggi. Nilai kuat lentur beton hasil penelitian untuk semua komposisi lebih tinggi dibandingkan dengan kuat lentur menurut formulasi yang ditetapkan SNI-03-2847 (2002) pasal 11.5 yaitu sebesar  $F_r = 0,7\sqrt{f_c}$  (Tabel 4.6). Dari data hasil penelitian ini dibuat grafik hubungan antara kuat lentur dengan kuat tekan beton seperti ditunjukkan pada Gambar 4.8a sampai 4.8c.





be

kuat tekan

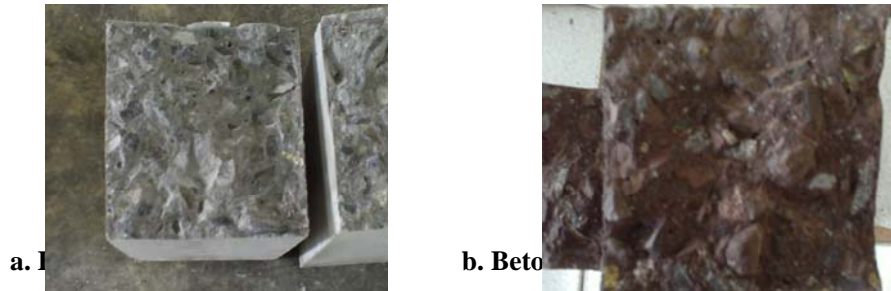
Beton tanpa limbah :  $F_r = 0,771 \cdot \sqrt{f_c'} + 1,307$ , dimana  $F_c' \geq 24,35$  MPa dengan tingkat ketelitian 95,5 % ( $R^2 = 0,955$ ).

Beton dengan 10 % Limbah :  $F_r = 0,905 \cdot \sqrt{f_c'} + 0,414$ , dimana  $F_c' \geq 24,35$  MPa dengan tingkat ketelitian 84,9 % ( $R^2 = 0,849$ ).

Beton dengan 20 % Limbah :  $F_r = 1,767 \cdot \sqrt{f_c'} - 4,130$ , dimana  $F_c' \geq 20,38$  MPa dengan tingkat ketelitian 87,6 % ( $R^2 = 0,876$ ).

Permukaan yang fraktur pada pengujian lentur pada beton tanpa limbah dan dengan penambahan limbah ditunjukkan oleh Gambar 4.9. Dari Gambar tersebut terlihat bahwa beton

dengan fas 0,51 mengalami kegagalan pada agregat dimana pada saat beban maksimum agregatnya pecah (Gb4.9a), sedangkan pada beton dengan kadar limbah 20 % terjadi kegagalan lekatan antara agregat dan mortar beton (Gb. 4.9b).



**Gambar 4.9. Permukaan Beton yang Fraktur Akibat Pengujian Lentur**

#### 4.7. Hubungan Tegangan-Regangan Beton

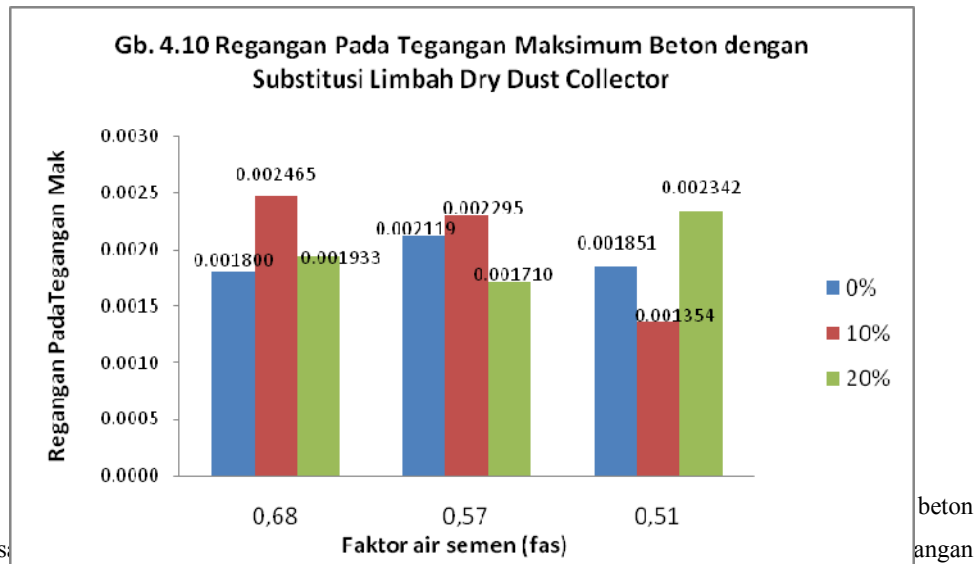
Penelitian untuk mengetahui hubungan tegangan regangan beton dengan substitusi limbah *dry dust collector* dilakukan dengan cara memberikan beban secara bertahap sampai beton hancur. Dari hasil pengujian diperoleh harga regangan beton pada saat terjadinya tegangan maksimum serta kecenderungan bentuk grafik pengujian.

Hasil penelitian regangan beton pada tegangan maksimum disajikan pada Tabel 4.8 sebagai berikut :

**Tabel 4.8. Tegangan dan Regangan Rata-Rata Pada Beban Puncak Beton dengan Substitusi Limbah Dry Dust Collector**

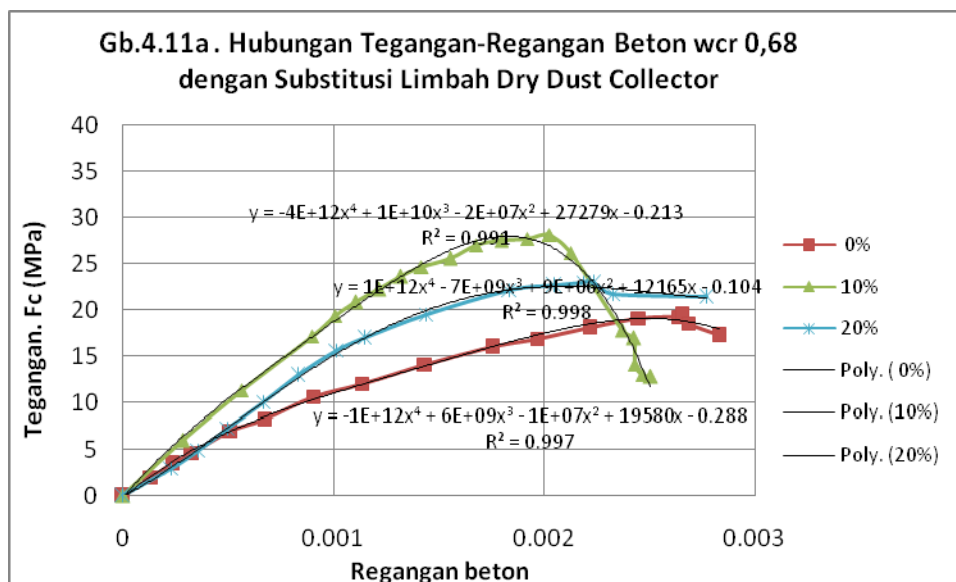
Perlakuan	fas	Kadar Limbah	Kuat Tekan (N/mm <sup>2</sup> )	Regangan Rata-rata Pada Beban Puncak ( $\epsilon_{peak}$ )
A0	0,68	0%	18.31	0.001800
A1		10%	25.31	0.002465
A2		20%	21.91	0.001933
B0	0,57	0%	33.09	0.002119
B1		10%	23.24	0.002295
B2		20%	21.74	0.001710
C0	0,51	0%	48.97	0.001851

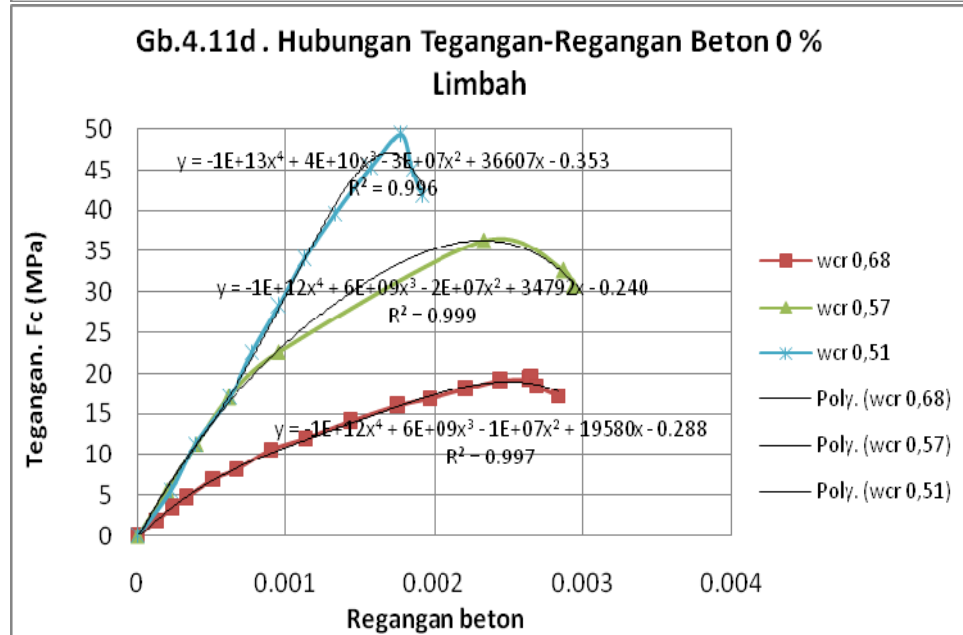
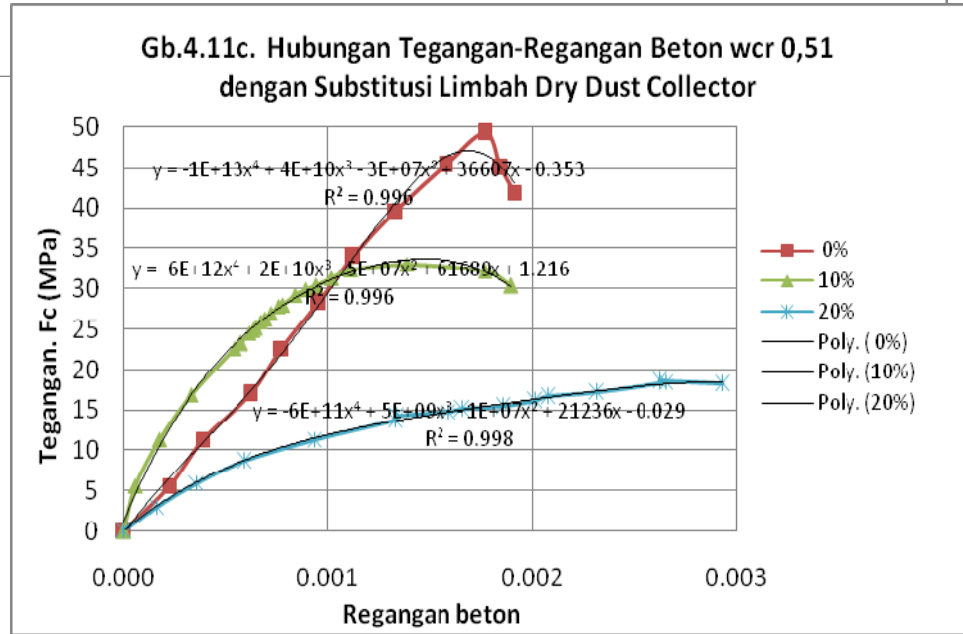
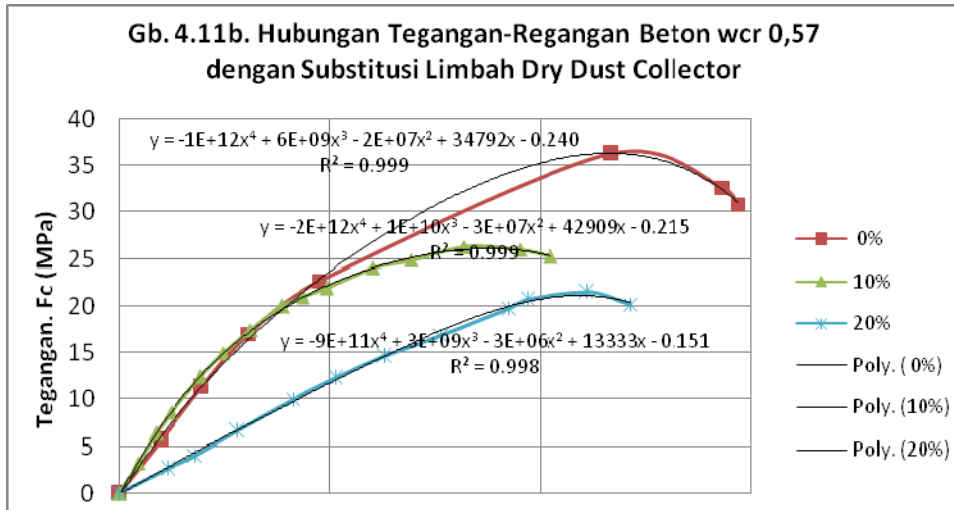
C1	10%	29.04	0.001354
C2	20%	16.76	0.002342



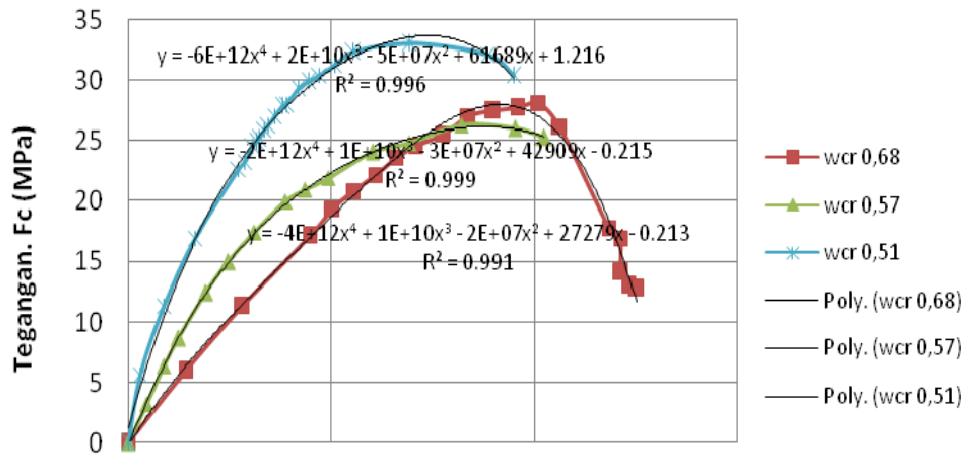
dis beton gan  
beton pada beban puncak. Regangan pada beban puncak meningkat sebesar 36,96 % dan 8,28 % pada beton dengan fas 0,68 dan 0,57 kadar limbah 10 % dibandingkan beton tanpa limbah. Pengaruh penambahan limbah pada regangan beton dengan fas 0,51 terlihat tidak konsisten, dimana regangan pada beban puncak kadar limbah 10 % justru turun, kemudian naik lagi pada kadar limbah 20 % dibandingkan beton tanpa limbah. Regangan maksimum beton tidak dapat dicapai pada penelitian ini karena pengukuran regangan setelah beton retak tidak akurat.

Perilaku hubungan tegangan regangan beton perlu diketahui untuk menurunkan persamaan dalam analisis dan desain struktur beton. Gambar 11a sampai 11f memperlihatkan kurva hubungan tegangan regangan beton dengan substitusi limbah *dry dust collector*.

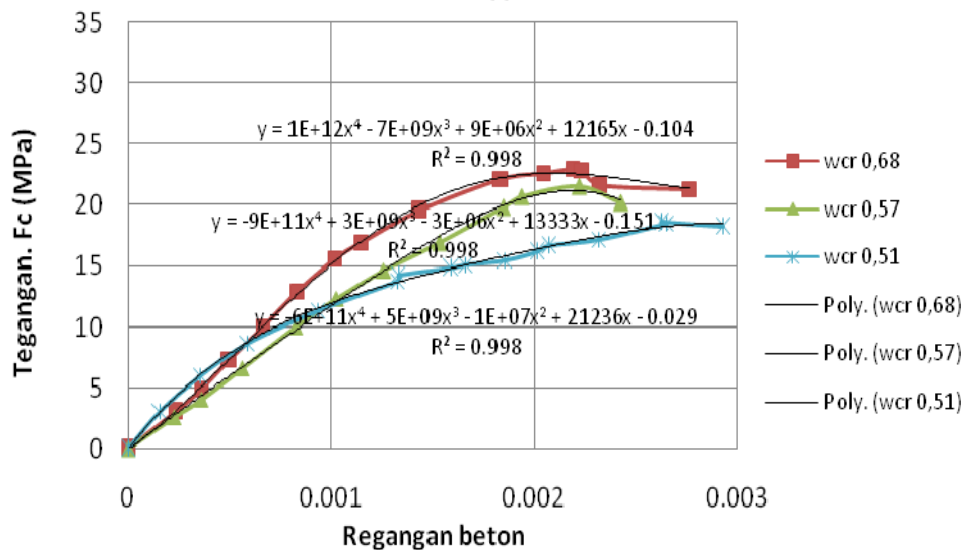




**Gb.4.11e . Hubungan Tegangan-Regangan Beton 10 % Limbah**



**Gb.4.11f . Hubungan Tegangan-Regangan Beton 20 % Limbah**



maksimal masih linear, setelah mendekati 70-75 tegangan maksimal beton banyak kemungkinannya sehingga bentuk kurva menjadi tidak linier. Pada beban batas, retak yang terjadi

searah dengan beban semakin jelas dan pada kondisi ini silinder beton akan segera hancur. Dari grafik 11d sampai 11f secara umum dapat terlihat bahwa (1) Semakin rendah kuat tekan beton regangan pada beban puncak semakin tinggi; (2) Terjadi reduksi terhadap daktilitas seiring dengan kenaikan kuat tekan beton. Hal ini terlihat dari bentuk kurva yang semakin tajam pada beton dengan kuat tekan tinggi. (3) Panjang bagian linier kurva semakin bertambah seiring dengan meningkatnya kuat tekan beton.

Perilaku tegangan regangan beton dengan fas 0,68 tanpa limbah (Gambar 11 a) pada bagian 40 % tegangan puncak masih linier, namun setelah melewati 40 %  $f_c'$  bentuk kurva lebih landai. Pada beton dengan kadar limbah 10 % kurva pra puncak dan pasca puncak terlihat lebih curam dibandingkan dengan beton tanpa limbah. Perilaku paling daktail ditunjukkan oleh beton dengan kadar limbah 20 %, dimana bentuk kurva tegangan regangan lebih landai.

Kurva pra puncak sampai  $\pm 70$  %  $f_c'$  pada beton dengan fas 0,57 dan 0,51 kadar limbah 10 % (Gambar 11b dan 11c) menunjukkan bentuk lebih melengkung dan memiliki kekakuan lebih besar dibandingkan beton tanpa limbah. Hal ini terjadi karena sampai pada beban  $\pm 70$  % beban maksimum penambahan gaya menyebabkan deformasi/perubahan regangan yang kecil.

Penambahan limbah sebesar 20 % pada beton dengan fas 0,57 dan 0,51 (Gambar 11b dan 11c) membuat tegangan tekan beton turun dan daktilitasnya naik. Bentuk kurva pra puncak sudah melengkung yang menunjukkan telah terjadi pergeseran/deformasi yang cukup besar antara agregat dan mortar beton. Pada beton dengan kadar 20 % mempunyai kekuatan rendah dan porositas yang tinggi sehingga pada saat terjadi penambahan gaya yang tidak begitu besar akan terjadi deformasi dan perubahan yang cukup besar. Hal ini menyebabkan bentuk kurva lebih landai dibandingkan beton tanpa limbah.

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Dari hasil penelitian dan pembahasan dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Penambahan limbah *dry dust collector* sebesar 10 % dan 20 % pada beton dengan fas 0,68 menurunkan nilai slump sebesar 10 mm , tetapi pada beton dengan wcr 0,57 tidak mempengaruhi nilai slump beton. Untuk beton dengan fas 0,51 kadar limbah 10 % menghasilkan nilai slump yang sama dengan beton tanpa limbah tetapi pada kadar limbah 20 % nilai slump turun sebesar 5 mm.
2. Dilihat dari berat isinya beton tanpa limbah maupun dengan penambahan limbah masuk dalam batasan berat isi beton normal yaitu sebesar 2400 – 2500 kg/m<sup>3</sup>.
3. Pola keruntuhan beton terhadap beban tekan uniaksial terlihat bahwa penambahan jumlah limbah pada beton membuat pola retak beton berubah drastis. Semakin banyak jumlah limbah yang ditambahkan pola keruntuhan beton semakin daktail dibandingkan dengan beton tanpa limbah dimana pola keruntuhan beton bersifat getas yang ditandai dengan pecahnya benda uji.
4. Pada penambahan limbah sebesar 10 % untuk beton dengan fas 0,68 kuat tekan beton meningkat sebesar 21,21 %, sedangkan pada kadar limbah 20 % kuat tekan beton naik sebesar 6,06 % dibandingkan beton tanpa limbah.
5. Penambahan limbah pada beton dengan fas yang semakin kecil ternyata menurunkan kuat tekan beton. Pada beton dengan fas 0,57 kadar limbah 10 % kuat tekan beton turun sebesar 15,98 %, beton dengan fas 0,51 kuat tekan beton turun sebesar 16,57 %. Semakin kecil nilai fas dan semakin besar jumlah limbah yang ditambahkan, kuat tekan beton semakin turun.
6. Nilai modulus elastisitas beton tanpa limbah semakin tinggi seiring dengan kenaikan kuat tekan beton. Pada beton dengan fas 0,68 modulus elastisitas beton naik sebesar 3,69 % dibandingkan beton tanpa limbah, sedangkan pada kadar limbah 20 % modulus elastisitas beton naik sebesar 3,49 %. Pada beton dengan fas 0,57 penambahan limbah 10 % justru menurunkan modulus sebesar 17,86 %, sedangkan pada kadar limbah 20 % modulus elastisitas juga turun sebesar 11,22 % dibandingkan beton tanpa limbah. Nilai modulus elastisitas paling kecil dihasilkan oleh beton dengan fas 0,51 kadar limbah 20 % .Nilai modulus elastisitas beton untuk semua perlakuan lebih kecil bila dibandingkan dengan modulus elastisitas menurut formulasi yang ditetapkan SNI-03-2847 (2002).

7. Pada beton dengan fas 0,68 nilai poisson's ratio terkecil dihasilkan oleh beton dengan kadar limbah 10 % yaitu 0,21, sedangkan untuk beton dengan fas 0,57 dan 0,51 nilai terkecil dihasilkan oleh beton tanpa limbah yaitu sebesar 0,21 dan 0,20.
8. Kuat lentur beton mengalami peningkatan sebesar 3,48 % pada beton dengan fas 0,68 kadar limbah 10 % dibandingkan dengan beton tanpa limbah. Pada penambahan limbah 20 % kuat lentur beton turun sebesar 8,49 %. Penambahan limbah sebesar 10 % dan 20 % pada beton dengan fas 0,57 dan 0,51 menyebabkan kuat lentur beton turun. Kuat lentur beton terkecil dihasilkan oleh beton dengan fas 0,51 kadar limbah 20 % yaitu sebesar 4,04 Mpa. Nilai kuat lentur beton hasil penelitian untuk semua komposisi lebih tinggi dibandingkan dengan kuat lentur menurut formulasi yang ditetapkan SNI-03-2847 (2002) pasal 11.5.
9. Penambahan limbah sebesar 10 % dapat meningkatkan regangan beton pada beban puncak sebesar 36,96 % dan 8,28 % pada beton dengan fas 0,68 dan 0,57. Pengaruh penambahan limbah pada regangan beton dengan fas 0,51 terlihat tidak konsisten, dimana regangan pada beban puncak kadar limbah 10 % justru turun, kemudian naik lagi pada kadar limbah 20 % dibandingkan beton tanpa limbah.
10. Perilaku tegangan regangan beton dengan fas 0,68, 0,57 dan 0,51 tanpa limbah maupun dengan limbah, pada bagian 40 % tegangan puncak memperlihatkan bentuk yang masih linier. Pada beton dengan kadar limbah 10 % kurva pra puncak dan pasca puncak terlihat lebih curam dibandingkan dengan beton tanpa limbah. Perilaku paling daktail ditunjukkan oleh beton dengan kadar limbah 20 %, dimana bentuk kurva tegangan regangan lebih landai.
11. Persamaan hubungan antara modulus elastisitas dan akar kuat tekan beton serta kuat lentur dengan akar kuat tekan beton hasil penelitian adalah :

Perlakuan	Formulasi Hubungan E dan Fc' Beton	Formulasi Hubungan Fr dan Fc' Beton	Keterangan
0 % Limbah	$E_c = 6005 \cdot \sqrt{f_c} - 10793$	$F_r = 0,771 \cdot \sqrt{f_c} + 1,307$	$F_c' \geq 24,35 \text{ MPa.}$
10 % Limbah	$E_c = 9292 \cdot \sqrt{f_c} - 31118$	$F_r = 0,905 \cdot \sqrt{f_c} + 0,414$	$F_c' \geq 24,35 \text{ MPa.}$
20 % Limbah	$E_c = 4454 \cdot \sqrt{f_c} - 2100$	$F_r = 1,767 \cdot \sqrt{f_c} - 4,130$	$F_c' \geq 20,38 \text{ MPa.}$

## 5.2. Saran-saran

1. Limbah *dry dust collector* dengan prosentase 10 % dapat digunakan sebagai filler pada beton dengan wcr 0,68, yang mempunyai berat isi 2497 kg/m<sup>3</sup>, kuat tekan 30,20 MPa, modulus elastisitas 20212 MPa, poisson's ratio 0,21 dan kuat lentur 5,29 MPa.
2. Untuk meningkatkan sifat kelecakan pada beton dengan bahan tambah *dry dust collector* sebaiknya digunakan superplastisizer pada campuran beton.
3. Perlu dilakukan penelitian tentang penggunaan limbah *dry dust collector* bersama-sama dengan kapur yang berfungsi sebagai aktivator, sehingga limbah dapat digunakan sebagai bahan cementitious pada beton.
4. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mencari komposisi optimum limbah pada beton dengan kuat tekan di atas 27,5 MPa.
5. Penelitian ini hanya terbatas pada umur beton 28 hari, sedangkan perilaku beton jangka panjang belum bisa diprediksi. Dari beberapa hasil penelitian terdahulu ternyata pada umur di atas 28 hari ternyata beton dengan bahan tambah yang banyak mengandung FeO terjadi peningkatan kuat tekan yang drastis. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian pada umur beton di atas 28 hari.
6. Perlu dilakukan penelitian untuk mengetahui durabilitas beton dan ketahanan beton terhadap lingkungan agresif serta tingkat keamanan apabila limbah digunakan pada beton secara umum.
7. Perlu dilakukan penelitian perilaku beton limbah *dry dust collector* terhadap beban triaksial.

## DAFTAR PUSTAKA

- A Borsoi, etc, 2007. *Low-Heat, High Strength, Durable Self Consolidating Concrete*. NINTH CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology. Warsaw, Poland.
- Abdulaziz I Alnegheimish, etc, 1997. *Utilization of Local Steelmaking Slag in Concrete*. J.King Saud Univ., Vol 9, Eng.Sci. (1), pp 39-55.
- Amalia dan Handi S, 2007. *Karakteristik Mortar dengan Bahan Pengisi Sebagian Limbah Debu Pengolahan Baja*. Laporan Akhir Penelitian DIPA Politeknik Negeri Jakarta .
- Badan Standirisasi Nasional, 2002. *SNI 03-2847. Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung*. Bandung
- ACI, 1999. *ACI 318-99 381 R-99 Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary*. Am. Concrete Inst., Detroit, Michigan
- ASTM, 1997. *ASTM Annual Book of ASTM Standards Section 4 Volume 04.02*. ASTM 100 West Conshohocken, PA.
- Broto AB, Amalia dan Sudardja H, 2006. *Karakteristik Aspal Beton dengan Filler Limbah Abu Pengolahan Logam*. Jurnal Politeknologi Vol. 5 No. 2. Jakarta : Politeknik Negeri Jakarta.
- B. Mobasher1 M. ASCE, and R. Devaguptapu, A.M. Arino. 1996. *Effect of Copper Slag on the Hydration of Blended Cementitious Mixtures*. Proceedings, ASCE, Materials Engineering Conference, Materials for the New Millenium, ed. K. Chong, pp. 1677-86
- H. Moosberg-Bustnes, 2006. *Steel Slag as Filler Material in Concrete*. VII International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts. The South African Institute of Mining and Metallurgy.
- HU Shuguang, HE Yongjia, LU Linnu, DING Qingjun, 2006. *Effect of Fine Steel Slag Powder on the Early Hydration Process of Portland Cement*. Journal of Wuhan University of Technology - Mater. Sci. Ed. Vol. 21 No. 1.
- Indrawati, V, 2005. *Semen dan Aplikasinya dalam Proyek-Proyek Infrastruktur*. Jakarta : Makalah Seminar Nasional Universitas Indonesia.
- Kaare K.B.Dahl, 1992. *Uniaxial Stress-Strain for Normal and High Strength Concrete*. Report 7.6. Frederiksberg.
- Murdiani KM, Nendi A, Armando P dan Fitri MY, 2006. *Pemanfaatan Limbah Gas Kolektor PT. Krakatau Steel Cilegon Sebagai Bahan Campuran Conblock*. Laporan PKMP Politeknik Negeri Jakarta.
- Nawy, EG (alih bahasa Bambang Suryoatmono),1998. *Beton Bertulang Suatu Pendekatan Dasar*. Bandung : Refika Aditama.

- P. Balaguru and Michael G. Dipsia, 1993. *Properties of Fiber Reinforced High-Strength Semilightweight Concrete*. Technical Paper, ACI Material Journal September-Oktober, pp 399-405.
- Park,R and T. Paulay, 1975. *Reinforced Concrete Structures*. John Wiley & Sons New York-London-Sydney-Toronto
- Supartono, FX, 2005. *Kecenderungan Masa Depan Teknologi Beton Berkinerja Tinggi*. Jakarta : Makalah Seminar Nasional Universitas Indonesia.
- Suryadi, Akhmad, 2007. *Hubungan Tegangan Regangan Beton Mutu Tinggi dengan Pasir Besi Sebagai Cementitious*. Abstraksi. Surabaya : ITS.

