

# PENGARUH PENAMBAHAN FLY ASH PADA CAMPURAN BETON TERHADAP KINERJA HUBUNGAN BALOK KOLOM DENGAN PEMBEBANAN STATIK (UMUR BETON 90 HARI)

Ade Dewangga<sup>1)</sup>, Edy Purwanto<sup>2)</sup>, Bambang Santosa<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret

<sup>2)</sup><sup>3)</sup>Pengajar Jurusan Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret

Jln Ir Sutami 36 A, Surakarta 57126

e-mail : ade.dewangga91@gmail.com

## Abstract

Indonesia has a fairly high seismic activity. As a result of this phenomenon, beside of taking victim also destroying buildings and infrastructure. The destruction of buildings and infrastructure collapse is suspected due to the selection hierarchy during implementation of design improper and application detailing of structure is inadequate. The destruction of part of HBK a trigger secondary moments are very large and cause the collapse of the building. Performance of the HBK can be improved by improving the way of concrete materials such as by the addition of steel fly ash. The purpose of this study is to find out the effect of fly ash addition on concrete mixing on column beam connection performance. Performance of HBK in this case is the ability of HBK to receive a load be reviewed of the load carrying ability, ductility, and pattern of cracking. Fly ash concrete experiencing compressive strength low, and estimated in age 90 days have a compressive strength which about approximately equal to normal concrete. This study applied the experimental method with specimens that are used in the form of beam-column with a beam size of 150 mm × 200 mm with a length of 1 m and a field size of 150 mm × 150 mm with a length of 2 m for static loading test at age 90 days, as well as 6-cylinder in which, 3 pieces of fly ash concrete specimens with the addition of F-type fly ash by 25 % of the total weight of cement and 3 pieces in the form of normal concrete to testing compressive strength and tensile strength at age 90 days. The results show that fly ash addition decreases the ability of the specimens fly ash concrete HBK in load carrying from maximum load is equal 12,730 kN obtained by the specimen normal concrete HBK amounted to 10,8733 kN. Fly ash addition increases ductility factor of specimen fly ash concrete HBK from 1,966 obtained by the specimen normal concrete HBK amounted to 2,806. Fly ash addition can also reduce the width of cracks on fly ash concrete that is from 0,55 cm on the specimen normal concrete HBK amounted to 0,45 cm.

**Keywords :** Beam-column connection (HBK), fly ash concrete, concrete age 90 days, and beam column connection performance.

## Abstrak

Indonesia memiliki aktivitas kegempaan yang cukup tinggi. Akibat fenomena ini, selain memakan korban jiwa juga banyak menghancurkan bangunan dan infrastruktur. Hancurnya bangunan dan infrastruktur ditengarai dikarenakan pemilihan hirarki keruntuhan pada saat desain pelaksanaan yang tidak tepat dan penerapan detailing struktur yang tidak memadai. Hancurnya bagian HBK menjadi pemicu terjadinya momen sekunder yang sangat besar dan mengakibatkan robohnya bangunan. Kinerja HBK dapat diperbaiki dengan jalan memperbaiki material beton dengan penambahan abu terbang atau *fly ash*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penambahan *fly ash* pada campuran beton terhadap kinerja hubungan balok kolom. Kinerja HBK dalam hal ini adalah kemampuan HBK dalam menerima beban ditinjau dari kemampuan menahan beban, daktilitas dan pola retak. Beton *fly ash* mengalami kuat tekan yang rendah di umur awal, dan diperkirakan pada umur 90 hari mempunyai kuat tekan yang kurang lebih sama dengan beton normal. Penelitian ini menerapkan metode eksperimental dengan benda uji yang digunakan berupa balok-kolom dengan ukuran balok 150 mm x 200 mm dengan panjang 1 m dan kolom ukuran 150 mm x 150 mm dengan panjang 2 m untuk uji pembebanan statik pada umur 90 hari, serta berupa silinder sebanyak 6 buah dimana, 3 buah benda uji beton *fly ash* dengan penambahan *fly ash* tipe F sebesar 25% dari jumlah berat semen dan 3 buah beton normal untuk uji kuat tekan dan kuat tarik belah pada umur 90 hari. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan *fly ash* menurunkan kemampuan benda uji HBK beton *fly ash* dalam menahan beban dari beban maksimum sebesar 12,730 kN yang didapat oleh HBK beton normal menjadi sebesar 10,873 kN. Penambahan *fly ash* dapat meningkatkan faktor daktilitas HBK beton *fly ash* dari 1,966 yang diperoleh HBK beton normal menjadi 2,158. Penambahan *fly ash* juga dapat mengurangi lebar retak pada HBK *fly ash* yaitu dari 0,55 cm pada HBK beton normal menjadi 0,45 cm.

**Kata Kunci:** Hubungan balok kolom (HBK), beton *fly ash*, umur beton 90 hari, kinerja hubungan balok kolom.

## PENDAHULUAN

Indonesia terletak di dua jalur gempa dan merupakan titik pertemuan empat lempeng tektonik, sehingga Indonesia memiliki aktivitas kegempaan yang cukup tinggi. Gempa banyak menghancurkan bangunan dan infrastruktur. Hubungan balok kolom (HBK) merupakan daerah yang kritis saat terjadi gempa. Beban gempa mempunyai pengaruh yang kompleks terhadap struktur, oleh sebab itu perlu dilakukan kajian yang mendalam untuk meningkatkan kinerja hubungan balok kolom (HBK). Perbaikan ditempuh dengan penambahan *fly ash*.

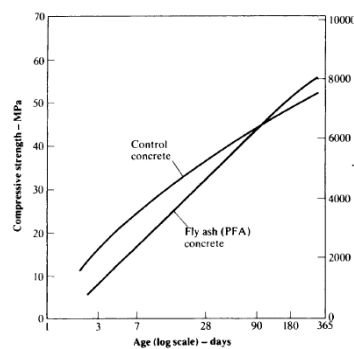
*Fly ash* sebagai material silika adalah material pozzolan yang paling banyak digunakan sebagai bahan tambah material semen. Dalam industri konstruksi pengembangan dan penggunaan semen campuran semakin meningkat

dan *fly ash* mendapat perhatian lebih karena penggunaannya dapat meningkatkan properti dari semen, menghemat biaya, dan mengurangi dampak negatif pada lingkungan. Penggunaan *fly ash* juga mengurangi rata-rata ukuran pori pada beton sehingga diperoleh permeabilitas beton yang lebih kecil. (Sumrering R dan Prinya C, 2008). Selain itu, nilai permeabilitas menjadi lebih rendah, panas hidrasi juga mengalami penurunan karena kenaikan temperatur terutama pada beton massa juga menjadi sangat rendah. Pemakaian *fly ash* juga merupakan tindakan peduli lingkungan karena dapat memanfaatkan limbah dan membuat limbah menjadi sesuatu yang bernilai ekonomis.

Beton *fly ash* mempunyai kuat tekan yang rendah dibandingkan beton normal pada saat umur awal dan diperkirakan pada saat umur 90 hari kuat tekannya kurang lebih sama. Kuat tekan maksimum dicapai pada penggunaan campuran *fly ash* 25 %, beton dengan campuran *fly ash* 25% memiliki kuat tekan lebih besar dibandingkan beton dengan campuran *fly ash* 15 % dan 20% baik pada umur 7, 28, dan 54 hari (Alve, 2010).

### Umur Beton

Kuat tekan beton akan bertambah sesuai dengan bertambahnya umur beton tersebut. Bertambahnya kuat tekan beton normal dengan beton *fly ash* berbeda. Kuat tekan beton *fly ash* lebih rendah dibanding beton normal, namun pada umur 90 hari kuat tekan beton *fly ash* akan sama besar dengan beton normal seperti pada Gambar 1.

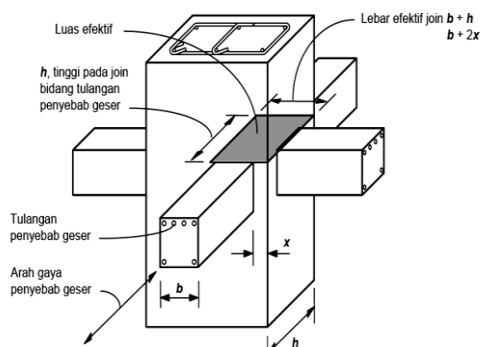


Gambar 1. Grafik perbandingan kuat tekan beton normal dan beton *fly ash*  
(Sumber : A.M. Neville dan JJ Brooks, *Concrete Technology 2<sup>nd</sup> Edition*, 2010)

### Hubungan Balok Kolom (HBK)

*State of the art* mengenai pertemuan balok kolom (komite 352 ACI-ASCE dalam Chu Kia Wang) mencantumkan provisi yang terperinci untuk perencanaan dari dua kelas pertemuan antara balok dan kolom yaitu :

- Pertemuan tipe I, terutama untuk pembebanan statis di mana kekuatan menjadi kriteria utama dan tidak diharapkan terjadinya deformasi yang berarti. Disini hanya dibutuhkan daktilitas saja.
- Pertemuan tipe II, biasanya untuk pembebanan gempa atau ledakan dimana dibutuhkan kekuatan yang dipertahankan melalui tegangan bertukar ke dalam daerah inelastik. Disini dibutuhkan daktilitas yang dipersyaratkan dalam peraturan gempa.



Gambar 2. Luas efektif hubungan balok kolom (HBK)

Daerah efektif dalam arsip penampang hubungan balok kolom (HBK) (lihat Gambar 2) harus diperhitungkan secara kuat karena adanya sistem pengekanan oleh tulangan sengkang. Dalam prakteknya akan terdapat banyak sekali pertemuan dari balok dan kolom serta sengkang itu sendiri sehingga menyulitkan pelaksanaannya. Kurangnya sengkang pada daerah joint tulangan utama yang tidak terkekang dan terdesak keluar akibat tekanan

yang tinggi dari inti beton. Adanya kesalahan dalam detailing dan pelaksanaan pemasangan tulangan pada joint dapat menyebabkan keruntuhan.

Rumus perhitungan kuat geser dapat dilihat sebagai berikut :

$$V_{jn} = c\sqrt{f'_c}A_j \dots\dots\dots [1]$$

keterangan:

$V_{jn}$  = Gaya geser nominal joint (kN).

$C$  = 1,7 (HBK terkekang pada keempat sisinya).

= 1,25 (HBK terkekang pada ketiga sisinya atau dua sisi yang berlawanan).

= 1 ( untuk hubungan lainnya).

$A_j$  = Luas efektif joint (mm<sup>2</sup>).

**Daktilitas**

Faktor daktilitas struktur gedung adalah rasio antara simpangan ultimit dan simpangan saat terjadi leleh pertama, seperti ditunjukkan pada Persamaan [2]

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \dots\dots\dots [2]$$

keterangan:

$\mu$  = daktilitas.

$\Delta_u$  = perpindahan dari 80% maksimum struktur.

$\Delta_y$  = perpindahan saat leleh pertama.

**Kekakuan**

Kekakuan didefinisikan sebagai gaya yang diperlukan untuk menghasilkan suatu lendutan (Gere dan Timoshenko, 1987). Kekakuan dapat dinyatakan dalam Persamaan [3]

$$K = \frac{P}{\Delta} \dots\dots\dots [3]$$

keterangan:

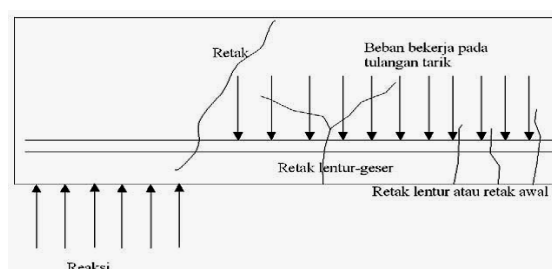
$K$  = kekakuan (kN/mm).

$P$  = gaya (kN).

$\Delta$  = perpindahan (mm).

**Pola Retak**

Pola – pola retak akibat dari lebihnya muatan beban rencana dapat dilihat pada Gambar 3. Perencanaan biasanya direncanakan untuk terjadi kuat lentur, tetapi retak miring dapat terjadi pada struktur beton bertulang sebagai kelanjutan dari retak lentur atau kadang sebagai retak independen (karena tidak dipasangnya tulangan geser). Setelah retak berkembang, struktur akan runtuh kecuali jika penampang beton yang retak menahan gaya yang bekerja.



Gambar 3. Pola Retak

**Kuat Tekan Beton (f<sub>c</sub>)**

Kuat tekan beton adalah kemampuan beton untuk menahan gaya tekan per satuan luas. Kuat tekan beton mengidentifikasi mutu dari sebuah struktur. Besarnya kuat tekan beton dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$f_c = \frac{P}{A} \dots\dots\dots [4]$$

keterangan:

$f_c$  = Kuat tekan (N/mm<sup>2</sup>)

$P$  = beban (N)

$A$  = Luas tampang (mm<sup>2</sup>)

**Kuat Tarik Belah (f<sub>t</sub>)**

Secara kasar nilai kuat tarik beton normal hanya berkisar antara 9%-15% dari kuat tekannya. Kuat tarik belah dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$f_t = \frac{2P}{\pi LD} \dots\dots\dots [5]$$

keterangan :

$f_t$  = kuat tarik belah (N/mm<sup>2</sup>)

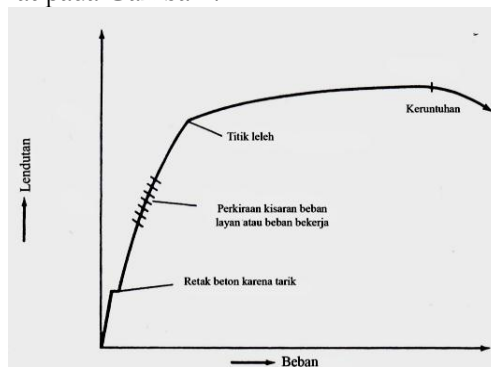
P = beban pada waktu beton terbelah (N)

L = Panjang benda uji silinder (mm)

D = diameter benda uji silinder (mm)

### Penentuan Titik Leleh

Tahapan pertama diagram, regangan yang terjadi kecil sehingga diagram hampir vertikal. Setelah itu kemiringan diagram akan sedikit berkurang karena beton tidak cukup kaku seperti pada tahap awal sebelum beton mulai retak. Diagram akan mengalami perubahan gradien dari miring menjadi hampir lurus mendatar. Agar beton bertulang mengalami leleh, diperlukan beban tambahan yang cukup besar untuk meningkatkan lendutan beton bertulang. Lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram momen-kurva untuk balok beton bertulang yang mengalami tarik (sumber: J.C. McCormac, *Desain Beton Bertulang*)

### METODE PENELITIAN

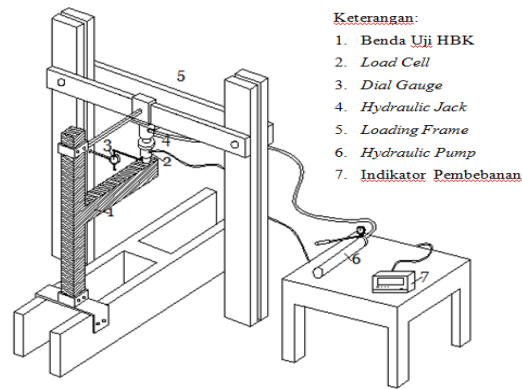
Penelitian ini menggunakan metode eksperimental yang dilakukan di laboratorium. Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian bahan, kuat tekan, kuat tarik belah dan hubungan balok kolom dengan pembebanan statik (lihat Gambar 5). Kuat tekan rencana beton normal adalah 20 Mpa. Benda uji yang digunakan dalam pengujian ini berupa benda uji silinder (lihat Tabel 1) dan elemen struktur hubungan balok kolom (lihat Tabel 2).

Tabel 1. Benda uji silinder.

Ukuran (mm)	Spesifikasi material		Kode Benda uji
	Jenis beton	Prosentase fly ash (%)	
Ø15 – H30	Beton normal	-	S-N1 <sub>90</sub> s/d S-N6 <sub>90</sub>
Ø15 – H30	Beton fly ash	25	S-F1 <sub>90</sub> s/d S-F6 <sub>90</sub>

Tabel 2. Benda uji elemen hubungan balok kolom

Ukuran		Spesifikasi material		Kode Benda Uji
Balok (mm)	Kolom (mm)	Jenis beton	Prosentase fly ash (%)	
150 x 200	150 x 150	Beton normal	-	HBK-N1 <sub>90</sub> s/d N3 <sub>90</sub>
150 x 200	150 x 150	Beton fly ash	25	HBK-F1 <sub>90</sub> s/d F3 <sub>90</sub>



Gambar 5. *Setting* pengujian benda uji HBK

### HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

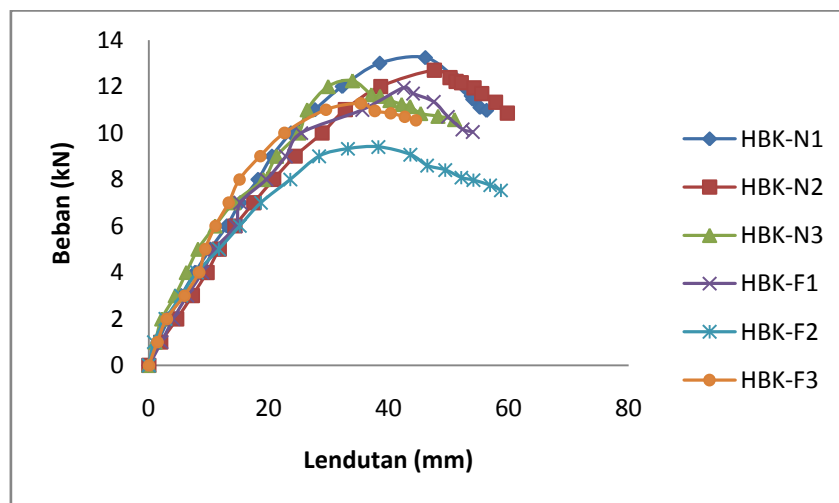
Pengujian benda uji silinder dilakukan pada 6 buah benda uji beton normal dan 6 buah benda uji beton fly ash serta pengujian benda uji hubungan balok kolom (HBK) dilakukan pada 3 buah benda uji beton normal dan 3 buah benda uji beton fly ash. Pengujian ini meliputi pengujian kuat tekan, kuat tarik, beban, lendutan, daktilitas, kekakuan, dan titik leleh serta pengamatan pola retak. Hasil pengujian tersaji pada Gambar 6 – 8 serta Tabel 3 – 7.

Tabel 3. Hasil pengujian kuat tekan beton

Benda uji	P maks (kN)	f <sub>c</sub> (MPa)	f <sub>cr</sub> (MPa)	Prosentase Penurunan (%)
S-N1 <sub>90</sub>	460	25,46		
S-N2 <sub>90</sub>	450	24,91	25,70	-
S-N3 <sub>90</sub>	470	26,72		
S-F1 <sub>90</sub>	480	26,80		
S-F2 <sub>90</sub>	460	25,57	25,65	0,16
S-F3 <sub>90</sub>	450	24,58		

Tabel 4. Hasil pengujian kuat tarik belah beton

Benda uji	P maks (kN)	f <sub>t</sub> (MPa)	f <sub>tr</sub> (MPa)	Prosentase Penurunan (%)
S-N4 <sub>90</sub>	110	1,55		
S-N5 <sub>90</sub>	100	1,41	1,45	-
S-N6 <sub>90</sub>	100	1,39		
S-F4 <sub>90</sub>	100	1,42		
S-F5 <sub>90</sub>	100	1,41	1,40	3,55
S-F6 <sub>90</sub>	100	1,38		



Gambar 6. Grafik beban dan lendutan HBK beton normal dan beton *fly ash*

Tabel 5. Nilai beban dan lendutan saat terjadi *crack*, *yield*, *peak*, dan *failure* benda uji HBK

Benda uji	Crack		Yield		Peak		Failure	
	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)
HBK-N1 <sub>90</sub>	5,00	10,25	11,00	27,70	13,24	46,10	10,97	56,30
HBK-N2 <sub>90</sub>	6,00	14,35	11,00	32,70	12,70	47,60	10,85	59,76
HBK-N3 <sub>90</sub>	5,00	8,20	10,00	25,00	12,25	33,95	10,58	50,97
HBK-F1 <sub>90</sub>	5,00	10,95	10,00	25,40	11,95	42,50	10,05	54,00
HBK-F2 <sub>90</sub>	5,00	11,70	9,00	28,40	9,40	38,25	7,53	58,70
HBK-F3 <sub>90</sub>	8,00	15,10	10,00	22,60	11,27	35,30	9,87	51,55

- Beban maksimum rata-rata pada HBK beton normal yaitu

$$P \text{ max rata - rata} = \frac{13,24 + 12,70 + 12,25}{3} = 12,73 \text{ kN}$$

- Beban maksimum rata-rata pada HBK beton *fly ash* yaitu

$$P \text{ max rata - rata} = \frac{11,95 + 9,40 + 11,27}{3} = 10,873 \text{ kN}$$

Gambar 6 menunjukkan bahwa kapasitas beban HBK beton *fly ash* masih dibawah HBK beton normal. Beban maksimum rata – rata yang dapat ditahan oleh HBK beton *fly ash* sebesar 12,730 kN, yaitu 17,075% dibawah HBK beton normal yang dapat menahan sebesar 10,873 kN.

Tabel 6. Faktor daktilitas benda uji HBK

Benda uji	$\Delta u$ (mm)	$\Delta y$ (mm)	Faktor daktilitas $\mu$ $=\Delta u/\Delta y$	Faktor daktilitas rata-rata ( $\mu$ )	Kenaikan $\mu$ HBK-F <sub>90</sub> terhadap HBK-N <sub>90</sub> (%)
HBK-N1 <sub>90</sub>	56,30	27,70	2,032		
HBK-N2 <sub>90</sub>	59,76	32,70	1,828	1,966	-
HBK-N3 <sub>90</sub>	50,97	25,00	2,039		
HBK-F1 <sub>90</sub>	54,00	25,40	2,126		
HBK-F2 <sub>90</sub>	58,70	28,40	2,067	2,158	8,883
HBK-F3 <sub>90</sub>	51,55	22,60	2,281		

Tabel 6 menunjukkan faktor daktilitas benda uji HBK beton *fly ash* mengalami kenaikan sebesar 8,883% dibandingkan dengan benda uji HBK beton normal.



Gambar 7. Pola retak HBK beton normal

Kerusakan cenderung terjadi pada joint sehingga terjadi kegagalan stuktur pada HBK beton normal seperti yang terlihat pada Gambar 7. Retak maksimum rata – rata pada HBK beton normal sebesar 0,55 cm.



Gambar 8. Pola retak HBK beton *fly ash*

Gambar 8 menunjukkan banyaknya keretakan pada joint sehingga terjadi kegagalan struktur pada joint HBK beton *fly ash*. Retak maksimum rata – rata pada HBK beton *fly ash* sebesar 0,45 cm.

## SIMPULAN

Kesimpulan dari hasil pengujian dan analisis beton fly ash dan beton normal adalah sebagai berikut :

- Penambahan *fly ash* pada campuran beton menurunkan kemampuan benda uji HBK beton *fly ash* dalam menahan beban dari beban maksimum sebesar 12,730 kN yang didapat oleh HBK beton normal menjadi sebesar 10,873 kN .
- Penambahan *fly ash* dapat meningkat faktor daktilitas benda uji HBK beton *fly ash* dari sebesar 1,966 yang didapat oleh HBK beton normal yaitu menjadi sebesar 2,158.
- Penambahan *fly ash* dapat mengurangi lebar retak pada benda uji HBK beton *fly ash* yaitu dari sebesar 0,55 cm pada HBK beton normal menjadi 0,45.
- Penambahan *fly ash* menurunkan kemampuan HBK dalam menahan beban, namun bagus untuk meningkatkan faktor daktilitas dan mengurangi lebar retak.

## REKOMENDASI

Rekomendasi yang dapat kami berikan untuk menindaklanjuti hasil penelitian ini adalah

- Campuran beton menggunakan *fly ash* sebaiknya ditambahkan dengan zat aditif yang dapat mempercepat pengerasan beton, sehingga beton dapat menerima beban yang maksimal dan tidak perlu menunggu waktu yang lama.
- Fly ash* digunakan sebaiknya dari batu bara tua. Jenis batu bara dapat diketahui dengan memberi tetesan air pada *fly ash*, jika hitam pekat merupakan batu bara muda dan jika warnanya menyerupai semen atau keabuan merupakan batu bara tua.
- Ketelitian dalam pencampuran prosentase bahan sangat diperlukan untuk mencapai hasil yang maksimal.
- Sebaiknya alat – alat penunjang penelitian tidak hanya ada satu, jadi jika terjadi kerusakan langsung ada gantinya.
- Setting* pengujian benda uji harus diperhatikan agar perletakkan benda uji sesuai dengan yang direncanakan, sehingga daerah penjepitan benar – benar terjepit.
- Perlu dilakukan penelitian lanjutan menggunakan pembebanan dinamik.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Puji syukur atas kehadiran Tuhan Yang Maha Kuasa, sehingga penelitian ini dapat terselesaikan. Terelesainya penyusunan penelitian ini berkat dukungan dan doa dari orang tua, untuk itu kami ucapkan terima kasih. Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada Edy Purwanto, ST, MT dan Ir. Bambang Santosa, MT , selaku pembimbing yang dengan penuh kesabaran telah memberi koreksi dan arahan sehingga menyempurnakan penyusunan. Rasa terima kasih penulis sampaikan khusus untuk Bahreisi, Eir dan Harjun, selaku tim kerja yang pantang menyerah. Pada kesempatan ini kami mengucapkan terima kasih yang tulus kepada semua pihak yang telah berperan dalam mewujudkan penelitian ini secara langsung maupun tidak langsung khususnya mahasiswa sipil UNS 2009.

## REFERENSI

- Anonim, 1971, "*Peraturan Beton Bertulang Indonesia*", Bandung : Departemen Pekerjaan Umum dan Tenaga Listrik Direktorat Jendral Ciptakarya Lembaga Penyelidikan Masalah Bangunan.
- Anonim, 1982, "*Persyaratan Umum Bahan Bangunan di Indonesia (PUBI 1982)*", Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Pemukiman, Badan Penelitian dan Pengembangan PU.
- Anonim, 2002, "*Annual Book of ASTM Standarts 2002*", Volume 04.03. USA : ASTM Internasional.
- Dipohusodo, I., 1990, "*Struktur Beton Bertulang*", Jakarta: PT Gramedia.
- L.J. Murdock dan K.M. Brook (Alih bahasa Stepanus Hendarko), 1991, "*Bahan dan Praktek Beton*", Jakarta: Erlangga.
- McCormac, J.C., 2003, "*Design of Reinforced Concrete (Fifth edition)* (terjemahan)", Jakarta: Erlangga
- Nawy, E.G., 1996, "*Reinforcement Concrete a Fundamental Approach (Third Edition)*", Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Neville, A.M. dan Brooks, J.J., 1987, "*Concrete Technology*", New York: Longman Scientific & Technical.
- Paul Nugraha, Antoni, 2007, "*Teknologi Beton, dari material, Pembuatan, ke Beton Kinerja Tinggi*", Yogyakarta: Penerbit Andi.
- Tjokrodinuljo, K., 1996, "*Teknologi Beton*", Yogyakarta: Biro Penerbit Keluarga Mahasiswa Teknik Sipil, Universitas Gadjah Mada.
- Wang. C.K, Salmon C.G., 1993, "*Desain Beton Bertulang, Edisi ke-4, Jilid I*", Erlangga. Jakarta.
- Yunus, A., 2010, "*Kuat Tekan dan Kuat Lentur Beton dengan Bahan Tambah Fly Ash sebagai Bahan Perkerasan Kaku (Rigid Pavement)*", Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Negeri Sebelas Maret Surakarta.