



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PENAMBAHAN
CACAHAN LIMBAH *POLYETHYLENE TEREPHTHALATE*
TERHADAP KEKUATAN *HOLLOW CORE SLAB* IN SITU
NONPRATEGANG**

SKRIPSI

**R. M. DIMAS A. CHANDRA
0706163496**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
DEPOK
JUNI 2011**

1026/FT.01/SKRIP/07/2011



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PENAMBAHAN
CACAHAN LIMBAH *POLYETHYLENE TEREPHTHALATE*
TERHADAP KEKUATAN *HOLLOW CORE SLAB* IN SITU
NONPRATEGANG**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**R. M. DIMAS A. CHANDRA
0706163496**

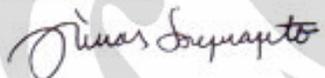
**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
DEPOK
JUNI 2011**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : R. M. Dimas A. Chandra

NPM : 0706163496

Tanda Tangan : 

Tanggal : 21 Juni 2011

Universitas Indonesia

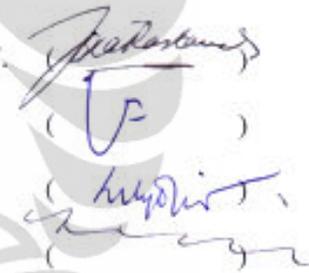
HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : R. M. Dimas A. Chandra
NPM : 0706163496
Program Studi : Teknik Sipil
Judul Skripsi : Studi Eksperimental Pengaruh Penambahan Cacahan
Limbah *Polyethylene Terephthalate* terhadap
Kekuatan *Hollow-Core* Slab In-Situ Nonprategang

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. -Ing. Josia Irwan Rastandi, S.T., M.T.
Pembimbing : Mulia Orientilize, S.T., M.Eng.
Penguji : Dr. Ir. Elly Tjahjono, DEA
Penguji : Ir. Madsuri, M.T.



(J. Rastandi)
(M. Orientilize)
(E. Tjahjono)
(I. Madsuri)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 21 Juni 2011

Universitas Indonesia

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya ucapkan kepada Allah S.W.T., karena atas izin dan rahmat-Nya saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Dengan berbagai kendala dan tantangan yang ada, seluruh proses dalam penulisan skripsi ini merupakan pengalaman yang berharga dan tak terlupakan oleh saya. Di samping itu, saya juga menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, akan sulit bagi saya untuk dapat menghadapi semua kendala dan tantangan tersebut. Untuk itu, saya ingin mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang turut membantu dalam penelitian dan penulisan skripsi ini, khususnya:

- Dr. –Ing. Josia Irwan Rastandi, S.T., M.T. dan Mulia Orientalize, S.T., M.Eng. selaku dosen pembimbing. Saya mengucapkan terima kasih atas bimbingan dan kesediaannya meluangkan waktu untuk kepentingan skripsi ini. Jasa Bapak dan Ibu takkan saya lupakan!
- Ibu saya Hj. Neneng Ratna Suminar dan almarhum ayah saya R. M. Soeprapto atas dukungan dan doanya. Tak lupa juga kakak-kakak saya, Mbak Ajeng dan Mas Bintang.
- Teman-teman seperjuangan: Abi, Marsha, Setem, dan Heru. Terlalu banyak yang ingin saya ucapkan untuk kalian. Tanpa kalian semua, skripsi ini tidak akan seberkesan ini. Sukses untuk kita semua!
- Fauzia Evanindya, S.Ars untuk dukungan, bantuan, dan waktu-waktu gedek barengnya. Terima kasih sudah menularkan kemampuan multitaskingnya, sifat ambisiusnya, dan membuat saya tidak kaku lagi. Waktu-waktu bersama Fauzia selalu menyenangkan.
- Pihak Fakultas Teknik Universitas Indonesia atas dana hibah yang diberikan untuk penelitian ini.
- Putu Ayu Ditta, S.KG untuk dukungan dan bantuannya selama ini. Sukses, Dit!
- Kepala Laboratorium Struktural dan Material Dr. Ir. Elly Tjahjono, DEA atas izinnnya untuk menggunakan lab selama penelitian ini.
- Bapak-bapak laboran: Pak Apri, Pak Idris, Pak Hanapi (Abah), Pak Supri, Pak Obet, Pak Yudi Permana, Pak Agus, Mbak Santi, Mbak Debby, dan

seluruh staf Laboratorium Struktural dan Material. Tanpa bapak-bapak dan mbak-mbak semua apalah jadinya saya dan teman-teman ini.

- Teman-teman Sipil 2007 yang saya sayangi dan saya banggakan.
- Rizqi dan Try atas kosannya yang selalu jadi tempat belajar bersama dan kesediannya untuk diganggu tanpa henti. Momen-momen bersama itu takkan tergantikan.
- Ibu Dr. Ir. Elly Tjahjono, DEA, Bapak Dr. Ir. Heru Purnomo, DEA dan Bapak Ir. Madsuri, M.T. selaku penguji seminar dan skripsi ini.
- Teman-teman Sipil yang ikut membantu persiapan pengecoran dan ikut membaca dial saat pengujian. Terima kasih sudah mau direpotkan.
- Mang Aep, Mas Abut, Pak Nardi, Pak Narto, dan semua bapak-bapak yang telah ikut membantu pengecoran. Tanpa bapak-bapak semua apalah jadinya beton-beton kami.
- Pak M. Baedowy atas cacahan PET-nya. Terima kasih sudah mau menyuplai PET-nya meskipun saya hanya beli sedikit. Semoga makin sukses, Pak.
- Para pekerja yang dengan sukarela membuatkan bekisting untuk pengecoran.
- Pelat-pelat beton dan sampel-sampel beton yang rela berkorban demi keberlangsungan penelitian ini.
- Babam, Bumblebee, Gerobak, Ferrari, Dongkri, dkk. yang telah meringankan beban kami.

Selain itu, saya juga menyadari bahwa skripsi ini tidak luput dari kekurangan dan kesalahan. Untuk itu, saya sangat menghargai segala kritik dan saran dari pembaca mengenai skripsi ini. Saya berharap agar skripsi ini dapat berguna dan bermanfaat bagi pembaca, pada khususnya, dan bagi perkembangan ilmu pengetahuan, pada umumnya.

Jakarta, 20 Juni 2011

Penulis

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

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

Nama : R. M. Dimas A. Chandra
NPM : 0706163496
Program Studi : Teknik Sipil
Departemen : Teknik Sipil
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

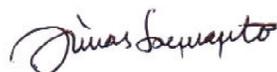
demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PENAMBAHAN CACAHAN
LIMBAH *POLYETHYLENE TEREPHTHALATE* TERHADAP KEKUATAN
HOLLOW CORE SLAB IN SITU NONPRATEGANG

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.

Jakarta, 28 Juni 2011



R. M. Dimas A. Chandra

ABSTRAK

Nama : R. M. Dimas A. Chandra
Program Studi : Teknik Sipil
Judul : Studi Eksperimental Pengaruh Penambahan Cacahan Limbah *Polyethylene Terephthalate* terhadap Kekuatan *Hollow Core Slab* In Situ Nonprategang

Hollow core slab (HCS) merupakan pelat lantai struktural yang terbuat dari beton bertulang dan memiliki lubang di bagian tengah penampangnya. Secara umum, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui bagaimana kekuatan HCS yang dibuat dengan teknik pengecoran di tempat tanpa menggunakan teknik prategang dan menggunakan limbah botol PET 1,5 liter sebagai pembentuk lubang, serta menggunakan cacahan limbah PET sebagai bahan tambah dalam upaya meningkatkan kekuatan.

Cacahan limbah PET yang ditambahkan ke dalam campuran beton adalah sebanyak 0,5% dan 0,7% dari volume fraksi, yang merupakan kadar optimal untuk peningkatan kuat geser, kuat tekan, kuat lentur, dan kuat tarik belah pada umur 28 hari. Pengujian dilakukan terhadap material dan benda uji HCS. Pengujian material meliputi pengujian beton (kuat tekan, kuat lentur, kuat tarik belah, kuat geser) dan pengujian baja tulangan (kuat tarik). Sementara itu, pengujian benda uji pelat dilakukan dengan metode pembebanan pada sepertiga bentang di atas dua tumpuan. Benda uji pengujian beton dan baja tulangan mengacu pada standar yang ditetapkan *American Society for Testing Materials*. Sementara benda uji pelat yang diuji memiliki dimensi 1,75 cm x 60 cm x 15 cm.

Hasil studi eksperimental ini menunjukkan bahwa benda uji HCS dengan tambahan PET dapat mencapai beban maksimal yang lebih tinggi dibandingkan dengan benda uji HCS tanpa tambahan PET. Persentase tambahan PET yang optimal untuk HCS in situ nonprategang adalah 0,7% dari volume fraksi. Di samping itu, eksperimen ini juga menunjukkan bahwa keretakan yang terjadi pada benda uji HCS untuk seluruh variasi didominasi oleh keretakan akibat lentur.

Kata kunci: *Polyethylene Terephthalate* (PET), *Hollow Core Slab* (HCS), botol plastik, beton bertulang

ABSTRACT

Name : R. M. Dimas A. Chandra
Study Program : Civil Engineering
Title : Experimental Study of the Effect of Shredded Polyethylene Terephthalate Waste Addition to the Strength of Cast-In-Site Nonprestressed Hollow Core Slab

Hollow core slab (HCS) is a type of structural slab made of reinforced concrete and has voided cross section. In general, the purpose of this experiment is to discover the strength of cast-in-site and nonprestressed HCS using 1,5 liters PET bottles as part of the formwork, and using shredded PET waste as additives to increase the strength of concrete.

The percentages of shredded PET waste added to the fresh concrete are 0,5% and 0,7% of volume fraction. The percentages are taken as the optimum dosage to increase the shear strength, compressive strength, flexural strength, and splitting tensile strength of 28 days old concrete. The tests include the test of materials and the test of HCS. The tests of materials include the test of concrete (shear strength, compressive strength, flexural strength, and splitting tensile strength) and the test of steel bar (tensile strength). HCS specimens are tested with third point loading scheme. Concrete and steel bar specimens are made according to *American Society for Testing Materials*, while HCS specimens are 1,75 cm x 60 cm x 15 cm in size.

The result of this experiment shows that HCS specimens with PET addition reach higher maximum load than HCS specimens made of normal concrete. The optimum percentage of PET addition to the strength of cast-in-site and nonprestressed HCS is 0,7% of volume fraction. Besides, the experiment also shows that the cracks occur are dominated by flexural cracks.

Keywords: Polyethylene Terephthalate (PET), Hollow Core Slab (HCS), plastic bottle, reinforced concrete

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	vi
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Hipotesis	5
1.6 Metodologi Penelitian	5
1.7 Sistematika Penulisan	6
BAB 2 STUDI LITERATUR	8
2.1 Teori Dasar Mekanika Material	8
2.1.2 Teori Lentur	8
2.1.3 Teori Geser	10
2.2 Beton	11
2.2.2 Pengertian	11
2.2.3 Material Dasar Pembentuk Beton	12
2.2.4 Karakteristik Dasar Beton.....	15
2.3 Beton Bertulang	17
2.3.2 Pengertian	17
2.3.3 Kuat Lentur Beton Bertulang	17
2.3.4 Kelebihan dan Kekurangan Beton Bertulang	21
2.3.5 Jenis Keretakan	21
2.4 Pelat Beton Bertulang	22
2.4.2 Pengertian	22
2.4.3 Klasifikasi Pelat Beton Bertulang Berdasarkan Arah Penyaluran Beban	23
2.4.4 <i>Hollow Core Slab</i> (HCS)	24
2.5 Perencanaan Penulangan Pelat Satu Arah	27
2.6 <i>Polyethylene Terephthalate</i>	31
2.7 Beton dengan Perkuatan Serat (<i>Fiber Reinforced Concrete</i>)	32
2.8 Mekanisme Kegagalan pada Pelat Satu Arah di Atas Dua Tumpuan	33

BAB 3	METODOLOGI PENELITIAN	37
3.1	Gambaran Umum	37
3.2	Jenis Penelitian	37
3.3	Tempat Penelitian	37
3.4	Waktu Penelitian	38
3.5	Pengujian Pelat	38
3.5.2	Benda uji	38
3.5.3	Alat dan Bahan	43
3.5.4	Prosedur Kerja	44
3.5.5	Pengolahan Data	49
3.6	Pengujian Kekuatan Beton	49
3.6.1	Uji Tekan Beton	49
3.6.2	Pengujian Kuat Lentur dengan Pembebanan Sepertiga Bentang pada Balok Sederhana	51
3.6.3	Uji Tarik Belah	54
3.6.4	Uji Geser	56
3.6.5	Pengujian Kuat Tarik Baja Tulangan	57
3.7	Jadwal Penelitian	58
BAB 4	PENGOLAHAN DATA DAN ANALISIS	59
4.1	Gambaran Umum	59
4.2	Hasil Pengujian	60
4.2.2	Pengujian Material	60
4.2.3	Pengujian Pelat	73
4.3	Analisis Hasil Penelitian	90
4.3.1	Jenis Kegagalan (<i>Failure Mode</i>) dan Pola Retak	90
4.3.2	Grafik Hubungan Beban-Lendutan dan Momen Gaya-Putaran Sudut	90
4.3.3	Analisis Kekuatan	92
BAB 5	PENUTUP	95
5.1	Kesimpulan	95
5.2	Saran	95

DAFTAR TABEL

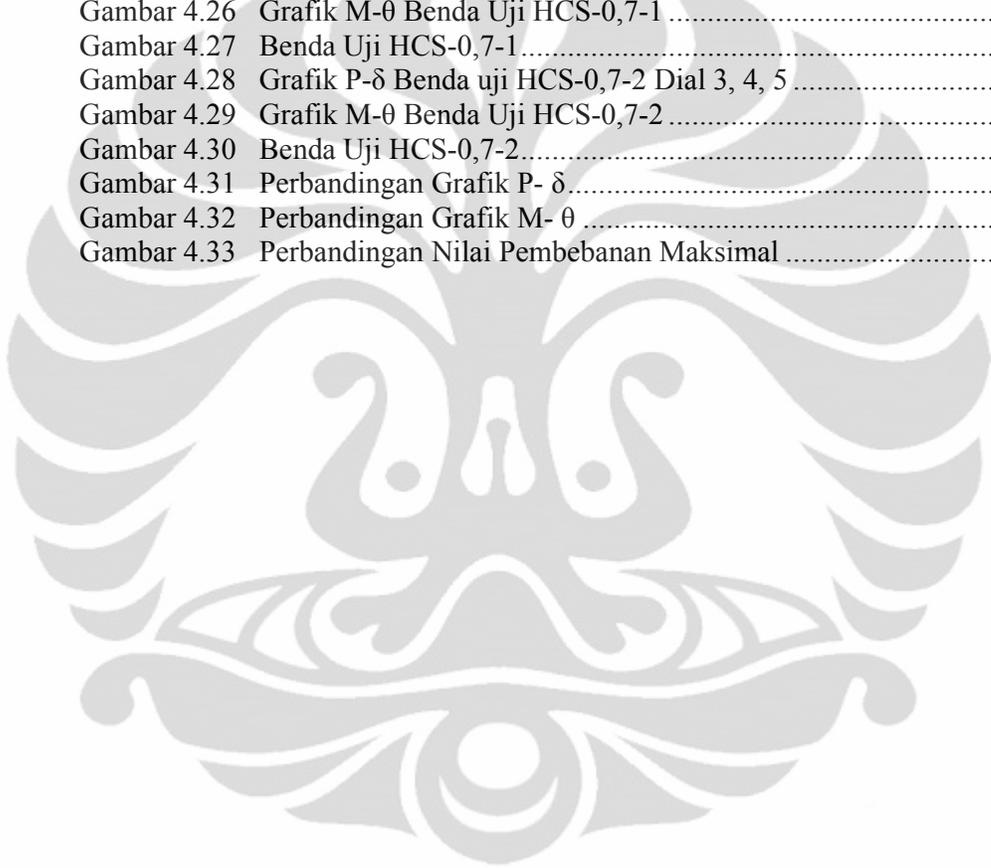
Tabel 2.1	Faktor Reduksi Kekuatan pada Struktur Beton.....	28
Tabel 2.2	Tebal Minimal Pelat Satu Arah.....	29
Tabel 2.3	Sifat Fisik PET	32
Tabel 3.1	Jadwal Penelitian	58
Tabel 4.1	Rangkuman Hasil Pengujian.....	89



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Variasi Tegangan Lentur.....	10
Gambar 2.2	Pengaruh Faktor Air-Semen terhadap Kekuatan Beton.....	16
Gambar 2.3	Tegangan pada Balok Beton Tanpa Tulangan	18
Gambar 2.4	Grafik Tegangan-Regangan	18
Gambar 2.5	Distribusi Tegangan Ekuivalen	19
Gambar 2.6	Jenis Keretakan dan Penyebabnya.....	22
Gambar 2.7	Aksi Satu Arah dan Dua Arah pada Pelat.....	23
Gambar 2.8	Distribusi Tegangan Lentur dan Geser pada Penampang Pelat Beton Berlubang	25
Gambar 2.9	Ikatan Kimia PET	32
Gambar 2.10	Kondisi Batas untuk Tegangan Tekan dan Lentur pada Beton dengan Serat	33
Gambar 2.11	Bentuk Tipikal Grafik.....	35
Gambar 2.12	Keretakan, Regangan, dan Tegangan	36
Gambar 3.1	Ilustrasi Deskripsi Benda Uji	38
Gambar 3.2	Rencana Potongan Melintang Penampang Benda Uji Pelat Berlubang.....	40
Gambar 3.3	Pemasangan Plastik Cor.....	46
Gambar 3.4	Pemasangan Tulangan Lentur dan Beton <i>Decking</i>	46
Gambar 3.5	Pemasangan Botol PET.....	47
Gambar 3.6	Penambahan PET dalam Campuran Beton	47
Gambar 3.7	Pengecoran	47
Gambar 3.8	Susunan Peralatan Pengujian	48
Gambar 3.9	Pola Keretakan pada Beton	51
Gambar 3.10	Posisi Benda Uji Kuat Lentur.....	53
Gambar 3.11	Penempatan Benda Uji Tarik Belah	55
Gambar 3.12	Benda Uji Kuat Geser	56
Gambar 4.1	Peralatan Uji <i>Flow</i>	61
Gambar 4.2	Pengujian <i>Flow</i>	61
Gambar 4.3	Perbandingan Hasil Uji Kuat Tekan.....	62
Gambar 4.4	Perbandingan Hasil Uji Tekan Chandra dan Adidasmama.....	63
Gambar 4.5	Uji Tekan Beton	63
Gambar 4.6	Perbandingan Hasil Uji Kuat Lentur	65
Gambar 4.7	Perbandingan Hasil Uji Lentur dengan Pembebanan Sepertiga Bentang pada Balok Sederhana Chandra dan Adidasmama	65
Gambar 4.8	Uji Kuat Lentur dengan Pembebanan Sepertiga Bentang pada Balok Sederhana	66
Gambar 4.9	Perbandingan Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah.....	67
Gambar 4.10	Perbandingan Hasil Uji Tarik Belah Chandra dan Mahendya	68
Gambar 4.11	Uji Tarik Belah.....	68
Gambar 4.12	Perbandingan Hasil Pengujian Kuat Geser	70
Gambar 4.13	Perbandingan Hasil Uji Geser Chandra dan Mahendya	71
Gambar 4.14	Uji Kuat Geser dengan Pola Retak yang Ideal	71
Gambar 4.15	Uji Kuat Geser dengan Pola Retak yang Tidak Ideal.....	72

Gambar 4.16	Grafik P- δ Benda Uji HCS-N.....	75
Gambar 4.17	Grafik M- θ Benda Uji HCS-N	75
Gambar 4.18	Benda Uji HCS-N.....	75
Gambar 4.19	Grafik P- δ Benda Uji HCS-0,5-1 Dial 3, 4, 5	78
Gambar 4.20	Grafik M- θ Benda Uji HCS-0,5-1	78
Gambar 4.21	Benda Uji HCS-0,5-1.....	78
Gambar 4.22	Grafik P- δ Benda Uji HCS-0,5-2 Dial 3, 4, 5	82
Gambar 4.23	Grafik M- θ Benda Uji HCS-0,5-2	82
Gambar 4.24	Benda Uji HCS-0,5-2.....	82
Gambar 4.25	Grafik P- δ Benda Uji HCS-0,7-1 Dial 3, 4, 5	84
Gambar 4.26	Grafik M- θ Benda Uji HCS-0,7-1	84
Gambar 4.27	Benda Uji HCS-0,7-1.....	84
Gambar 4.28	Grafik P- δ Benda uji HCS-0,7-2 Dial 3, 4, 5	88
Gambar 4.29	Grafik M- θ Benda Uji HCS-0,7-2	88
Gambar 4.30	Benda Uji HCS-0,7-2.....	88
Gambar 4.31	Perbandingan Grafik P- δ	91
Gambar 4.32	Perbandingan Grafik M- θ	91
Gambar 4.33	Perbandingan Nilai Pembebanan Maksimal	92



DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 : Penamaan Benda Uji
- Lampiran 2 : Data Hasil Uji Tekan
- Lampiran 3 : Data Hasil Uji Lentur
- Lampiran 4 : Data Hasil Uji Tarik Belah
- Lampiran 5 : Data Hasil Uji Geser
- Lampiran 6 : Uji Tarik Baja
- Lampiran 7 : Data Hasil Pengujian HCS-N
- Lampiran 8 : Data Hasil Pengujian HCS-0,5%-1
- Lampiran 9 : Data Hasil Pengujian HCS-0,5%-2
- Lampiran 10 : Data Hasil Pengujian HCS-0,7%-1
- Lampiran 11 : Data Hasil Pengujian HCS-0,7%-2
- Lampiran 12 : Pola Retak Benda Uji Pelat HCS-N
- Lampiran 13 : Pola Retak Benda Uji Pelat HCS-0,5%-1
- Lampiran 14 : Pola Retak Benda Uji Pelat HCS-0,5%-2
- Lampiran 15 : Pola Retak Benda Uji Pelat HCS-0,7%-1
- Lampiran 16 : Pola Retak Benda Uji Pelat HCS-0,7%-2

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beton dan beton bertulang digunakan sebagai material struktur bangunan di seluruh dunia. Penggunaan beton dan beton bertulang yang luas didasari oleh besarnya ketersediaan material penyusun beton dan beton bertulang, yaitu baja tulangan, air, semen, pasir, dan kerikil. Di samping itu, pengaplikasian beton yang relatif mudah, dan biaya yang relatif ekonomis turut menjadi faktor yang mendasari luasnya penggunaan beton dan beton bertulang dalam konstruksi bangunan (MacGregor dan Wight 2005: 1).

Di sisi lain, beton bertulang memiliki sejumlah kekurangan. Salah satu kekurangan yang dimiliki beton bertulang adalah berat sendirinya yang besar. Hal ini akan berakibat pada tingginya gaya efektif gempa pada bangunan, seperti yang dituliskan Chopra (1995: 21), bahwa perencana struktur bangunan akan meningkatkan gaya efektif gempa bila massa bangunan bertambah. Di samping itu, hal ini juga akan meningkatkan beban yang ditahan oleh struktur pendukung, seperti kolom dan pondasi.

Seiring dengan perkembangan teknologi beton bertulang, lantai dan atap pada bangunan beton seringkali berupa elemen prategang pracetak yang berlubang di tengahnya (*hollow core member*), atau yang disebut dengan *hollow core slab* (HCS). Lubang longitudinal pada HCS mengurangi beban mati dan menghasilkan bagian struktural yang lebih efisien (Stanton 1992). Dibandingkan dengan pelat beton bertulang yang padat, HCS tentunya memiliki berat yang lebih ringan. Besarnya perbedaan berat tergantung pada seberapa besar porsi volume lubang terhadap volume pelat secara keseluruhan. Dengan akumulasi pengurangan berat di setiap lantai, dampak penggunaan HCS terhadap berat bangunan dan beban gempa menjadi semakin signifikan ketika HCS diaplikasikan pada bangunan bertingkat.

Secara teoritis, adanya lubang di tengah penampang tersebut dimungkinkan, karena tegangan lentur paling besar ditahan oleh sisi terluar dari penampang, sehingga pengurangan luas penampang pada bagian tengah tidak mengurangi kekuatan HCS terhadap lentur.

Selama ini, HCS merupakan produk beton pracetak. Adanya lubang dan digunakannya teknik prategang membuat proses produksi melalui fabrikasi beton pracetak lebih memungkinkan. *Canadian Precast/Prestressed Concrete Institute* (2006) menuliskan bahwa teknik prategang ini mampu menjadikan HCS dapat memiliki bentang yang lebih panjang, tebal pelat yang lebih kecil, dan kemampuan untuk menerima beban yang lebih besar. Akan tetapi di sisi lain, teknologi HCS ini akan sulit diterapkan di daerah dengan akses transportasi minimal dan akan memakan biaya transportasi yang relatif besar bila diterapkan di daerah yang jauh dari tempat produksi.

Saat ini telah ditemukan beberapa metode pembuatan pelat dengan lubang di tengah penampang yang dapat diproduksi di tempat (*cast-in-site*). Salah satu metode yang dimaksud adalah *Bubbledeck System* dari Belanda. Teknologi tersebut menggunakan bola-bola plastik sebagai pembentuk lubang pada pelat struktural. Teknologi ini telah teruji secara ilmiah dan telah diaplikasikan dalam sejumlah proyek konstruksi di Eropa.

Teknologi tersebut, beserta dengan teknologi lainnya yang serupa, menginspirasi penggunaan limbah botol plastik dalam pembuatan HCS. Bentuknya yang sesuai dan jumlahnya yang relatif banyak menjadikan limbah botol plastik memiliki potensi untuk dapat dimanfaatkan sebagai pembentuk lubang pada HCS. Meski perlu dikaji lebih lanjut, namun hal ini dapat menjadi salah satu bentuk pemanfaatan limbah yang akan berkontribusi terhadap keberlangsungan lingkungan hidup. Didasari oleh pemikiran tersebut, maka muncullah gagasan untuk memproduksi HCS dengan memanfaatkan limbah botol plastik sebagai pembentuk lubang.

Di samping itu, hal lain yang menjadi permasalahan adalah mengenai teknik perkuatan yang sesuai. Sulitnya menerapkan teknik prategang dalam metode *cast-in-site* mendasari kebutuhan akan teknik perkuatan yang lain. Salah satu teknik perkuatan yang dapat diterapkan untuk metode *cast-in-site* adalah dengan menggunakan suatu bahan tambah dalam campuran beton. Dari penelitian yang dilakukan oleh Adidasmara (2008), diketahui bahwa cacahan *polyethylene terephthalate* (PET) dapat meningkatkan kuat tarik dan kuat lentur pada beton secara berarti. Dari hasil pengujian terhadap beton yang telah mengeras diketahui

bahwa dengan penambahan cacahan botol plastik PET sebesar 0,7% dari volume fraksi akan menambah kuat tekan sebesar 11% dan kuat lentur sebesar 37,8% pada umur 28 hari. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa persentase tambahan PET yang optimal untuk peningkatan kuat tekan dan kuat lentur adalah 0,7% dari volume fraksi. Kemudian dari penelitian lainnya yang dilakukan oleh Mahendya (2008), diketahui bahwa cacahan *polyethylene terephthalate* (PET) juga dapat meningkatkan kuat geser dan kuat tarik belah pada beton secara berarti. Dari hasil pengujian terhadap beton yang telah mengeras didapatkan bahwa dengan penambahan cacahan botol plastik PET optimal sebesar 0,7% terjadi peningkatan kuat tarik belah sebesar 19,39% pada umur 28 hari. Pada kuat geser, peningkatan optimal terjadi pada kadar cacahan botol plastik PET 0,5% yang berumur 28 hari, yaitu sebesar 37,19%. Didasari oleh hasil studi tersebut, cacahan PET diharapkan memiliki potensi untuk menjadi bahan tambah pada campuran beton dalam upaya meningkatkan kekuatan HCS.

Untuk mengetahui bagaimana pengaruh pemanfaatan limbah PET terhadap kekuatan HCS beton, diperlukan adanya suatu pengujian secara eksperimental. Dari hasil pengujian tersebut, diharapkan dapat diketahui bagaimana perbandingan kekuatan antara HCS yang memanfaatkan cacahan PET sebagai bahan tambah dalam campuran beton dengan HCS tanpa tambahan PET. Dari hasil pengujian yang sama, diharapkan akan diketahui juga bagaimana kekuatan HCS dengan tambahan PET sebesar 0,5% dan 0,7% dari volume fraksi dan berapa persentase volume fraksi yang optimal. Di samping itu, diharapkan dapat diketahui pula bagaimana pola retak yang terjadi dan apa penyebab dominan dari keretakan tersebut.

1.2 Perumusan Masalah

- 1) Bagaimana perbandingan kekuatan antara HCS beton yang memanfaatkan cacahan PET dengan HCS beton tanpa cacahan PET?
- 2) Bagaimana kekuatan HCS beton dengan tambahan PET pada kadar optimal untuk kuat tekan, kuat lentur dan kuat tarik belah (0,7% dari volume fraksi) dan HCS beton dengan dengan tambahan PET pada kadar optimal untuk kuat geser (0,5% dari volume fraksi)?

- 3) Bagaimana pola retak yang terjadi dan apa penyebab dominan dari keretakan tersebut?

1.3 Tujuan Penelitian

- 1) Mengetahui perbandingan kekuatan antara HCS beton yang memanfaatkan cacahan PET dengan HCS beton tanpa cacahan PET.
- 2) Mengetahui kekuatan HCS beton dengan tambahan PET pada kadar optimal untuk kuat tekan, kuat lentur dan kuat tarik belah (0,7% dari volume fraksi) dan HCS beton dengan dengan tambahan PET pada kadar optimal untuk kuat geser (0,5% dari volume fraksi).
- 3) Mengetahui pola retak yang terjadi dan penyebab dominan dari keretakan tersebut.

1.4 Batasan Masalah

- 1) Nilai properti material (kuat tekan beton, tegangan leleh baja tulangan, modulus elastisitas beton, dan modulus elastisitas baja) setiap benda uji sejenis diasumsikan sama.
- 2) Campuran beton (tanpa cacahan PET) yang digunakan memiliki properti sebagai berikut:
 - Mutu beton : K-300
 - Slump : 15 cm (\pm 1 cm)
- 3) Tulangan tarik lentur yang digunakan memiliki properti material sebagai berikut:
 - Mutu : U24
 - Diameter : 7,5 mm
- 4) Dimensi pelat yang diuji adalah 175 cm x 60 cm x 15 cm
- 5) *Polyethylene terephthalate* (PET) yang digunakan sebagai bahan tambah pada campuran beton adalah PET yang tidak berwarna (transparan).
- 6) *Polyethylene terephthalate* (PET) yang digunakan sebagai pembentuk lubang adalah limbah botol air mineral berukuran 1,5 liter.

1.5 Hipotesis

- 1) Diperkirakan, HCS dengan tambahan PET sebesar 0,5% dan 0,7% dari volume fraksi akan memiliki kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan HCS tanpa tambahan PET.
- 2) Diperkirakan, HCS beton dengan tambahan PET pada kadar optimal untuk kuat tekan, kuat lentur, dan kuat tarik belah (0,7%) akan memiliki kekuatan maksimal yang lebih besar dibandingkan dengan HCS beton dengan tambahan PET pada kadar optimal untuk kuat geser (0,5%).
- 3) Diperkirakan, retak yang terjadi didominasi oleh retak akibat lentur, khususnya lentur murni.

1.6 Metodologi Penelitian

Secara garis besar, tahapan-tahapan yang dilakukan penulis dalam melakukan penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1) Studi literatur
- 2) Perencanaan alat dan material eksperimen
- 3) Pengadaan alat dan material eksperimen
- 4) Pembuatan benda uji
- 5) Persiapan peralatan pengujian
- 6) Pengujian material
 - Uji slump
 - Uji tekan beton
 - Uji kuat lentur dengan pembebanan sepertiga bentang pada balok sederhana
 - Uji kuat tarik belah
 - Uji kuat geser
 - Uji kuat tarik baja
- 7) Pengujian pelat dengan pembebanan setiap sepertiga bentang
- 8) Pengolahan data hasil eksperimen
- 9) Analisis
- 10) Kesimpulan

1.7 Sistematika Penulisan

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi hal-hal mendasar yang terkait dengan pembahasan skripsi ini. Dalam bab 1, disebutkan latar belakang dilakukannya penelitian, perumusan masalah, tujuan dilakukannya penelitian, batasan ruang lingkup permasalahan yang ditinjau, hipotesis awal dari hasil studi eksperimental ini, serta metodologi penelitian yang akan dilakukan, dan sistematika penulisan skripsi.

BAB II DASAR TEORI

Bab ini berisi teori-teori yang terkait dengan apa yang dibahas dan ditinjau dalam skripsi. Teori-teori tersebut digunakan sebagai dasar dan rujukan dalam pembahasan hasil studi eksperimental.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi penjelasan rinci mengenai metodologi penelitian yang dilakukan. Dalam bagian tersebut dijelaskan secara rinci metodologi eksperimen yang dilakukan untuk memperoleh data yang diperlukan dalam menjawab permasalahan yang ditinjau dalam skripsi.

BAB IV PENGOLAHAN DATA DAN ANALISIS

Bab ini berisi data-data hasil studi eksperimental yang dilakukan dan pembahasan mengenai hasil eksperimen tersebut. Pembahasan hasil eksperimen tersebut meliputi deskripsi sebaran data yang diperoleh dan analisis untuk menjelaskan hasil eksperimen berdasarkan dasar teori yang ada.

BAB VI PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan dan saran. Dari hasil studi eksperimental yang dilakukan, ditarik sejumlah kesimpulan yang menjawab tujuan dan permasalahan yang mendasari dilakukannya penelitian. Dalam bagian ini

disampaikan pula sejumlah saran agar studi yang telah dilakukan dapat dikembangkan.



BAB 2 STUDI LITERATUR

2.1 Teori Dasar Mekanika Material

2.1.2 Teori Lentur

Hibbeler (1997) menuliskan penjelasan mengenai penurunan persamaan lentur sebagai berikut. Dalam menurunkan persamaan lentur (*flexure formula*), perlu diasumsikan bahwa material berperilaku dalam kondisi elastis-linear. Dengan demikian, dapat diasumsikan bahwa hukum Hooke, yaitu $\sigma = E/\varepsilon$, berlaku pada material tersebut. Oleh karena itu, seperti juga variasi regangan (ε) pada penampang, tegangan (σ) akan bervariasi dari nol, pada sumbu netral penampang, hingga mencapai maksimal pada bagian terjauh dari sumbu netral. Berdasarkan hukum Hooke, maka dapat dituliskan:

$$\sigma = -\left(\frac{y}{c}\right) \sigma_{max} \quad (2.1)$$

Persamaan ini menunjukkan distribusi tegangan sepanjang daerah penampang. Tanda yang digunakan dalam persamaan tersebut memiliki peran yang penting, karena akan menunjukkan apakah tegangan tersebut merupakan tegangan tekan atau tarik.

Dalam penurunan persamaan ini, digunakan kesepakatan tanda sebagai berikut. Untuk nilai momen, M positif, di mana momen bekerja pada arah positif sumbu z , nilai positif dari y menunjukkan nilai negatif (tarik) untuk tegangan, sedangkan nilai negatif dari y menunjukkan nilai positif (tekan) untuk tegangan.

Dengan menentukan bahwa gaya $dF = \sigma dA$ bekerja pada elemen dA , maka

$$0 = \int_A dF = \int_A \sigma dA \quad (2.2)$$

$$0 = \int_A -\left(\frac{y}{c}\right) \sigma_{max} dA \quad (2.3)$$

$$0 = \frac{-\sigma_{max}}{c} \int_A y dA \quad (2.4)$$

Karena $\frac{\sigma_{max}}{c}$ tidak bernilai nol, maka

$$\int_A y dA = 0 \quad (2.5)$$

Dengan kata lain, momen dari penampang terhadap sumbu netral haruslah bernilai nol. Kondisi ini hanya dapat tercapai bila sumbu netral juga merupakan sumbu *centroid* untuk penampang melintang tersebut.

Tegangan pada balok dapat ditentukan dari ketentuan bahwa resultan gaya dalam momen, M , harus bernilai sama dengan momen yang diakibatkan oleh distribusi tegangan terhadap sumbu netral, yaitu:

$$dM = y dF \quad (2.6)$$

Karena $dF = \sigma dA$, maka dengan menggunakan Persamaan 1, diperoleh.

$$(M_R)_z = \sum M_z; \quad (2.7)$$

$$M = \int_A y dF = \int_A y(\sigma dA) = \int_A y \left(\frac{y}{c} \sigma_{max} \right) dA \quad (2.8)$$

atau

$$M = \frac{\sigma_{max}}{c} \int_A y^2 dA \quad (2.9)$$

Dalam hal ini, bentuk integral menunjukkan momen inersia, I , dari penampang melintang yang ditinjau, dihitung terhadap sumbu netral. Dengan demikian, persamaan tersebut dapat diselesaikan secara umum, sehingga diperoleh:

$$\sigma_{max} = \frac{Mc}{I} \quad (2.10)$$

dengan:

σ_{max} = tegangan normal terbesar pada batang, yang terjadi pada suatu titik pada penampang melintang terjauh dari sumbu netral

M = resultan gaya dalam momen, dihitung dari metode penampang dan persamaan kesetimbangan, serta dihitung terhadap sumbu netral penampang melintang

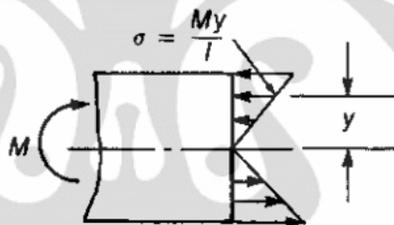
I = momen inersia penampang melintang, dihitung terhadap sumbu netral

c = jarak tegak lurus dari sumbu netral ke suatu titik terjauh dari sumbu netral, di mana tegangan maksimal bekerja

Karena $\sigma_{max}/c = -\sigma/y$, maka tegangan normal pada jarak y dari sumbu netral dapat ditentukan dari persamaan serupa, yaitu:

$$\sigma = -\frac{My}{I} \quad (2.11)$$

Tanda negatif pada persamaan tersebut diperlukan agar sesuai dengan asumsi arah x , y , dan z yang digunakan. Sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 2.1, maka sesuai kaidah tangan kanan, nilai M yang positif akan menghasilkan tegangan pada titik di ordinat positif yang bernilai negatif (tekan). Kedua persamaan terakhir tersebut disebut sebagai persamaan lentur.



Gambar 2.1 Variasi Tegangan Lentur

Sumber: Callister, 2003

2.1.3 Teori Geser

Apabila segmen bagian atas dari elemen yang terletak sejarak y' ditinjau dari sumbu netral. Segmen tersebut memiliki lebar (t) dan pada setiap sisi potongan melintang tersebut terdapat luasan sebesar A' . Karena resultan momen pada kedua sisi tersebut berbeda sebesar dM , maka keseimbangan $\sum F_x = 0$ tidak akan tercapai, kecuali terdapat tegangan geser longitudinal (τ) yang bekerja pada sisi bawah segmen tersebut. Dalam analisis ini, diasumsikan bahwa tegangan tersebut bernilai konstan sepanjang lebar bagian dasar segmen tersebut, t . Tegangan tersebut bekerja pada area seluas $t dx$. Dengan menerapkan persamaan kesetimbangan gaya horizontal, dan dengan menggunakan persamaan lentur (Persamaan 11), maka dapat diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$\leftarrow \sum F_x = 0; \int_A \sigma' dA - \int_A \sigma dA - \tau (t dx) = 0 \quad (2.12)$$

$$\int_{A'} \left(\frac{M+dM}{I} \right) y dA - \int_{A'} \left(\frac{M}{I} \right) y dA - \tau (t dx) = 0 \quad (2.13)$$

$$\left(\frac{dM}{I} \right) \int_{A'} y dA = (t dx) \quad (2.14)$$

Dengan menyelesaikan persamaan tersebut, maka diperoleh solusi:

$$\tau = \frac{1}{It} \left(\frac{dM}{dx} \right) \int_{A'} y dA \quad (2.15)$$

Persamaan tersebut dapat disederhanakan dengan mensubstitusikan $V = dM / dx$. Di samping itu, bagian integral pada persamaan tersebut menunjukkan momen dari luasan A' terhadap sumbu netral yang akan disimbolkan dengan Q . Dengan mensubstitusikan keduanya ke Persamaan 15, dapat diperoleh persamaan:

$$\tau = \frac{VQ}{It} \quad (2.16)$$

dengan:

τ = tegangan geser

V = resultan gaya dalam geser

$Q = \int_{A'} y dA'$, dengan A' merupakan bagian atas atau bawah dari penampang melintang yang ditinjau, diukur dari bagian dengan t diukur, dan \bar{y} merupakan jarak ke centroid A' , diukur dari sumbu netral.

I = momen inersia dari penampang melintang yang dihitung dari sumbu netral

t = lebar penampang, dihitung pada titik di mana τ dihitung

2.2 Beton

2.2.2 Pengertian

Dalam Standar Nasional Indonesia (SNI) 03-2847-2002 tentang *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung*, beton didefinisikan sebagai campuran antara semen portland atau semen hidraulik yang lain, agregat halus, agregat kasar dan air, dengan atau tanpa bahan tambahan yang membentuk massa padat.

2.2.3 Material Dasar Pembentuk Beton

1) Semen Portland

Dalam dunia konstruksi, semen didefinisikan sebagai material pengikat (*bonding material*) antar batuan, pasir, batu bata, dan lainnya. Oleh karena itu, semen berperan sebagai pengikat antar butiran agregat dalam campuran beton. Semen yang digunakan untuk membuat campuran beton merupakan semen hidraulik, karena sifatnya yang akan mengeras ketika kontak dengan air.

Semen portland merupakan hasil kalsinasi dari batu kapur dengan aluminium silika pada suhu sekitar 1400°C. Secara garis besar, proses produksi semen portland dilakukan dengan melakukan penggilingan bahan mentah, pencampuran bahan mentah dalam proporsi tertentu, pembakaran campuran tersebut pada temperatur 1400°C hingga membentuk apa yang disebut dengan *clinker*. *Clinker* tersebut kemudian didinginkan dan dicampur dengan bahan gips.

Adapun bahan baku utama dalam pembuatan semen portland meliputi kapur (*limestone*), silika (SiO₂), alumina (Al₂O₃), dan oksida besi (Fe₂O₃). Senyawa tersebut saling berinteraksi satu sama lain dalam kiln untuk membentuk serangkaian atau lebih produk yang lebih kompleks, yaitu C₃S, C₂S, C₃A, dan C₄AF. Proses kimia pembentukan semen pada umumnya mengikuti persamaan kimia berikut:



Masing-masing senyawa kompleks tersebut memiliki peran yang berbeda-beda. *Tricalcium silicate* berperan dalam pengerasan awal dan kekuatan pada waktu pengeringan awal. Sementara itu, *Dicalcium silicate* mengeras secara perlahan, dan dampaknya terhadap kekuatan mulai muncul pada usia beton di atas satu minggu. Secara umum, kekuatan pada waktu awal pengeringan akan meningkat seiring dengan besarnya proporsi *Tricalcium silicate*. Akan tetapi, bila pengeringan lembab terus berlangsung, kekuatan setelah 6 bulan akan lebih besar pada semen dengan persentase *Dicalcium silicate* yang lebih besar.

Berbeda dengan kedua komponen tersebut, *Tricalcium aluminate* berkontribusi terhadap perkembangan kekuatan pada beberapa hari pertama. Akan tetapi, komponen ini menyumbangkan faktor negatif berupa sifat panas dan kereaktifannya terhadap tanah dan air dengan konsentrasi sulfat menengah hingga

tinggi. Semen dengan kadar komponen ini yang rendah biasanya menghasilkan panas lebih sedikit, memiliki kekuatan lebih besar dan lebih tahan terhadap sulfat.

Komponen dasar terakhir, yaitu *Tetracalcium aluminoferrite* mempengaruhi temperatur pemanasan pada produksi semen portland. Meski mengalami hidrasi yang cepat, komponen ini tidak berpengaruh besar pada kekuatan beton.

Perbedaan komposisi kimia dan karakteristik fisik akan menghasilkan semen dengan sifat yang berbeda ketika terhidrasi. Oleh karena itu, terdapat beberapa jenis semen portland yang umum diproduksi. *American Standard for Testing Materials* mengklasifikasikan semen portland menjadi lima jenis berdasarkan komposisi senyawa yang terkandung di dalamnya. Semen portland tipe I digunakan pada konstruksi biasa, dengan tanpa karakteristik khusus tertentu. Semen portland tipe II memiliki panas hidrasi lebih rendah dari tipe I; digunakan apabila struktur beton terekspos oleh sulfat atau ketika panas hidrasi yang sedang dibutuhkan. Semen portland tipe III digunakan apabila dibutuhkan kekuatan awal yang tinggi; memiliki panas hidrasi yang lebih tinggi. Semen portland tipe IV digunakan dalam campuran beton skala besar untuk bendungan beton dan struktur lainnya dengan panas hidrasi terdispersi secara perlahan. Semen ini relatif jarang di produksi, termasuk di Indonesia. Perannya tergantikan oleh kombinasi tipe I dan II dengan *fly ash*. Semen portland tipe V digunakan untuk konstruksi pondasi, dinding basement, gorong-gorong, dan lainnya yang terekspos oleh tanah yang mengandung sulfat.

2) Agregat

Agregat memiliki pengaruh yang signifikan terhadap perilaku struktur beton, karena persentasenya yang dominan pada campuran beton (mencapai 75%). Di samping kekuatannya akan berpengaruh terhadap kekuatan beton, sifat material agregat juga akan mempengaruhi ketahanan beton.

Secara umum, untuk mendapatkan kekuatan dan ketahanan yang maksimal dengan tetap ekonomis, agregat harus saling terekat satu sama lain dengan baik dan tercampur sedemikian rupa dalam komposisi yang padat.

Agregat dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok menurut ukurannya, yaitu agregat halus dan agregat kasar. Agregat halus adalah material yang tidak tersaring oleh saringan nomor 4 (berdiameter kurang dari 5 mm). Sementara itu, agregat kasar adalah material dengan ukuran yang lebih besar. Ukuran agregat kasar yang terbesar yang diizinkan tidak boleh lebih dari:

- a) Seperlima dimensi terkecil antara sisi bekisting
- b) Sepertiga ketebalan pelat
- c) $\frac{3}{4}$ spasi bersih antara tulangan baja

Pada umumnya, agregat merupakan batu-batuan alami. Oleh karena itu, massa jenis beton yang umumnya digunakan adalah 2320 kg/m^3 untuk beton tanpa tulangan dan 2400 kg/m^3 untuk beton bertulang.

3) Air

Dalam campuran beton, air berpengaruh terhadap properti material beton, baik sebelum maupun setelah mengeras. Sebelum campuran beton mengeras, air berpengaruh terhadap kemudahan pengerjaannya (*workability*). Sedangkan setelah campuran beton mengeras, proporsi air dalam campuran beton akan mempengaruhi kuat tekan beton tersebut.

Nilai proporsi air-semen yang disebut dengan faktor air-semen (FAS) berpengaruh terhadap kuat tekan beton dan kemudahan dalam pengerjaannya (*workability*). Setidaknya dalam jumlah minimal, air diperlukan agar reaksi kimia dalam pengerasan beton dapat terjadi. Air dalam jumlah yang lebih akan meningkatkan kemudahan dalam pengerjaan (*workability*), namun pada saat yang bersamaan juga menurunkan kekuatan beton.

Di samping kuantitasnya, kualitas air yang digunakan dalam campuran beton juga akan mempengaruhi sifat beton. Air sebagai bahan bangunan sebaiknya memenuhi syarat sebagaimana yang ditetapkan dalam standar SK SNI S-04-1989-F tentang Spesifikasi Bahan Bangunan Bagian A, yaitu:

- Bersih.
- Tidak mengandung lumpur, minyak, dan benda melayang lainnya yang dapat dilihat secara visual. Benda-benda tersuspensi ini tidak boleh lebih dari 2 gram/liter.

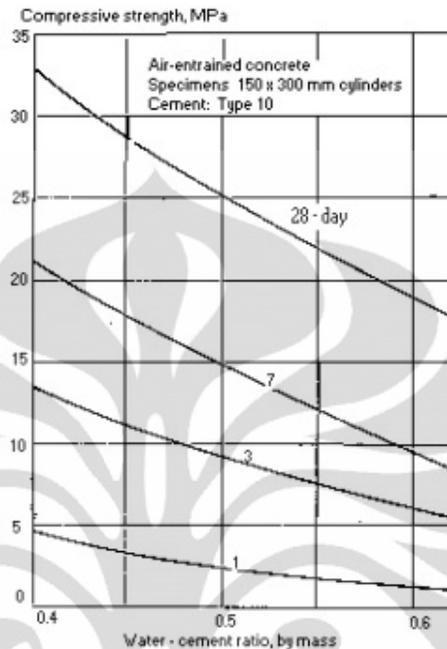
- Tidak mengandung garam-garam yang dapat larut dan dapat merusak beton (asam, zat organik, dan sebagainya) lebih dari 15 gram/liter.
- Tidak mengandung klorida (Cl) lebih dari 0,5 gram/liter. Khusus untuk beton prategang kandungan klorida tidak boleh lebih dari 0,05 gram/liter.
- Tidak mengandung senyawa sulfat (sebagai SO_3) lebih dari 1 gram/liter.

2.2.4 Karakteristik Dasar Beton

1) Kuat Tekan pada Beton

Secara umum, istilah “kekuatan beton” didefinisikan sebagai kuat tekan akibat pembebanan aksial tunggal (*uniaxial*) yang diukur melalui uji tekan pada silinder uji berukuran standar. Kekuatan beton bergantung pada proporsi semen, agregat kasar, agregat halus, air, dan berbagai zat tambahan dalam campuran (*admixtures*). Faktor yang paling berpengaruh terhadap kekuatan beton adalah faktor air-semen (FAS). Sampai batas tertentu, semakin kuat suatu beton, semakin rendah nilai FAS-nya (Gambar 2.2). Meski FAS berbanding terbalik dengan kekuatan beton, namun sebagaimana yang telah disebutkan, air dalam jumlah minimal tetap diperlukan agar reaksi kimia dalam pengerasan beton dapat terjadi.

Kekuatan beton pada umumnya diukur sebagai besaran yang disimbolkan dengan f_c' . Nilai ini merupakan kuat tekan beton berusia 28 hari dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm.



Gambar 2.2 Pengaruh Faktor Air-Semen terhadap Kekuatan Beton

Sumber: Sonag Ready Mix, LLC. <http://www.sonagconcrete.com>, 23 November 2011)

2) Kuat Tarik pada Beton

Pada umumnya, kuat tarik beton jauh lebih rendah dibandingkan kuat tekan beton. MacGregor dan Wight (2005) menyebutkan bahwa nilai kuat tarik beton berkisar antara 8 hingga 15 persen dari kuat tekannya.

Saat ini, terdapat dua standar pengujian untuk mengetahui kuat tarik pada beton menurut *American Standard for Testing Materials (ASTM)*. Masing-masing pengujian tersebut mengukur nilai kuat tarik yang berbeda. Bentuk pengujian pertama, yaitu ASTM C496, merupakan pengujian untuk mengetahui kuat tarik belah pada benda uji beton dengan dimensi yang sama dengan benda uji untuk uji tekan. Bentuk pengujian yang kedua, yaitu ASTM C78, mengukur kuat tarik beton dalam lentur, atau yang dikenal dengan modulus keruntuhan (*modulus of rupture*).

Hasil pengujian dari kedua pengujian tersebut memberikan hasil yang berbeda. Secara umum, kuat tarik beton menurun seiring dengan bertambahnya

volume beton yang mengalami tarik meningkat. Hasil uji tarik lentur pada balok dengan luas penampang 150 mm^2 menunjukkan *modulus of rupture*, f_r bernilai 1,5 kali hasil uji tarik belah, f_{ct} .

2.3 Beton Bertulang

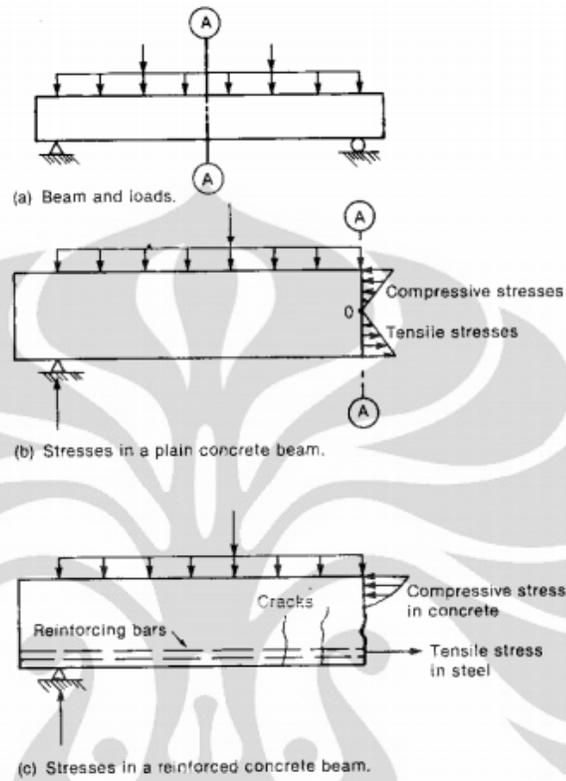
2.3.2 Pengertian

Dalam SNI 03-2847-2002, didefinisikan bahwa beton bertulang adalah beton yang ditulangi dengan luas dan jumlah tulangan yang tidak kurang dari nilai minimal, yang disyaratkan dengan atau tanpa prategang, dan direncanakan berdasarkan asumsi bahwa kedua material bekerja bersama-sama dalam menahan gaya yang bekerja

2.3.3 Kuat Lentur Beton Bertulang

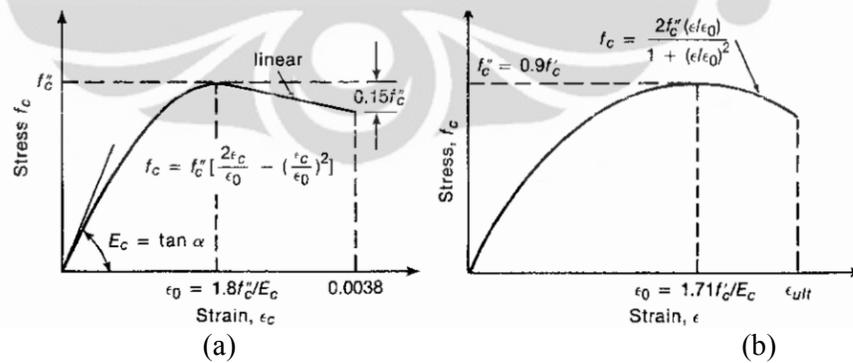
MacGregor dan Wight (2005) menyebutkan bahwa pada dasarnya, beton tanpa tulangan (*plain concrete*) memiliki kuat tekan yang besar, namun kuat tariknya relatif rendah. Akibatnya, retak terjadi ketika beban, penyusutan, atau perubahan temperatur meningkatkan tegangan tarik pada beton. Pada beton tanpa tulangan, momen terhadap titik O akibat beban yang ada, ditahan oleh kopel gaya dalam tarik-tekan (Gambar 2.3). Elemen beton tersebut akan segera mengalami keruntuhan saat keretakan pertama terjadi. Pada beton bertulang, baja tulangan tertanam di dalam beton sedemikian rupa sehingga tegangan tarik yang dialami ditahan oleh baja tulangan tersebut.

Hubungan tegangan-regangan pada penampang beton dapat didasari oleh grafik tegangan-regangan atau diasumsikan sebagai bentuk persegi, trapesium, parabola, atau bentuk lainnya yang dapat merepresentasikan kekuatan yang sebenarnya. Oleh karena itu, penggunaan grafik lain selain grafik tegangan-regangan *Modified Hongstad* atau *Todeschini* dapat dilakukan untuk memudahkan perhitungan matematis, selama grafik tersebut dapat merepresentasikan kekuatan sebenarnya dengan baik.



Gambar 2.3 Tegangan pada Balok Beton Tanpa Tulangan

Sumber: MacGregor dan Wight, 2005



Gambar 2.4 Grafik Tegangan-Regangan *Modified* (a) Hongestad dan (b) Todeschini

Sumber: MacGregor dan Wight, 2005

SNI memungkinkan penggunaan distribusi tegangan sebagai bentuk persegi sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 2.5 untuk perhitungan kekuatan maksimal. Distribusi berbentuk persegi didefinisikan sebagai berikut:

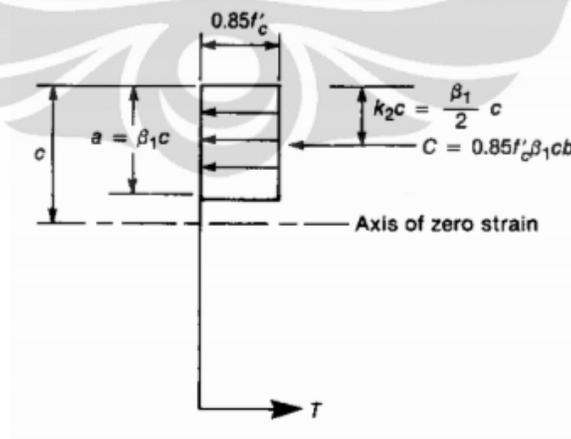
- i. Tegangan sebesar $\alpha_1 f_c'$ terdistribusi merata sepanjang daerah yang ekuivalen dengan daerah tekan yang dibatasi oleh bagian samping penampang melintang dan sebuah garis yang sejajar dengan sumbu netral sejarak $a = \beta_1 c$ dari serat dengan regangan tekan terbesar.
- ii. Jarak c dari serat dengan regangan tekan terbesar ke sumbu netral diukur sejajar dengan sumbu netral tersebut.
- iii. Faktor β_1 yang digunakan diambil dengan nilai sebagai berikut:
 - a) $f_c' \leq 30$ MPa, $\beta_1 = 0,85$
 - b) $30 < f_c' < 55$ MPa, $\beta_1 = 1,09 + 0,008f_c'$
 - c) $f_c' > 55$ MPa, $\beta_1 = 0,65$

Untuk daerah tekan dengan lebar konstan b dan jarak ke sumbu netral adalah c , resultan gaya tekan yang terjadi adalah:

$$C = \alpha_1 \beta_1 f_c' b c \quad (2.17)$$

Momen yang terjadi akibat gaya tersebut terhadap sumbu netral adalah:

$$M = \alpha_1 \beta_1 \left(1 - \frac{\beta_1}{2}\right) f_c' b c^2 \quad (2.18)$$



Gambar 2.5 Distribusi Tegangan Ekuivalen

Sumber: MacGregor dan Wight, 2005

Kuat lentur nominal adalah nilai maksimal yang diperoleh dari resultante gaya tekan dan resultante gaya tarik yang membentuk suatu kopel momen tahanan dalam dengan jarak $d - a/2$, dengan d adalah tinggi efektif penampang balok dan a adalah tinggi blok tekan. Berdasarkan diagram tegangan pada penampang yang ditunjukkan pada Gambar 2.5, dapat dilakukan analisis perhitungan kuat lentur nominal balok dengan persamaan:

$$C_c = 0,85 f_c' a b$$

$$T_s = A_s f_y$$

dengan:

C_c : gaya tekan beton

T_s : gaya tarik baja

f_c' : kuat tekan beton

f_y : tegangan leleh baja

a : tinggi blok tekan

b : lebar balok

A_s : luas tulangan baja tarik

Dengan persamaan kesetimbangan gaya dalam, diperoleh:

$$C_c = T_s$$

$$0,85 f_c' a b = A_s f_y$$

Sehingga diperoleh

$$a = \beta_1 c = \frac{A_s f_y}{0,85 f_c' b}$$

$$c = \frac{a}{\beta_1}$$

Maka kuat lentur nominal balok adalah:

$$M_n = T_s \left(d - \frac{a}{2} \right) = C_c \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

Untuk perkuatan dengan tulangan tunggal, maka rumus kuat lentur nominal balok dapat dituliskan sebagai berikut:

$$M_n = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.19)$$

2.3.4 Kelebihan dan Kekurangan Beton Bertulang

Empat material yang paling sering digunakan dalam konstruksi adalah kayu, baja, batu bata, dan beton bertulang. Beton bertulang memiliki kelebihan dan kekurangan tertentu bila dibandingkan dengan kedua material lain tersebut. Dalam bukunya, MacGregor dan Wight (2005) menyebutkan bahwa kelebihan yang dimiliki beton bertulang sebagai material konstruksi meliputi:

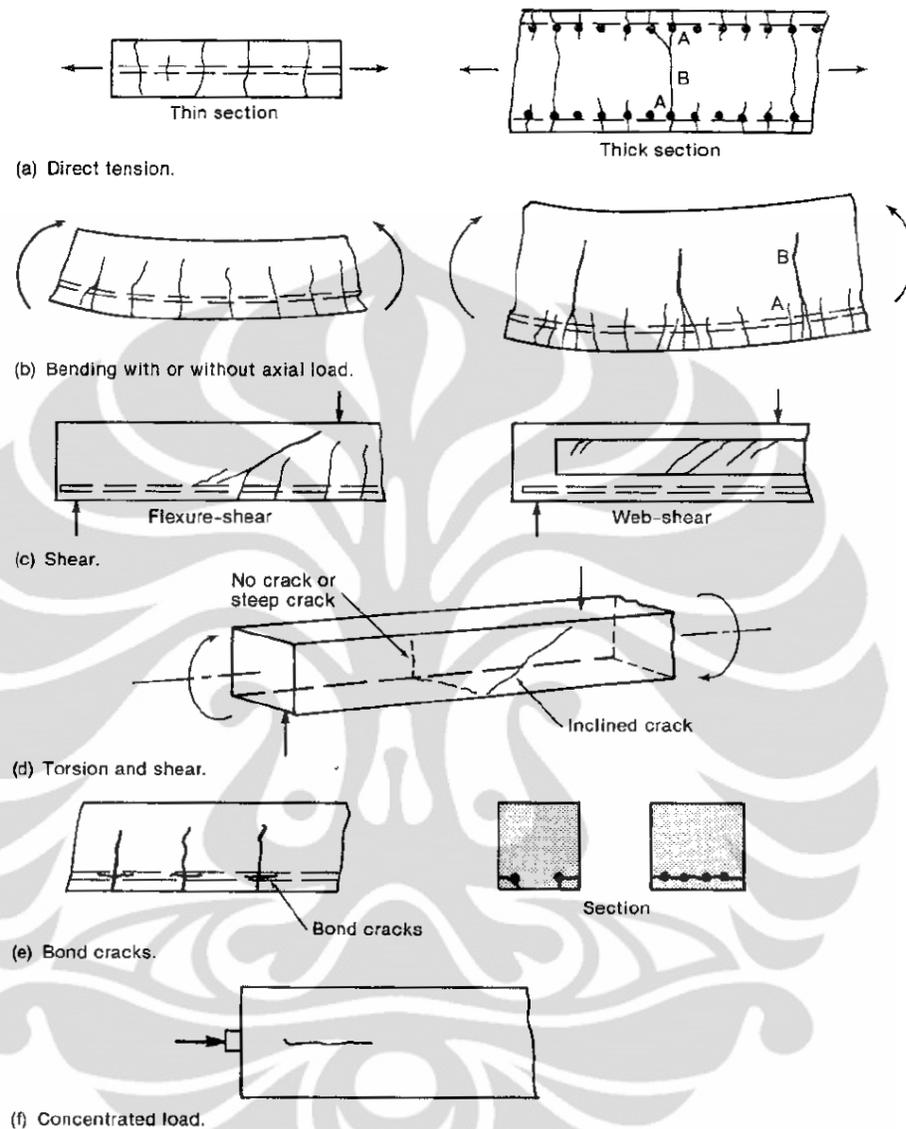
- Relatif lebih ekonomis;
- Mudah dibentuk, sehingga dapat memiliki fungsi struktural dan arsitektural sekaligus;
- Tahan terhadap api;
- Memiliki kekakuan yang baik;
- Membutuhkan perawatan yang relatif lebih sedikit;
- Material pembentuknya mudah diperoleh.

Di sisi lain, beton bertulang juga memiliki kekurangan. Kekurangan beton bertulang sebagai material konstruksi meliputi.

- Kuat tarik relatif rendah;
- Membutuhkan peralatan lebih dalam konstruksi, yaitu bekisting dan pendukung (*shoring* atau *propping*).
- Memiliki kekuatan per satuan berat atau volume yang relatif lebih rendah;
- Volumennya berubah menurut waktu, sehingga cenderung terjadi peningkatan lendutan akibat rangkakan.

2.3.5 Jenis Keretakan

MacGregor dan Wight (2005: 381) menuliskan bahwa tegangan tarik akibat beban, momen, dan lintang/geser menyebabkan pola retak yang berbeda. Ilustrasi bentuk pola retak untuk berbagai jenis mekanisme keretakan ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Jenis Keretakan dan Penyebabnya

Sumber: MacGregor dan Wight, 2005

2.4 Pelat Beton Bertulang

2.4.2 Pengertian

Struktur bangunan beton bertulang terdiri dari serangkaian elemen struktural yang saling berinteraksi untuk menahan beban yang ada pada struktur. Di antara serangkaian elemen struktural tersebut, pelat merupakan salah satunya. Pelat meneruskan beban yang diterimanya ke balok-balok yang menumpunya.

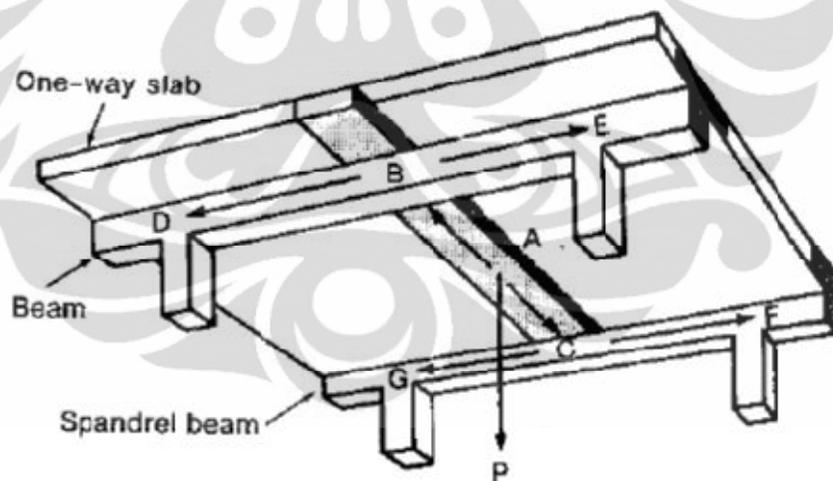
Balok-balok tersebut kemudian menyalurkan beban ke kolom-kolom untuk kemudian di salurkan ke pondasi dan tanah yang menopang struktur tersebut.

2.4.3 Klasifikasi Pelat Beton Bertulang Berdasarkan Arah Penyaluran Beban

Pelat beton bertulang dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok berdasarkan arah penyaluran bebannya, yaitu pelat satu arah dan pelat dua arah.

1) Pelat Satu Arah (*One Way Slab*)

Pelat yang menumpu menerus sepanjang dua tepi atau sisinya dikatakan pelat lantai satu arah. Gambar 2.7 menunjukkan bentuk paling sederhana dari sebuah pelat satu arah. Pada pelat tersebut, beban P yang bekerja di A diteruskan pada arah yang ditunjukkan oleh bagian yang diarsir menuju balok di B dan C . Balok tersebut kemudian mengalirkan beban ke kolom D , E , F , dan G .



Gambar 2.7 Aksi Satu Arah dan Dua Arah pada Pelat

Sumber: MacGregor dan Wight, 2005

2) Pelat Dua Arah (*Two Way Slab*)

Pelat lantai yang ditumpu pada keempat sisinya merupakan pelat dua arah.

2.4.4 *Hollow Core Slab (HCS)*

Selama ini, beberapa inovasi telah dilakukan pada struktur beton bertulang, khususnya untuk elemen pelat dan balok. Sejumlah inovasi di antaranya mengarah pada cara-cara mengurangi berat sendiri beton bertulang. Pada elemen pelat dan balok beton bertulang, diasumsikan bahwa tegangan tekan seluruhnya ditahan oleh bagian beton, sedangkan tegangan tarik seluruhnya ditahan oleh bagian baja. Bagian beton pada penampang melintang yang menahan tegangan tekan hanya sebagian kecil dari ketebalan tersebut. Sementara itu, sisanya tidak menyumbang kekuatan terhadap tegangan tekan, meski berperan dalam menghasilkan momen inersia yang cukup dan terciptanya *bonding* antara beton dan baja, serta kekuatan terhadap geser.

Oleh karena itu, muncul gagasan untuk mengurangi massa elemen beton bertulang dengan meniadakan beton pada bagian tengah elemen yang tidak menyumbang kekuatan terhadap tekan. Meski demikian, untuk menciptakan kuat geser dan momen inersia yang cukup, elemen tersebut tetap dibuat dengan ketebalan tertentu. Kemudian, untuk menghasilkan *bonding* yang cukup, elemen tersebut dibuat dengan tidak meniadakan beton pada bagian yang diperkuat dengan tulangan baja. Salah satu inovasi yang didasari oleh konsep tersebut adalah *hollow core slab*.

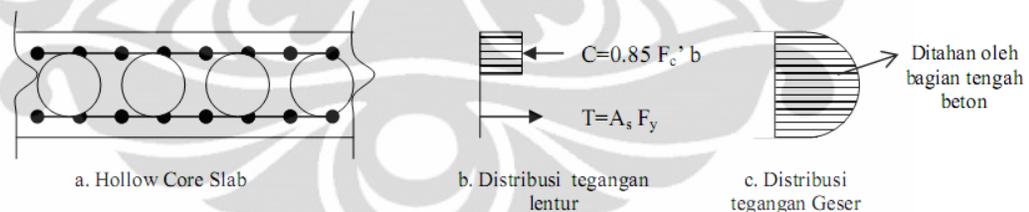
Hollow Core Slab (HCS) merupakan *pelat* beton dengan penampang yang berlubang di tengahnya. Lubang di tengah penampang tersebut memiliki beberapa manfaat, seperti pengurangan volume beton, pengurangan berat pelat, sebagai tempat untuk komponen mekanik dan elektrik, dan sebagainya. Pada umumnya, HCS diperkuat dengan tendon prategang, dan oleh karenanya, HCS diproduksi sebagai beton pracetak.

Fellinger, Stark, dan Joost (2005) dalam tulisannya yang berjudul *Shear and Anchorage Behaviour of Fire Exposed Hollow Core Slabs* menyebutkan bahwa,

Hollow core (HC) slabs are made of pre-cast concrete with pre-tensioned strands. The slabs consist of pre-cast units of typically 1.2 m wide. The cross sectional depth depends on the intended span and ranges between 150-400 mm reaching spans up to 16 m. The number and shape of the hollow cores is adjusted to the depth of the slab. These slabs are very popular in offices and dwellings, thanks to the large span to depth ratio.

This is a result of the reduction of weight, maintaining the effectiveness of the cross section, due to the hollow cores in combination with a relatively high strength of the concrete, typically C45 to C60.

Ide mengenai *Hollow Core Slab* (HCS) berawal dari teori elastis tegangan lentur yang menyebutkan bahwa tegangan paling maksimal pada penampang pelat ditahan oleh sisi terluar penampang. Pada saat kondisi *ultimate* tercapai, kapasitas momen nominal dari penampang ditentukan oleh lengan momen antara resultan tegangan pada sisi tekan dan sisi tarik. Pada beton bertulang, diasumsikan bahwa tegangan tarik sepenuhnya ditahan oleh tulangan baja pada sisi tarik, dan tegangan tekan sepenuhnya ditahan oleh beton pada sisi tekan. Baik sisi tekan maupun tarik pada tegangan lentur, keduanya berada pada sisi luar penampang. Dengan demikian, beton pada bagian tengah diasumsikan tidak menyumbangkan kekuatan lentur (Gambar 2.8). Berdasarkan pada hal tersebut, muncullah pemikiran untuk memberikan lubang pada beton dengan tujuan untuk mengurangi berat sendiri pelat tanpa mengurangi kekuatan lenturnya. Oleh karena itu pula, konsep ini mulai diterapkan pada komponen struktur yang secara dominan menahan tegangan lentur.



Gambar 2.8 Distribusi Tegangan Lentur dan Geser pada Penampang Pelat Beton Berlubang

Sumber: Rastandi, Josia I. dan Mulia Orientilize, 2010

Saat ini, *design code* yang ada telah memuat berbagai hasil penelitian tentang HCS. Meski demikian, berbagai riset tetap dilakukan untuk mengevaluasi dan mengembangkan *design code* tersebut. Studi mengenai kapasitas penampang HCS dalam menahan tegangan geser merupakan hal yang masih terus dikembangkan hingga saat ini, mengingat kegagalan geser merupakan *failure*

mode yang paling rentan terjadi pada HCS sebagai konsekuensi dari berkurangnya luas penampang beton pada HCS.

Dalam penelitiannya, Pajari (2005) melakukan validasi kuat geser pada badan (*web*) penampang HCS prategang terhadap persamaan yang terdapat dalam Eurocode 2 (BS Code). Hasil eksperimen yang dilakukan menunjukkan bahwa perhitungan kapasitas geser dengan Eurocode 2 dan “metode Yang’s” melebihi (*overestimate*) rata-rata nilai kapasitas geser dari seluruh jenis pelat yang diuji. Di antara keduanya, metode Yang memberikan hasil yang lebih baik untuk benda uji dalam penelitian ini. Di samping itu, dari penelitian ini diketahui pula bahwa selisih antara hasil perhitungan dengan hasil eksperimen bervariasi menurut ketebalan dan bentuk lubangnya. Selisih yang lebih besar cenderung terjadi pada pelat yang lebih tipis.

Dalam tulisannya, Hawkins dan Ghosh (2006) menyebutkan bahwa sejak tahun 1970-an, para peneliti telah menyadari bahwa komponen beton bertulang yang menahan lentur tanpa tulangan geser akan mengalami kegagalan geser pada beban yang kurang dari nilai yang diperkirakan dalam ACI 318-05. Oleh karena itu, ditetapkan bahwa apabila V_u melebihi $0,5\phi V_c$, maka diperlukan tulangan geser minimal. Akan tetapi, persyaratan tersebut tidak berlaku secara efektif pada pelat, termasuk HCS. Hal tersebut terjadi karena tebal pelat pada umumnya tidak cukup besar seperti balok. Selain itu, pelat yang relatif tipis membuat penambahan tulangan geser cukup sulit dilakukan. Untuk itu, Hawkins dan Ghosh melakukan studi eksperimental terhadap kekuatan geser dari *one way* HCS prategang dengan ketebalan melebihi 300 mm. Hasil studi eksperimen tersebut akhirnya menunjukkan bahwa *web shear strength* dari ACI lebih rendah dibandingkan dengan hasil uji eksperimen.

Dalam *PCI Manual for the Design of Hollow Core Slabs* disebutkan bahwa terdapat dua metode utama untuk memproduksi komponen *hollow core* di Amerika Serikat. Cara yang pertama disebut dengan sistem cetak-kering (*dry-cast system*) di mana campuran beton dengan *slump* yang sangat rendah dimasukkan ke dalam mesin pencetak. Lubang di dalamnya dibuat dengan auger atau selongsong. Campuran beton kemudian dipadatkan di sekitar lubang tersebut. Sebaliknya, pada cara yang kedua digunakan campuran beton dengan *slump* yang

tinggi yang dituang ke dalam bekisting (baik statis maupun dapat bergerak/*slip forming*). Bekisting tersebut terpasang pada mesin. Pada cara ini, lubang umumnya dibentuk dengan selongsong berisi udara (*pneumatic tube*) yang terpasang pada bekisting, atau dengan menggunakan selongsong panjang yang terpasang pada mesin pencetak.

2.5 Perencanaan Penulangan Pelat Satu Arah

- 1) Menentukan pembebanan yang terjadi;

Pembebanan yang diperhitungkan adalah pembebanan *ultimate* yang merupakan kombinasi dari beban-beban yang bekerja, kombinasi-kombinasi tersebut adalah:

$$U = 1,4 DL$$

$$U = 1,2 DL + 1,6 LL + 0,5 (A \text{ atau } R)$$

$$U = 1,2 DL + 1,0 LL \pm 1,6 W + 0,5 (A \text{ atau } R)$$

$$U = 0,9 DL + 1,6 W$$

$$U = 1,2 DL + 1,0 LL + 1,0 E$$

dengan:

U = Kombinasi beban terfaktor

D = beban mati (*Dead Load*)

L = beban hidup (*Live Load*)

A = beban hidup atap

R = beban air hujan

W = beban angin

E = beban gempa (Ditetapkan berdasarkan SNI 03-1726-1989-F)

- 2) Menghitung gaya dalam *ultimate* yang terjadi, dengan menggunakan tabel koefisien momen ataupun perhitungan statis tak tentu. Gaya dalam *ultimate* pelat untuk selanjutnya diperhitungkan harus kurang dari atau sama dengan gaya dalam rencana/nominal dikalikan faktor reduksinya, yaitu:

$$M_u \leq \phi_m M_n$$

$$V_u \leq \phi_v V_n$$

$$N_u \leq \phi_n N_n$$

$$T_u \leq \phi_t T_n$$

dengan faktor reduksi bernilai sesuai yang diisyaratkan oleh SNI 03-2847-2002, yaitu sesuai Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Faktor Reduksi Kekuatan pada Struktur Beton

Deskripsi gaya dalam		Faktor Reduksi Kekuatan (ϕ)
		SNI 03-2847-2002
Lentur, tanpa beban aksial		0,8
Beban aksial dan beban aksial dengan lentur	Aksial tarik dan aksial tarik dengan lentur	0,8
	Aksial tekan dan aksial tekan dengan lentur (yulangan spiral)	0,7
	Aksial tekan dan aksial tekan dengan lentur (struktur lain)	0,65
Geser dan Torsi		0,75
Tumpuan pada beon kecuali untuk daerah pengangkuran pasca tarik		0,65
Daerah pengangkuran pasca tarik		0,85

3) Mentukan dimensi pelat, yaitu panjang bentang, tebal pelat, tebal selimut, serta tinggi efektif (d) dari penampang pelat sesuai dengan peraturan yang berlaku (ACI Code, SNI 03-2847-2002, PBI 1971).

i. Pada perhitungan pelat, lebar pelat diambil 1000 mm, untuk memudahkan.

ii. Panjang bentang (l) (Pasal 10.7 SNI 03-2847-2002):

Pelat yang tidak menyatu dengan struktur pendukung (tidak monolit):

$$l = l_n + h ; l \leq l_{as-as} \quad (2.20)$$

Pelat yang menyatu dengan struktur pendukung:

$$\text{Jika } l_n \leq 3,0 \text{ m , maka } l = l_n$$

$$\text{Jika } l_n > 3,0 \text{ m , maka } l = l_n + (2 \times 50 \text{ mm})$$

Tebal minimal pelat satu arah (h) (Pasal 11.5.2.3 SNI 03-2847-2002) dapat dilihat pada Tabel 2.2.

iii. Tebal Selimut beton minimal, (Pasal 9.7.1 SNI 03-2847-2002):

Untuk batang tulangan $D \leq 36$, tebal selimut beton, $d_s \geq 20 \text{ mm}$

Untuk batang tulangan $D44 - D56$, tebal selimut beton, $d_s \geq 40 \text{ mm}$

- iv. Tinggi efektif (d) adalah jarak dari atas permukaan pelat hingga tengah tulangan. Sehingga: $d = h - d_s - \frac{1}{2} D_{tulangan}$

Tabel 2.2 Tebal Minimal Pelat Satu Arah

Komponen Struktur	Tebal Minimal, h			
	Terdukung sederhana	Satu ujung menerus	Kedua ujung menerus	kantilever
	Komponen struktur tidak mendukung atau tidak dihubungkan dengan partisi atau konstruksi lainnya yang mungkin rusak oleh lendutan yang besar			
Pelat padat satu arah	$l/20$	$l/24$	$l/28$	$l/10$
Balok atau pelat rusuk satu arah	$l/16$	$l/18,5$	$l/21$	$l/8$

CATATAN:
 Panjang bentang dalam mm.
 Nilai yang diberikan harus digunakan langsung untuk komponen struktur dengan beton normal ($w_c = 2400 \text{ kg/m}^3$) dan tulangan **BJTD 40**, untuk kondisi lain, nilai diatas harus dimodifikasi sebagai berikut:
 a) Untuk struktur beton ringan dengan berat jenis diantara **1500 kg/m³** sampai **2000 kg/m³**, nilai tadi harus dikalikan **dengan (1,65-0,0003w_c)** tetapi tidak kurang dari **1,09** dimana w_c adalah berat jenis dalam **kg/m³**.
 b) Untuk **f_y** selain **400 Mpa**, nilainya harus dikalikan dengan **(0,4 + f_y/700)**

- 4) Menentukan besarnya momen nominal dari penampang (M_n), didapatkan persamaan kuadrat dalam A_s , sehingga didapat besarnya nilai A_s (luas penampang tulangan);

$$M_n = \frac{M_u}{\phi} \quad (2.21)$$

$$M_n = A_s f_y \cdot \left(d - 0,59 \frac{A_s f_y}{f'_c \cdot b} \right) \quad (2.22)$$

- 5) Menghitung rasio luas tulangan terhadap luas beton (ρ), dengan persyaratan $\rho_{min} < \rho < \rho_{max}$.

$$\rho = \frac{A_s}{b \cdot d} \quad (2.23)$$

$$\rho_{min} = 2,5 \cdot 10^{-3} \quad (2.24)$$

$$\rho_{max} = 0,75 \cdot \rho_b \quad (2.25)$$

$$\rho_b = \left[\frac{0,85 f'_c \beta_1}{f_y} \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \right] \quad (2.26)$$

- 6) Setelah semua persyaratan terpenuhi, maka dihitung jumlah tulangan yang dibutuhkan.

$$n = \frac{A_s}{0,25 \cdot \pi \cdot d^2} \quad (2.27)$$

dengan jarak antar tulangan dihitung dengan cara:

$$s = \frac{b}{n} \quad (2.28)$$

dengan b adalah 1000 mm yaitu asumsi lebar pelat dan n adalah jumlah tulangan. Selain itu beberapa syarat yang ditetapkan dalam SNI 03-2847-2002 mengenai spasi tulangan adalah sebagai berikut:

- a) Jarak bersih antar tulangan mimum (s) (Pasal 9.6.1 SNI 03-2847-2002):

$$s \geq D ; \text{ dan } s \geq 25 \text{ mm } (D = \text{Diameter tulangan})$$

Jarak bersih antar tulangan mimum (s) (Pasal 5.3.2.3 SNI 03-2847-2002):

$$s \geq 4/3 msa \text{ (msa = maximum size of agregat); atau } \\ s \geq 40 \text{ mm}$$

- b) Jarak maksimal tulangan (as – as):

Tulangan pokok :

$$s \leq 3 h \text{ dan } s \leq 450 \text{ mm (Pasal 12.5.4)}$$

Tulangan bagi:

$$s \leq 5 h \text{ dan } s \leq 450 \text{ mm (Pasal 9.12.2.2 SNI 03-2847-2002)}$$

7) Perencanaan kapasitas geser

Kapasitas nominal geser V_n adalah:

$$V_n = V_c + V_s$$

dengan V_c adalah kapasitas geser yang disumbangkan oleh beton dan V_s adalah kapasitas geser yang disumbangkan oleh tulangan baja.

Dengan

$$V_c = \frac{\sqrt{f_c'} b_w d}{6} \quad (2.29)$$

dengan:

f_c' = kuat tekan beton

b_w = lebar

d = tinggi efektif

2.6 *Polyethylene Terephthalate*

Polyethylene terephthalate (PET) merupakan polyester termoplastik yang diproduksi secara komersial melalui produk kondensasi yang dikarakterisasi dengan banyaknya ikatan ester yang didistribusikan sepanjang rantai utama polimer. PET merupakan bahan dasar dari botol untuk minuman kemasan sekali pakai.

Proses pembuatan PET memerlukan suhu yang sangat tinggi di atas 100° C untuk produk yang secara komersial memiliki kemampuan kristalisasi cepat. Material ini memiliki sifat mekanik yang baik, ketahanan terhadap pelarut yang bagus, dan stabilitas hidrolitik yang baik.

PET dan polyester lain pada umumnya bebas dari hasil pembakaran berbahaya selain CO₂. Titik leleh PET murni di atas 280° C untuk benda uji yang *annealing* secara lengkap. Sedangkan produk komersialnya meleleh pada suhu 255°C hingga 256°C, karena hasil kristalisasi berkurang dengan adanya pengotor pada rantai utamanya. Pengotor yang ada dalam PET mengakibatkan kekuatan produk akan berkurang, baik sebagai produk film atau serat. Titik transisi gelas bervariasi dalam interval yang luas tergantung pada kemurnian polimernya.

PET secara komersial disintesa dari *etilen glikol* (EG) dan *dimethyl terephthalate* (DMT) melalui esterifikasi langsung dengan *asam terephthalate*

(TPA), dan memiliki lebih banyak gugus dietilen glikol daripada PET yang dibuat dengan proses trans esterifikasi. Polimerisasi terjadi melalui dua tahap, yaitu pertukaran ester dan tahap polimerisasi.

PET dapat larut dalam m-cresol panas, asam trifluoro asetat, oklorofenol, memiliki titik leleh kristalin yang cukup tinggi, yaitu sekitar 270°C dan sifat mekanik yang baik, tahan terhadap perlakuan kimia, hidrolitik, dan pelarut. PET juga digunakan dalam teknik pemlastik sebagai pengganti baja, aluminium dalam pembuatan bahan elektronik. Sifat-sifat fisik dari PET ditunjukkan pada Tabel 2.3.



Gambar 2.9 Ikatan Kimia PET

Sumber: www.wikipedia.com, 16 Juni 2011

Tabel 2.3 Sifat Fisik PET

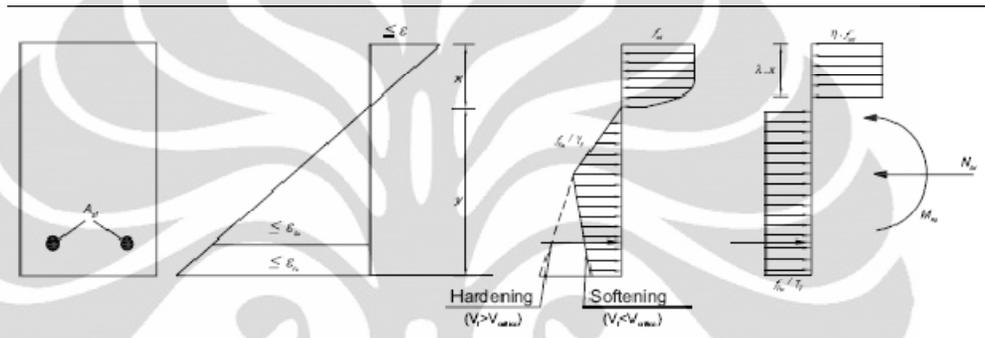
<i>Compression strength</i>	14000 psi
<i>Density</i>	1,35 gr/cm ³
<i>Thermal expansion</i>	117 x 10 ⁻⁶ °C ⁻¹
<i>Elongation</i>	70%
<i>Flexural modulus</i>	400000 psi
<i>Flexural strength</i>	16000 psi
<i>Impact</i>	0,8 izod ft. lbs/in
<i>Thermal conductivity</i>	0,15 W/m-K
<i>Melting point</i>	265 °C
<i>Strength</i>	50 MPa
<i>Tensile strength</i>	6600 Psi
<i>Water absorbtion rate</i>	0,15%

2.7 Beton dengan Perkuatan Serat (*Fiber Reinforced Concrete*)

Dalam metode perhitungan yang umumnya digunakan saat ini, kekuatan tarik beton biasanya diabaikan. Hal ini didasari oleh sifat beton yang getas. Dengan adanya serat pada matriks campuran beton, kekuatan tarik pada campuran beton meningkat. Hal tersebut menjadikan kontribusi campuran beton terhadap

kekuatan tarik beton bertulang meningkat, sehingga kekuatan tarik beton dapat diikutsertakan dalam perhitungan.

Gambar 2.10 menunjukkan distribusi tegangan pada penampang dengan perkuatan serat. Perhitungan tegangan lentur dan kombinasi lentur-aksial, baik dengan atau tanpa keberadaan tulangan baja, dapat dilakukan berdasarkan penyederhanaan yang ditunjukkan pada Gambar 2.10. Nilai-nilai koefisien yang digunakan dalam penyederhanaan tersebut diatur dalam Eurocode 2.



Gambar 2.10 Kondisi Batas untuk Tegangan Tekan dan Lentur pada Beton dengan Serat

Sumber: Maccaferri, 2009

2.8 Mekanisme Kegagalan pada Pelat Satu Arah di Atas Dua Tumpuan

Secara umum, grafik hubungan beban-lendutan dan momen-putaran sudut memiliki suatu bentuk tipikal (Gambar 2.11). Terdapat tiga bagian penting dalam grafik hubungan tersebut, yaitu garis sebelum keretakan, garis pasca keretakan, dan garis leleh (*yielding*). Garis sebelum keretakan dibatasi oleh titik awal (0) dan titik pada grafik ketika retak pertama terjadi. Sementara garis pasca keretakan dibatasi oleh titik saat retak pertama pada beton terjadi dan titik saat baja tulangan tepat akan mengalami leleh. Sedangkan daerah leleh baja tulangan dibatasi oleh titik di mana beban leleh tercapai hingga beban maksimal (*ultimate*) tercapai.

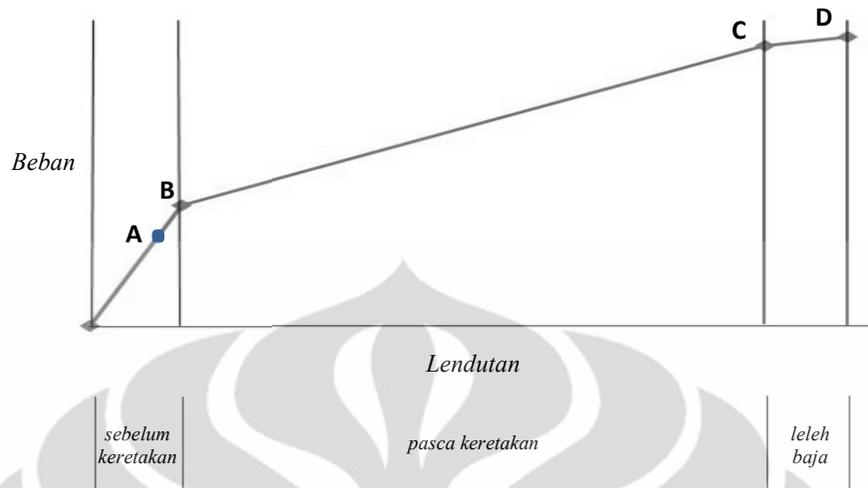
Bentuk grafik yang tipikal tersebut terkait dengan mekanisme kegagalan yang terjadi. Terdapat beberapa tahapan secara umum dalam mekanisme terjadinya keruntuhan pada kelima benda uji pelat tersebut. Mekanisme terjadinya keruntuhan pada benda uji pelat satu arah di atas dua tumpuan dapat dijelaskan dengan prinsip mekanisme keruntuhan yang terjadi pada balok dengan tulangan tunggal, sebagaimana yang dijelaskan MacGregor dan Wight (2005: 106). Hal ini

dapat dilakukan karena perilaku pelat satu arah menyerupai perilaku balok dengan tulangan tunggal.

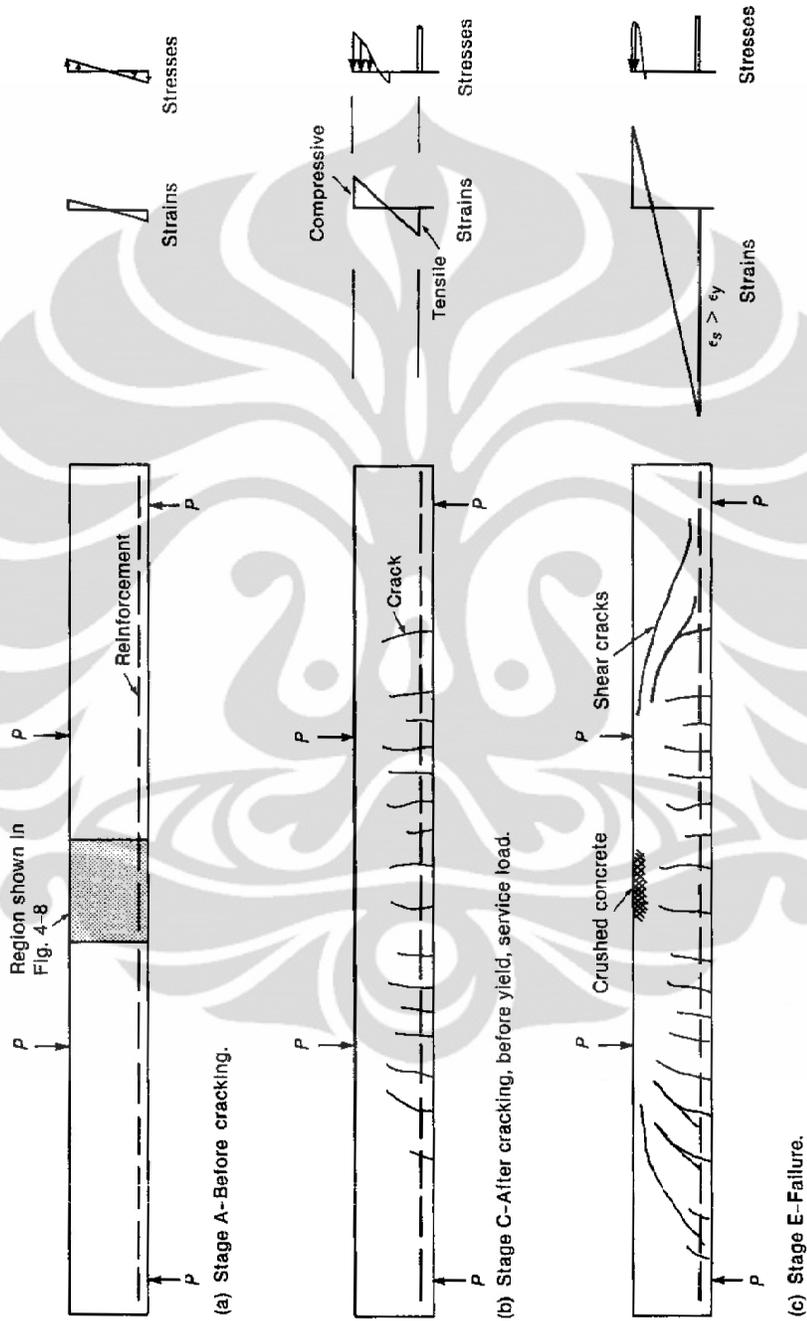
Pada pembebanan awal, pelat satu arah belum mengalami keretakan, sebagaimana yang ditunjukkan pada ilustrasi (Gambar 2.12a). Regangan yang terjadi pada benda uji di tahap ini masih sangat kecil, dan distribusi tegangan dapat dikatakan masih linear. Pada grafik hubungan beban (P) dengan lendutan (δ) (Gambar 2.11), kondisi beban dan lendutan pada tahap ini ditunjukkan oleh titik A.

Keretakan beton mulai terjadi ketika tegangan pada bagian bawah benda uji pelat mencapai kekuatan tarik beton (*tensile strength*). Setelah retak tersebut, gaya tarik dalam beton ditransfer ke baja. Akibatnya, penampang beton yang efektif menahan momen menjadi berkurang, sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 2.12b. Di samping itu, kekakuan pada pelat pun berkurang akibat berkurangnya momen inersia penampang setelah terjadi keretakan. Hal ini ditunjukkan dengan kemiringan grafik yang mulai menjadi landai setelah titik B.

Pada tingkat pembebanan tertentu, tulangan longitudinal pada pelat mencapai titik leleh. Tahap ini ditunjukkan oleh titik D pada grafik hubungan beban (P) dengan lendutan (δ) (Gambar 2.12c). Tegangan pada beton akibat tekan masih dapat dikatakan mendekati linear pada tahap ini. Ketika leleh terjadi, lendutan yang terjadi di tengah bentang meningkat secara signifikan dengan sedikit penambahan beban. Peningkatan lendutan tersebut dapat dilihat pula dari perbedaan antara grafik regangan saat tulangan belum mencapai leleh (Gambar 2.12b) dan grafik regangan saat tulangan telah mencapai leleh (Gambar 2.12c).



Gambar 2.11 Bentuk Tipikal Grafik



Gambar 2.12 Keretakan, Regangan, dan Tegangan

Sumber: MacGregor dan Wight, 2005

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Gambaran Umum

Secara garis besar, studi eksperimental yang dilakukan dalam penelitian ini terbagi menjadi dua bagian, yaitu pengujian benda uji pelat dan pengujian material. Pengujian benda uji pelat dilakukan untuk mengetahui beban maksimal yang dapat ditahan oleh masing-masing benda uji yang menjadi objek dalam penelitian ini. Sementara itu, pengujian material dilakukan untuk mengetahui kekuatan beton yang digunakan terhadap beberapa jenis kegagalan yang terkait. Hal ini berguna dalam melakukan analisis terhadap hasil pengujian benda uji pelat.

Pengujian benda uji pelat dilakukan dengan pembebanan sepertiga bentang (*third point loading*). Dalam pengujian tersebut, benda uji dibebani pada setiap sepertiga bentang untuk mengetahui berapa besar beban yang mampu ditahan hingga benda uji mengalami keruntuhan. Kekuatan dari setiap jenis benda uji tersebut kemudian dibandingkan satu sama lain.

Sementara itu, pengujian material dilakukan dengan enam bentuk pengujian, yaitu uji slump, uji tekan, uji kuat lentur dengan pembebanan sepertiga bentang pada balok sederhana, uji kuat tarik belah, dan uji kuat geser untuk beton, serta uji kuat tarik baja untuk baja tulangan yang digunakan. Standar mengenai prosedur, peralatan, bahan, benda uji, dan perhitungan yang dilakukan dalam pengujian tersebut mengacu pada ASTM 2009 dan akan dijelaskan lebih lanjut pada bagian 3.6.

3.2 Jenis Penelitian

Penelitian ini bersifat eksperimental laboratorik.

3.3 Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Struktural dan Material Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

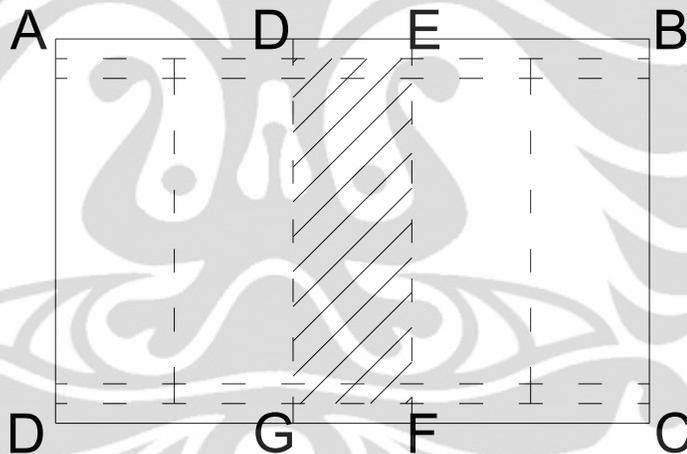
3.4 Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada bulan Februari 2011-Mei 2011.

3.5 Pengujian Pelat

3.5.2 Benda uji

Bila ditinjau sepetak pelat sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 3.1, benda uji pelat dalam studi ini dianggap sebagai suatu bagian (DEFG) dari sepetak pelat satu arah (ABCD) yang ditumpu di atas dua buah balok pada sisi memanjangnya (AB dan DC). Beban yang ditumpu di atas pelat diteruskan ke balok AB dan balok CD. Oleh karena itu, tulangan lentur pelat diposisikan pada arah memendek dari pelat ABCD, atau pada arah memanjang dari pelat DEFG.



Gambar 3.1 Ilustrasi Deskripsi Benda Uji

1) Jenis

Terdapat tiga jenis benda uji pelat pada penelitian ini. Ketiga jenis tersebut merupakan pelat berlubang (HCS) yang divariasikan menurut kadar cacahan PET:

- Benda uji pelat berlubang dengan kadar cacahan PET 0,7%
- Benda uji pelat berlubang dengan kadar cacahan PET 0,5%
- Benda uji pelat berlubang tanpa cacahan PET

2) Dimensi

Seluruh jenis benda uji memiliki dimensi (panjang, lebar, dan tebal) yang sama. Dimensi benda uji dipilih sedemikian rupa untuk dapat memenuhi kriteria sebagai berikut:

- Memiliki perbandingan panjang:lebar:tebal yang cukup untuk dapat diasumsikan sebagai sebuah pelat.
- Dalam bentuk pelat konvensional, memiliki kekuatan maksimal di bawah kapasitas alat pembebanan yang digunakan, sehingga dapat diketahui nilai beban maksimal untuk mencapai keruntuhan.
- Memiliki berat sendiri di bawah kapasitas alat bantu yang digunakan (*forklift* dan dongkrak hidrolik).
- Memiliki ketebalan yang cukup untuk mendapatkan penampang pelat dengan susunan yang telah ditentukan (Gambar 3.2), serta tetap memenuhi syarat tebal pelat padat dan tebal selimut beton minimal yang ditetapkan dalam SNI 03-2847-2002.

Berdasarkan kriteria tersebut, maka dalam penelitian ini ditentukan dimensi benda uji yang digunakan adalah sebagai berikut.

- Panjang = 175 cm
- Lebar = 60 cm
- Tebal = 15 cm

Berikut ini adalah penjabaran perhitungan dalam penentuan dimensi benda uji pelat.

- Tebal Pelat

Dalam bagian 9.7, SNI 03-2847-2002 ditetapkan bahwa tebal selimut beton minimal yang diperlukan untuk pelat yang tidak berhubungan langsung dengan tanah atau cuaca adalah 20 mm. Di samping itu, SNI 03-2847-2002 menetapkan bahwa tebal minimal pelat padat satu arah di atas dua tumpuan sederhana adalah:

$$\frac{l}{20} \left(0,4 + \frac{fy}{700} \right) = \frac{1500}{20} \left(0,4 + \frac{240}{700} \right) = 55,714 \text{ mm}$$

Dengan demikian, tebal pelat minimal menurut SNI SNI 03-2847-2002 adalah:

$$\text{tebal pelat minimal} = 5,6 \text{ cm}$$

Adapun tebal pelat minimal yang dibutuhkan adalah:

$$\text{tebal selimut beton minimal} = 2 \text{ cm}$$

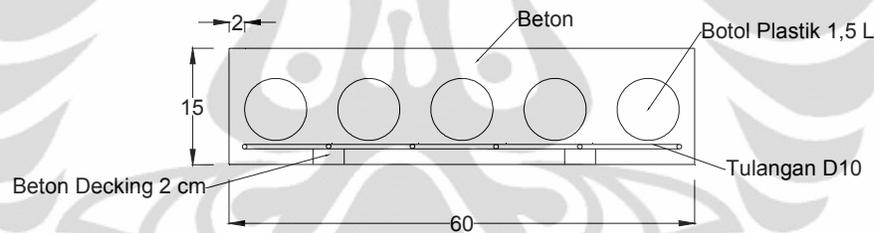
$$\text{diameter botol plastik} = \pm 8 \text{ cm}$$

$$\text{diameter tulangan} = 0,75 \text{ cm}$$

Agar diperoleh pelat dengan potongan melintang sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 3.2, maka tebal pelat yang diperlukan adalah:

$$\text{tebal} = 8 + 2 \cdot 2 + 2 \cdot 0,75 = 13,5 \text{ cm}$$

Berdasarkan perhitungan dan syarat tebal pelat minimal yang dijabarkan di atas, maka tebal pelat yang digunakan adalah 15 cm.



Gambar 3.2 Rencana Potongan Melintang Penampang Benda Uji Pelat Berlubang

- Rasio Tebal-Lebar Pelat

Pada umumnya, pelat memiliki tebal yang besarnya beberapa kali lipat lebih kecil dibandingkan dengan lebarnya. Dengan menggunakan tebal pelat 15 cm, maka dengan lebar pelat sebesar 60 cm hal tersebut dapat terpenuhi.

- Kapasitas Pelat

Kapasitas Momen

$$M_n = A_s f_y \cdot \left(d - 0,59 \frac{A_s f_y}{f'_c \cdot b} \right)$$

$$A_s = \frac{1}{4} \pi 7,5^2 = 265,07 \text{ mm}^2$$

$$\rho = \frac{A_s \text{ bar}}{A_s \text{ beton}} = \frac{265,07}{600 \cdot 150} = 2,9452 \cdot 10^{-3}$$

$$\rho_{min} = 2,5 \cdot 10^{-3} < 2,9452 \cdot 10^{-3} \text{ (OK)}$$

$$f_y = 240 \text{ MPa}$$

$$d = 150 - 20 - \frac{7,5}{2} = 126,25 \text{ mm}$$

$$f'_c = 30 \text{ MPa}$$

$$b = 600 \text{ mm}$$

$$M_n = 265,07 \cdot 240 \left(126,25 - 0,59 \frac{265,07 \cdot 240}{30 \cdot 600} \right) = 7.898.966,15 \text{ Nmm}$$

$$M_u = \frac{M_n}{\phi} = \frac{7.898.966,15}{0,8} = 9.873.707,68 \text{ Nmm}$$

Dengan panjang bentang (L_y) sebesar 1500 mm, maka dengan pembebanan sepertiga bentang, momen *ultimate* tersebut akan tercapai pada pembebanan sebesar:

$$P_u = \frac{9.873.707,68}{500} = 19.747,42 \text{ N}$$

$$P_u = 19,75 \text{ kN} = 1,975 \text{ ton}$$

Dengan demikian, gaya dalam momen tersebut akan tercapai pada pembebanan sebesar 1,975 ton.

Kapasitas Geser

$$V_n = V_c + V_s$$

Karena dalam penelitian ini, pelat tidak diperkuat dengan tulangan geser, maka:

$$V_n = V_c$$

$$V_c = \frac{\sqrt{f'_c} b_w d}{6} = \frac{\sqrt{30} \cdot 600 \cdot 126,25}{6} = 69.149,97 \text{ N}$$

$$\phi V_c = 0,75 \cdot 69.149,97 = 51.862,48 \text{ N}$$

Gaya dalam geser ultimate tersebut akan tercapai pada pembebanan sebesar 5,186 ton.

- Berat

Dengan dimensi sebagaimana yang ditentukan tersebut, maka dengan mengasumsikan bahwa massa jenis beton bertulang yang digunakan adalah 2.400 kg/m^3 , maka dapat diketahui berat sendiri benda uji adalah:

$$W = 2.400 \cdot 0,15 \cdot 0,6 \cdot 1,75 = 378 \text{ kg}$$

3) Bahan Tambah

Perhitungan jumlah PET yang ditambahkan pada campuran beton dilakukan dengan cara sebagai berikut.

i. Hitung volume beton untuk satu benda uji

$$V = V_{padat} - V_{tubang}$$

$$V = 1750 \cdot 60 \cdot 0,150 - 25 \cdot 1500000$$

$$V = 1,2 \cdot 10^8 \text{ mm}^3 = 1,2 \cdot 10^5 \text{ cm}^3$$

ii. Hitung volume bahan tambah yang dibutuhkan

$$V_{PET} = \%PET \cdot V_{beton}$$

Untuk 0,5% dari volume fraksi:

$$V_{PET} = 0,5\% \cdot V_{beton}$$

$$V_{PET} = 0,5\% \cdot 1,2 \cdot 10^5 \text{ cm}^3$$

$$V_{PET} = 600 \text{ cm}^3$$

iii. Konversi jumlah bahan tambah dari besaran volume menjadi massa

$$m = \rho \cdot V$$

$$m = 1,35 \cdot 600$$

$$m = 810 \text{ gr}$$

4) Jumlah

- Dua benda uji pelat berlubang dengan kadar cacahan PET 0,7%

- Dua benda uji pelat berlubang dengan kadar cacahan PET 0,5%
- Satu benda uji pelat berlubang tanpa cacahan PET

3.5.3 Alat dan Bahan

Dalam penelitian ini, alat dan bahan yang digunakan adalah:

- Satu unit *hydraulic jack*
 - o Kapasitas = 20 ton
 - o Kapasitas Izin = 18 ton
- Satu unit *hydraulic jack frame* Hi-Tech Magnus
 - o Tinggi ruang bebas = 1,65 m
- Sembilan unit *dial gauge*
- Satu unit kamera digital
- Baja tulangan polos D8, U24
 - o Diameter tulangan = 7,5 mm
 - o f_y = 240 MPa
- Kawat beton
- Paku
- Beton *decking* dengan tebal 25 mm
- 25 Botol air mineral 1,5 liter untuk setiap benda uji
- Cacahan PET
- Beton ready mix
 - o Mutu beton rencana = K300
 - o *Slump* beton rencana = (15 ± 1) cm

Dalam penelitian ini, campuran beton yang digunakan ditambahkan dengan dua zat tambahan, yaitu *super plasticizer* dan *retarder*. Pada pembuatan benda uji, nilai *slump* yang tinggi diperlukan agar campuran beton dapat dengan mudah mengisi ruangan di antara botol-botol dan tulangan *wiremesh*. Untuk meningkatkan nilai *slump* tanpa meningkatkan FAS, maka pada campuran beton untuk penelitian ini perlu ditambahkan dengan zat tambahan jenis *super plasticizer*. Di samping itu, mengingat dalam penelitian ini benda uji perlu dibuat dengan teliti dan

membutuhkan waktu yang relatif lama, maka untuk memperlambat terjadinya pengerasan beton, campuran beton perlu ditambahkan dengan zat tambahan jenis *retarder*.

Untuk mengantisipasi terjadinya lubang/keropos pada benda uji akibat kecilnya celah-celah di antara botol, maka dalam eksperimen ini digunakan beton *self compacting concrete* (SCC). Beton ini memiliki *workability* yang tinggi dan dimensi agregat yang kecil, sehingga dapat mengalir masuk ke sela-sela rongga antar botol tanpa perlu dipadatkan terlalu lama.

3.5.4 Prosedur Kerja

1) Tahap Pembuatan Benda uji

Persiapan Botol Plastik Pembentuk Lubang

- i. Lepaskan label merk pada botol dan bersihkan permukaan luar botol dari kotoran.
- ii. Lakukan pemeriksaan pada kondisi botol. Pastikan tidak ada kebocoran pada permukaan botol dan mulut botol telah tertutup rapat.
- iii. Buat rangkaian botol sesuai dengan yang dikehendaki. Untuk membuat satu rangkaian yang terdiri dari 5 botol, misalnya, terlebih dahulu sambungkan dua buah botol pada bagian tutupnya. Kemudian sambungkan dua pasang botol yang sudah dirangkai pada bagian dasarnya. Terakhir, sambung salah satu ujung rangkaian botol tersebut dengan satu botol lainnya. Penyambungan botol dilakukan dengan menggunakan *seal tape*. Pastikan sambungan terikat dengan baik dan rapat.

Persiapan Bahan Tambah

- i. Siapkan PET yang telah dicacah dengan ukuran maksimal ± 2 cm.
- ii. Timbang PET sesuai dengan volume fraksi yang dibutuhkan.

Persiapan Pengecoran

- i. Rangkai tulangan baja yang akan digunakan sesuai dengan rencana. Sambungan antar tulangan baja dapat diikat dengan menggunakan kawat beton atau dilas.
- ii. Siapkan bekisting yang akan digunakan. Bersihkan permukaan bekisting dari kotoran dan debu yang dapat merusak hasil pengecoran.
- iii. Pasang plastik cor pada permukaan bagian dalam bekisting.
- iv. Susun beton *decking*, baja tulangan yang telah dirangkai, dan rangkaian botol air mineral di dalam bekisting seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2.
- v. Untuk menjaga agar botol tidak berpindah posisi, ikat rangkaian botol pada tulangan baja dengan menggunakan kawat beton.
- vi. Untuk menjaga agar tulangan dan botol tidak terangkat ketika pengecoran dilakukan, ikat tulangan baja ke bekisting dengan menggunakan kawat beton.

Pengecoran

- i. Lakukan pengujian *slump* terhadap beton *readymix* yang akan digunakan.
- ii. Tuang beton *readymix* dari truk *mixer* ke dalam wadah pencampuran. Pada saat yang bersamaan, tuang cacahan PET yang telah disiapkan di depan mulut corong truk *mixer* secara perlahan.
- iii. Dalam menuangkan beton *readymix* ke dalam wadah pencampuran, pastikan volume yang tertuang sesuai dengan volume beton yang dibutuhkan untuk menghasilkan volume fraksi bahan tambah sesuai rencana. Hal ini dapat dilakukan dengan memberi tanda pada ketinggian tertentu di dinding dalam wadah pencampuran sesuai dengan volume yang dibutuhkan.
- iv. Aduk beton dalam wadah pencampuran untuk memastikan bahwa bahan tambah telah tercampur secara merata.

- v. Tuang campuran beton dari wadah pencampuran ke dalam bekisting yang telah disiapkan. Penuangan dapat dilakukan dengan menggunakan bantuan alat, seperti ember atau gerobak.
- vi. Padatkan campuran beton dengan cara mengetuk-ngetukkan sisi bekisting dengan sebuah tongkat secara merata agar tidak terdapat *void* di dalam pelat, serta dengan menusuk-nusukkan campuran beton di sela-sela botol.
- vii. Biarkan pelat beton mengeras selama satu hari.
- viii. Lakukan perawatan secara teratur dan konstan selama 28 hari.



Gambar 3.3 Pemasangan Plastik Cor



Gambar 3.4 Pemasangan Tulangan Lentur dan Beton *Decking*



Gambar 3.5 Pemasangan Botol PET



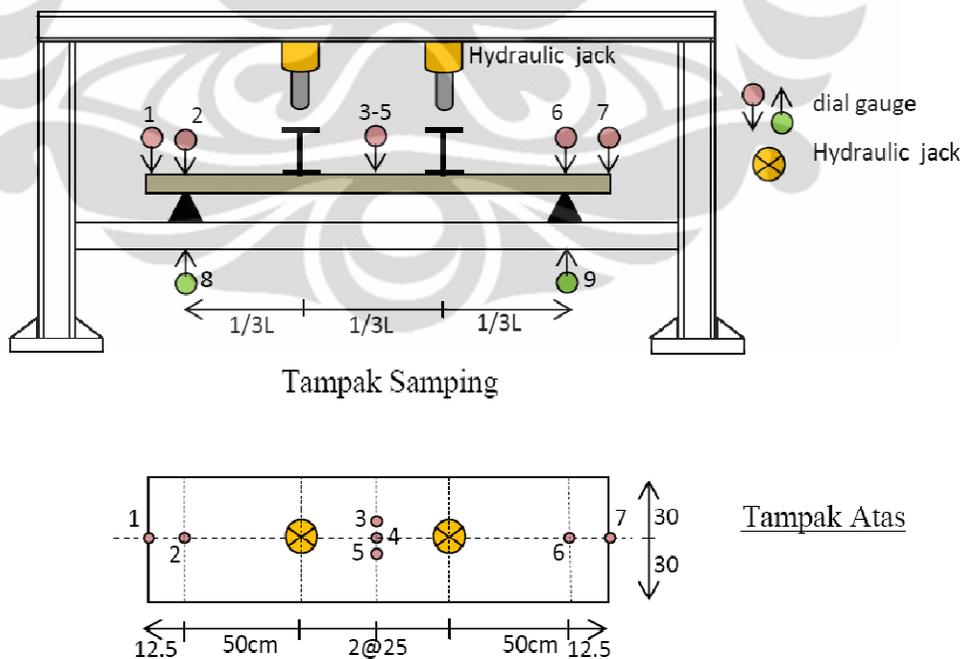
Gambar 3.6 Penambahan PET dalam Campuran Beton



Gambar 3.7 Pengecoran

2) Tahap Pengujian Benda uji

- i. Lepas bekisting di sekeliling benda uji.
- ii. Letakkan benda uji yang akan diuji di atas dua tumpuan.
- iii. Cat bagian sisi pelat dengan warna putih agar retak yang terjadi dapat terlihat dengan jelas.
- iv. Setelah cat mengering, buat garis-garis vertikal berjarak 5 atau 10 cm yang diukut dari tengah bentang pelat.
- v. Susun seluruh peralatan dan benda uji sebagaimana yang telah direncanakan (Gambar 3.8).
- vi. Setelah seluruh peralatan dan benda uji telah tersusun sesuai rencana, lakukan pembebanan pada benda uji dengan *hydraulic jack*.
- vii. Lakukan pencatatan nilai beban dan regangan yang terjadi setiap penambahan beban 2 kN (untuk beban 0 s.d 6 kN) dan setiap penambahan beban 1 kN (untuk beban lebih dari 6 kN).
- viii. Lakukan pencatatan nilai beban dan regangan yang terjadi pada saat beban mencapai nilai maksimal.



Gambar 3.8 Susunan Peralatan Pengujian

Sumber: Rastandi dan Orientilize, 2011

3.5.5 Pengolahan Data

a) Grafik Beban-Lendutan

- i. Dari data hasil pengujian yang dilakukan, diperoleh nilai beban (P) dan lendutan (δ). Nilai yang digunakan adalah nilai beban dan lendutan pada tengah bentang.
- ii. Plot nilai tersebut pada koordinat dengan nilai lendutan pada sumbu tegak dan nilai lendutan pada sumbu mendatar.

b) Grafik Momen-Putaran Sudut

- i. Dengan mengalikan nilai beban (P) dengan jarak beban ke perletakan ($L/3$), dapat diperoleh nilai momen (M) yang terjadi pada setiap pembebanan.
- ii. Nilai putaran sudut diperoleh dengan membagi nilai lendutan pada *dial gauge* yang terletak di ujung benda uji dengan jarak ujung benda uji ke perletakan terdekat.
- iii. Plot nilai momen dan putaran sudut yang terjadi pada koordinat dengan nilai putaran sudut sebagai sumbu mendatar dan nilai momen sebagai sumbu tegak.

3.6 Pengujian Kekuatan Beton

3.6.1 Uji Tekan Beton

1) Tujuan

Uji tekan beton dilakukan untuk mengetahui kuat tekan benda uji beton berbentuk silinder.

2) Peralatan

- Alat uji tekan beton
- Satu set alat pelapis (*capping*)
- Timbangan dengan ketelitian 0,3 % dari berat contoh.

3) Benda uji

Benda uji yang diuji dalam pada pengujian ini merupakan silinder beton dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm sebanyak 5 buah untuk setiap jenis campuran beton (5 benda uji campuran beton tanpa tambahan cacahan PET, 5 benda uji campuran beton dengan kadar cacahan PET 0,5%, dan 5 benda uji campuran beton dengan kadar cacahan PET 0,7%).

4) Prosedur

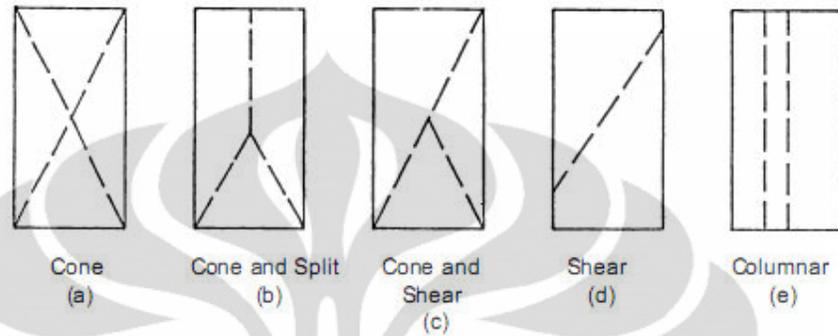
a) Prosedur Persiapan

- i. Keluarkan benda uji yang akan ditentukan kuat tekannya dari bak perendam 1 hari sebelum waktu uji yang ditentukan, kemudian bersihkan dari kotoran yang menempel dengan kain lembab.
- ii. Keesokan harinya, tentukan berat dan ukuran benda uji.
- iii. Lapsi permukaan atas dan bawah benda uji (*capping*) dengan mortar belerang, dengan cara:
 - iv. Lelehkan mortar belerang di dalam pot peleleh sampai suhu 130°C.
 - Lapsi cetakan pelapis dengan gemuk
 - Tuang mortar belerang ke dalam cetakan pelapis
 - Letakkan benda uji tegak lurus pada cetakan pelapis hingga mortar belerang cair mengeras.
 - Dengan cara yang sama lakukan pelapisan pada permukaan bawahnya.
- v. Diamkan benda uji selama ± 1 jam sampai lapisan belerang mengering.

b) Prosedur Pengujian

- i. Siapkan benda uji silinder beton berusia 28 hari yang telah melalui proses perawatan.
- ii. Lakukan pengukuran dimensi dan berat benda uji.
- iii. Letakkan Benda uji yang telah diberi lapisan permukaan atas dan bawah di atas mesin uji tekan secara sentris.
- iv. Jalankan alat uji tekan dengan penambahan beban konstan antara 2 hingga 4 kg/cm² per detik.

- v. Lakukan penambahan beban sampai benda uji hancur.
- vi. Catat beban maksimal.
- vii. Amati bentuk keruntuhan serta catat keadaan benda uji (Gambar 3.9).



Gambar 3.9 Pola Keretakan pada Beton

Sumber: American Society for Testing Materials, 2005:

5) Perhitungan

Kuat tekan beton diperhitungkan berdasarkan rumus berikut:

$$f = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

dengan:

f = Tegangan tekan beton (kg/cm^2)

P = Gaya tekan (kg)

A = Luas penampang silinder beton (cm^2)

3.6.2 Pengujian Kuat Lentur dengan Pembebanan Sepertiga Bentang pada Balok Sederhana

1) Tujuan

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kekuatan lentur pada beton yang diuji dengan menggunakan balok sederhana yang dibebani di setiap sepertiga bentang.

2) Peralatan

- Mesin uji lentur (*flexural strength testing machine*)
- *Mold* balok berukuran 15 cm x 15 cm x 60 cm

3) Benda uji

Benda uji yang digunakan dalam pengujian ini adalah balok beton sederhana berukuran 15 cm x 15 cm x 60 cm. Jumlah benda uji yang disediakan adalah sebanyak 3 buah untuk setiap jenis campuran beton (3 benda uji untuk campuran beton biasa, 3 benda uji untuk campuran beton dengan cacahan PET 0,5%, dan 3 benda uji untuk campuran beton dengan cacahan PET 0,7%).

4) Prosedur

a) Prosedur Persiapan

- i. Buat benda uji balok berukuran 15 cm x 15 cm x 60 cm.

b) Prosedur Pengujian

- i. Pengujian lentur ini harus dilakukan segera setelah diambil dari tempat perawatan. Pengeringan permukaan pada benda uji akan mengurangi kekuatan lentur yang terukur.
- ii. Tentukan panjang bentang (L), yaitu tiga kali tinggi balok pada posisi simetris memanjang (d).
- iii. Atur posisi roda baja bagian bawah untuk meletakkan benda uji
- iv. Letakkan balok pada kedua perletakan mesin uji lentur secara simetris
- v. Beri beban garis sejarak $1/3$ bagian dari perletakan secara simetris.
- vi. Hidupkan alat uji lentur.
- vii. Berikan beban secara tetap dan berkesinambungan tanpa ada beban kejut sampai keruntuhan terjadi.
- viii. Berikan beban sedemikian rupa sehingga terjadi peningkatan tegangan maksimal pada sisi tarik antara 125 dan 175 psi/menit (0,86 dan 1,21 MPa per menit) hingga keruntuhan terjadi

Pembebanan yang diberikan mengikuti persamaan:

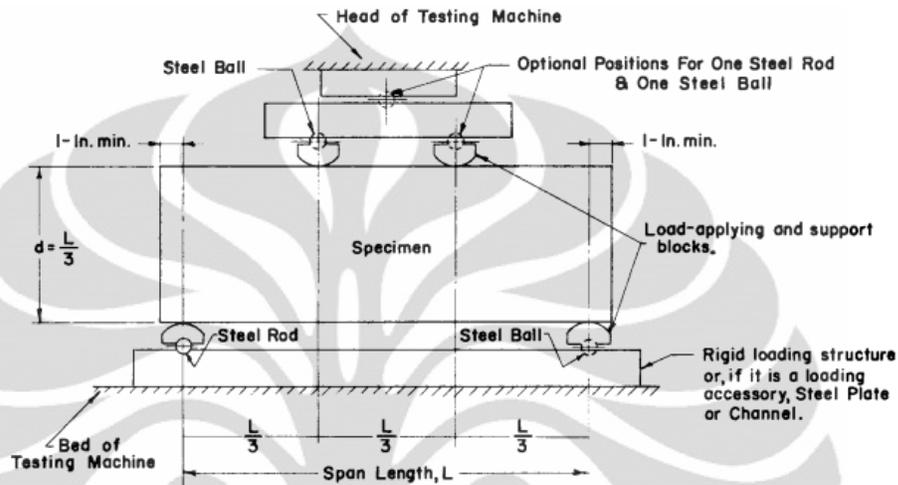
$$r = Sbd^2/L \quad (3.2)$$

dengan:

r = beban per satuan waktu (N/menit)

S = peningkatan tegangan maksimal pada bagian tarik (MPa/menit)

- b = tebal benda uji (mm)
 d = tinggi benda uji (mm)
 L = panjang bentang (mm)



Gambar 3.10 Posisi Benda Uji Kuat Lentur

Sumber: American Society for Testing Materials, 2008

5) Perhitungan

Untuk keruntuhan yang terjadi pada bagian tengah bentang, *modulus of rupture* (R) dihitung berdasarkan persamaan berikut:

- Keruntuhan pada tengah bentang:

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad (kg/cm^2) \quad (3.3)$$

- Keruntuhan yang terjadi pada bagian tarik di luar tengah bentang:

$$R = \frac{3Pa}{bd^2} \quad (kg/cm^2) \quad (3.4)$$

dengan:

- R = modulus of rupture (MPa)
 P = beban maksimal yang terjadi (N)
 L = panjang bentang (mm)
 b = lebar benda uji (mm)

d = tinggi benda uji (mm)

a = jarak rata-rata dari garis keruntuhan dan titik perletakan terdekat (mm)

- Bila keretakan terjadi pada sisi tarik di luar sepertiga bentang bagian tengah lebih dari 5% panjang bentang, hasil pengujian tersebut diabaikan.

3.6.3 Uji Tarik Belah

1) Tujuan

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kuat tarik belah pada suatu benda uji beton.

2) Peralatan

- Alat uji tekan beton
- Lempengan besi untuk membagi rata beban

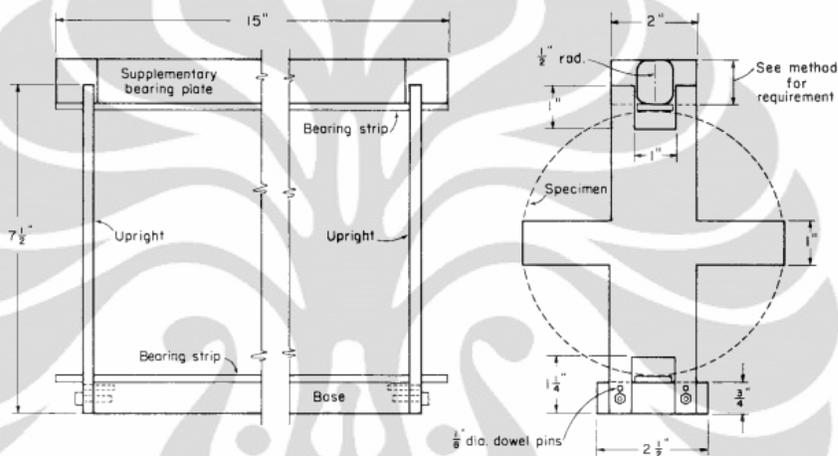
3) Benda uji

Benda uji yang diuji dalam pada pengujian ini merupakan silinder beton dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm sebanyak 5 buah untuk setiap jenis campuran beton (5 benda uji campuran beton tanpa tambahan cacahan PET, 5 benda uji campuran beton dengan kadar cacahan PET 0,5%, dan 5 benda uji campuran beton dengan kadar cacahan PET 0,7%.

4) Prosedur

- Gambarkan garis diameter pada masing-masing ujung benda uji agar keduanya berada pada bidang aksial yang sama.
- Lakukan pengukuran dimensi dan berat benda uji.
- Letakkan benda uji pada garis bidang kayu kemudian selaraskan agar garis diameter pada ujung benda uji berpusat atau tegak lurus dengan garis bidang kayu.

- iv. Letakkan garis bidang kayu yang kedua dan bearing bar sepanjang silinder dan kemudian selaraskan agar garis diameter pada ujung benda uji berpusat atau tegak lurus dengan garis bidang kayu.
- v. Lakukan pembebanan dengan peningkatan yang konstan antara 7,03 kg/cm² sampai 14,06 kg/cm² per menit.
- vi. Catat beban maksimal saat terjadi keruntuhan.



Gambar 3.11 Penempatan Benda Uji Tarik Belah
Sumber: American Society for Testing Materials, 1996

5) Perhitungan

Kekuatan tarik belah beton dihitung dengan persamaan:

$$T = \frac{2P}{\pi ld} \quad (3.5)$$

dengan:

T = kuat tarik belah (kPa)

P = beban maksimal saat runtuh (kg)

l = panjang silinder (cm)

d = diameter (cm)

3.6.4 Uji Geser

1) Tujuan

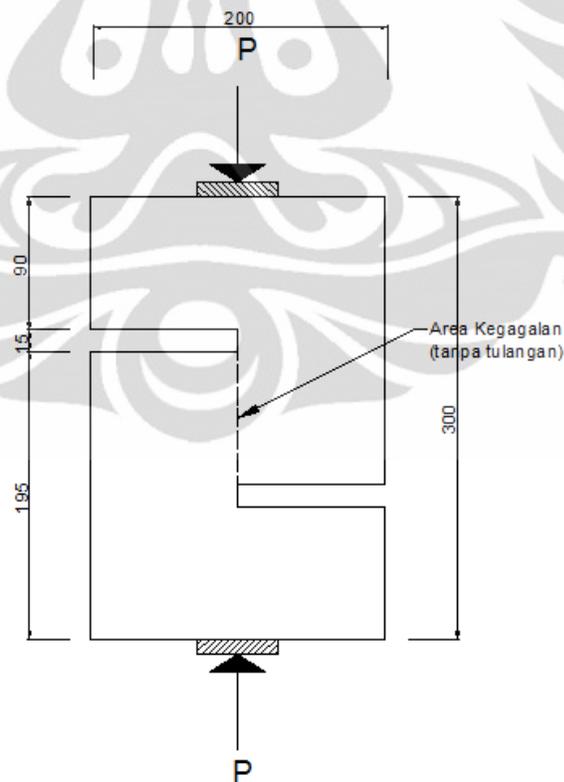
Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan beton mentransfer geser.

2) Peralatan

- Alat uji tekan

3) Benda uji

- Bentuk benda uji yang digunakan pada pengujian ini ditunjukkan pada Gambar 3.12.
- Untuk masing-masing jenis campuran beton, digunakan tiga buah benda uji.



Gambar 3.12 Benda Uji Kuat Geser

Sumber: Mahendya, 2008

4) Prosedur

- Lakukan pengukuran dimensi dan berat benda uji.
- Tempatkan benda uji pada mesin uji tekan secara sentris.
- Lakukan pembebanan dengan alat uji tekan.
- Catat beban saat terjadi keruntuhan.

3.6.5 Pengujian Kuat Tarik Baja Tulangan

1) Tujuan

Pengujian kuat tarik baja tulangan *wiremesh* dilakukan untuk mendapatkan nilai dari tegangan tarik (f_y) baja.

2) Peralatan

- Mesin uji tarik dengan persyaratan:
 - o Mesin harus dapat menarik benda uji dengan kecepatan merata dan dapat diatur sehingga kecepatan naiknya tegangan tidak melebihi 1 kg/mm^2 tiap detik.
 - o Ketelitian pembacaan sebaiknya sebesar $1/10$ x beban maksimal menurut skala penunjuk beban pada mesin uji tarik.
- Alat ukur geser
- Alat pemotong baja
- Alat penggores batang percobaan
- Mesin bubut

3) Benda uji

Benda uji yang diuji pada pengujian ini adalah tulangan baja yang digunakan sebagai tulangan lentur sebanyak tiga benda uji.

4) Prosedur

- i. Benda uji dipotong dengan menggunakan alat pemotong baja, sesuai aturan.
- ii. Jepit benda uji pada pegangan h pada alat penjepit mesin uji tarik. Sumbu alat penjepit harus berimpit dengan sumbu benda uji.

- iii. Jalankan mesin dengan kecepatan tarik 1 kg/mm^2 per detik dan amati serta catat kenaikan beban serta kenaikan panjang yang terjadi hingga benda uji putus.

3.7 Jadwal Penelitian

Jadwal penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Jadwal Penelitian

No	Kegiatan	Maret				April				Mei					Juni			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4
1	Pembuatan Benda Uji																	
2	Perawatan Benda Uji																	
3	Pengujian Pelat																	
4	Pengujian Material																	
5	Pengolahan Data Eksperimen																	
6	Analisis																	

BAB 4

PENGOLAHAN DATA DAN ANALISIS

4.1 Gambaran Umum

Eksperimen ini, yang terdiri dari pembuatan dan pengujian benda uji, berlangsung dari 13 Maret 2011 hingga 13 Mei 2011. Pembuatan benda uji dilaksanakan pada tanggal 13 Maret 2011 di lapangan parkir Gedung Engineering Center, Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Sementara itu, pengujian benda uji beton dan pelat dilaksanakan dari tanggal 10 April 2011 hingga 13 Mei 2011 di Laboratorium Struktural dan Material, Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Secara keseluruhan, terdapat 48 benda uji material dan 5 benda uji pelat dalam studi ini. Penjabaran seluruh benda uji yang ada dan kode penamaannya ditunjukkan pada Lampiran 1.

Selama eksperimen ini berlangsung, terdapat sejumlah catatan mengenai kondisi setiap benda uji pelat yang ada. Berikut ini dijelaskan secara singkat kondisi setiap benda uji pelat tersebut.

- 1) Pelat HCS Beton Normal (HCS-N)
Pengujian benda uji pelat HCS tanpa campuran PET (HCS-N) dilaksanakan pada tanggal 10 April 2011.
- 2) Pelat HCS Beton dengan Tambahan PET 0,5% No. 1 (HCS-0,5-1)
Pengujian benda uji pertama pelat HCS dengan campuran 0,5% PET (HCS-0,5-1) dilaksanakan pada tanggal 20 April 2011.
- 3) Pelat HCS Beton dengan Tambahan PET 0,5% No. 2 (HCS-0,5-2)
Pengujian benda uji kedua pelat HCS dengan campuran 0,5% PET (HCS-0,5-2) dilaksanakan pada tanggal 22 April 2011.

- 4) Pelat HCS Beton dengan Tambahan PET 0,7% No. 1 (HCS-0,7-1)
Pengujian benda uji pertama pelat HCS dengan campuran 0,7% PET (HCS-0,7-1) dilaksanakan pada tanggal 10 April 2011.
- 5) Pelat HCS Beton dengan Tambahan PET 0,7% No. 1 (HCS-0,7-2)
Pengujian benda uji kedua pelat HCS dengan campuran 0,7% PET (HCS-0,7-2) dilaksanakan pada tanggal 13 Mei 2011. Benda uji ini tidak tercetak dengan sempurna pada sisi bawahnya. Pada kedua bagian tumpuan benda uji ini terdapat keropos yang cukup besar, karena beton tidak mengisi ruang pada bagian tersebut ketika pengecoran dilakukan. Untuk memperbaikinya, benda uji ini di-*grouting* di dua bagian untuk menutupi bagian tersebut. Volume *grouting* yang diaplikasikan pada benda uji di kedua bagian tersebut berturut-turut sebesar 1,6 liter dan 3,2 liter.

4.2 Hasil Pengujian

Pada bagian ini akan dipaparkan data hasil penelitian, baik hasil pengujian material maupun hasil pengujian pelat. Hasil pengujian material akan dipaparkan berdasarkan jenis pengujiannya. Sementara itu, hasil pengujian pelat akan dibahas secara terpisah untuk setiap benda uji.

4.2.2 Pengujian Material

1) Uji *Flow* Beton

Sebagai bagian dari prosedur pengecoran dengan beton SCC, pengujian *flow* dilakukan pada saat beton *readymix* tiba di lokasi pembuatan benda uji. Pengujian *flow* ini hanya dilakukan pada beton tanpa tambahan PET. Dari hasil pengujian, nilai *flow* beton *readymix* yang digunakan dalam eksperimen ini adalah 34 cm. Nilai *flow* tersebut terlalu rendah untuk beton SCC. Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa beton yang digunakan dalam pengecoran ini memiliki tingkat kekentalan yang terlalu tinggi. Hal ini berdampak pada berkurangnya tingkat *workability*.



Gambar 4.1 Peralatan Uji *Flow*



Gambar 4.2 Pengujian *Flow*

2) Uji Tekan Beton

Pengujian benda uji tekan beton dilaksanakan pada tanggal 13 April 2011. Data hasil uji tekan beton selengkapnya ditunjukkan pada Lampiran 2. Dari hasil pengujian, diketahui bahwa mutu ketiga jenis beton dalam eksperimen ini adalah:

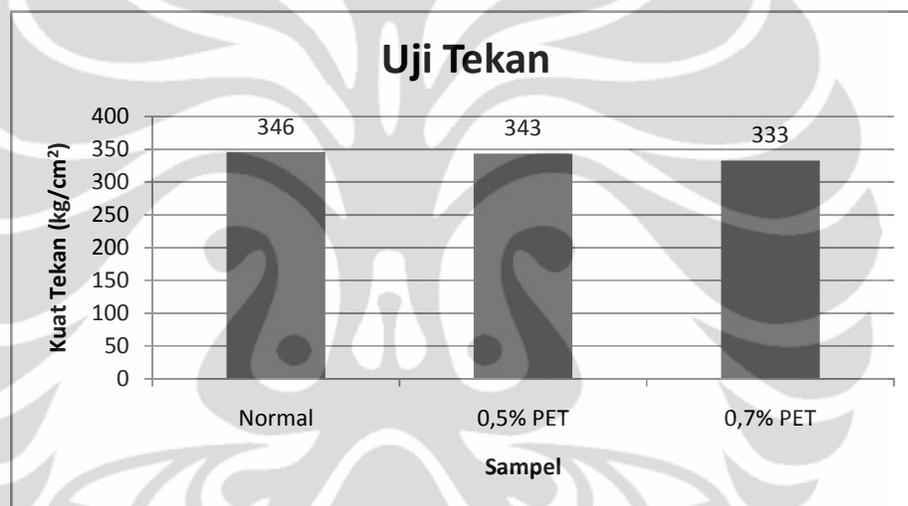
Beton normal tanpa tambahan : $f_c' = 346 \text{ kg/cm}^2 = 34 \text{ MPa}$

Beton dengan tambahan PET 0,5% : $f_c' = 343 \text{ kg/cm}^2 = 34 \text{ MPa}$

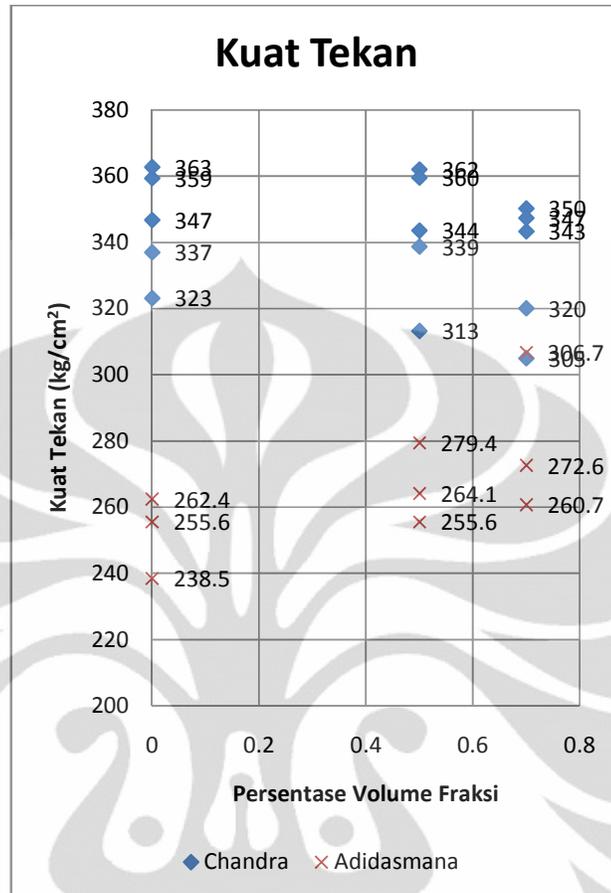
Beton dengan tambahan PET 0,7% : $f_c' = 333 \text{ kg/cm}^2 = 33 \text{ MPa}$

Dari hasil uji tekan beton tersebut tampak bahwa mutu beton dengan bahan tambah PET dalam volume fraksi yang digunakan tidak berbeda secara signifikan dibandingkan dengan mutu beton normal tanpa bahan tambah.

Perbandingan antara hasil pengujian kuat tekan yang dilakukan dalam eksperimen ini dengan yang telah dilakukan pada studi sebelumnya oleh Adidasmana (2008), ditunjukkan pada Gambar 4.4. Dari perbandingan tersebut, tampak adanya kecenderungan yang berbeda. Dari hasil pengujian kuat tekan dalam eksperimen ini, kuat tekan beton dengan tambahan PET sebesar 0,7% dari volume fraksi justru lebih rendah dibandingkan dengan variasi beton lainnya. Meski demikian, penurunan yang terjadi dapat dikatakan tidak signifikan.



Gambar 4.3 Perbandingan Hasil Uji Kuat Tekan



Gambar 4.4 Perbandingan Hasil Uji Tekan Chandra dan Adidasmana



Gambar 4.5 Uji Tekan Beton

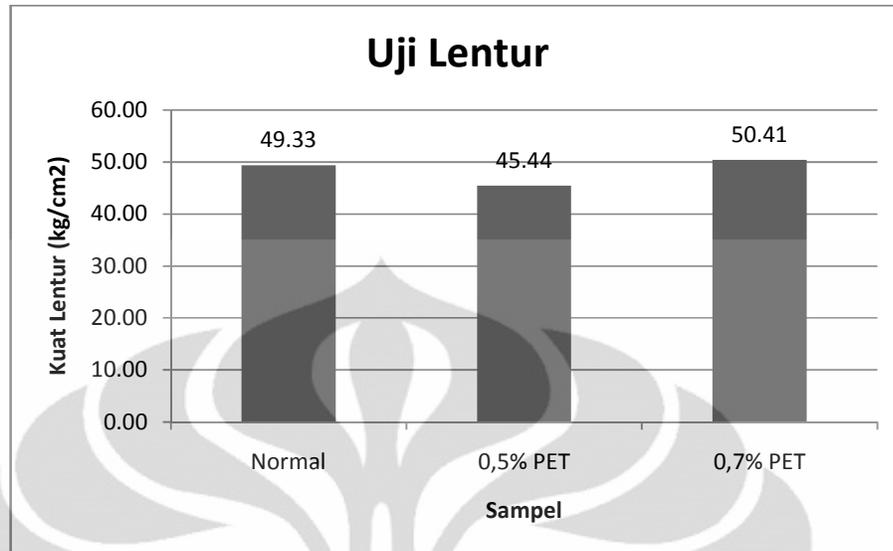
3) Pengujian Kuat Lentur dengan Pembebanan Sepertiga Bentang pada Balok Sederhana

Pengujian benda uji kuat lentur beton dilaksanakan pada tanggal 13 April 2011. Data hasil uji kuat lentur beton selengkapnya ditunjukkan pada Lampiran 3. Berikut ini adalah nilai hasil uji kuat lentur ketiga jenis beton:

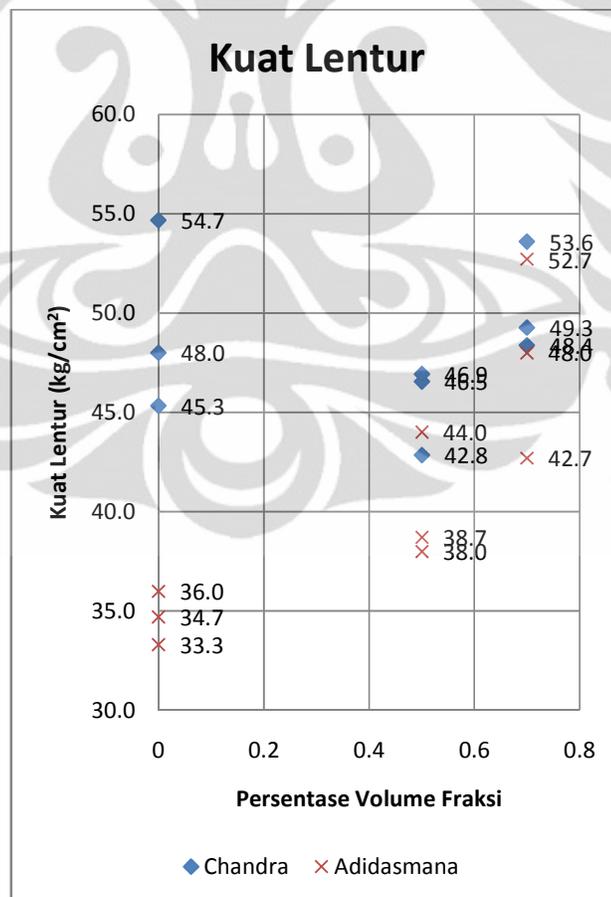
Beton normal tanpa tambahan	: 49,33 kg/cm ²
Beton dengan tambahan PET 0,5%	: 45,44 kg/cm ²
Beton dengan tambahan PET 0,7%	: 50,41 kg/cm ²

Perbandingan antara hasil pengujian kuat lentur yang dilakukan dalam eksperimen ini dengan yang telah dilakukan pada studi sebelumnya oleh Adidasmara (2008), ditunjukkan pada Gambar 4.7. Dari perbandingan tersebut, tampak adanya kecenderungan yang berbeda dalam perbandingan kekuatan beton normal dan beton dengan tambahan PET. Dari hasil pengujian dalam studi eksperimen ini, rata-rata kuat lentur beton normal berada di antara rata-rata kuat lentur beton dengan tambahan PET 0,5% dan 0,7% dari volume fraksi. Sementara pada studi sebelumnya, kuat lentur beton tanpa tambahan PET lebih rendah dibandingkan kuat lentur beton dengan tambahan PET pada kedua persentase tersebut. Bila ditinjau, diketahui bahwa standar deviasi untuk hasil pengujian benda uji beton normal cukup tinggi dibandingkan dengan standar deviasi variasi beton lainnya. Standar deviasi untuk benda uji beton normal mencapai 4,81, sedangkan untuk benda uji dengan tambahan PET sebesar 0,5% dan 0,7% volume fraksi, berturut-turut, adalah 2,25 dan 2,79.

Akan tetapi, perbandingan hasil pengujian kekuatan lentur untuk beton dengan tambahan PET sebesar 0,5% dan 0,7% dari volume fraksi menunjukkan kecenderungan yang sama, yaitu nilai kuat lentur beton dengan 0,7% PET lebih tinggi dibandingkan beton dengan 0,5% PET.



Gambar 4.6 Perbandingan Hasil Uji Kuat Lentur



Gambar 4.7 Perbandingan Hasil Uji Lentur dengan Pembebanan Sepertiga Bentang pada Balok Sederhana Chandra dan Adidasmana



Gambar 4.8 Uji Kuat Lentur dengan Pembebanan Sepertiga Bentang pada Balok Sederhana

4) Uji Tarik Belah

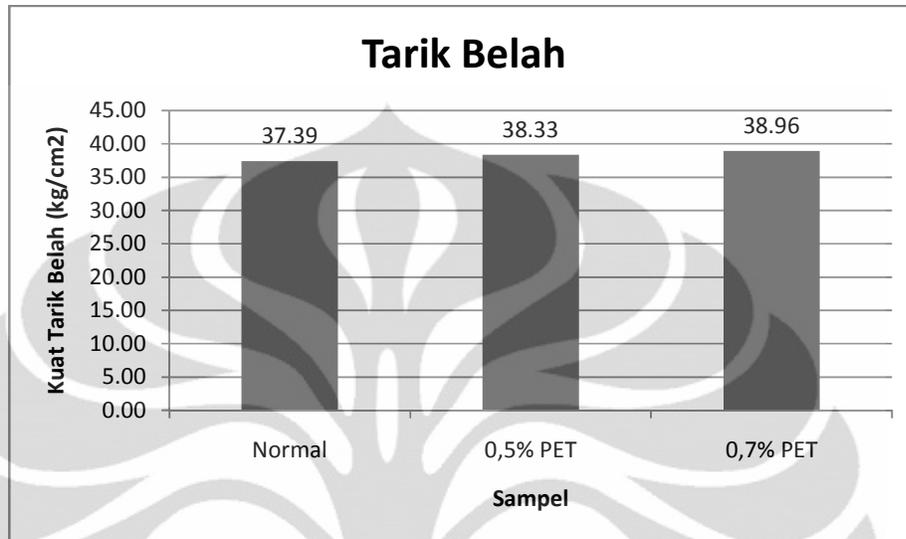
Pengujian benda uji tarik belah beton dilaksanakan pada tanggal 20 April 2011. Data hasil uji tarik belah beton selengkapnya ditunjukkan pada Lampiran 4. Nilai kuat tarik belah hasil pengujian untuk ketiga jenis beton dalam eksperimen ini adalah sebagai berikut:

Beton normal tanpa tambahan	: 37,39 kg/cm ²
Beton dengan tambahan PET 0,5%	: 38,33 kg/cm ²
Beton dengan tambahan PET 0,7%	: 38,96 kg/cm ²

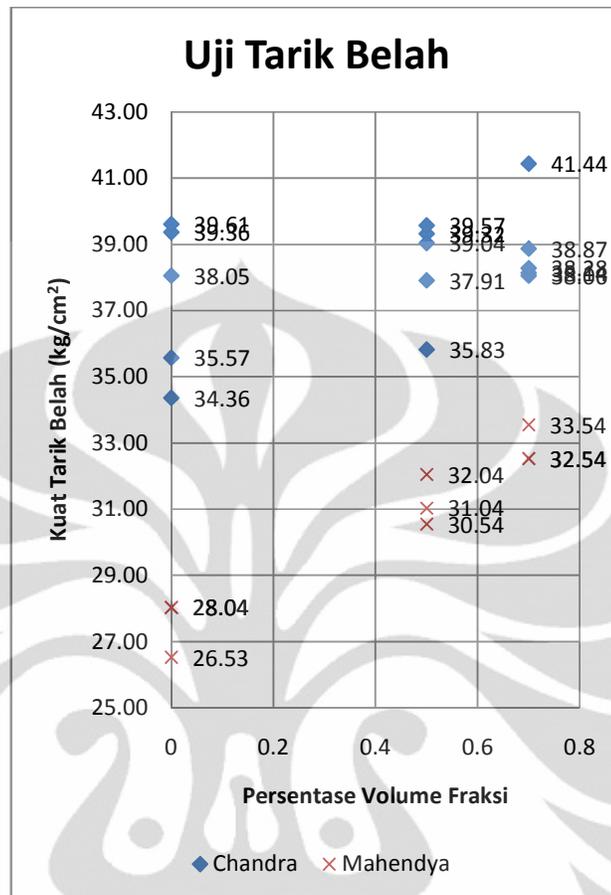
Dari hasil pengujian, tampak adanya perbedaan pada kuat tarik belah untuk beton dengan tambahan PET dengan beton normal. Dari data hasil pengujian tampak bahwa kuat tarik belah untuk beton dengan tambahan PET relatif lebih besar dibandingkan dengan kuat tarik belah untuk beton normal. Kuat tarik belah terbesar dicapai oleh beton dengan tambahan PET 0,7%. Sementara itu, beton tanpa tambahan PET memiliki nilai yang paling rendah dibanding variasi lainnya. Meski tidak signifikan, namun peningkatan ini menunjukkan bahwa PET memberikan pengaruh positif pada kekuatan tarik belah.

Perbandingan antara hasil pengujian tarik belah yang dilakukan dalam eksperimen ini dengan yang telah dilakukan pada studi sebelumnya oleh Mahendya (2008), ditunjukkan pada Gambar 4.10. Dari perbandingan sebaran data hasil pengujian tersebut tampak bahwa kecenderungan yang sama terjadi pada kedua eksperimen tersebut. Beton dengan tambahan

PET 0,7% memiliki kuat tarik belah yang paling tinggi dibandingkan dengan benda uji lainnya, disusul oleh beton dengan tambahan PET 0,5%.



Gambar 4.9 Perbandingan Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah



Gambar 4.10 Perbandingan Hasil Uji Tarik Belah Chandra dan Mahendya



Gambar 4.11 Uji Tarik Belah

5) Uji Kuat Geser

Pengujian kuat geser beton dilaksanakan pada tanggal 16 April 2011. Data hasil uji geser beton selengkapnya ditunjukkan pada Lampiran 5. Berikut ini adalah nilai kuat geser hasil pengujian untuk ketiga jenis beton dalam eksperimen ini:

Beton normal tanpa tambahan	: 5,98 MPa
Beton dengan tambahan PET 0,5%	: 5,84 MPa
Beton dengan tambahan PET 0,7%	: 5,59 MPa

Dari hasil pengujian, tampak bahwa kuat geser beton tanpa tambahan PET relatif lebih tinggi dibandingkan dengan hasil pengujian untuk beton lainnya.

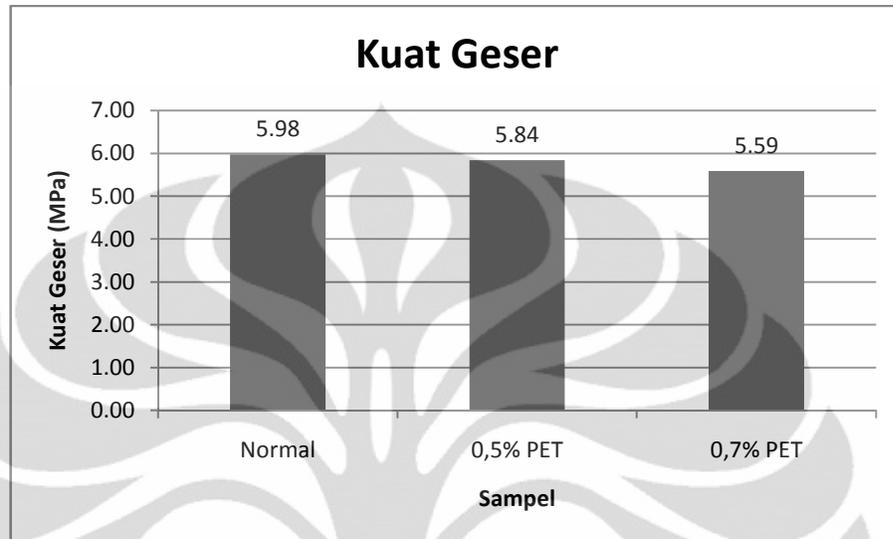
Secara kualitatif, analisis hasil uji kuat geser terkait dengan pola retak yang terjadi. Pada Gambar 4.14 dan Gambar 4.15 ditunjukkan contoh pola retak yang terjadi saat pengujian kuat geser beton. Pola retak yang diharapkan terjadi dalam pengujian ini adalah pola keruntuhan geser murni, sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 4.14. Akan tetapi, terdapat sejumlah benda uji yang mengalami pola keretakan yang tidak sesuai dengan yang diharapkan. Contoh keretakan yang tidak ideal ditunjukkan pada Gambar 4.15.

Berdasarkan pengamatan, keruntuhan yang tidak ideal tersebut dapat disebabkan karena benda uji tidak diposisikan dengan tepat pada alat pengujian. Ketidaktepatan yang dimaksud adalah posisi benda uji tidak tepat berada di tengah piston dan pembebanan sentris pada bidang geser yang dikehendaki tidak terjadi.

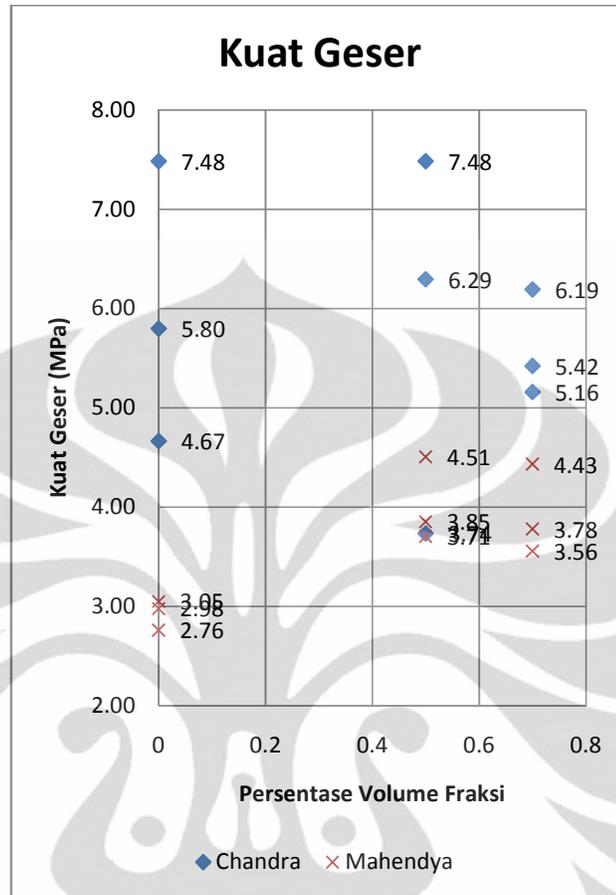
Secara kuantitatif, hal ini tercermin pada nilai standar deviasi yang relatif besar untuk sampel beton normal dan beton dengan tambahan PET 0,5% volume fraksi. Standar deviasi untuk kedua jenis beton tersebut, berturut-turut, mencapai 1,42 dan 1,92.

Diagram perbandingan antara hasil pengujian geser yang dilakukan dalam eksperimen ini dengan hasil pengujian studi sebelumnya yang dilakukan oleh Mahendya (2008) ditunjukkan pada Gambar 4.13. Dari

diagram tersebut tampak bahwa kecenderungan yang terjadi pada kedua eksperimen tersebut berbeda.



Gambar 4.12 Perbandingan Hasil Pengujian Kuat Geser



Gambar 4.13 Perbandingan Hasil Uji Geser Chandra dan Mahendya



Gambar 4.14 Uji Kuat Geser dengan Pola Retak yang Ideal



Gambar 4.15 Uji Kuat Geser dengan Pola Retak yang Tidak Ideal

6) Kuat Tarik Baja Tulangan

Pengujian benda uji tarik baja dilaksanakan pada tanggal 13 Juni 2011. Data hasil uji tarik baja selengkapnya ditunjukkan pada Lampiran 6. Dari hasil pengujian, diketahui bahwa kuat tarik baja tulangan (f_y) yang diuji adalah 280 MPa.

4.2.3 Pengujian Pelat

Dalam bagian ini, hasil pengujian pelat akan disampaikan dalam bentuk pemaparan data mengenai spesifikasi, grafik hubungan beban (P) dengan lendutan (δ), dan momen gaya (M) dengan putaran sudut (θ), serta pemaparan data pola retak yang terjadi. Data hasil eksperimen secara lengkap ditunjukkan pada bagian lampiran. Nilai lendutan yang ditunjukkan dalam grafik hubungan beban-lendutan merupakan nilai lendutan yang terjadi di tengah bentang. Sementara itu, nilai putaran sudut yang digunakan dalam grafik hubungan momen-putaran sudut merupakan putaran sudut yang terjadi di perletakan.

Grafik hubungan beban-lendutan diperoleh dari hasil pembacaan dial di tengah bentang. Dalam eksperimen ini, terdapat tiga buah dial di tengah bentang. Oleh karena itu, akan terdapat tiga grafik beban-lendutan untuk setiap benda uji pelat. Sementara itu, grafik hubungan momen gaya-putaran sudut diperoleh dari nilai lendutan pada kedua titik ujung pelat yang dibagi dengan jarak dari tepi pelat ke perletakan. Hal ini dilakukan dengan mengasumsikan bahwa sudut yang terjadi akibat lendutan sangat kecil, sehingga $\theta = \tan \theta$, dengan θ dalam radian. Nilai putaran sudut yang diperoleh tersebut merupakan nilai putaran sudut yang terjadi di perletakan.

Sebagai catatan, pengujian benda uji pelat dalam eksperimen ini menggunakan satu pompa hidrolik yang memberikan beban pada pelat melalui dua buah *hydraulic jack* secara bersamaan. Oleh karena itu, nilai beban yang bekerja pada masing-masing *hydraulic jack* adalah setengah dari beban yang terbaca di dial pompa hidrolik.

1) HCS-N

Spesifikasi

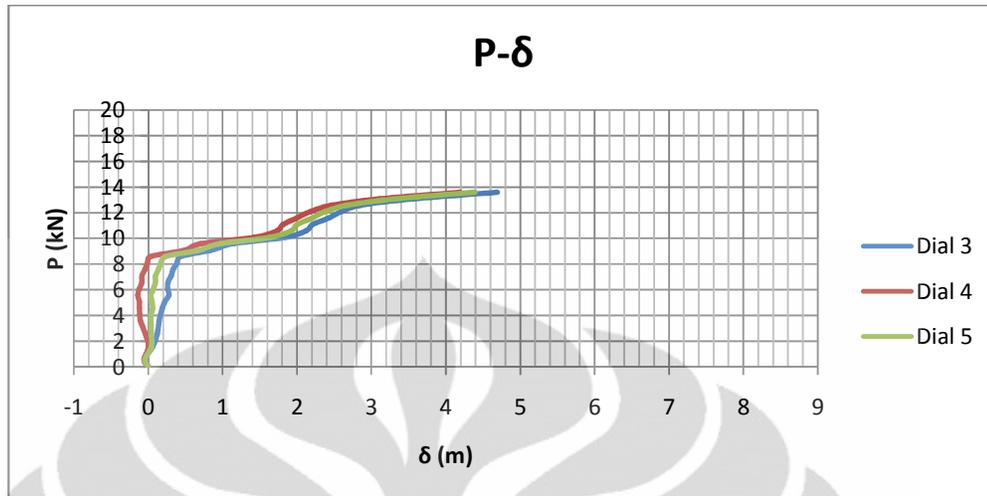
- Panjang : 175 cm
- Lebar : 60 cm
- Tebal :
 - o A1 : 151,3 mm

- B1 : 153,45 mm
- C1 : 151,2 mm
- A2 : 153,65 mm
- B2 : 155,8 mm
- C2 : 155,6 mm

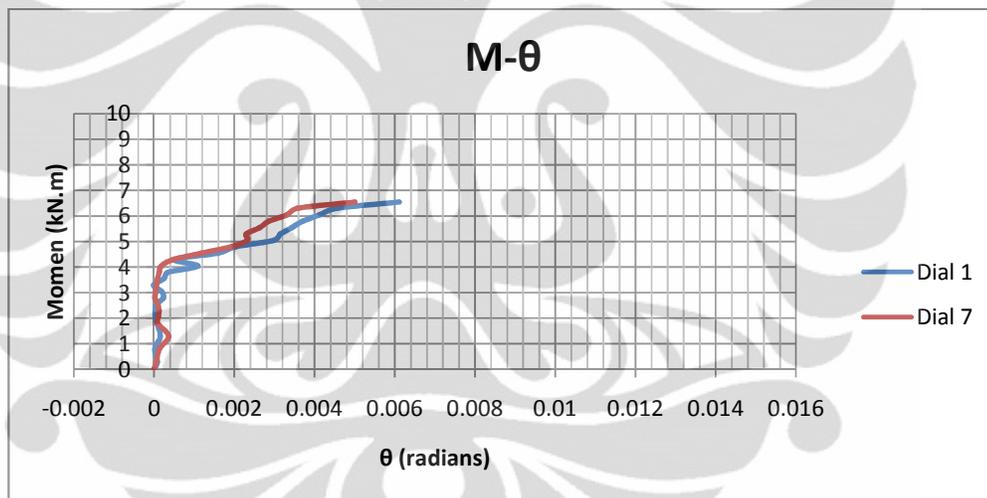
Grafik P- δ , Grafik M- θ , dan Pola Retak

Grafik beban (P)-lendutan (δ) dan grafik momen gaya (M)-putaran sudut (θ) untuk benda uji ini ditunjukkan pada Gambar 4.16 dan Gambar 4.17. Sementara itu, pola retak yang terjadi pada benda uji ini ditunjukkan pada Gambar 4.18. Terkait dengan kedua grafik tersebut, terdapat sejumlah hal yang perlu menjadi perhatian:

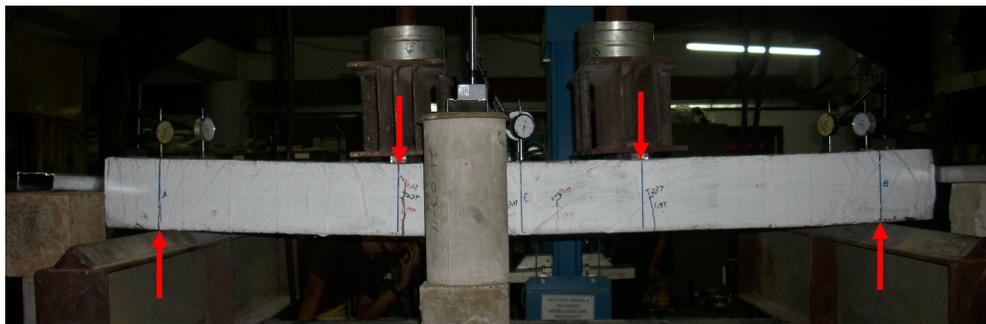
- i. Sebagaimana yang ditunjukkan pada kedua gambar tersebut, retak pertama kali terjadi pada pembebanan sebesar 9,088 kN dengan lendutan 0,6683 mm. Sementara itu, beban terbesar untuk benda uji ini adalah 13,088 kN dengan lendutan maksimal sebesar 3,338 mm.
- ii. Dengan jarak antara beban dengan perletakan terdekat sebesar 50 cm, besar momen maksimal untuk benda uji ini adalah 6,544 kN.m.
- iii. Pola retak yang terjadi pada benda uji ini ditunjukkan pada Lampiran 12. Pada sisi 1, tercatat bahwa pada beban 9,088 kN terjadi keretakan pertama terjadi pada tiga tempat sekaligus, yaitu pada jarak 67,5 cm dari perletakan B, 51 cm dari perletakan A, dan 71 cm dari perletakan A. Kemudian, pada beban 10,088 kN terjadi keretakan baru pada jarak 47,5 cm dari perletakan B. Pada beban 12,088 kN, beberapa keretakan yang sudah ada bertambah panjang. Saat beban maksimal tercapai, retak pada jarak 51 cm dari perletakan A bertambah panjang.



Gambar 4.16 Grafik P- δ Benda Uji HCS-N



Gambar 4.17 Grafik M- θ Benda Uji HCS-N



Gambar 4.18 Benda Uji HCS-N

2) HCS-0,5-1

Spesifikasi

- Panjang : 175 cm
- Lebar : 60 cm
- Tebal :
 - o A1 : 151,2 mm
 - o B1 : 151,4 mm
 - o C1 : 151,3 mm
 - o A2 : 149,4 mm
 - o B2 : 154,4 mm
 - o C2 : 152,85 mm

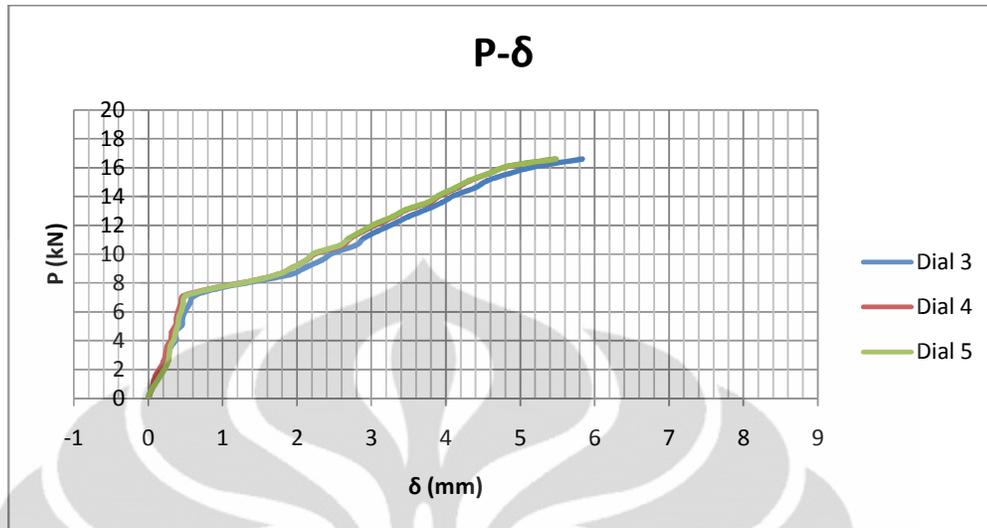
Grafik P- δ , Grafik M- θ dan Pola Retak

Grafik beban (P)-lendutan (δ) dan grafik momen gaya (M)-putaran sudut (θ) untuk benda uji ini ditunjukkan pada Gambar 4.19 dan Gambar 4.20. Sementara itu, pola retak yang terjadi pada benda uji ini ditunjukkan pada Gambar 4.21. Terkait dengan kedua grafik tersebut, terdapat sejumlah hal yang perlu menjadi perhatian:

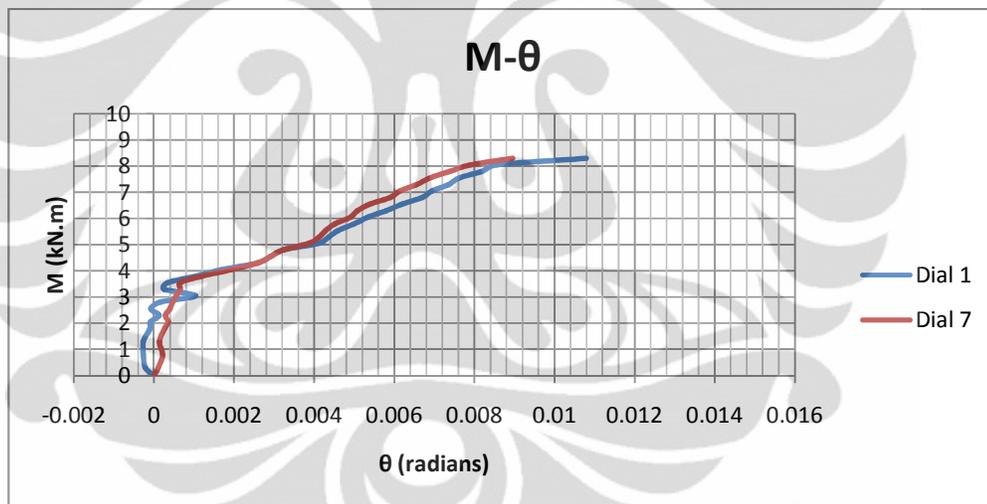
- i. Sebagaimana yang ditunjukkan pada kedua gambar tersebut, retak pertama kali terjadi pada pembebanan sebesar 7,588 kN dengan lendutan 0,86167 mm. Sementara itu, beban terbesar untuk benda uji ini adalah 16,588 kN dengan lendutan maksimal sebesar 5,595 mm.
- ii. Dengan jarak antara beban dengan perletakan terdekat sebesar 50 cm, besar momen maksimal untuk benda uji ini adalah 8,294 kN.m.
- iii. Pada grafik, tampak bahwa terjadi perubahan kekakuan yang cukup signifikan dalam rentang kondisi setelah retak hingga sebelum mengalami leleh. Perubahan kekakuan tersebut ditunjukkan dengan adanya perubahan kemiringan. Sebagaimana yang tampak pada Gambar 4.19, terdapat perbedaan kemiringan garis pasca keretakan pada rentang beban 7,088 kN hingga 8,588 kN dengan kemiringan garis pada rentang 8,588 kN hingga 16,088 kN. Kemiringan yang lebih landai pada rentang beban 7,088 kN hingga 8,588 kN menunjukkan

terjadinya peningkatan kekakuan setelah pembebanan 8,588 kN. Hal ini dapat disebabkan oleh terjadinya *strain hardening* pada tulangan baja.

- iv. Sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 4.21, keretakan yang terjadi merupakan retak lentur, karena berada di daerah sepertiga bentang bagian tengah. Pada benda uji ini, keretakan pertama terjadi pada beban 7,588 kN di jarak 62,5 cm dari perletakan A dan 65 cm dari perletakan B. Berdasarkan posisi dan bentuk retaknya, retak tersebut merupakan retak lentur. Pada beban 8,088 kN, keretakan yang sudah ada bertambah panjang dan muncul keretakan lentur-geser pada jarak 45 cm dari perletakan B. Pada beban 8,588 kN, muncul keretakan baru pada jarak 51 cm dari perletakan A. Retak tersebut terjadi di bawah salah satu beban sepertiga bentang. Kemudian, pada beban 10,588 kN, 13,088 kN, dan 14,588 kN, sebagian retak yang ada bertambah panjang.
- v. Sama seperti yang terjadi pada sisi 1, keretakan pertama terjadi pada pembebanan 7,588 kN. Pada sisi 2, keretakan tersebut terjadi pada jarak 65 cm dari perletakan A dan 71 cm dari perletakan B. Oleh karena itu, keretakan pertama ini juga dapat dikatakan merupakan keretakan lentur. Saat pembebanan sebesar 8,588 kN, muncul keretakan pada jarak 50 cm dari perletakan B, atau persis di bawah salah satu beban yang bekerja pada pelat. Pada beban 8,588 kN, muncul keretakan lentur-geser pada jarak 46 cm dari perletakan A. Pada beban 10,588 kN, sebagian keretakan yang sudah ada bertambah panjang. Kemudian, pada beban 8,588 kN dan 11,588 kN, keretakan yang terdapat di daerah di bawah beban bertambah panjang.



Gambar 4.19 Grafik P- δ Benda Uji HCS-0,5-1 Dial 3, 4, 5



Gambar 4.20 Grafik M- θ Benda Uji HCS-0,5-1



Gambar 4.21 Benda Uji HCS-0,5-1

3) HCS-0,5%-2

Spesifikasi

- Panjang : 175 cm
- Lebar : 59,75 cm
- Tebal :
 - o A1 : 153,05 mm
 - o B1 : 153,45 mm
 - o C1 : 151,85 mm
 - o A2 : 153,4 mm
 - o B2 : 153,85 mm
 - o C2 : 151,2 mm

Grafik P- δ , Grafik M- θ , dan Pola Retak

Grafik beban (P)-lendutan (δ) dan grafik momen gaya (M)-putaran sudut (θ) untuk benda uji ini ditunjukkan pada Gambar 4.22 dan Gambar 4.23. Sementara itu, pola retak yang terjadi pada benda uji ini ditunjukkan pada Gambar 4.24. Terkait dengan kedua grafik tersebut, terdapat sejumlah hal yang perlu menjadi perhatian:

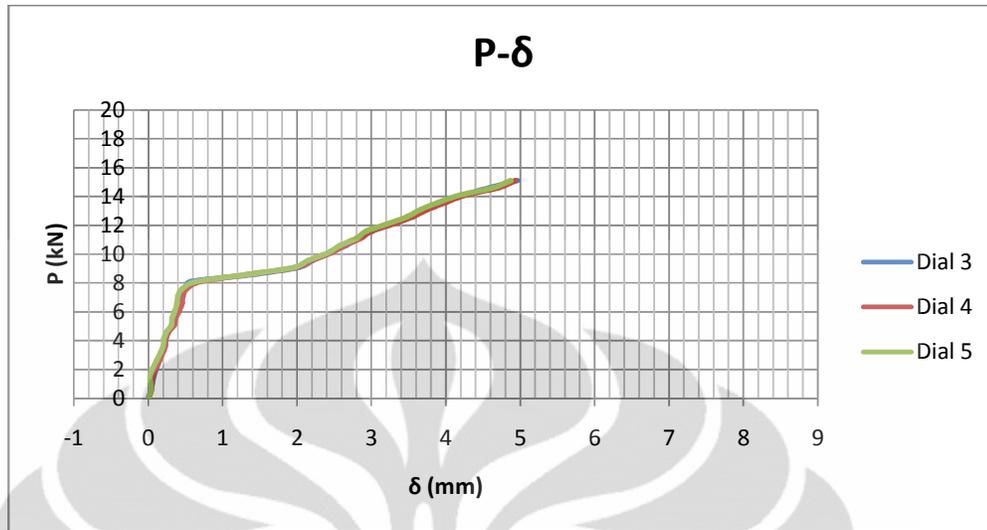
- i. Sebagaimana yang ditunjukkan pada kedua gambar tersebut, retak pertama kali terjadi pada pembebanan sebesar 8,088 N dengan lendutan 0,6317 mm. Sementara itu, beban terbesar untuk benda uji ini adalah 15,088 kN dengan lendutan maksimal sebesar 4,925 mm. Hal ini ditunjukkan dengan penurunan kemiringan garis pada grafik yang dimulai pada kondisi pembebanan tersebut. Sebagaimana yang telah disebutkan, berkurangnya kemiringan tersebut terkait dengan penurunan kekakuan benda uji setelah keretakan terjadi.
- ii. Dengan jarak antara beban dengan perletakan terdekat sebesar 50 cm, besar momen maksimal untuk benda uji ini adalah 7,544 kN.m.
- iii. Pada grafik P- δ dan M- θ untuk benda uji ini, tampak adanya perubahan kemiringan garis pada rentang pembebanan 8,088 kN hingga 9,088 kN dengan pembebanan 9,088 kN hingga 14,088 kN. Hal ini menunjukkan terjadinya perubahan kekakuan penampang.

Kemiringan garis yang lebih landai pada rentang beban 8,088 kN hingga 9,088 kN menunjukkan terjadinya peningkatan kekakuan setelah beban 9,088 kN. Hal ini dapat disebabkan oleh terjadinya *strain hardening* pada tulangan baja.

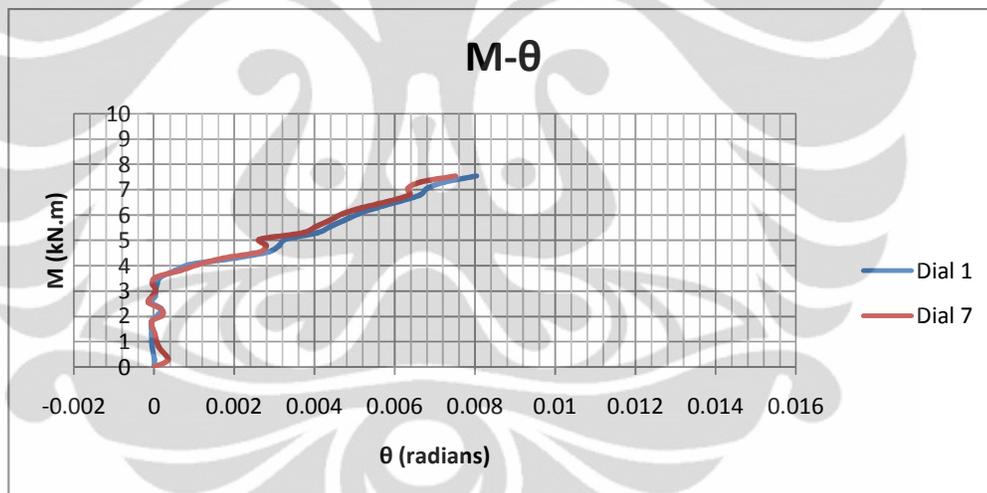
- iv. Pola retak yang terjadi pada benda uji ini ditunjukkan pada Lampiran 14. Tampak bahwa, secara garis besar, hanya terdapat sedikit keretakan yang terjadi pada benda uji ini. Pada sisi 1, keretakan pertama terjadi pada jarak 50 cm dari perletakan A, atau tepat di bawah salah satu beban yang bekerja pada pelat. Keretakan tersebut cenderung membentuk garis vertikal, sehingga masih dapat dikatakan sebagai keretakan lentur murni. Pada pembebanan 8,588 kN, muncul keretakan baru di sekitar tengah bentang (74 cm dari perletakan A) dan pada jarak 58 cm dari perletakan B. Masing-masing keretakan yang sudah ada terus bertambah panjang secara bertahap pada besar pembebanan yang berbeda-beda hingga kegagalan terjadi. Menjelang terjadinya kegagalan, perpanjangan keretakan hanya terjadi pada keretakan di jarak 90 cm dari perletakan A. Di samping itu, perpanjangan keretakan yang terjadi mengarah dari retak awal yang sudah terjadi menuju titik di mana beban bekerja. Keretakan ini dapat disebabkan oleh adanya rongga pada pelat pada bagian yang dilalui retak.
- v. Serupa dengan sisi 1, hanya terdapat sedikit keretakan pada sisi 2. Keretakan pada sisi 2 tersebar dalam jumlah dan lokasi yang serupa dengan yang terjadi pada sisi 1. Keretakan dan perpanjangan retak yang terjadi pada sisi ini terpusat pada keretakan yang sudah ada. Keretakan pertama pada sisi 2 juga terjadi pada jarak 50 cm dari perletakan A, atau tepat di salah satu titik pembebanan. Pada beban 8,588 kN, keretakan baru terjadi pada jarak 71 cm dari perletakan A dan pada jarak 54 cm dari perletakan B. Berdasarkan arah retaknya yang vertikal, serta lokasinya yang berada pada daerah sepertiga bentang bagian tengah, keretakan yang terjadi merupakan keretakan lentur murni. Sama seperti yang terjadi pada sisi 1, perpanjangan salah

satu keretakan yang lokasinya dekat dengan salah satu titik beban (54 cm dari perletakan B) mengarah dari retak yang sudah ada menuju titik pembebanan.





Gambar 4.22 Grafik P- δ Benda Uji HCS-0,5-2 Dial 3, 4, 5



Gambar 4.23 Grafik M- θ Benda Uji HCS-0,5-2



Gambar 4.24 Benda Uji HCS-0,5-2

4) HCS-0,7%-1

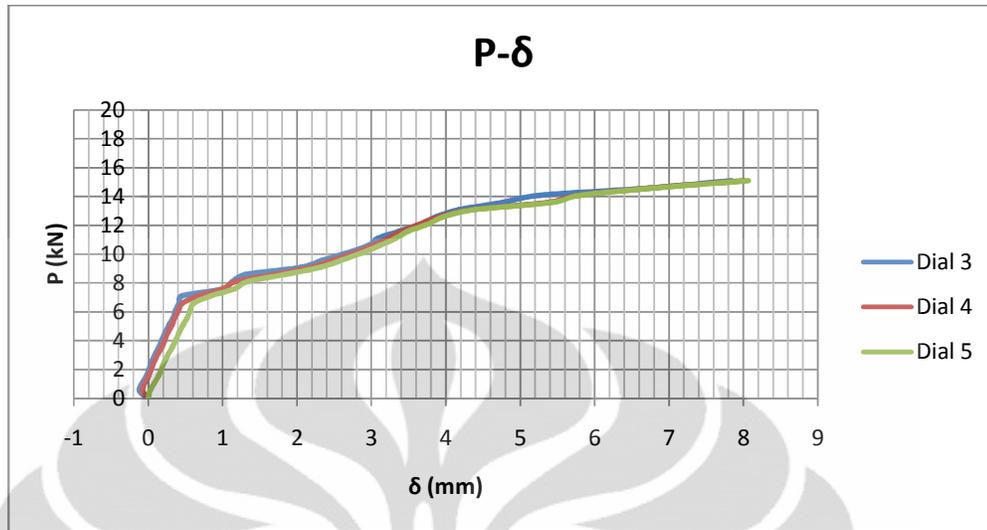
Spesifikasi

- Panjang : 175 cm
- Lebar : 60 cm
- Tebal :
 - o A1 : 152,05 mm
 - o B1 : 152,7 mm
 - o C1 : 151,25 mm
 - o A2 : 150,95 mm
 - o B2 : 154,0 mm
 - o C2 : 154,2 mm

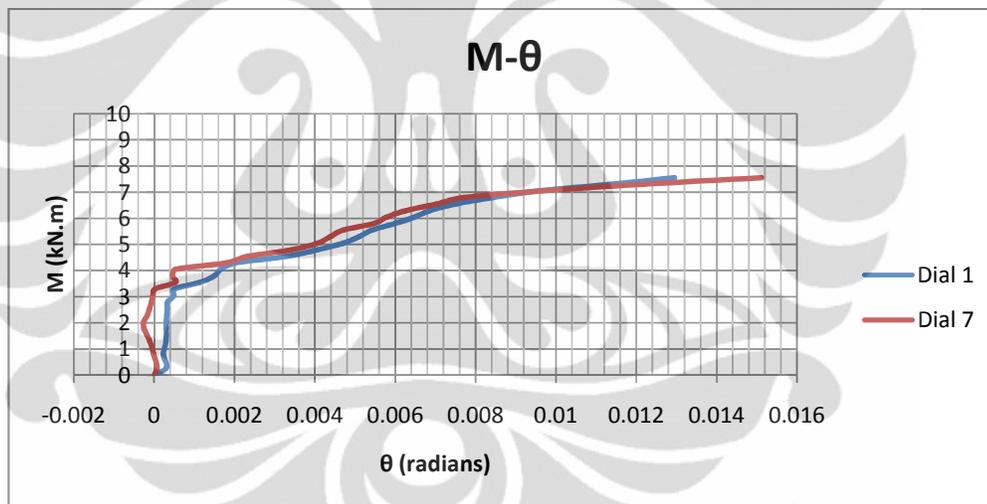
Grafik P- δ , Grafik M- θ , dan Pola Retak

Grafik beban (P)-lendutan (δ) dan grafik momen gaya (M)-putaran sudut (θ) untuk benda uji ini ditunjukkan pada Gambar 4.25 dan Gambar 4.26. Sementara itu, pola retak yang terjadi pada benda uji ini ditunjukkan pada Gambar 4.27. Terkait dengan kedua grafik tersebut, terdapat sejumlah hal yang perlu menjadi perhatian:

- i. Sebagaimana yang ditunjukkan pada kedua gambar tersebut, retak pertama kali terjadi pada pembebanan sebesar 7,088 kN dengan lendutan 0,8375 mm. Sementara itu, beban terbesar untuk benda uji ini adalah 15,088 kN dengan lendutan maksimal sebesar 7,9683 mm.
- ii. Dengan jarak antara beban dengan perletakan terdekat sebesar 50 cm, besar momen maksimal untuk benda uji ini adalah 7,544 kN.m.
- iii. Pola retak benda uji ini ditunjukkan pada Lampiran 15. Pola retak yang terjadi didominasi keretakan di sepertiga bentang bagian tengah yang mengarah vertikal ke atas. Keretakan ini merupakan keretakan akibat lentur murni. Di samping keretakan tersebut, terdapat pula keretakan yang disebabkan oleh kombinasi lentur dan geser, sebagaimana yang terjadi di sisi 2 pada jarak 47,5 cm dari perletakan B.



Gambar 4.25 Grafik P- δ Benda Uji HCS-0,7-1 Dial 3, 4, 5



Gambar 4.26 Grafik M- θ Benda Uji HCS-0,7-1



Gambar 4.27 Benda Uji HCS-0,7-1

5) HCS-0,7%-2

Spesifikasi

- Panjang : 175 cm
- Lebar : 60 cm
- Tebal :
 - o A1 : 152,05 mm
 - o B1 : 152,7 mm
 - o C1 : 151,25 mm
 - o A2 : 150,95 mm
 - o B2 : 154,0 mm
 - o C2 : 154,2 mm

Grafik P- δ , Grafik M- θ , dan Pola Retak

Grafik beban (P)-lendutan (δ) dan grafik momen gaya (M)-putaran sudut (θ) untuk benda uji ini ditunjukkan pada Gambar 4.28 dan Gambar 4.29. Sementara itu, pola retak yang terjadi pada benda uji ini ditunjukkan pada Gambar 4.30. Terkait dengan kedua grafik tersebut, terdapat sejumlah hal yang perlu menjadi perhatian:

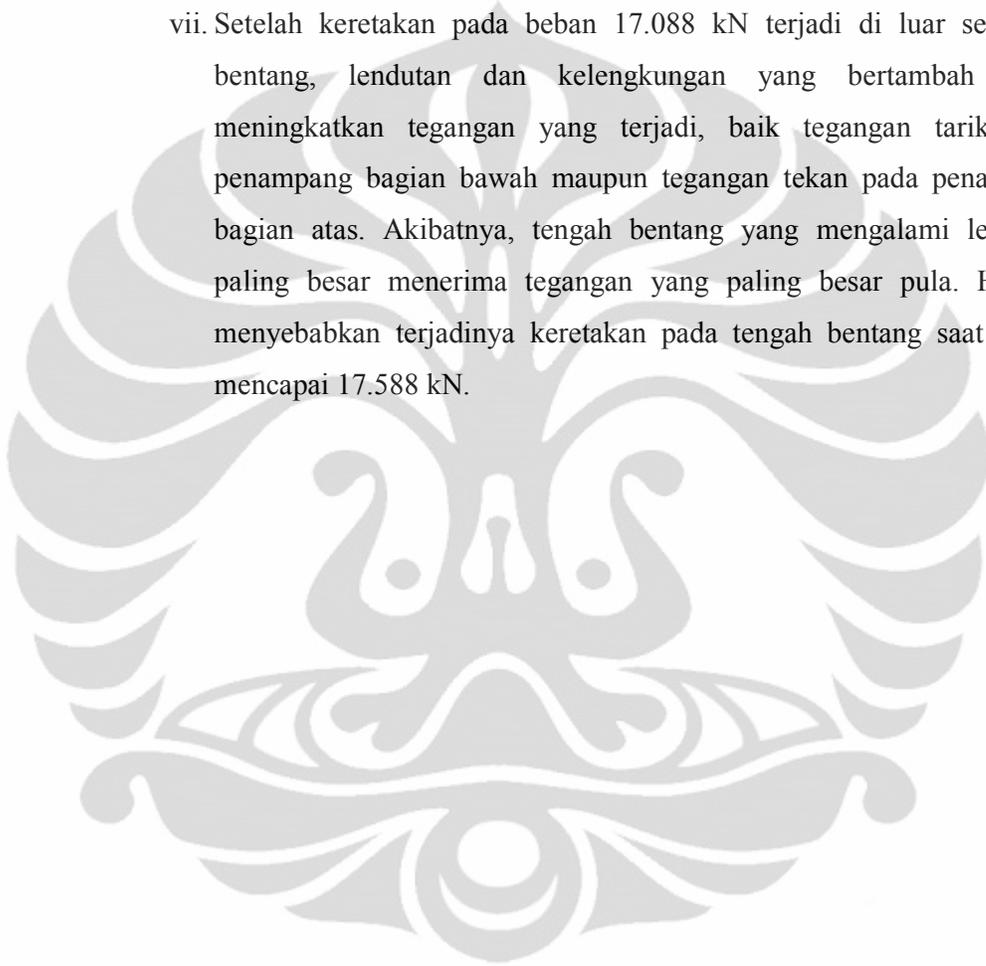
- i. Sebagaimana yang ditunjukkan pada kedua gambar tersebut, retak pertama kali terjadi pada pembebanan sebesar 6,088 kN dengan lendutan 0,5817 mm. Sementara itu, beban terbesar untuk benda uji ini adalah 17,588 kN dengan lendutan maksimal sebesar 6,53 mm. Hal ini ditunjukkan dengan penurunan kemiringan garis pada grafik yang dimulai pada kondisi pembebanan tersebut. Sebagaimana yang telah disebutkan, berkurangnya kemiringan tersebut terkait dengan penurunan kekakuan benda uji setelah keretakan terjadi.
- ii. Dengan jarak antara beban dengan perletakan terdekat sebesar 50 cm, besar momen maksimal untuk benda uji ini adalah 8,794 kN.m.
- iii. Pola retak yang terjadi pada benda uji ini ditunjukkan pada Lampiran 16. Secara umum, pola retak yang terjadi pada benda uji ini cenderung menyebar. Di sisi 1, keretakan pertama terjadi di sekitar bawah titik pembebanan, yaitu pada jarak 48 cm dari perletakan A. Dilihat dari

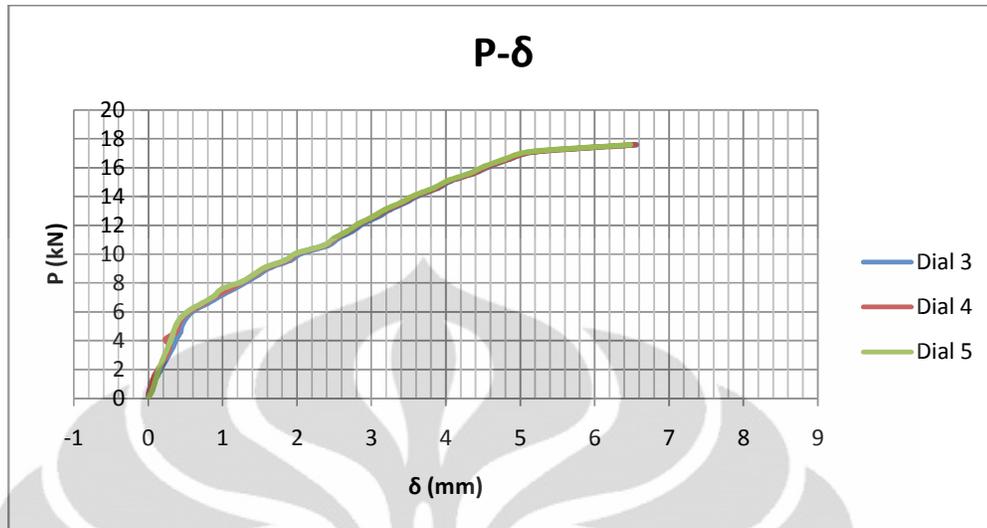
bentuk dan posisinya, dapat dikatakan keretakan tersebut merupakan retak lentur-geser. Keretakan berikutnya terjadi pada jarak 71 cm dari perletakan A yang mulai terjadi pada beban 6,588 kN. Pada beban 7,588 kN, terjadi keretakan baru pada jarak 57 cm dari perletakan B. Kemudian, pada pembebanan 9,588 kN, terjadi keretakan di bawah salah satu titik pembebanan. Pada nilai pembebanan yang sama, retak yang sudah ada juga bertambah panjang. Pada pembebanan 10,588 kN, retak tersebut bertambah panjang dan muncul juga keretakan baru pada jarak 68 cm dari perletakan B. Pada pembebanan 14,088 kN, muncul retak lentur-geser pada jarak 35 cm dari perletakan B. Keretakan geser tersebut terus bertambah panjang hingga kegagalan terjadi.

- iv. Keretakan dengan sebaran yang serupa terjadi pada sisi 2 benda uji ini. Keretakan pertama terjadi pada jarak 43 cm dan 66,5 cm dari perletakan A. Keretakan berikutnya terjadi saat pembebanan 7,588 kN pada jarak 52,5 cm dari perletakan B. Lalu, pada pembebanan 8,088 kN terjadi keretakan di bawah salah satu titik pembebanan (51 cm dari perletakan A). Kemudian pada beban 10,588 kN, muncul dua keretakan lentur-geser, yaitu pada jarak 43 cm dari perletakan A dan 45 cm dari perletakan B. Pada pembebanan 11,588 kN terjadi retak yang panjang di sekitar tengah bentang dan penambahan retak-retak yang sudah ada. Pada pembebanan akhir menjelang terjadinya kegagalan, terjadi keretakan lentur-geser pada jarak 32 cm dari perletakan B.
- v. Benda uji ini mengalami keretakan pertama pada beban awal (6088 kN). Hal ini diduga disebabkan oleh tidak sempurnanya kepadatan beton pada penampang bagian bawah. Sebagaimana yang telah disebutkan, benda uji ini mengalami keropos yang cukup besar di bagian bawahnya, sehingga tidak menutup kemungkinan terdapat rongga-rongga kecil pada bagian yang lain.
- vi. Keropos yang terjadi pada bagian bawah tidak terjadi pada penampang bagian atas. Hal tersebut ditunjukkan dengan pola retak yang ada. Dari pola retak tampak bahwa tidak terjadi perpanjangan keretakan pada

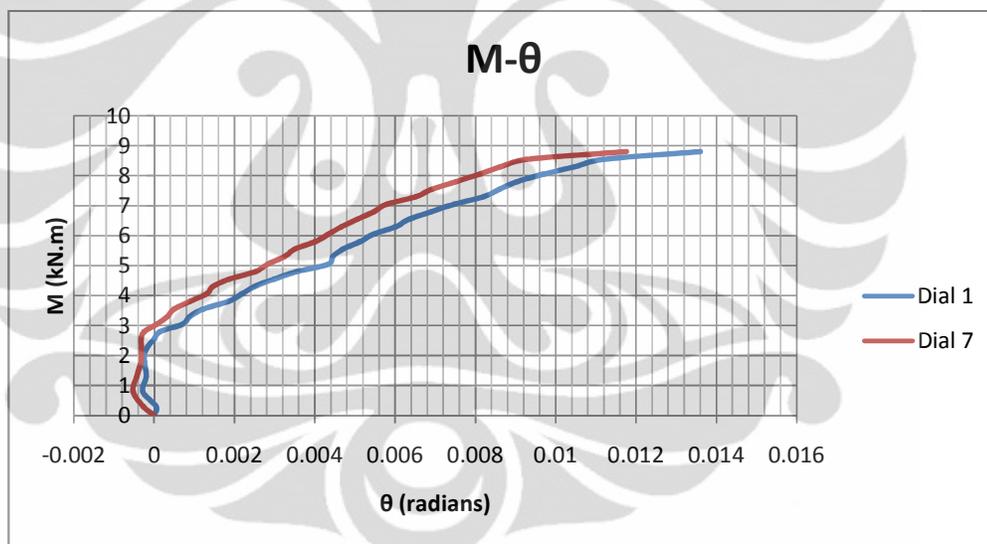
beban-beban tinggi. Pada beban tinggi, justru terjadi keretakan baru di luar daerah sepertiga bentang. Hal ini dapat disebabkan karena penampang bagian atas yang terpadatkan dengan baik masih kuat menahan tegangan yang terjadi, sehingga keretakan baru muncul dari penampang bagian bawah yang tidak terpadatkan secara sempurna.

- vii. Setelah keretakan pada beban 17.088 kN terjadi di luar sepertiga bentang, lendutan dan kelengkungan yang bertambah besar meningkatkan tegangan yang terjadi, baik tegangan tarik pada penampang bagian bawah maupun tegangan tekan pada penampang bagian atas. Akibatnya, tengah bentang yang mengalami lendutan paling besar menerima tegangan yang paling besar pula. Hal ini menyebabkan terjadinya keretakan pada tengah bentang saat beban mencapai 17.588 kN.

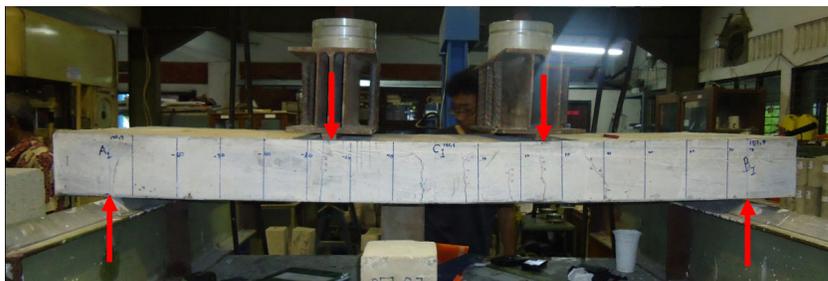




Gambar 4.28 Grafik P- δ Benda uji HCS-0,7-2 Dial 3, 4, 5



Gambar 4.29 Grafik M- θ Benda Uji HCS-0,7-2



Gambar 4.30 Benda Uji HCS-0,7-2

Kesimpulan

Rangkuman hasil pengujian, berupa nilai beban maksimal (P_{maks}) dan lendutan maksimal (δ_{maks}) ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Rangkuman Hasil Pengujian

	HCS-N	HCS-0,5%-1	HCS-0,5%-2	HCS-0,7%-1	HCS-0,7%-2
P_{maks} (kN)	13.088	16.588	15.088	15.088	17.588
δ_{maks} (mm)	3.338	5.595	4.925	7.968	6.530



4.3 Analisis Hasil Penelitian

Pada bagian sebelumnya, data setiap benda uji dipaparkan satu per satu tanpa membandingkan atau mengaitkan hasil pengujian satu benda uji dengan benda uji lainnya. Dalam bagian ini, hasil pengujian akan dibahas lebih lanjut dengan membandingkan hasil pengujian dari setiap benda uji secara bersama-sama. Terdapat tiga hal yang dibandingkan dalam analisis ini, yaitu jenis kegagalan dan pola retak, grafik $P-\delta$ dan $M-\theta$, dan kekuatan lentur.

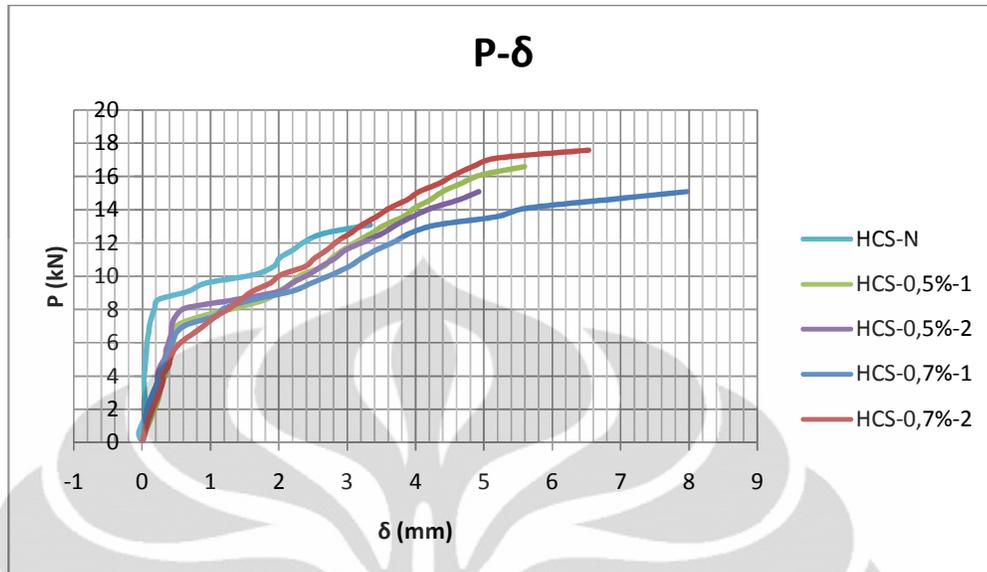
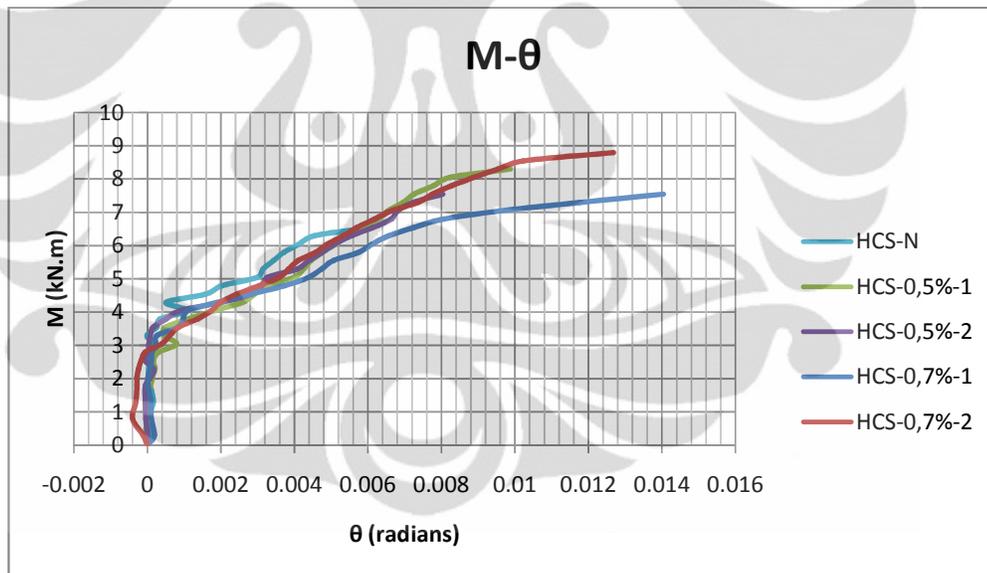
4.3.1 Jenis Kegagalan (*Failure Mode*) dan Pola Retak

Secara keseluruhan, tampak bahwa keretakan yang terjadi pada seluruh benda uji pelat dalam eksperimen ini merupakan keretakan akibat lentur murni atau keretakan akibat kombinasi lentur dan geser. Pada seluruh benda uji, terjadi keretakan lentur murni pada sepertiga bentang bagian tengah. Pada beberapa benda uji, terdapat pula keretakan akibat lentur-geser. Keretakan akibat lentur-geser pada beberapa benda uji tersebut terjadi di luar sepertiga bentang bagian tengah di dekat titik pembebanan.

4.3.2 Grafik Hubungan Beban-Lendutan dan Momen Gaya-Putaran Sudut

Untuk membandingkan grafik hubungan beban-lendutan dan momen gaya-putaran sudut, terlebih dahulu perlu dibuat sebuah grafik rata-rata untuk setiap benda uji. Sebagaimana yang diketahui, terdapat tiga buah dial pada pengukuran lendutan di tengah bentang, dan masing-masing satu buah dial pada kedua tepi pelat. Dari hasil pengujian, terdapat variasi dari nilai-nilai yang ditunjukkan oleh sejumlah dial tersebut.

Untuk memperoleh satu grafik hubungan beban-lendutan dan momen gaya-putaran sudut untuk setiap benda uji, maka nilai dari sejumlah dial tersebut kemudian dirata-ratakan. Hal ini dilakukan dengan mengasumsikan bahwa pembebanan dilakukan secara merata dan tidak terjadi puntir/torsi pada arah melintang benda uji. Hubungan beban-lendutan dan momen gaya-putaran sudut dari setiap benda uji yang telah dirata-ratakan tersebut kemudian dibandingkan secara bersama-sama (Gambar 4.31 dan Gambar 4.32).

Gambar 4.31 Perbandingan Grafik P- δ Gambar 4.32 Perbandingan Grafik M- θ

Kelima grafik hubungan P- δ dan kelima grafik hubungan M- θ menunjukkan pola yang sesuai dengan teori. Seluruh benda uji mengalami tiga tahapan dalam pengujian tersebut. Tahap pertama merupakan tahap sebelum keretakan terjadi, yaitu ketika tegangan tarik pada bagian di bawah sumbu netral

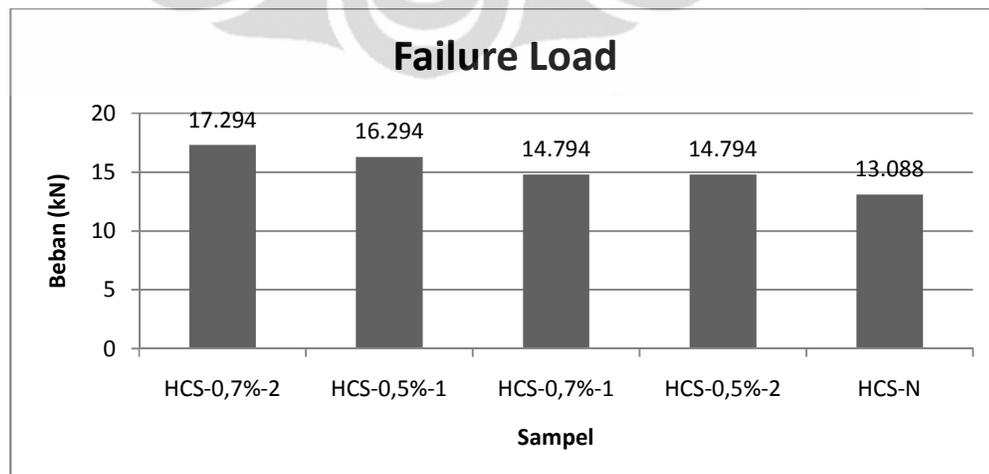
penampang masih dapat ditahan oleh beton. Pada tahap ini, bentuk garis pada grafik P- δ masih berupa garis linear.

Setelah terjadi keretakan, kemiringan grafik menurun. Hal ini sesuai dengan teori yang menyebutkan bahwa setelah terjadi keretakan, kekakuan balok berkurang secara signifikan akibat berkurangnya tinggi penampang pada bagian yang mengalami keretakan. Dalam tahap ini pula terjadi peningkatan kekakuan pada seluruh benda uji. Hal ini disebabkan oleh terjadinya *strain hardening* pada tulangan baja.

Kemudian, tampak bahwa di akhir grafik masing-masing benda uji kembali terjadi penurunan kemiringan garis secara signifikan. Pada tahap ini, benda uji mengalami beban maksimal. Bentuk garis yang hampir sejajar dengan sumbu δ menunjukkan bahwa setelah beban maksimal tercapai, sedikit peningkatan beban akan direspon dengan lendutan yang sangat besar.

4.3.3 Analisis Kekuatan

Dari perbandingan grafik P- δ dan M- θ yang ditunjukkan, benda uji dengan nilai pembebanan terbesar adalah HCS-0,7%-2. Sementara itu, benda uji dengan nilai pembebanan maksimal terkecil adalah HCS-N. Histogram perbandingan nilai pembebanan maksimal untuk kelima benda uji pelat ditunjukkan pada Gambar 4.33. Pada histogram tersebut, nilai pembebanan maksimal diurutkan dari yang terbesar hingga yang terkecil.



Gambar 4.33 Perbandingan Nilai Pembebanan Maksimal

Dari hasil pengujian tersebut, keempat benda uji HCS dengan tambahan PET dapat mencapai nilai pembebanan maksimal yang lebih besar dibandingkan dengan benda uji HCS tanpa tambahan PET (HCS-N). Berikut ini adalah persentase peningkatan beban maksimal benda uji dengan tambahan PET terhadap beban maksimal benda uji tanpa tambahan PET:

- HCS-0,5%-1 : 24,50%
- HCS-0,5%-2 : 13,03%
- HCS-0,7%-1 : 13,03%
- HCS-0,7%-2 : 32,14%

Bila ditinjau secara teoritis, kekuatan lentur pelat satu arah ditentukan oleh nilai A_s , f_y , d , f_c' , c , dan distribusi tegangan yang terjadi pada penampang. Akan tetapi, pengaruh nilai-nilai A_s , f_y , d , dan c dalam eksperimen ini dapat diabaikan, karena perbedaan yang dapat terjadi pada nilai-nilai tersebut dalam eksperimen ini dijaga agar tidak memiliki perbedaan yang berarti. Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa pengaruh nilai-nilai tersebut pada variasi hasil pengujian tidak signifikan. Pengaruh mutu beton pun dapat dikatakan tidak signifikan dalam kasus ini, karena dari hasil pengujian diketahui bahwa mutu dari ketiga jenis beton yang digunakan relatif sama.

Nilai beban maksimal yang lebih tinggi pada benda uji pelat dengan tambahan PET dapat disebabkan oleh perbedaan distribusi tegangan. Pada beton tanpa tambahan, distribusi tegangan yang terjadi pada serat tekan disederhanakan menjadi bentuk persegi dan tegangan tarik setelah retak seluruhnya ditahan oleh tulangan baja sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 2.5. Sementara pada beton dengan tambahan PET, tegangan tarik juga ditahan oleh bagian beton. Hal ini ditunjukkan oleh Gambar 2.10.

Hasil ini menunjukkan bahwa benda uji HCS dengan tambahan PET dapat mencapai beban maksimal yang lebih tinggi dibandingkan dengan benda uji HCS tanpa tambahan PET. Di samping itu, hasil eksperimen ini juga menunjukkan bahwa benda uji HCS dengan tambahan PET sebesar 0,7% dari volume fraksi, secara-rata, dapat mencapai beban maksimal lebih tinggi dari benda uji HCS dengan tambahan PET sebesar 0,5% dari volume fraksi. Dengan mengacu pada hasil penelitian sebelumnya oleh Mahendya dan Adidasmana (2008) yang

menyebutkan bahwa persentase tambahan cacahan PET yang optimal adalah 0,7% dari volume fraksi (untuk kuat tekan, kuat lentur, dan kuat tarik belah) dan 0,5% dari volume fraksi (untuk kuat geser), maka dari hasil studi eksperimental ini dapat ditarik kesimpulan bahwa persentase tambahan PET yang optimal untuk HCS in situ nonprategang adalah 0,7% dari volume fraksi.



BAB 5 PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari studi eksperimental yang telah dilakukan, terdapat beberapa hal yang dapat disimpulkan, yaitu:

- 1) Hasil pengujian terhadap empat benda uji HCS dengan tambahan PET dan satu benda uji HCS tanpa tambahan PET menunjukkan bahwa benda uji HCS dengan tambahan PET mampu mencapai beban maksimal yang lebih tinggi dibandingkan dengan benda uji HCS tanpa tambahan PET.
- 2) Persentase tambahan PET yang optimal untuk HCS in situ nonprategang adalah 0,7% dari volume fraksi. Beban maksimal yang dapat ditahan oleh benda uji HCS dengan tambahan PET pada kadar tersebut mencapai 32,14% lebih tinggi dibandingkan dengan benda uji HCS tanpa tambahan PET.
- 3) Retak yang terjadi pada benda uji HCS untuk seluruh variasi didominasi oleh retak akibat lentur, meskipun pada beberapa benda uji terjadi juga retak akibat kombinasi lentur-geser di daerah sekitar beban terpusat.

5.2 Saran

- 1) Penerapan metode yang diusulkan dalam eksperimen ini memerlukan pengendalian kualitas (*quality control*) yang baik.
- 2) Penelitian lebih lanjut perlu dilakukan dengan jumlah benda uji yang lebih banyak dan menggunakan instrumentasi untuk mengukur regangan hingga benda uji mengalami keruntuhan (*failure*), sehingga dapat diketahui daktilitas dan grafik *moment-curvature* untuk HCS.
- 3) Perlu dilakukan studi lebih lanjut untuk mengetahui efektivitas dan efisiensi penggunaan cacahan PET pada HCS in situ nonprategang dari segi manajemen konstruksi. Studi ini dapat dilakukan dengan membandingkan biaya, mutu, dan waktu dari penggunaan konstruksi HCS in situ nonprategang dengan pelat beton konvensional.
- 4) Perlu dilakukan studi lebih lanjut untuk mengetahui pengaruh penambahan PET pada kapasitas elemen struktur yang rentan mengalami kegagalan

geser. Studi ini dapat dilakukan dengan melakukan pengujian terhadap balok tinggi atau balok dengan bentang yang pendek.



DAFTAR REFERENSI

- Adidasmana, Gede. (2008). *Penggunaan Limbah Botol Plastik (PET) Sebagai Campuran Beton untuk Meningkatkan Kapasitas Tekan, Lentur, Modulus Elastisitas, dan Poisson Ratio*.
- ASTM Standard C39. (2005). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. West Conshohocken.
- ASTM Standard C78. (2008). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*. West Conshohocken.
- ASTM Standard C143. (2008). *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*. West Conshohocken.
- ASTM Standard C192. (2007). *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. West Conshohocken.
- ASTM Standard C496. (1996). *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. West Conshohocken.
- Badan Standarisasi Nasional. (2002). *Standar Nasional Indonesia: 03-2847-2002*. Semarang: Penerbit Institut Teknologi Semarang.
- Chu Kia-Wang. (1998). *Reinforced concrete design*. Massachusetts: Addison Wesley Educational Publishers.
- Canadian Precast/Prestressed Concrete Institute. (2006). *Structural floor & roof systems: Precast/Prestressed Concrete*. Ontario.
- Chopra, Anil K. (1995). *Dynamics of structures*. New Jersey: Prentice-Hall.
- Ehrig, R. J. (editor). (1993). *Plastic recycling*. New York: Oxford University Press.
- Hawkins dan Ghosh. (2006). Shear strength of hollow core slabs. *PCI Journal*, 110-114.
- Hibbeler. (1997). *Mechanics of materials*. New Jersey: Prentice-Hall.
- MacGregor, James, dan James K. Wight. (2005). *Reinforced concrete: Mechanics and Design*. Singapura: Prentice-Hall.
- Mahendya, Bambang. (2008) *Penggunaan limbah botol plastik (PET) sebagai campuran beton untuk meningkatkan kapasitas tarik belah dan geser*.

- Micallef. (2005). Assessment of shear capacity of pre-stressed hollow core floor units in the local construction industry. *Building Industry Consultative Council*. 29 September 2010. http://www.bicc.gov.mt/bicc/files_folder/P%20Micallef.pdf
- Nawy, Edward G. (1990). *Beton Bertulang Suatu Pendekatan Dasar*. Bandung: PT. Eresco
- Neville, A. M. (1981). *Properties of concrete*. London: Pitman Publishing Ltd.
- Pajari, Matti. (2005). “Resistance of prestressed hollow core slabs against web shear failure” VIT Research Notes.
- Polyethylene terephthalate (PET) CAS No: 25038-59-9*. ---. 31 Desember 2010. Chemical Industry News & Intelligence. [http://www.icis.com/v2/chemicals/9076423/polyethylene terephthalate.html](http://www.icis.com/v2/chemicals/9076423/polyethylene%20terephthalate.html).
- Polyethylene terephthalate: Identificaion*. ---. 31 Desember 2010. <http://biade.itrust.de/biaen/lpext.dll/Infobase/uberschrift42438?f=templates&fn=main-h.htm&2.0>
- Wang, Chu-Kia. (1998). *Reinforced concrete design*. Massachusetts: Addison Wesley Educational Publishers.
- Young J. F., Mindess, S., Bentur, A. (editor). (1993). *The Science and Technology of Civil Engineering Material*. Prentice Hall.

Lampiran 1: Penamaan Benda Uji

1) Pengujian Material

i. Uji Tekan Beton:

- Beton Normal No. 1 (TN-1)
- Beton Normal No. 2 (TN-2)
- Beton Normal No. 3 (TN-3)
- Beton Normal No. 4 (TN-4)
- Beton Normal No. 5 (TN-5)
- Beton dengan Tambahan PET 0,5% No. 6 (T0,5%-1)
- Beton dengan Tambahan PET 0,5% No. 7 (T0,5%-2)
- Beton dengan Tambahan PET 0,5% No. 8 (T0,5%-3)
- Beton dengan Tambahan PET 0,5% No. 9 (T0,5%-4)
- Beton dengan Tambahan PET 0,5% No. 10 (T0,5%-5)
- Beton dengan Tambahan PET 0,7% No. 6 (T0,7%-1)
- Beton dengan Tambahan PET 0,7% No. 7 (T0,7%-2)
- Beton dengan Tambahan PET 0,7% No. 8 (T0,7%-3)
- Beton dengan Tambahan PET 0,7% No. 9 (T0,7%-4)
- Beton dengan Tambahan PET 0,7% No. 10 (T0,7%-5)

ii. Pengujian Kuat Lentur dengan Pembebanan Sepertiga Bentang pada Balok Sederhana

- Beton Normal No. 1 (LN-1)
- Beton Normal No. 2 (LN-2)
- Beton Normal No. 3 (LN-3)
- Beton dengan Tambahan PET 0,5% No. 1 (L0,5%-1)
- Beton dengan Tambahan PET 0,5% No. 2 (L0,5%-2)
- Beton dengan Tambahan PET 0,5% No. 3 (L0,5%-3)
- Beton dengan Tambahan PET 0,7% No. 1 (L0,7%-1)
- Beton dengan Tambahan PET 0,7% No. 2 (L0,7%-2)
- Beton dengan Tambahan PET 0,7% No. 3 (L0,7%-3)

Lampiran 1: Penamaan Benda Uji (Lanjutan)

iii. Uji Tarik Belah

- Beton Normal No. 1 (BN-1)
- Beton Normal No. 2 (BN-2)
- Beton Normal No. 3 (BN-3)
- Beton Normal No. 2 (BN-4)
- Beton Normal No. 3 (BN-5)
- Beton dengan Tambahan PET 0,5% No. 1 (B0,5%-1)
- Beton dengan Tambahan PET 0,5% No. 2 (B0,5%-2)
- Beton dengan Tambahan PET 0,5% No. 3 (B0,5%-3)
- Beton dengan Tambahan PET 0,5% No. 4 (B0,5%-4)
- Beton dengan Tambahan PET 0,5% No. 5 (B0,5%-5)
- Beton dengan Tambahan PET 0,7% No. 1 (B0,7%-1)
- Beton dengan Tambahan PET 0,7% No. 2 (B0,7%-2)
- Beton dengan Tambahan PET 0,7% No. 3 (B0,7%-3)
- Beton dengan Tambahan PET 0,7% No. 4 (B0,7%-4)
- Beton dengan Tambahan PET 0,7% No. 5 (B0,7%-5)

iv. Uji Geser

- Beton Normal No. 1 (GN-1)
- Beton Normal No. 2 (GN-2)
- Beton Normal No. 3 (GN-3)
- Beton dengan Tambahan PET 0,5% No. 1 (G0,5%-1)
- Beton dengan Tambahan PET 0,5% No. 2 (G0,5%-2)
- Beton dengan Tambahan PET 0,5% No. 3 (G0,5%-3)
- Beton dengan Tambahan PET 0,7% No. 1 (G0,7%-1)
- Beton dengan Tambahan PET 0,7% No. 2 (G0,7%-2)
- Beton dengan Tambahan PET 0,7% No. 3 (G0,7%-3)

v. Uji Kuat Tarik Baja

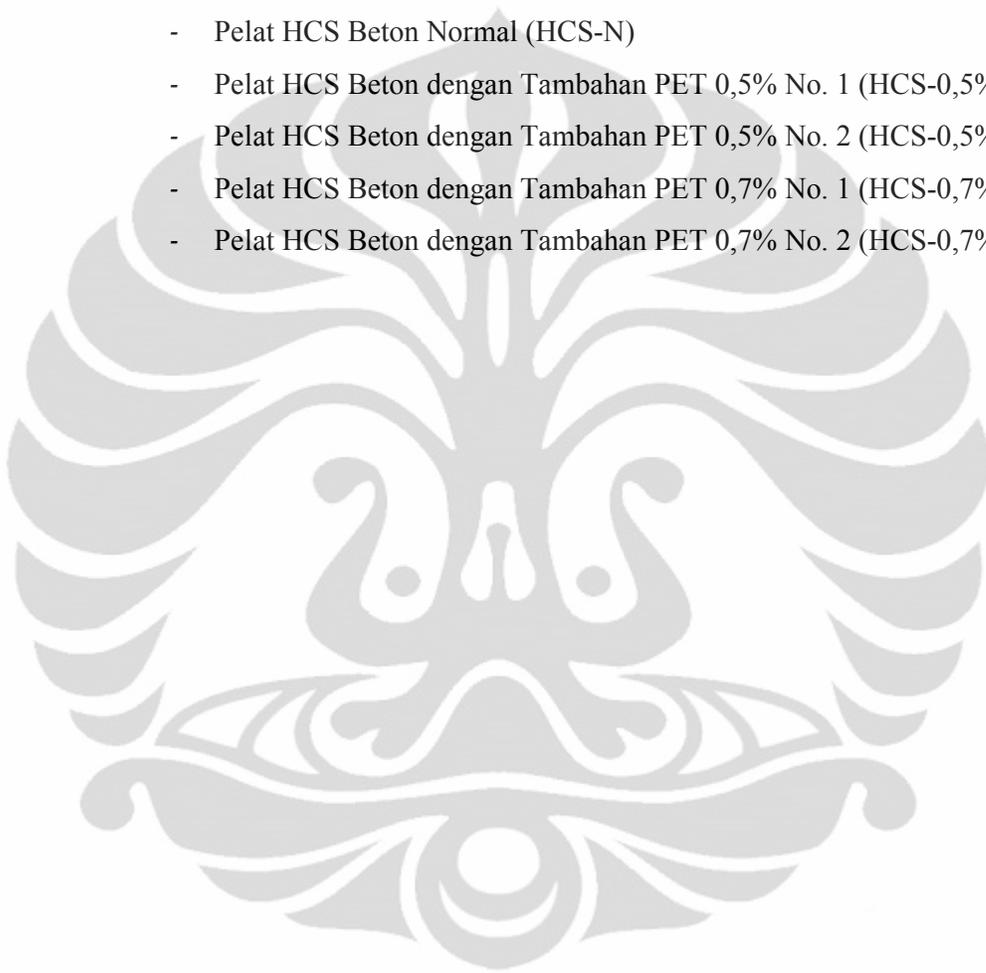
- Baja Polos Diameter 7,5 mm (SNI Φ 8) No. 1

Lampiran 1: Penamaan Benda Uji (Lanjutan)

- Baja Polos Diameter 7,5 mm (SNI Φ 8) No. 2
- Baja Polos Diameter 7,5 mm (SNI Φ 8) No. 3

2) Pengujian Pelat

- Pelat HCS Beton Normal (HCS-N)
- Pelat HCS Beton dengan Tambahan PET 0,5% No. 1 (HCS-0,5%-1)
- Pelat HCS Beton dengan Tambahan PET 0,5% No. 2 (HCS-0,5%-2)
- Pelat HCS Beton dengan Tambahan PET 0,7% No. 1 (HCS-0,7%-1)
- Pelat HCS Beton dengan Tambahan PET 0,7% No. 2 (HCS-0,7%-2)





LABORATORIUM STRUKTUR DAN MATERIAL

Departemen Teknik Sipil - Fakultas Teknik
Universitas Indonesia

Kampus UI Depok 16424, Indonesia (021) Telp. 787 4878 - 727 0029 (Ext.110/111) - 727 0028 (Fax)

No. Surat :

Kegiatan Penelitian :

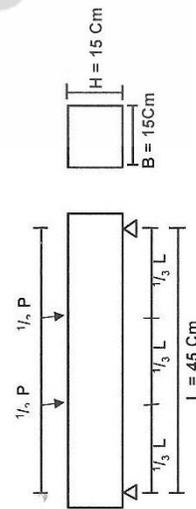
:

:

HASIL TEST LENTUR BALOK BETON CONCRETE FLEXURAL STRENGTH TEST

NO.	TANGGAL		UMUR (HARI)	KODE	BENTUK & LUAS PENAMPANG (Cm ²)	BENTANG (L) (Cm)	DIMENSI		BEBAN (P) (Kg)	W 1/6.b.l. ² (Cm ³)	MOMEN LENTUR M = 1/6.P.L (Kg.Cm)	TEGANGAN LENTUR (M/W) (Kg/Cm ²)	KETERANGAN
	DICOR	DITEST					(b) (Cm)	(h) (Cm)					
1	13/3/2011	13/4/2011	31	L0.5' - 1	balok	45	15,16	15,16	3600	580,12	27000	46,54	
2	13/3/2011	13/4/2011	31	L0.5' - 2	balok	45	15,12	15,37	3400	595,12	25500	42,85	
3	13/3/2011	13/4/2011	31	L0.5' - 3	balok	45	15,17	15,5	3800	607,43	28500	46,92	
4	13/3/2011	13/4/2011	31	L0.7' - 1	balok	45	15,07	15,18	3800	578,58	28500	49,26	
5	13/3/2011	13/4/2011	31	L0.7' - 2	balok	45	15,21	15,05	4100	573,8	30750	53,59	
6	13/3/2011	13/4/2011	31	L0.7' - 3	balok	45	15,14	15,28	3800	589,4	28500	48,75	
7	13/3/2011	13/4/2011	31	LN-1	balok	45	15	15	4000	562,5	30000	53,33	
8	13/3/2011	13/4/2011	31	LN-2	balok	45	15	15	3400	562,5	25500	45,33	
9	13/3/2011	13/4/2011	31	LN-3	balok	45	15	15	4100	562,5	30750	54,67	

DETAIL GAMBAR:

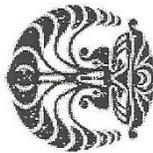


Depok, 13 April 2011.
Kepala Laboratorium,

Dr. Ir. Ely Tjahjono, DEA

Ditests oleh
Diperiksa oleh

: Yudi Permana
: Dimas A. Chandra



LABORATORIUM STRUKTUR DAN MATERIAL

Departemen Sipil - Fakultas Teknik
Universitas Indonesia

Kampus Baru UI Depok, Telp. 787 4878 - 727 0029 (Ext.110/111) - 727 0028 (Fax)

No. Surat : /H/LAB./FTUI/CSI/...../2008.

Untuk :

Proyek :

Alamat :

HASIL UJI KUAT BELAH BETON TEST RESULT OF SPLITTING TENSILE OF CONCRETE (ASTM C.496M-04)

No.	Tanggal		Umur (hari)	Kode	Bentuk Sampel	Tinggi (l) (cm)	Diameter (d) (cm)	Beban Maximum (P) (kg)	Kuat Belah (T) (kg/cm ²)	Keterangan
	Dicor	Dites								
1	13/3/2011	20/4/2011	38	B0.5%-1	Silinder	30	15	27500	39,32	T = 2.P/π.l.d
2	13/3/2011	20/4/2011	38	B0.5%-2	Silinder	30	15	26750	37,91	
3	13/3/2011	20/4/2011	38	B0.5%-3	Silinder	30	15	27500	39,57	
4	13/3/2011	20/4/2011	38	B0.5%-4	Silinder	30	15	25000	35,83	
5	13/3/2011	20/4/2011	38	B0.5%-5	Silinder	30	15	27500	39,04	
6	13/3/2011	20/4/2011	38	B0.7%-1	Silinder	30	15	26750	38,06	
7	13/3/2011	20/4/2011	38	B0.7%-2	Silinder	30	15	27500	38,87	
8	13/3/2011	20/4/2011	38	B0.7%-3	Silinder	30	15	26750	38,14	
9	13/3/2011	20/4/2011	38	B0.7%-4	Silinder	30	15	28750	41,44	
10	13/3/2011	20/4/2011	38	B0.7%-5	Silinder	30	15	26750	38,28	
11	13/3/2011	20/4/2011	38	BN-1	Silinder	30	15	26750	39,05	
12	13/3/2011	20/4/2011	38	BN-2	Silinder	30	15	25000	35,57	
13	13/3/2011	20/4/2011	38	BN-3	Silinder	30	15	27500	39,36	
14	13/3/2011	20/4/2011	38	BN-4	Silinder	30	15	27500	39,61	
15	13/3/2011	20/4/2011	38	BN-5	Silinder	30	15	23750	34,36	

Studi eksperimental : R. M. Dimas A. Chandra, FT UI, 2011

Ditests oleh
Diperiksa oleh

: Supri
: Dimas A. Chandra

Depok, 20 April 2011
Kepala Laboratorium,

Supri
Dr. Ir. Ely Ijahjono, DEA

Lampiran 5: Data Hasil Uji Geser

Nama	Hasil Pengujian	Tegangan Geser (MPa)	Rata-rata Tegangan Geser (MPa)	Standar Deviasi
GN-1	3.99	5.80	5.98	1.42
GN-2	5.15	7.48		
GN-3	3.21	4.67		
G0,5%-1	5.15	7.48	5.84	1.92
G0,5%-2	4.33	6.29		
G0,5%-3	2.57	3.74		
G0,7%-1	3.55	5.16	5.59	0.54
G0,7%-2	4.26	6.19		
G0,7%-3	3.73	5.42		

Lampiran 6: Uji Tarik Baja

Diameter	fy (kg/cm ²)		
	1	2	3
D8	298,56	288,6	288,6



Lampiran 7: Data Hasil Pengujian HCS-N



LABORATORIUM STRUKTUR DAN MATERIAL

Departemen Teknik Sipil - Fakultas Teknik

Universitas Indonesia

Kampus UI Depok 16424, Telp. 787 4874 - 727 0029 (Ext. 110-111) - 727 0028 (Fax)

Nama Sampel : HCS-N
Tanggal Pekerjaan : 10 April 2011
Dites Oleh : Apri S.

No.	Kode Pengujian	Hasil Bacaan						
		1	2	3	4	5	6	7
1	0	17.00	15.00	12.00	25.00	15.00	20.00	11.00
2	+60	16.86	14.88	11.95	24.95	14.94	19.91	10.92
3	100	16.78	14.85	11.78	24.84	14.80	19.84	10.85
4	200	16.66	14.75	11.60	24.76	14.68	19.69	10.73
5	300	16.55	14.65	11.44	24.69	14.55	19.52	10.52
6	350	16.45	14.59	11.35	24.63	14.48	19.44	10.44
7	400	16.39	14.56	11.28	24.59	14.41	19.38	10.38
8	450	16.33	14.52	11.20	24.54	14.37	19.32	10.32
9	500	16.26	14.40	11.05	24.47	14.29	19.26	10.25
10	550	16.22	14.37	11.02	24.40	14.21	19.19	10.18
11	600	16.12	14.32	10.95	24.30	14.12	19.11	10.10
12	650	16.11	14.25	10.85	24.24	14.06	19.06	10.06
13	700	16.07	14.19	10.76	24.14	13.96	19.00	10.00
14	750	16.20	14.14	10.66	24.05	13.87	18.94	9.95
15	800	15.98	14.10	10.55	23.95	13.75	18.86	9.90
16	850	16.06	14.00	10.05	23.41	13.22	18.79	9.92
17	900	16.05	13.97	9.72	23.15	12.89	18.74	9.96
18	950	16.12	13.86	8.96	22.38	12.17	18.74	10.02
19	1000	16.12	13.82	8.66	22.05	11.86	18.74	10.02
20	1050	16.12	13.79	8.53	21.93	11.74	18.69	10.01
21	1100	16.11	13.74	8.27	21.70	11.49	18.65	10.00
22	1150	16.11	13.69	8.04	21.46	11.26	18.58	9.99
23	1200	16.11	13.62	7.72	21.11	10.90	18.54	9.98
24	1250	16.25	13.55	6.95	20.40	10.18	18.48	10.10
25	1300	16.60	13.52	5.80	19.30	9.10	18.46	10.50

Lampiran 8: Data Hasil Pengujian HCS-0,5%-1



LABORATORIUM STRUKTUR DAN MATERIAL

Departemen Teknik Sipil - Fakultas Teknik

Universitas Indonesia

Kampus UI Depok 16424, Telp. 787 4874 - 727 0029 (Ext. 110-111) - 727 0028 (Fax)

Nama Sampel : HCS-0,5%-1

Tanggal Pekerjaan : 20 April 2011

Dites Oleh : Apri S.

No.	Kode Pengujian	Hasil Bacaan						
		1	2	3	4	5	6	7
1	0	15.00	20.00	16.00	20.00	17.00	12.00	15.00
2	+60	14.92	19.95	15.76	19.72	16.65	11.91	14.92
3	100	14.80	19.84	15.56	19.53	16.46	11.76	14.78
4	200	14.64	19.68	15.34	19.26	16.20	11.60	14.61
5	300	14.49	19.51	15.08	19.04	16.00	11.42	14.45
6	350	14.42	19.44	14.95	18.91	15.87	11.33	14.37
7	400	14.35	19.34	14.85	18.82	15.77	11.27	14.30
8	450	14.29	19.31	14.75	18.71	15.68	11.19	14.23
9	500	14.21	19.20	14.62	18.60	15.57	11.10	14.15
10	550	14.25	19.13	14.51	18.50	15.46	11.02	14.08
11	600	14.08	19.06	14.40	18.38	15.35	10.92	13.99
12	650	14.03	19.00	14.29	18.29	15.26	10.86	13.93
13	700	14.03	18.91	13.89	17.85	14.83	10.78	13.92
14	750	14.05	18.85	13.34	17.27	14.26	10.71	13.94
15	800	14.10	18.79	12.79	16.80	13.80	10.63	13.94
16	850	14.08	18.73	12.53	16.53	13.53	10.56	13.91
17	900	14.06	18.67	12.26	16.28	13.29	10.49	13.88
18	950	14.02	18.52	11.95	16.00	13.03	10.35	13.82
19	1000	14.01	18.48	11.62	15.61	12.65	10.29	13.79
20	1050	14.01	18.45	11.48	15.47	12.49	10.26	13.78
21	1100	13.99	18.38	11.22	15.23	12.25	10.20	13.75
22	1150	13.99	18.34	10.98	14.98	12.02	10.13	13.73
23	1200	13.98	18.27	10.70	14.71	11.73	10.09	13.71
24	1250	13.98	18.22	10.41	14.48	11.50	10.04	13.70
25	1300	13.98	18.16	10.14	14.11	11.14	9.96	13.68
26	1350	13.98	18.13	9.95	13.93	10.95	9.92	13.67
27	1400	13.98	18.08	9.64	13.65	10.68	9.85	13.65
28	1450	13.98	18.05	9.45	13.43	10.44	9.79	13.63
29	1500	13.99	17.99	9.10	13.10	10.10	9.72	13.62
30	1550	14.02	17.98	8.75	12.80	9.81	9.64	13.60
31	1600	14.25	17.93	8.10	12.12	9.10	9.58	13.67
32	FINAL	14.64	17.90		11.60	8.57		

Lampiran 9: Data Hasil Pengujian HCS-0,5%-2



LABORATORIUM STRUKTUR DAN MATERIAL

Departemen Teknik Sipil - Fakultas Teknik

Universitas Indonesia

Kampus UI Depok 16424, Telp. 787 4874 - 727 0029 (Ext. 110-111) - 727 0028 (Fax)

Nama Sampel : HCS-0,5%-2
Tanggal Pekerjaan : 22 April 2011
Dites Oleh : Apri S.

No.	Kode Pengujian	Hasil Bacaan						
		1	2	3	4	5	6	7
1	0	11.00	15.00	15.00	16.00	15.00	16.00	15.00
2	+60	10.92	14.96	14.90	15.90	14.90	15.92	14.96
3	100	10.80	14.82	14.78	15.79	14.83	15.89	14.91
4	200	10.65	14.66	14.56	15.56	14.60	15.75	14.76
5	300	10.52	14.52	14.34	15.34	14.37	15.61	14.61
6	350	10.44	14.44	14.23	15.23	14.26	15.49	14.52
7	400	10.36	14.33	14.11	15.11	14.14	15.43	14.46
8	450	10.31	14.30	14.02	15.00	14.04	15.40	14.39
9	500	10.24	14.22	13.90	14.89	13.94	15.30	14.30
10	550	10.17	14.16	13.80	14.77	13.83	15.22	14.23
11	600	10.11	14.08	13.69	14.66	13.73	15.15	14.15
12	650	10.02	13.98	13.58	14.55	13.62	15.05	14.06
13	700	9.99	13.94	13.45	14.43	13.49	14.95	14.03
14	750	9.94	13.85	13.30	14.17	13.23	14.88	14.02
15	800	10.05	13.76	12.39	13.45	12.46	14.82	14.04
16	850	10.11	13.73	11.70	12.73	11.77	14.72	14.05
17	900	10.10	13.67	11.46	12.47	11.52	14.68	14.03
18	950	10.10	13.61	11.20	12.16	11.21	14.63	13.96
19	1000	10.09	13.54	10.86	11.88	10.94	14.49	13.95
20	1050	10.08	13.49	10.65	11.61	10.67	14.44	13.94
21	1100	10.07	13.44	10.38	11.39	10.46	14.34	13.88
22	1150	10.06	13.38	10.10	11.04	10.13	14.30	13.88
23	1200	10.06	13.33	9.75	10.72	9.80	14.22	13.86
24	1250	10.06	13.27	9.45	10.44	9.53	14.11	13.83
25	1300	10.06	13.21	9.15	10.12	9.22	14.03	13.81
26	1350	10.06	13.16	8.85	9.84	8.91	14.03	13.81
27	1400	10.06	13.09	8.47	9.35	8.42	13.99	13.81
28	1450	10.08	13.02	8.00	9.03	8.09	13.91	13.84
29	FINAL	10.20	12.97	7.05			13.88	14.04

Lampiran 10: Data Hasil Pengujian HCS-0,7%-1



LABORATORIUM STRUKTUR DAN MATERIAL

Departemen Teknik Sipil - Fakultas Teknik

Universitas Indonesia

Kampus UI Depok 16424, Telp. 787 4874 - 727 0029 (Ext. 110-111) - 727 0028 (Fax)

Nama Sampel : HCS-0,7%-1

Tanggal Pekerjaan : 10 April 2011

Dites Oleh : Apri S.

No.	Kode Pengujian	Hasil Bacaan						
		1	2	3	4	5	6	7
1	0	20.00	15.00	15.00	15.00	15.00	19.00	11.00
2	+60	19.93	14.89	15.02	14.98	14.87	18.91	10.92
3	100	19.82	14.79	14.82	14.79	14.66	18.81	10.81
4	200	19.68	14.64	14.61	14.58	14.44	18.68	10.67
5	300	19.55	14.51	14.38	14.34	14.20	18.54	10.51
6	350	19.48	14.44	14.27	14.23	14.08	18.47	10.44
7	400	19.42	14.38	14.16	14.12	13.97	18.39	10.37
8	450	19.36	14.32	14.04	14.00	13.85	18.32	10.30
9	500	19.30	14.26	13.92	13.90	13.73	18.25	10.24
10	550	19.25	14.19	13.82	13.78	13.62	18.18	10.18
11	600	19.19	14.13	13.71	13.66	13.51	18.11	10.11
12	650	19.18	14.04	13.59	13.37	13.20	18.04	10.10
13	700	19.17	13.98	13.00	13.00	12.84	18.02	10.08
14	750	19.14	13.93	12.82	12.78	12.62	17.97	10.04
15	800	19.10	13.84	12.58	12.19	12.05	17.93	10.16
16	850	19.15	13.73	11.74	11.61	11.48	17.85	10.15
17	900	19.18	13.67	11.35	11.21	11.09	17.71	10.14
18	950	19.19	13.60	10.95	10.85	10.75	17.63	10.14
19	1000	19.19	13.55	10.61	10.55	10.45	17.58	10.13
20	1050	19.19	13.51	10.44	10.30	10.20	17.54	10.13
21	1100	19.18	13.43	10.06	10.02	9.94	17.44	10.13
22	1150	19.18	13.37	9.72	9.73	9.62	17.40	10.13
23	1200	19.18	13.32	9.46	9.42	9.36	17.34	10.13
24	1250	19.19	13.25	9.09	8.91	8.87	17.28	10.16
25	1300	19.25	13.19	8.46	7.85	7.80	17.26	10.23
26	1350	19.33	13.13	7.89	7.38	7.35	17.18	10.39
27	1400	19.51	13.09	6.37	6.33	6.29	17.10	10.62
28	1450	19.70	13.08	5.25	5.08	5.02	17.09	10.98

Lampiran 11: Data Hasil Pengujian HCS-0,7%-2



LABORATORIUM STRUKTUR DAN MATERIAL

Departemen Teknik Sipil - Fakultas Teknik

Universitas Indonesia

Kampus UI Depok 16424, Telp. 787 4874 - 727 0029 (Ext. 110-111) - 727 0028 (Fax)

Nama Sampel : HCS-0,7%-2

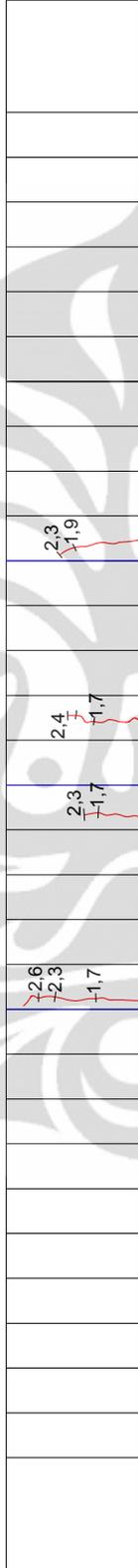
Tanggal Pekerjaan : 13 Mei 2011

Dites Oleh : Apri S.

No.	Kode Pengujian	Hasil Bacaan						
		1	2	3	4	5	6	7
1	0	19.00	16.00	16.30	15.98	16.98	24.17	13.31
2	+60	18.92	15.91	16.22	15.89	16.86	24.13	13.24
3	100	18.79	15.82	16.03	15.75	16.72	24.06	13.14
4	200	18.63	15.65	15.75	15.46	16.48	23.88	12.97
5	300	18.48	15.51	15.48	15.21	16.23	23.69	12.79
6	350	18.40	15.43	15.36	15.19	16.11	23.61	12.71
7	400	18.35	15.37	15.24	14.98	16.01	23.54	12.64
8	450	18.28	15.28	15.13	14.86	15.89	23.46	12.56
9	500	18.20	15.18	14.98	14.71	15.74	23.37	12.48
10	550	18.19	15.10	14.80	14.52	15.55	23.30	12.45
11	600	18.15	15.04	14.54	14.27	15.30	23.21	12.39
12	650	18.13	14.98	14.31	14.05	15.07	23.14	12.34
13	700	18.11	14.88	14.03	13.76	14.87	23.05	12.30
14	750	18.09	14.82	13.78	13.51	14.53	22.96	12.26
15	800	18.06	14.75	13.55	13.28	14.30	22.89	12.21
16	850	18.05	14.68	13.31	13.04	14.06	22.80	12.17
17	900	18.03	14.59	12.95	12.67	13.70	22.70	12.15
18	950	18.05	14.51	12.72	12.45	13.47	22.64	12.13
19	1000	18.00	14.45	12.30	12.03	13.04	22.55	12.09
20	1050	18.00	14.42	12.12	11.84	12.86	22.50	12.07
21	1100	17.98	14.35	11.84	11.58	12.59	22.39	12.02
22	1150	17.97	14.30	11.64	11.37	12.39	22.32	11.99
23	1200	17.97	14.23	11.37	11.10	12.12	22.25	11.96
24	1250	17.96	14.18	11.15	10.87	11.90	22.19	11.95
25	1300	17.95	14.10	10.86	10.57	11.60	22.11	11.92
26	1350	17.95	14.03	10.61	10.32	11.35	22.04	11.89
27	1400	17.95	13.94	10.26	9.96	11.00	21.94	11.88
28	1450	17.95	13.89	10.03	9.73	10.76	21.89	11.88
29	1500	17.95	13.84	9.66	9.36	10.40	21.79	11.85
30	1550	17.97	13.78	9.36	9.07	10.12	21.71	11.84
31	1600	17.98	13.69	9.03	8.72	9.77	21.65	11.85
32	1650	18.01	13.63	8.63	8.33	9.39	21.58	11.86
33	1700	18.28	13.60	7.22	6.91	7.98	21.53	12.12
34	FINAL 1	18.74	13.63	4.52	4.22	5.33	21.45	12.50
35	FINAL 2	19.45	13.49				21.31	13.05

Lampiran 12: Pola Retak Benda Uji Pelat HCS-N

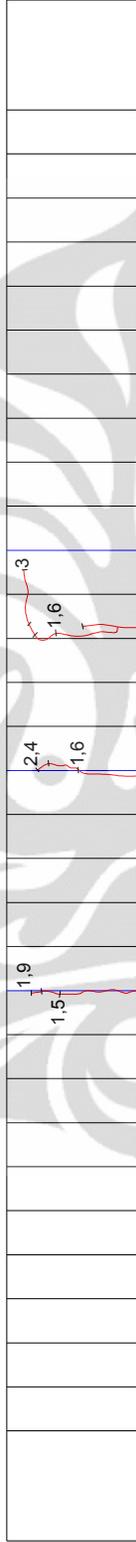
A



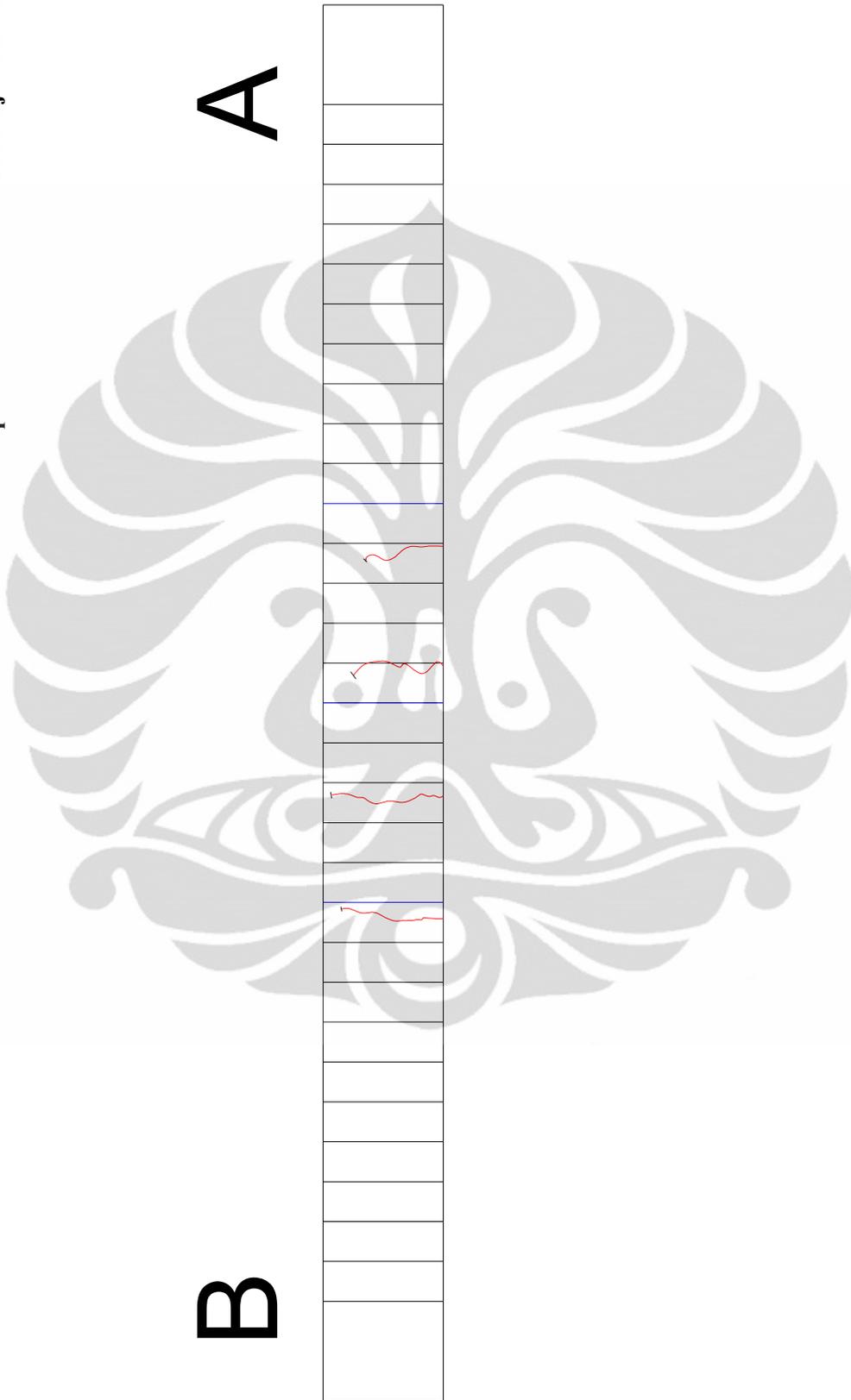
B

Lampiran 14: Pola Retak Benda Uji Pelat HCS-0,5%-2

A



B



Lampiran 16: Pola Retak Benda Uji Pelat HCS-0,7%-2

B

A

