

**TUGAS AKHIR
PENELITIAN LABORATORIUM**

**KUAT LENTUR BALOK BETON BERTULANG
PASCA BAKAR DENGAN PERBAIKAN PASTA SEMEN**



Disusun Oleh :

**TONNY PRASETYO
NIM : 95 310 186**

**SRI PALUPI LISTIYANI
NIM : 95 310 266**

**JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
2000**

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**KUAT LENTUR BALOK BETON BERTULANG
PASCA BAKAR DENGAN PERBAIKAN PASTA SEMEN**

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Guna Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik Sipil
Pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil Dan Perencanaan
Universitas Islam Indonesia**

disusun oleh :

**Nama : Tonny Prasetyo
No. Mhs : 95 310 186**

**Nama : Sri Palupi Listiyani
No. Mhs : 95 310 266**

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

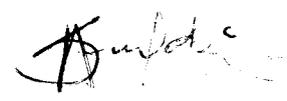
Ir. H.M.Samsudin, MT

Dosen Pembimbing I

Ir. Fatkhurrohman N, MT

Dosen Pembimbing II





Tanggal : 11-12-2000



Tanggal : 11/12-2000

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmaanirrahiim

Assalamu'alaikum wr.wb.

Puji syukur ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian tentang **KUAT LENTUR BALOK BETON BERTULANG PASCA BAKAR DENGAN PERBAIKAN PASTA SEMEN** ini dengan baik.

Penelitian yang merupakan salah satu syarat untuk mencapai derajat Sarjana S-1 ini dilakukan di Laboratorium Struktur dan Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik, Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.

Dengan selesainya laporan penelitian ini, penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Ir.H.M Samsudin , MT., selaku dosen Pembimbing Utama yang dengan penuh kesabaran dan ketekunan telah meluangkan waktunya untuk membimbing penulis.
2. Ir. Fatkhurrohman Nursodik, MT., selaku dosen Pembimbing Pendamping dan juga selaku Kepala Laboratorium Struktur, Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia yang telah memberikan ide-ide dasar dan bimbingannya hingga selesainya penelitian penulis.

3. Ir. Widodo, MSCE, PhD, selaku Dekan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
4. Ir. Tadjuddin BMA, MS, selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
5. Ir. Ilman Noor, selaku Kepala laboratorium Bahan Konstruksi Teknik Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia, yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk melakukan penelitian di Laboratorium Bahan konstruksi Teknik.
6. Ibu dan Ayah tercinta yang telah membimbing sejak kecil hingga kini dan selalu memberi dorongan baik moral maupun material selama pelaksanaan pendidikan, penelitian dan penulisan skripsi ini.
7. Segenap staff dan karyawan Laboratorium Bahan konstruksi teknik dan Struktur Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia.
8. Rekan-rekan F'95 serta semua pihak yang tidak bisa kami sebutkan satu persatu yang telah membantu penelitian ini.

Penulis menyadari bahwa hasil karya penelitian ini masih jauh dari sempurna, namun penulis berharap agar hasil yang diperoleh ini bermanfaat bagi penelitian-penelitian selanjutnya.

Wabillahittaufik walhidayah, wassalamu'alaikum wr.wb.

Yogyakarta, Maret 2000

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR SIMBOL	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
ABSTRAKSI	xvii

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Tujuan Penelitian.....	2
1.3. Manfaat Penelitian.....	2
1.4. Batasan Masalah.....	2
1.5. Metode Penelitian.....	3

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pengertian Beton.....	4
2.2. Baja Tulangan.....	5
2.3. Kekuatan/ Ketahanan Beton Terhadap Kebakaran.....	5
2.3.1. Pengaruh Temperatur Pada Kuat Desak Beton.....	6

2.3.2. Sifat Fisik Beton Pada Temperatur Tinggi	7
2.3.3. Sifat Pasta Semen Pada Temperatur Tinggi.....	8
2.3.4. Sifat Agregat Pada Temperatur Tinggi	9
2.4. Hubungan Temperatur Dengan Modulus Elastis Beton	9
2.5. Kapasitas Momen Retak	10
2.6. Kekuatan Beton	11
2.7. Umur Beton.....	11
2.8. Perancangan Campuran Beton	11

BAB III LANDASAN TEORI

3.1. Kuat Lentur Balok Persegi.....	13
3.2. Momen Kapasitas.....	14
3.3. Hubungan Beban Dan Lendutan	16
3.4. Perhitungan Momen Retak.....	18
3.5. Persamaan Diferensial Untuk Defleksi Balok.....	18
3.6. Momen Dan Kelengkungan.....	22
3.7. Hipotesa.....	29

BAB IV METODOLOGI PENELITIAN

4.1. Bahan Penyusun Beton.....	30
4.1.1. Semen.....	30
4.1.2. Agregat.....	30
4.1.3. Air.....	31
4.1.4. Besi Tulangan Beton.....	31
4.1.5. Kawat Bendrat.....	32

4.1.6. Kayu Lapis.....	32
4.1.7. Bahan Perbaikan.....	32
4.2. Alat Yang digunakan.....	33
4.2.1. Ayakan.....	33
4.2.2. Timbangan.....	33
4.2.3. Mistar Dan Kaliper.....	33
4.2.4. Mesin Uji Kuat Tarik.....	33
4.2.5. Mesin Uji Kuat Desak.....	34
4.2.6. Mesin Pengaduk Beton.....	34
4.2.7. Cetok Dan Talam Baja.....	35
4.2.8. Kerucut Abrams.....	35
4.2.9. Cetakan Benda Uji.....	35
4.2.10. Tungku Pembakaran.....	35
4.2.11. Thermokopel.....	36
4.2.12. Dukungan Sendi Dan Rol.....	36
4.2.13. Loading Frame.....	36
4.2.14. Dial Gauge.....	37
4.2.15. Hidraulic Jack.....	38
4.3. Pelaksanaan Penelitian.....	39
4.3.1. Persiapan Bahan.....	39
4.3.2. Pembuatan sampel.....	40
4.3.3. Perawatan	40
4.3.4. Pembakaran Sampel.....	41

4.3.5. Perbaikan Struktur Beton.....	42
4.3.6. Pengujian Sampel.....	46

BAB V HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

5.1. Hasil Penelitian.....	47
5.1.1. Hasil Uji Kuat Desak Beton.....	47
5.1.2. Hasil Uji Kuat Tarik Baja Tulangan.....	48
5.1.3. Hasil Pembakaran Balok Uji.....	48
5.1.4. Hasil Uji Lentur Balok.....	49
5.1.5. Hubungan Momen Dengan Kelengkungan.....	53
5.2. Pembahasan.....	59
5.2.1. Pengaruh Waktu Terhadap Kuat Tekan Beton.....	59
5.2.2. Kuat Lentur Sisa Ditinjau Dari Hubungan Beban Dan Lendutan.....	60
5.2.3. Penurunan Momen Akibat Kebakaran Secara Analitis.....	61
5.2.4. Degradasi Momen Dan Faktor Kekakuan Ditinjau Dari Grafik Momen-Kelengkungan.....	64

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan.....	67
6.2. Saran.....	69

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

No.	Nama Gambar	Hal
3.1.	Distribusi tegangan dan regangan pada penampang balok.....	14
3.2.	Blok tegangan ekuivalen Withney tulangan rangkap.....	16
3.3.	Hubungan beban dan defleksi.....	17
3.4.	Deformasi segmen balok dalam lenturan.....	19
3.5.	Kurva Lendutan.....	20
3.6.	Grafik momen kelengkungan.....	21
3.7.	Kelengkungan balok.....	22
3.8.	Kurva momen kelengkungan.....	28
3.9.	Hubengan M dan Φ balok beton pasca bakar.....	29
4.1.	Tulangan benda uji.....	32
4.2.	Universal Testing Material.....	34
4.3.	Dukungan Sendi dan Rol.....	36
4.4.	Bentuk fisik <i>Loading Frame</i>	37
4.5.	Dial gauge.....	38
4.6.	<i>Hydraulic jack</i>	38
4.7.	Model balok.....	40
4.8.	Grafik hubungan suhu dan waktu pembebanan.....	42
4.9.	Metode pembebanan.....	46
5.1.	Grafik beban danLendutan balok Standard suhu ruang.....	50
5.2.	Grafik beban dan lendutan balok suhu 400° C	51

5.3.	Grafik beban dan lendutan balok suhu 600°C	52
5.4.	Kurva momen kelengkungan tri linier teoritis.....	54
5.5	Grafik momen dan kelengkungan balok normal.....	55
5.6	Grafik momen dan kelengkungan normal suhu ruang dan teoritis.....	56
5.7	Grafik momen kelengkungan balok suhu 400°C dengan dan tanpa perbaikan	57
5.8	Grafik momen kelengkungan balok suhu 400°C dengan dan tanpa perbaikan.....	58
5.9.	Grafik hubungan kuat tekan dan umur beton.....	59

DAFTAR TABEL

No.	Nama Tabel	Halaman
5.1	Hasil Uji Kuat Tarik Baja Tulangan	48
5.2	Pengamatan Fisual	49
5.3	Hasil pengujian Kuat lentur balok Standard 0C	50
5.4	Analisa Data	53
5.5	Perhitungan Momen Kekakuan Teoritis	53
5.6	hubungan Momen kelengkungan balok normal	55
5.7	Hasil analisa	65

DAFTAR LAMPIRAN

Nomor	Judul Lampiran	Halaman
Lampiran 1	Surat Keterangan.....	72
Lampiran 2	Data Pemeriksaan Berat Jenis Agregat halus.....	73
Lampiran 3	Data Pemeriksaan Gradasi Agregat Halus.....	74
Lampiran 4	Data Pemeriksaan Agregat Kasar.....	75
Lampiran 5	Data Pemeriksaan Berat Volume Agregat Kasar.....	76
Lampiran 6	Data Kuat Tekan Silinder Beton.....	77
Lampiran 7	Hasil Pengujian Kuat Tarik Baja.....	79
Lampiran 8	Perencanaan Campuran Beton	80
Lampiran 9	Perhitungan Momen Kelengkungan Secara Teoritis.....	84
Lampiran 10	Data Hasil Pengujian Kuat Lentur Balok Beton Bertulang Suhu Ruang.....	87
Lampiran 11	Data Hasil Pengujian Kuat Lentur Balok Beton Bertulang Suhu Normal 400°C Tanpa Perbaikan.....	88
Lampiran 12	Data Hasil Pengujian Kuat Lentur Balok Beton Bertulang Suhu Normal 400°C dengan Perbaikan.....	89
Lampiran 13	Data Hasil Pengujian Kuat Lentur Balok Beton Bertulang Suhu Normal 600°C Tanpa Perbaikan.....	90
Lampiran 14	Data Hasil Pengujian Kuat Lentur Balok Beton Bertulang Suhu Normal 600°C Dengan Perbaikan	91
Lampiran 15	Grafik Beban dan Defleksi Balok Beton Normal.....	92
Lampiran 16	Suhu.Ruang Grafik Beban dan Defleksi Balok Beton Pasca Bakar suhu 400°C Tanpa Perbaikan.....	93
Lampiran 17	Beban dan Defleksi Balok Beton Pasca Bakar suhu 400°C Dengan Perbaikan.....	94

Lampiran 18	Beban dan Defleksi Balok Beton Pasca Bakar suhu 600°C Tanpa Perbaikan.....	95
Lampiran 19	Grafik Beban dan Defleksi Balok Beton Pasca Bakar suhu 600°C Dengan Perbaikan.....	96
Lampiran 20	Grafik Momen Dan Kelengkungan Balok Normal Suhu Ruang.....	97
Lampiran 21	Grafik Momen Dan Kelengkungan Balok Beton Pasca Bakar Suhu 400°C Tanpa Perbaikan.....	98
Lampiran 22	Grafik Momen Dan Kelengkungan Balok Beton Pasca Bakar Suhu 400°C Dengan Perbaikan.....	99
Lampiran 23	Grafik Momen Dan Kelengkungan Balok Beton Pasca Bakar Suhu 600°C Tanpa Perbaikan.....	100
Lampiran 24	Grafik Momen Dan Kelengkungan Balok Beton Pasca Bakar Suhu 600°C Dengan Perbaikan.....	101
Lampiran 25	Grafik Awal Beban Dan Defleksi Balok Beton Normal....	102
Lampiran 26	Suhu Ruang Grafik Awal Beban Dan Defleksi Balok Beton Pasca Bakar Suhu 400°C Tanpa Perbaikan.....	103
Lampiran 27	Grafik Awal Beban Dan Defleksi Balok Beton Pasca Bakar Suhu 400°C Dengan Perbaikan.....	104
Lampiran 28	Grafik Awal Beban Dan Defleksi Balok Beton Pasca Bakar Suhu 600°C Tanpa Perbaikan.....	105
Lampiran 29	Grafik Awal Beban Dan Defleksi Balok Beton Pasca Bakar Suhu 600°C Dengan Perbaikan.....	106
Lampiran 30	Grafik Awal Momen Dan Kelengkungan Balok Beton Normal Suhu Ruang.....	107
Lampiran 31	Grafik Awal Momen Dan Kelengkungan Balok Beton Pasca Bakar Suhu 400°C Tanpa Perbaikan.....	108
Lampiran 32	Grafik Awal Momen Dan Kelengkungan Balok Beton Pasca Bakar Suhu 400°C Dengan Perbaikan.....	109

Lampiran 33	Grafik Awal Momen Dan Kelengkungan Balok Beton Pasca Bakar Suhu 600°C Tanpa Perbaikan.....	110
Lampiran 34	Grafik Awal Momen Dan Kelengkungan Balok Beton Pasca Bakar Suhu 600°C Dengan Perbaikan.....	111

KUAT LENTUR BALOK BETON BERTULANG PASCA BAKAR DENGAN PERBAIKAN PASTA SEMEN

Abstraksi

Kerusakan balok beton bertulang akibat kebakaran, ditandai dengan perubahan warna, degradasi kekakuan dan degradasi kuat lenturnya. Penelitian eksperimental dengan pembebanan statis, untuk mengetahui karakteristik balok akibat kebakaran. Kerusakan dimodelkan dengan pembakaran dalam tungku pada suhu 400°C dan 600°C dan lama pembakaran 3 jam. Masing-masing suhu dipakai dua variasi yaitu dengan perbaikan dan tanpa perbaikan. Dari hasil pembakaran timbul warna putih dan kuning. Pengujian tersebut menghasilkan data primer berupa beban (P) dan lendutan (Δ). Selanjutnya dari data primer didapatkan momen, kelengkungan dan faktor kekakuan. Kuat lentur bervariasi menurut suhu pembakaran. Pada suhu 400°C lama pembakaran 3 jam tanpa perbaikan mengalami penurunan 18,75 %, sedangkan setelah perbaikan mengalami peningkatan kuat lentur sebesar 6,25 %. Pada suhu 600°C lama pembakaran 3 jam tanpa perbaikan mengalami penurunan 25%, sedangkan setelah perbaikan mengalami penurunan kuat lentur sebesar 6,25 %. Degradasi Momen (M) dan Faktor Kekakuan (EI) bervariasi menurut suhu pembakaran. Pada suhu 400°C lama pembakaran 3jam momen mengalami penurunan 8,75 % dengan penurunan faktor kekakuan 12,5 %. Sedangkan pada suhu 400°C lama pembakaran 3 jam dengan perbaikan momen mengalami peningkatan 6,21 % dengan penurunan faktor kekakuan 7,06 %. Pada suhu 600°C lama pembakaran 3jam momen mengalami penurunan 25 % dengan penurunan faktor kekakuan 30 %. Sedangkan pada suhu 600°C lama pembakaran 3jam dengan perbaikan momen mengalami penurunan 6,25 % dengan penurunan faktor kekakuan 6,26 %.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kebakaran gedung yang akhir-akhir ini sering terjadi mengakibatkan degradasi kekakuan dan kekuatan suatu struktur termasuk kuat lentur balok.

Secara umum gedung-gedung yang terbakar akan mengalami kerusakan dari tingkat ringan sampai dengan sangat berat. Kerusakan dapat terjadi pada saat kebakaran berlangsung. Kerusakan pada saat terjadi kebakaran tergantung dari temperatur dan durasi kebakaran. Jika gedung tidak segera ditangani perbaikan dan pengamanannya, kerusakan dapat berlanjut, misalnya korosi baja akibat kelembaban yang tinggi atau kebocoran-kebocoran air, penjarahan dan sebagainya. Secara langsung atau tidak langsung kerusakan elemen-elemen struktur akan berakibat pada kekuatan struktur itu sendiri.

Degradasi kekuatan yang terjadi mempengaruhi kinerja gedung secara keseluruhan dan menimbulkan rasa kurang aman bagi para pemakai, bahkan dapat membahayakan keselamatan jiwa, karena itu struktur beton perlu diperhatikan, sehingga timbul keinginan untuk menggunakan kembali gedung tersebut. Dengan perbaikan (*retrofitting*) terhadap elemen-elemen struktur diharapkan terjadi peningkatan kekuatan struktur yang telah rusak.

1.2. Tujuan Penelitian

1. Mengetahui kekuatan lentur akibat perbaikan beton bertulang pasca kebakaran, kemudian membandingkan dengan kekuatan lentur pada beton yang dibakar namun tidak diperbaiki dan dengan beton yang tidak dibakar sehingga dapat diketahui seberapa besar perbedaannya.
2. Mengetahui hubungan momen, kelengkungan dan kekuatan lentur pada balok beton pasca bakar sebelum dan sesudah perbaikan.

1.3. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah :

1. Untuk mengetahui kuat lentur balok beton pasca bakar dengan perbaikan
2. Memberikan alternatif lain sebagai bahan pertimbangan, jika ditemukan permasalahan-permasalahan yang identik dengan penelitian ini, sehingga kebijaksanaan yang diambil dapat lebih optimal.
3. Menambah pengetahuan para pembaca mengenai balok beton pasca bakar dengan perbaikan.

1.4. Batasan Masalah

Untuk membatasi subyek penelitian, maka lingkup permasalahan hanya dibatasi pada :

1. Kerusakan struktur terhadap perilaku perubahan momen dan lendutan pada balok beton pasca bakar
2. Degradasi kuat lentur balok beton bertulang akibat kebakaran dengan variasi suhu 400°C dan 600°C selama 3 jam

3. Pengujian hanya pada kuat lentur balok dengan pembebanan statis
4. Perbaiki balok beton pasca bakar menggunakan pasta semen dengan sedikit pasir

1.5. Metode Penelitian

Metode penelitian yang dilakukan berupa serangkaian percobaan dilaboratorium, meliputi :

1. Pemeriksaan agregat halus yang terdiri dari pemeriksaan berat jenis dan gradasi pasir
2. Pemeriksaan agregat kasar yang terdiri dari pemeriksaan berat jenis, berat volume dan gradasi split
3. Cetakan benda uji menggunakan papan 9mm
4. Perawatan benda uji dilakukan setelah cetakan dibuka dan diselimuti dengan karung goni yang dibasahi air selama 28 hari
5. Pembakaran balok uji setelah balok tersebut berumur 28 hari. Pembakaran menggunakan tungku bakar yang dilakukan di UPT Kasongan, Kasihan, Bantul
6. Dua balok uji tidak dibakar yang digunakan sebagai pembanding
7. Perlakuan beton setelah dibakar adalah dibiarkan dingin secara alami dan disiram air
8. Rangkaian pengujian selanjutnya dilakukan di Laboratorium Mekanika Rekayasa dan Struktur Fakultas Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Beton

Beton didapat dari pencampuran bahan-bahan agregat halus dan kasar yaitu pasir, batu, batu pecah atau bahan semacam lainnya, dengan menambahkan secukupnya bahan perekat semen dan air sebagai bahan pembantu guna keperluan reaksi kimia selama proses pengerasan dan perawatan beton berlangsung (Istimawan.D,1996).

Nilai kuat tekan beton relatif tinggi dibandingkan dengan kuat tariknya, dan beton merupakan bahan yang bersifat getas. Nilai kuat tariknya hanya berkisar 9% - 15 % dari kuat tekannya (Istimawan.D,1996).

Salah satu kebaikan beton adalah termasuk bahan yang berkekuatan tinggi. Bila dibuat dengan cara yang baik, kuat tekannya akan sama dengan batuan alami (Kardiyono, 1996).

Bilamana suhu dari beton meningkat oleh sinar matahari maka akan terjadi penyusutan kering. Sesudah pemuaiian suhu awal, beton yang dipanasi cenderung untuk menyusut sampai pada tingkatan tertentu (L.J. Murdock.K.M.Brook, 1986).

2.2. Baja Tulangan

Tulangan merupakan material yang berkekuatan tinggi. Baja penguat atau baja tulangan memikul tarik maupun tekan, kekuatan lelehnya kurang lebih sepuluh kali dari kekuatan tekan struktur beton yang umum, atau seratus kali dari kekuatan tarik beton (Winter,1993).

Kekuatan tarik beton hanya 10% dari kekuatan tekan. Hampir semua konstruksi beton bertulang direncanakan dengan anggapan bahwa beton sama sekali tidak memikul gaya tarik. Tulanganlah yang direncanakan memikul gaya tarik tersebut. Tempat dimana terjadi tarikan mungkin akan terdapat retak-retak pada beton, akan tetapi retak-retak ini tidak mengurangi keamanan konstruksi yang dilengkapi pelekatan tulangan yang baik. Disamping itu baja yang terbungkus beton dapat mengurangi dan melindungi tulangan dari korosi (Mosley,1989).

Disisi lain kekuatan baja tulangan sangat dipengaruhi oleh temperatur. Pada temperatur 550°C baja akan mengalami penurunan tegangan leleh sebesar 50%. Namun demikian bila temperatur tersebut telah kembali normal tegangan leleh baja hampir pulih kembali (Priyosulistyo,1998).

2.3. Kekuatan/ Ketahanan Beton Terhadap Kebakaran

2.3.1. Pengaruh Temperatur Pada Kuat Desak Beton

Beton menunjukkan kenaikan kuat desak pada temperatur 200°C - 300°C, tetapi diatas 400°C kuat desak hanya mencapai 90% dari kuat desak normal dan maksimum 40% pada suhu 700°C (Neville, 1987). Oleh Mindess hal tersebut

dibuktikan bahwa kuat desak beton dapat dipertahankan sampai dengan 300°C, lebih dari itu kuat desak akan menurun.

Hal itu juga dikemukakan oleh Mark Fintel (1987), yaitu beton pada suhu tinggi akan mengalami penurunan tegangan sampai 40% dari kuat desak normal selama proses pemanasan.

Kuat desak juga dinyatakan Maholtra bahwa kuat desak beton setelah dipanaskan tergantung pada bahan dan metode penelitiannya, yaitu untuk beton ringan dengan kepadatan 2000 kg/m³ dan beton biasa dengan kepadatan 2400 kg/m³. Demikian juga Hakimei Faroq, dia membuktikan bahwa kuat tekan beton ringan (lempung bekah) setelah dipanaskan pada suhu 200°C lebih tinggi daripada kuat tekan pada suhu kamar (Hakimei Faroq, 1993).

Pengaruh panas yang tidak terlalu tinggi (sampai suhu 200°C) pada permukaan beton setelah mengeras (diatas umur 28 hari) akan menyebabkan penguapan air (dehidrasi) dan penetrasi kedalam rongga-rongga beton lebih dalam, sehingga memperbaiki sifat lekatan. Pada penelitian yang dilakukan oleh Andang.W (1999), terhadap kuat tekan silinder beton berdiameter 100 mm, tinggi 200 mm yang dipanaskan didalam tungku, bahwa beton menunjukkan peningkatan sekitar 10-15% dibanding dengan beton normal pada suhu 200°C. Pengaruh panas lebih tinggi (500°C) sudah menyebabkan penurunan kuat tekan beton hingga 50% dari kuat tekan beton normal.

Carlos Castillo dan A.J.Durrani (1990), dalam penelitiannya menyimpulkan bahwa pemanasan pada temperatur 100°C sampai 400°C akan menyebabkan kuat tekan beton berkurang 15 sampai 20 %. Pemanasan antara

suhu 400°C sampai 600°C akan menyebabkan kekuatan beton naik sekitar 8 sampai 13 %. Pemanasan diatas 600°C menyebabkan kekuatan beton akan turun kembali sekitar 30 %.

Penelitian Amat Qolyubi dan Dina Rahmani (1998) menyimpulkan bahwa akibat proses pembakaran terjadi penurunan kekuatan beton (f_c') dan kekuatan baja (f_y). Pembakaran pada suhu 400°C terjadi penurunan kuat tekan beton sebesar 23,22%, sedangkan pada suhu 600°C penurunan kuat tekan beton sebesar 31,66 %.

Menurut Hansen reaksi kimia dan fisika terjadi selama pemanasan, sifat beton tidak berubah bila dipanasi pada suhu yang konstan walaupun dalam waktu yang lama. Beton akan rusak bila dipanaskan berulang-ulang pada suhu 400°C.

2.3.2. Sifat Fisik Beton Pada Temperatur Tinggi

Neville mengemukakan tiga sifat dari bahan penyusun beton yang mempengaruhi perilaku beton bila dipanasi, yaitu koefisien muai panas, panas jenis, dan daya hantar panas. Jika koefisien muai panas bahan susun beton makin besar semakin besar pula koefisien muai panas betonnya. Aspek lain dari pengamatan masalah ini memberikan pengertian bahwa jika perbedaan koefisien muai panas antara pasta semen dan agregat terlalu besar, maka dapat menimbulkan keretakan pada pasta semen.

Faktor seperti perbandingan air-semen. Kadar semen dan nilai kekentalan (*slump*) hampir tidak berpengaruh pada ketahanan terhadap kebakaran (Mark Fintel, 1987).

2.3.3. Sifat Pasta Semen Pada Temperatur Tinggi

Jika pasta semen dipanaskan dari suhu ruangan samapai 300°C , maka kekuatan akan naik sedikit karena air bebas hilang (*clinker*) yang terhidrasi, kemudian berturut-turut air yang diserap. Pada pemanasan lebih dari 300°C sebagian dari air yang terikat secara kimia akan hilang pula. Kekuatan pasta semen pada 400°C hampir sama dengan kekuatan pasta semen pada temperatur 300°C. Penurunan kekuatan yang tajam terjadi antara 400°C sampai dengan 600°C. Diantara temperatur tersebut kandungan kalsium hidroksida pada pasta semen mengalami dehidrasi dan berubah menjadi oksida yang mempunyai kekuatan rendah sekali atau bahkan tidak mempunyai kekuatan sama sekali. Setelah didinginkan dari temperatur antara 500°C sampai dengan 400°C retak-retak akan menjalar dipermukaan pasta semen. Retak-retak juga disebabkan oleh pemuaiian volume kalsium oksida yang dihasilkan pada temperatur tinggi.

Perubahan kimia pasta semen pada temperatur tinggi juga disertai perubahan volume. Jika dipanaskan suhu ruang sampai 100°C pasta semen akan mengembang, kemudian terjadi penyusutan sampai temperatur 500°C karena dehidrasi. Pada temperatur tinggi volume mengembang lagi tapi tidak sampai pada volume semula. Diatas temperatur 700°C pasta semen akan rusak dan kekuatan akan hilang sama sekali, juga mengakibatkan ikatan pasta semen dengan agregat hilang. Kerusakan pasta semen akibat proses kimia pada temperatur tinggi ini disebabkan perubahan volume pasta semen selama pemanasan (Hansen,1976).

2.3.4. Sifat Agregat Pada Temperatur Tinggi

Ketahanan beton dipengaruhi jumlah mortar dalam beton, beton dengan ukuran agregat maksimum yang lebih kecil, lebih tahan terhadap kebakaran dari pada beton dengan agregat yang lebih besar (Mark Fintel,1987).

Nekrassow menyebutkan bahwa reaksi agregat pada temperatur tinggi sangat bergantung pada struktur dan komposisi saat basah lebih kecil di banding saat kering. Jika temperatur meningkat dengan mendadak pemuaian batuan sedimen menjadikan beton retak, ini disebabkan adanya *flint*, yaitu partikel yang terkandung dalam batuan sedimen yang berisi sejumlah air pada pori-pori mikroskopisnya. Jika air ini menguap pada temperatur 300°C, timbul rongga-rongga yang berisi tekanan uap panas yang dapat mengakibatkan keretakan pada beton.

Batuan alam dengan kandungan *feldspar* yang tinggi seperti *basalt*, *andesit*, *diabase* dan agregat buatan yang terbuat dari lempung bakar (*slag*) atau batuan keras yang lain adalah bahan yang sangat cocok untuk beton yang tahan panas. Bahan-bahan ini tidak akan menghasilkan kekuatan tahan panas yang tinggi bila tidak di campur dengan semen yang bersifat tahan panas misalnya semen aluminat (Hansen,1976).

2.4. Hubungan Temperatur Dengan Modulus Elastis Beton

Pada suhu tinggi terjadi penurunan tegangan leleh baja tulangan yang disertai lendutan pada balok. Pada suhu normal tegangan leleh balok kembali seperti semula tetapi lendutan yang terjadi tidak kembali lagi. Lendutan balok

juga diakibatkan oleh pembebanan dan degradasi material (beton dan baja tulangan) (Studium General UGM. 1999).

Kenaikan suhu mempengaruhi penurunan modulus elastis pada beton. Perbaikan terhadap nilai kekakuan (EI) meningkatkan kekuatan mutu bahan yang juga berpengaruh terhadap kuat lentur balok.

2.5. Kapasitas Momen Retak

Pada suatu penampang retak, yaitu suatu penampang yang terletak pada terjadinya retak, beton tidak menyalurkan tegangan-tegangan tarik, dengan demikian seperti juga pada batang-batang tarik maka tulanganlah yang harus memikul semua tegangan tarik yang terjadi.

Kekuatan tarik beton akan tercapai jika beban terus bertambah, pada tingkatan ini mulai terjadi retak-retak akibat tarik. Retak-retak ini akan menjalar cepat keatas dan bergeser mengikuti retak-retak sebelumnya.

Berdasarkan anggapan bahwa jumlah baja tertentu akan memberikan keadaan hancur yang tertentu pula (Istimawan D,1996), maka pemakaian jumlah tulangan yang relatif sedikit pada suatu pembebanan tertentu, tulangan akan mencapai tegangan leleh. Pada besar tegangan tersebut tulangan akan meleleh secara tiba-tiba dan akan mengalami deformasi yang besar, dan retak-retak akibat tarik pada beton akan melebar keatas, diikuti dengan terjadinya lentur yang besar pada balok. Jika hal ini terjadi, regangan pada daerah tekan bertambah sedemikian rupa sehingga dapat menghancurkan beton.

Tegangan leleh dan besarnya lendutan berlangsung secara berangsur-angsur dan didahului dengan tanda-tanda yang cukup jelas, seperti melebar dan memanjangnya retak pada balok.

Sebaliknya jika digunakan jumlah tulangan banyak atau jumlah tulangan yang normal dari tulangan yang mempunyai kekuatan tinggi, maka kekuatan beton akan dicapai sebelum tulangan mulai meleleh. Regangan beton menjadi sangat besar sehingga dapat merusak keutuhan beton (Winter, 1993).

2.6. Kekuatan Beton

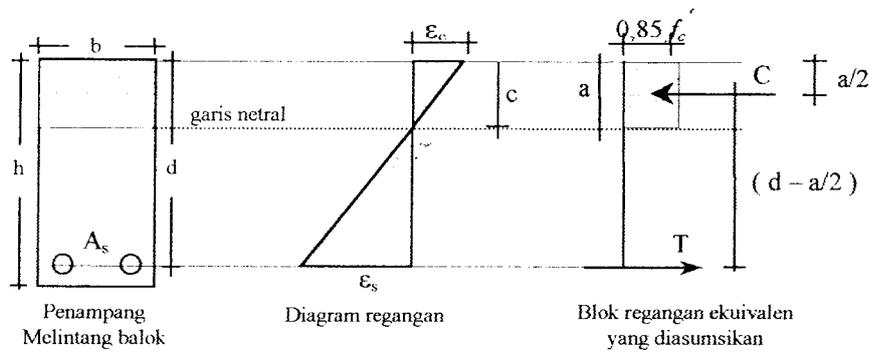
Beton dapat mempunyai kuat tekan yang tinggi, tetapi kuat tariknya sangat rendah. Kardiyono (1996) menyebutkan bahwa kuat desak beton dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya faktor air semen (fas) dan kepadatan, umur beton, jumlah semen dan sifat agregat.

2.7. Umur Beton

Kuat desak beton berbanding lurus terhadap umur beton. Faktor air semen berpengaruh pada kecepatan meningkatnya nilai kuat desak. Bertambahnya nilai f.a.s akan memperlambat kenaikan kuat desak beton dan sebaliknya semakin rendah f.a.s semakin cepat kenaikan kuat desaknya.

2.8. Perancangan Campuran Beton

Tujuan dari perancangan beton ialah untuk menentukan proporsi semen, agregat halus dan kasar serta air dipenuhi beberapa persyaratan sebagai berikut:



Gambar 3.1 Distribusi tegangan dan regangan pada penampang balok

Agar keseimbangan gaya horisontal terpenuhi, gaya tekan C pada beton dan gaya tarik T pada tulangan harus seimbang, sehingga :

$$C = T \dots\dots\dots(3.1)$$

3.2. Momen Kapasitas

Mengacu pada blok tegangan Whitney yang mempunyai tinggi a , tegangan rata-rata sebesar $0,85 f_c'$ ditentukan berdasarkan hasil percobaan pada beton yang berumur 28 hari. Dengan asumsi luas blok tegangan segi empat ekuivalen dianggap sama dengan luas blok tegangan yang berbentuk parabola, diperoleh :

$$C = 0,85 f_c' b a \dots\dots\dots(3.2)$$

$$T = A_s f_y \dots\dots\dots(3.3)$$

Jadi persamaan keseimbangan dapat ditulis

$$0,85 f_c' b a = A_s f_y \dots\dots\dots(3.4)$$

atau:

$$a = \frac{A_s f_y}{0,85 f_c' b} \dots\dots\dots(3.5)$$

balok dianggap bertulangan tunggal dengan mengabaikan adanya tulangan tekan dengan alasan tidak begitu mempengaruhi desain praktis, sehingga momen nominal untuk tulangan tunggal Mn dapat ditulis sebagai :

$$Mn = (A_s f_y) jd \dots \dots \dots (3.6)$$

Dimana jd adalah lengan momen, yaitu jarak antara gaya tarik dan tekan yang membentuk kopel. Dengan menggunakan blok tegangan segi empat ekuivalen dari Gambar 3.1, maka lengannya adalah :

$$jd = d - \frac{a}{2} \dots \dots \dots (3.7)$$

jadi momen tahanan nominalnya adalah :

$$Mn = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \dots \dots \dots (3.8)$$

karena $C = T$, maka persamaan momen dapat ditulis :

$$Mn = 0,85 f_c' b a \left(d - \frac{a}{2} \right) \dots \dots \dots (3.9)$$

cek tulangan leleh dengan

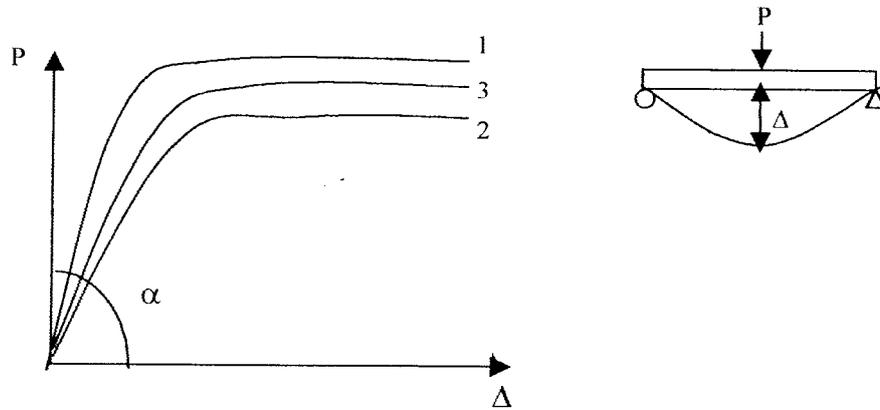
$$\varepsilon_s' \geq \varepsilon_y \dots \dots \dots (3.10)$$

dimana :

$$\varepsilon_s' = 0,003 \left(1 - \frac{d}{c} \right) \dots \dots \dots (3.11)$$

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} \dots \dots \dots (3.12)$$

$$c = \frac{a}{0,85} \dots \dots \dots (3.13)$$



Gambar 3.3 Hubungan antara (P) dan (Δ)

1. Balok tanpa pembakaran yang telah dibebani akan mengalami defleksi (Δ) pada P_{maks} .
2. Balok pasca bakar tanpa perbaikan setelah dibebani akan terjadi defleksi (Δ) dan penurunan kekuatan (P).
3. Balok pasca bakar dengan perbaikan, setelah diuji akan mengalami defleksi (Δ) dan peningkatan kekuatan (P).

Dari hubungan antara kekuatan (P) dan defleksi (Δ) Gambar 3.3, didapat kekakuan balok (k), sebagai berikut :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{P}{\Delta} \dots\dots\dots(3.16)$$

$$k = \operatorname{tg} \alpha \dots\dots\dots(3.17)$$

$$k = \frac{P}{\Delta} \dots\dots\dots (3.18)$$

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Kuat Lentur Balok Persegi

Pada suatu komposisi tertentu balok menahan beban sedemikian hingga regangan tekan lentur beton maksimum (ϵ_b' max) mencapai 0,003 sedangkan tegangan tarik baja tulangan mencapai tegangan luluh f_y . Jika hal demikian terjadi, penampang dinamakan mencapai keseimbangan regangan atau disebut penampang bertulangan seimbang (Istimawan D,1996).

Menurut Edward G. Nawy (1990) lentur pada balok diakibatkan oleh regangan yang timbul karena adanya beban luar, apabila beban bertambah maka pada balok akan terjadi deformasi dan regangan tambahan yang mengakibatkan retak lentur disepanjang bentang balok. Bila beban semakin bertambah, pada akhirnya terjadi keruntuhan elemen struktur. Tarap pembebanan yang demikian disebut keadaan limit dari keruntuhan pada lentur.

Withney mengusulkan untuk menggunakan blok tegangan segi empat ekuivalen yang digunakan untuk menghitung gaya tekan tanpa mengurangi ketelitian, yang berarti juga dapat digunakan untuk menghitung kekuatan lentur penampang seperti pada Gambar 3.1

3.4. Perhitungan Momen Retak

Momen retak secara teoritis menurut Istimawan (1996), dinyatakan dengan rumus sbb:

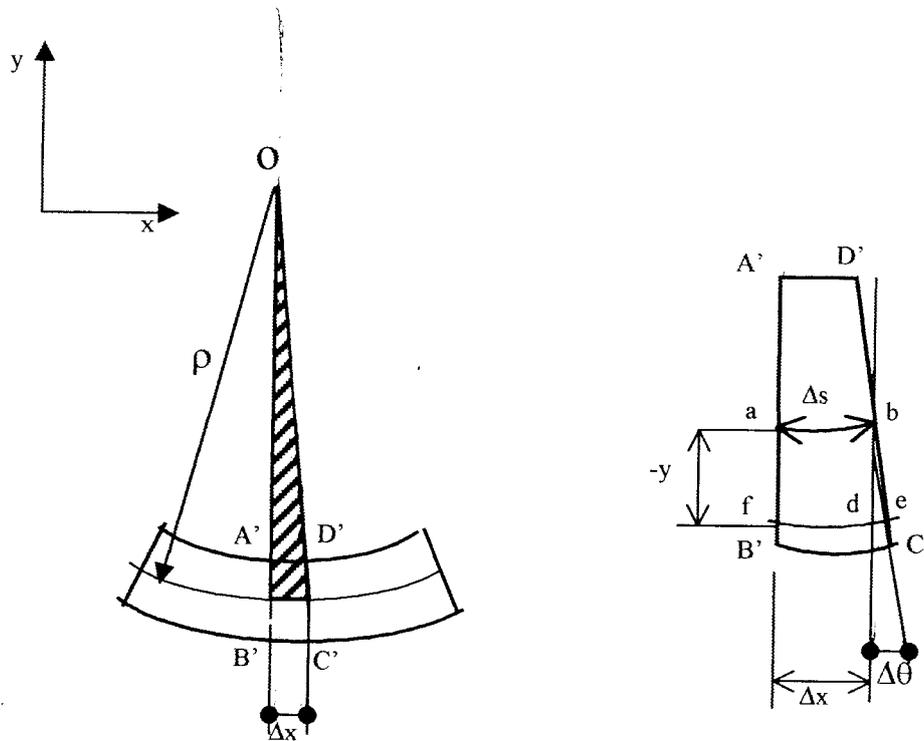
$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{Y_t} \dots\dots\dots(3.19)$$

- Dimana :
- M_{cr} = Momen Retak
 - f_r = Modulus retak beton = $0,7 \sqrt{f_c'}$
 - I_g = Inersia balok = $\frac{1}{12} b h^3$
 - Y_t = Jarak garis netral ke serat tepi tertarik

Kebakaran yang terjadi mempengaruhi penurunan nilai kuat tekan beton (f_c'), sehingga akan berpengaruh pula terhadap nilai modulus retak beton yang pada akhirnya akan memperkecil momen retak.

3.5. Persamaan Diferensial Untuk Defleksi Balok

Menurut E.P. Popov (1995), teori defleksi balok dipengaruhi oleh geometri atau kinematika dari sebuah elemen balok. Kinematika dasar yang menghipotesa bahwa irisan-irisan yang berbentuk bidang datar akan tetap merupakan bidang datar selama berdeformasi.



Gambar 3.4 Deformasi segmen balok dalam lenturan

$$\lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta \theta}{\Delta s} = \frac{d\theta}{ds} = \frac{1}{\rho} = \kappa = \varphi \dots\dots\dots(3.20)$$

Hubungan dasar antara kurva elastis dan regangan linier, didapat

$$\varphi = - \varepsilon / y \dots\dots\dots(3.21)$$

karena sifat beban tidak di perhitungkan, maka hubungan ini digunakan untuk masalah-masalah elastis maupun tidak.

$$\varepsilon = \varepsilon_x = \sigma_x / E \quad \text{dan} \quad \sigma_x = - M_y / I$$

$$\text{sehingga} \quad 1 / \rho = M / EI \dots\dots\dots(3.22)$$

dalam koordinat kartesian kurva kelengkungan didefinisikan

$$\varphi = \frac{d^2 y}{dx^2} \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{3/2}} \dots\dots\dots(3.23)$$

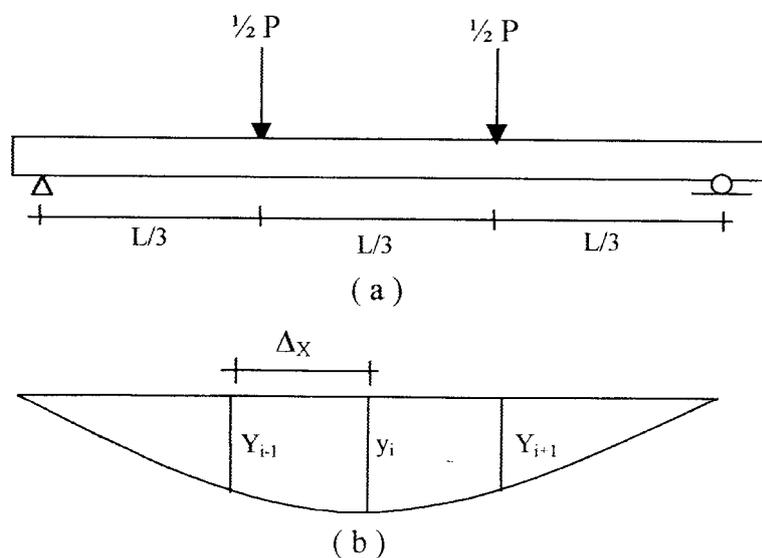
karena kemiringan dy/dx dari kurva elastis adalah sangat kecil, maka

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)^2 \approx 0$$

sehingga Persamaan (3.20) dapat disederhanakan menjadi

$$\varphi = \frac{d^2 y}{dx^2} \dots\dots\dots(3.24)$$

Dari persamaan diatas tampak bahwa kelengkungan adalah turunan kedua dari defleksi. Dari pengujian kuat lentur didapat defleksi pada titik-titik diskrit, yaitu Y_i , Y_{i+1} , Y_{i-1} , dengan jarak sama sebesar Δ_x . Pendekatan kemiringan menggunakan pendekatan metode *Central Differences*.



Gambar 3.5 Kurva lendutan

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{\Delta_x} \dots\dots\dots(3.25)$$

Dari hasil penurunan defleksi Persamaan 3.25 diperoleh rumus kelengkungan, yaitu

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{y_{I+1} - 2y_I + y_{I-1}}{\Delta_x^2} \dots\dots\dots(3.26)$$

$$\varphi = \frac{y_{I+1} - 2y_I + y_{I-1}}{\Delta_x^2} \dots\dots\dots(3.27)$$

Mengacu kepada Gambar 3.5 (a) didapat momen M

$$M = 1/6 PL^2 \dots\dots\dots(3.28)$$

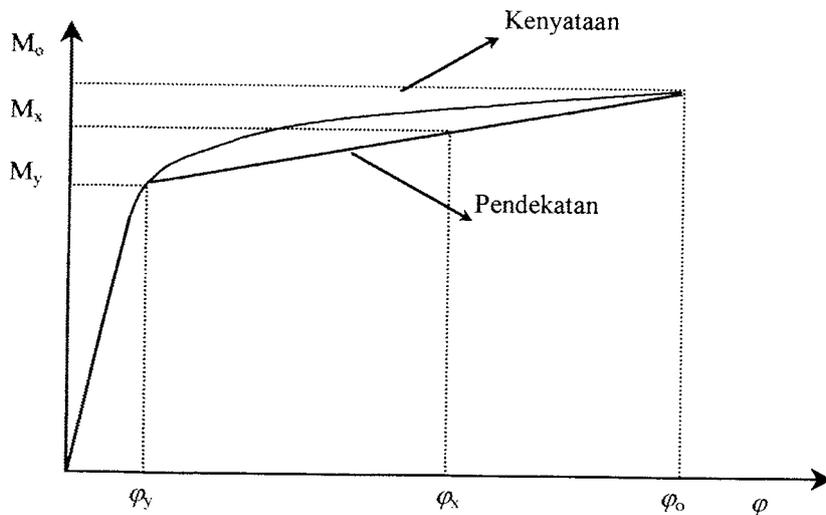
Sehingga dapat disimpulkan besar EI dengan rumus :

$$EI = M/\varphi \dots\dots\dots(3.29)$$

$$M = EI/\varphi \dots\dots\dots(3.32)$$

$$M = EI d^2y/dx^2 \dots\dots\dots(3.33)$$

Hubungan Momen (M) dan Kelengkungan (φ) ditunjukkan pada Gambar 3.6 (Roufaiel dan meyer, 1983) dalam buku Dipasquale.

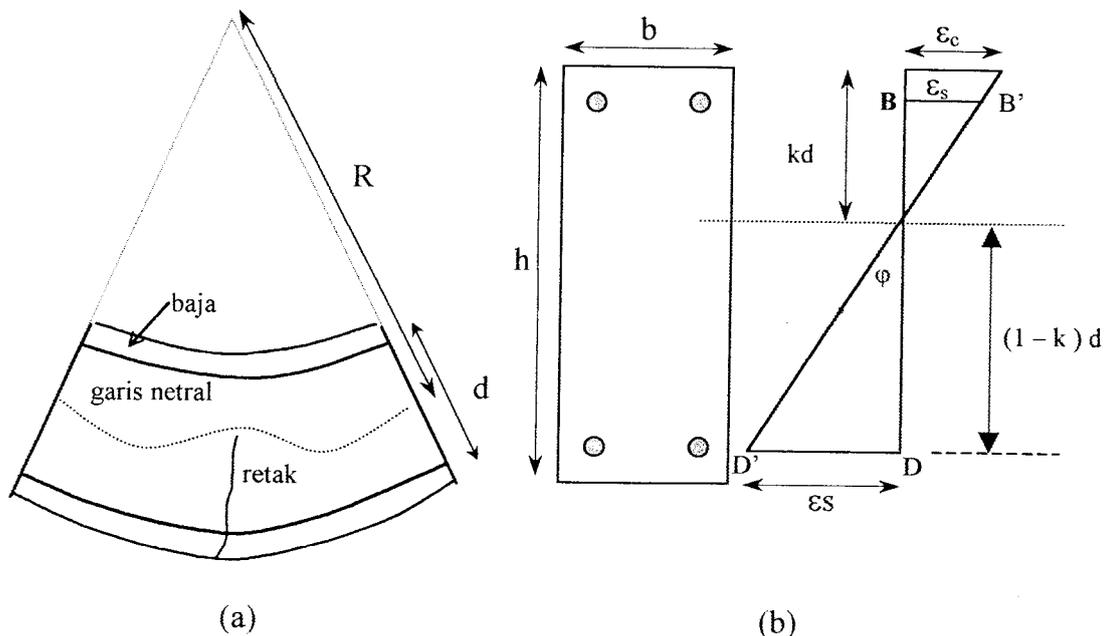


Gambar 3.6 Grafik momen kelengkungan

3.6. Momen dan Kelengkungan1

1. Kelengkungan balok

Menurut Park dan Pauley (1975), kelengkungan balok didapat dengan mengambil sebuah elemen lurus dari sebuah balok beton bertulang dengan momen-momen ujung dan gaya axial yang sama seperti Gambar 3.7. Jari-jari kelengkungan R diukur dari garis netral. Adanya retak-retak pada beton akibat terjadi penambahan tegangan akan merubah jari-jari kelengkungan (R), tinggi netral (kd), regangan beton (ϵ_c) dan regangan baja tarik (ϵ_s). Berdasar teori tersebut, retak beton akibat kebakaran akan bertambah jika dilakukan penambahan beban.



Gambar 3.7 Kelengkungan balok

Menganggap sebuah elemen kecil dengan panjang dx dari balok dan menggunakan notasi seperti pada Gambar 3.7 maka rotasi diantara ujung-ujung dari elemen diberikan oleh :

$$\frac{dx}{R} = \frac{\varepsilon_c dx}{kd} = \frac{\varepsilon_s dx}{d(1-k)} \dots\dots\dots(3.32)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{\varepsilon_c}{kd} = \frac{\varepsilon_s}{d(1-k)} \dots\dots\dots(3.33)$$

dengan $\frac{1}{R} = \varphi$

dari Gambar 3.7 (b) jika regangan dijumlahkan diperoleh :

$$\varphi = \frac{\varepsilon_c}{kd} = \frac{\varepsilon_s}{d(1-k)} = \frac{\varepsilon_c + \varepsilon_s}{d} \dots\dots\dots(3.34)$$

dengan : φ = kelengkungan

ε_c = regangan beton

ε_s = regangan baja

d = tinggi efektif penampang

Ini menunjukkan bahwa kelengkungan φ adalah gradien dari regangan dari elemen seperti dalam Gambar 3.7. Kelengkungan akan benar-benar berubah sepanjang bentang balok karena naik-turunnya garis netral dan regangan-regangan diantara retak-retak. Jika panjang elemen adalah kecil dan sebuah retak berakhir, kelengkungan dihitung dengan Persamaan 3.34 untuk penampang ijin yang diperoleh dari hubungan momen-kelengkungan. Dua grafik yang diperoleh dari penghitungan balok bertulangan sebelah adalah lurus/linear diawal dan hubungan antara momen dan kelengkungan diberikan oleh persamaan :

$$EI = MR = \frac{M}{\varphi} \dots\dots\dots(3.37)$$

Dimana EI adalah faktor kekakuan dari penampang. Dengan peningkatan momen, retak pada beton mengurangi faktor kekakuan di penampang. Perilaku dari penampang setelah retak tergantung dari jumlah tulangan pokok. Balok bertulangan sedikit menghasilkan sebuah kurva linear $M-\phi$ diatas titik leleh baja. Ketika baja leleh, peningkatan yang besar terjadi didalam kelengkungan pada momen hampir konstan.

Hubungan $M-\phi$ yang ideal adalah ditunjukkan pada grafik tri-linear. Garis awal pertama adalah retak awal, garis kedua adalah tegangan leleh baja dan ketiga adalah regangan ultimit dari beton. Untuk balok beton bertulang dibawah beban layan hubungan $M-\phi$ dari beban 0 sampai leleh baja kedua garis hampir linear sehingga sering juga ditampilkan grafik hubungan $M-\phi$ dalam bentuk bi-linear.

2. Leleh dan Ultimit Momen – Kelengkungan

Gambar 3.7 menunjukkan kasus umum dari sebuah penampang persegi bertulangan ganda pada leleh pertama dari tegangan baja dan regangan ultimit beton. Kelengkungan pada leleh pertama dari baja ϕ_y dicari dengan Persamaan 3.34 dalam istilah dari regangan baja saat leleh.

Persamaan Momen-Kelengkungan pada saat leleh pertama dicari dengan Persamaan :

$$k = [(\rho + \rho')^2 n^2 + 2(\rho + \frac{\rho' d'}{d})n]^{1/2} - (\rho - \rho')n \dots\dots\dots (3.36)$$

$$M_y = A_s f_y j d \dots\dots\dots (3.37)$$

$$\phi_y = \frac{\frac{f_y}{E_s}}{d(1-k)} \dots\dots\dots (3.38)$$

Dengan : k = faktor tinggi garis netral

M_y = Momen leleh pertama

ϕ_y = Kelengkungan leleh pertama

A_s = Luas tulangan tarik

A'_s = Luas tulangan tekan

d = tinggi efektif penampang

d' = jarak dari serat tekan ketitik berat baja tekan

E_c = Modulus elastis beton

E_s = Modulus elastis baja

f_y = Tegangan leleh baja

jd = lengan dari titik berat dari baja tekan dan beton ketitik

berat

tulangan tarik.

$$n = E_s/E_c, \rho = A_s/bd, \rho' = A'_s/bd$$

Dengan asumsi bahwa modulus elastis beton untuk beton pasca bakar sama dengan nilai modulus elastis beton sebagai berikut:

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \dots\dots\dots(3.39)$$

maka akibat kebakaran, nilai kuat tekan beton (f'_c) akan menurun. Penurunan kuat tekan beton mempengaruhi penurunan nilai modulus elastisitas beton. Dengan demikian nilai perbandingan antara modulus elastisitas baja terhadap modulus elastisitas beton (n) akan semakin besar.

Pengaruh nilai n yang semakin besar akan mempertinggi faktor tinggi garis netral (k). Seperti dijelaskan dimuka tentang perubahan kekuatan baja yang tidak diperhitungkan, maka dari Persamaan 3.38 dapat diperoleh kelengkungan yang semakin besar sebanding dengan perubahan nilai k . Berdasar Persamaan 3.38 diperoleh nilai kelengkungan leleh pertama ϕ_y yang semakin besar.

Kelengkungan ultimit dan momen dari penampang bertulangan rangkap (lihat Gambar 3.7) dicari dengan Persamaan :

$$a = \frac{A_s \cdot f_y - A'_s \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} \dots \dots \dots (3.40)$$

$$Mu = 0,85 \cdot f'_c \cdot ab \left(d - \left(\frac{a}{2} \right) \right) + A'_s \cdot f_y (d - d') \dots \dots \dots (3.41)$$

$$\phi_u = \frac{\epsilon_c}{c} = \frac{\epsilon_c \cdot \beta_1}{a} \dots \dots \dots (3.42)$$

nilai a yang semakin besar akibat kebakaran akan memperkecil kelengkungan ultimit.

Regangan baja tekan yang ditunjukkan pada Gambar 3.7 dicari dengan persamaan :

$$\epsilon'_s = \epsilon_c \left(\frac{c - d'}{c} \right) = \epsilon_c \left(1 - \left(\frac{\beta_1 d'}{a} \right) \right) \dots \dots \dots (3.43)$$

Dengan substitusi Persamaan 3.40 ke Persamaan 3.43 menunjukkan bahwa gaya tekan akan leleh ketika :

$$\epsilon_c \left[1 - \beta_1 d \left(\frac{0,85 f'_c b}{(A_s f_y) - (A'_s f_y)} \right) \right] \geq \frac{f_y}{E_s} \dots \dots \dots (3.44)$$

Jika Persamaan 3.44 kurang sesuai, baja tekan tidak leleh maka nilai nyata dari tegangan baja dicari dengan Persamaan :

$$f_s' = \varepsilon_s' E_s = 0,003 \frac{a - \beta_1 d'}{a} E_s \dots\dots\dots(3.45)$$

dengan

$$a = \frac{A_s' f_s - A_s f_s'}{0,85 f_c' b} \dots\dots\dots(3.46)$$

maka momen ultimit dapat dicari dengan Persamaan:

$$Mu = 0,85 f_c' a b \left(d - \frac{a}{2} \right) + A_s' E_s \varepsilon_s' \frac{a - \beta_1 d'}{a} (d - d') \dots\dots\dots(3.47)$$

dan kelengkungan ϕ_u dicari dengan Persamaan 3.42

Ukuran dari meningkatnya momen lentur setelah leleh dikenal Mu/My . Rasio ini ditentukan dari Persamaan 3.37 dan 3.41. Rasio ϕ_u/ϕ_y dapat ditulis seperti:

$$\frac{\Phi_u}{\Phi_y} = \frac{\varepsilon_c}{f_y/E_s} \cdot \frac{d(1-k)}{a/\beta_1} \dots\dots\dots(3.48)$$

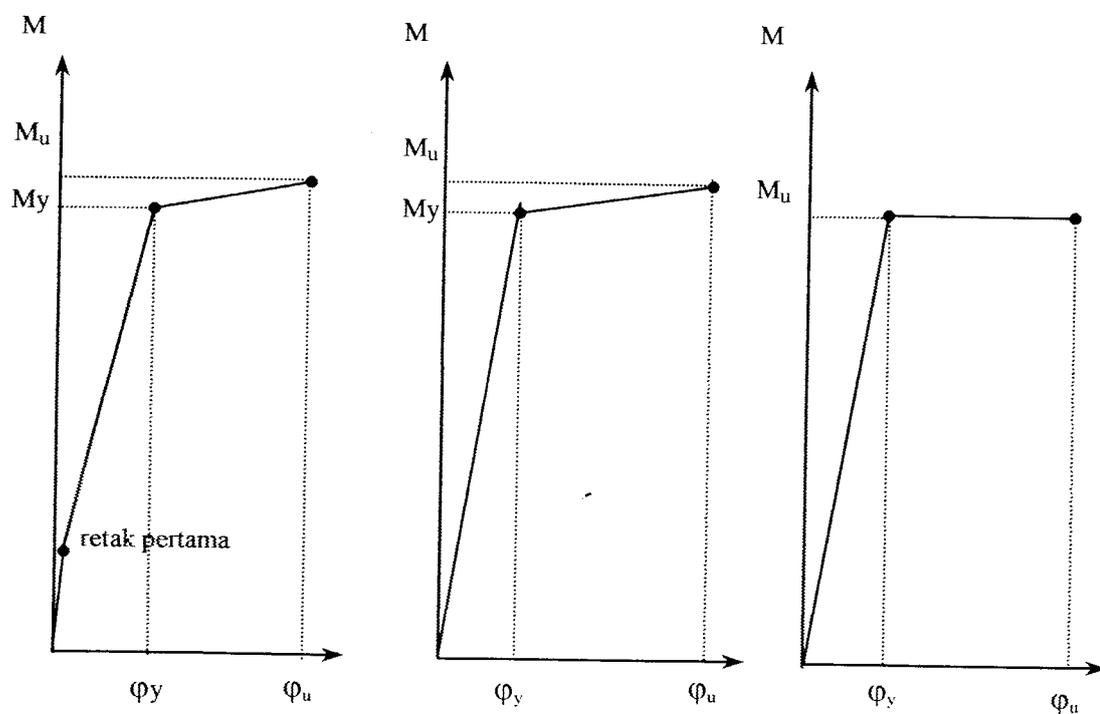
Persamaan 3.48 digunakan untuk menentukan daktilitas kelengkungan dalam kasus umum dari penampang bertulangan ganda. Jika Persamaan 3.44 memuaskan, baja tekan leleh dan substitusi Persamaan 3.36 dan 3.40 ke dalam Persamaan 3.48, didapatkan persamaan faktor kelengkungan daktil menurut Park dan Paulay (1975), yaitu:

$$\frac{\varphi_u}{\varphi_y} = \left(\frac{0,85 \beta_1 E_s \varepsilon_c f_y'}{f_y^2 (\rho - \rho_1)} \right) \left\{ 1 + (\rho - \rho_1)n - [(\rho + \rho^2)n^2 + 2 \left(\left(\rho + \frac{\rho' d'}{d} \right) n \right)^2] \right\} \dots\dots\dots(3.49)$$

Jika baja tekan belum leleh maka faktor kelengkungan dicari dengan Persamaan :

$$\frac{\phi_u}{\phi_y} = \left(\frac{\beta_1 E_s \epsilon_c}{f_y} \right) \times \left(\frac{1 + (\rho - \rho_1)n - (\rho + \rho^2)n^2 + 2 \left(\rho + \left(\frac{\rho d'}{d} \right) n \right)^2}{\left(\frac{(\rho \epsilon_c E_s - \rho f_y)^2}{1,7 f_c'} \right) + \left(\frac{\rho \epsilon_c E_s \beta_1 d'}{0,85 f_c' d} \right)^2 - \left(\frac{\rho \epsilon_c E_s - f_y}{1,7 f_c'} \right)} \right) \quad (3.50)$$

Mengacu pada Persamaan 3.38 dan 3.42 serta 3.49 dan 3.50 perubahan material yang berupa penurunan f_c' berpengaruh terhadap kenaikan nilai ϕ_y dan penurunan ϕ_u menyebabkan penurunan rasio faktor daktilitas kelengkungan beton.

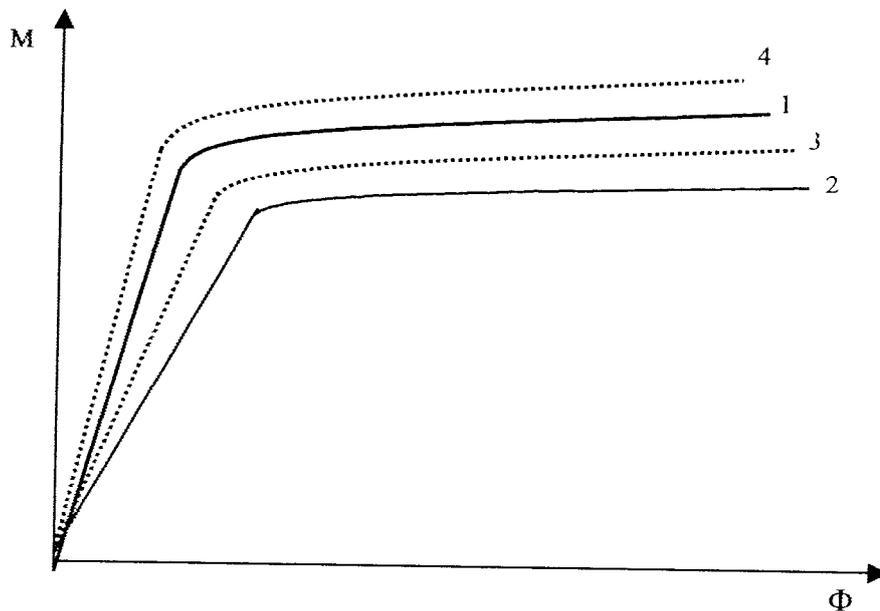


Gambar 3.8 Curva momen kelengkungan

3.7. Hipotesa

Setelah balok mengalami kebakaran nilai EI turun yang menyebabkan nilai M kecil, sehingga kekuatan $P = 6 M/L$ berkurang. Perbaikan beton pasca bakar akan meningkatkan nilai EI yang juga akan meningkatkan kekuatan dan kekakuan balok.

Hubungan momen M dan kelengkungan balok Φ yang telah diperbaiki ditunjukkan Gambar 3.9



Gambar 3.9 hubungan M dan Φ balok beton pasca bakar

Keterangan gambar :

1. Balok utuh tanpa mengalami pembakaran.
2. Balok setelah kebakaran tanpa perbaikan
3. Balok pasca bakar setelah perbaikan mengalami peningkatan kekuatan dan kekakuan mendekati balok utuh
4. Balok pasca bakar setelah perbaikan mengalami peningkatan kekuatan dan kekakuan melebihi balok utuh.

BAB IV

METODOLOGI PENELITIAN

Bahan-bahan yang dipergunakan dalam pembuatan sampel penelitian tugas akhir adalah sebagai berikut :

4.1. Bahan Penyusun Beton

Perencanaan campuran adukan beton menggunakan metode ACI Committee 544 (1982). Sebagai penyusun beton digunakan bahan antara lain adalah sebagai berikut:

4.1.1. Semen

Dipakai semen portland jenis I Merk Nusantara. Semen dalam penelitian ini digunakan sebagai bahan perekat adukan beton (*binder*). Semen jenis ini dipilih karena paling umum digunakan sebagai perekat adukan beton dan tidak memerlukan persyaratan khusus. Sedangkan dalam penelitian ini, penilaian kualitas semen hanya dilakukan dengan pengamatan secara visual terhadap keutuhan kemasan dan kehalusan butirannya.

4.1.2. Agregat

Dalam penelitian ini digunakan dua macam agregat, yaitu:

a. Agregat halus

Agregat halus adalah pasir yang diambil dari Kali Boyong, Sleman, Yogyakarta yang berdiameter lolos saringan 4,80 mm. Sebelum digunakan

terlebih dahulu pasir dicuci. Hal ini bertujuan untuk menghilangkan kotoran yang terkandung didalam butiran-butiran pasir tersebut. Selain itu dilakukan pula penyelidikan pasir yang bertujuan untuk memperoleh distribusi ukuran butir (gradasi) dan berat volume dalam keadaan jenuh kering muka (SSD).

b. Agregat kasar

Agregat kasar adalah batuan pecah yang didatangkan dari daerah Clereng, Kulon Progo, Yogyakarta. Memperhatikan ukuran penampang model, dipilih batu pecah dengan ukuran butir maksimum 20 mm. Penyelidikan batu pecah bertujuan memperoleh data tentang berat jenis dan berat volume dalam keadaan SSD. Sebelum digunakan batu pecah dicuci dan fraksi batu-batu pecah dipisahkan menggunakan ayakan.

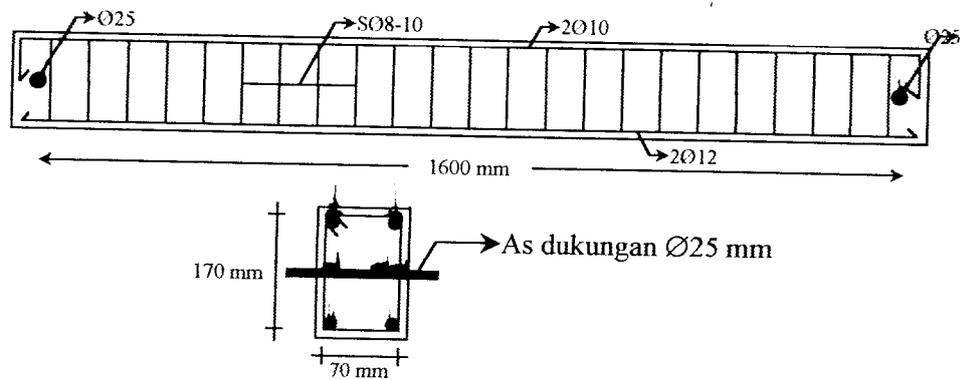
4.1.3. Air

Dalam penelitian ini fungsi air terutama adalah untuk membuat campuran adukan beton, rawatan keras (*curing*), mencuci agregat halus dan agregat kasar. Air yang digunakan berdasarkan pengamatan secara visual tampak jernih, tidak berbau, dan tidak berwarna. Sedangkan air diambil dari Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

4.1.4. Besi Tulangan Beton

Dalam pembuatan sampel penelitian digunakan baja tulangan polos (BJTP) \varnothing 10 mm sebagai tulangan memanjang atas, \varnothing 12 mm sebagai tulangan

memanjang bawah, dan \varnothing 8 mm untuk tulangan sengkang, sedangkan jarak sengkang yang dipakai 10 cm. Pengujian tarik baja dilakukan untuk mengetahui kuat leleh dan kuat tarik baja tulangan yang terpasang pada sample (Lihat Gambar 4.1).



Gambar 4.1 Tulangan Benda Uji

4.1.5. Kawat Bendrat

Kawat bendrat \varnothing 0,8 mm digunakan untuk merangkai tulangan-tulangan, yaitu tulangan memanjang dan tulangan melintang.

4.1.6. Kayu Lapis

Dalam pembuatan sampel agar didapat ukuran yang tepat dan permukaan yang rata sesuai dengan apa yang telah direncanakan digunakan cetakan dari kayu lapis dengan ketebalan 9 mm.

4.1.7. Bahan Perbaikan

Sampel beton yang mengalami kerusakan akibat pembakaran (retak-retak) diperbaiki dengan menggunakan campuran pasta semen dan pasir tanpa menggunakan bahan tambah.

4.2. Alat yang Digunakan

Untuk kelancaran penelitian diperlukan beberapa peralatan yang akan digunakan sebagai sarana mencapai maksud dan tujuan penelitian. Adapun alat-alat yang dipergunakan adalah :

4.2.1. Ayakan

Ayakan digunakan untuk mengetahui gradasi pasir dan batu pecah. Sedangkan ukuran yang dipakai untuk memisahkan fraksi-fraksi dalam pasir adalah 4,8; 2,4; 1,2; 0,6; 0,3; 0,15 mm, batu pecah 20; 9,6; 4,8 mm.

4.2.2. Timbangan

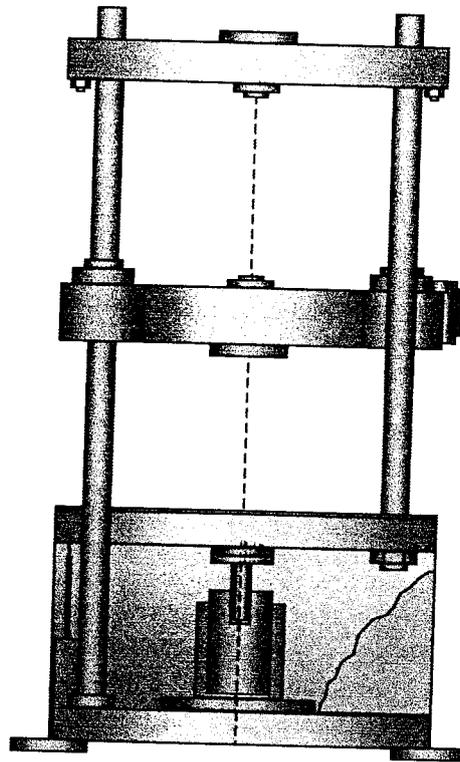
Timbangan merk Fa Gani kapasitas 500 kg, digunakan untuk menimbang bahan susun campuran adukan beton (pasir, semen, kerikil). Timbangan halus merk O`house kapasitas 20 kg dan 5 kg digunakan untuk menimbang batu pecah dan pasir ketika melakukan uji berat jenis, berat volume, agregat batu pecah dan modulus halus butir pasir.

4.2.3. Mistar dan Kaliper

Mistar dari logam digunakan untuk mengukur dimensi cetakan model, sedangkan kaliper untuk mengukur diameter tulangan dan benda uji.

4.2.4. Mesin Uji Kuat Tarik

Digunakan untuk mengetahui kuat tarik dan kuat leleh baja tulangan. Pada penelitian ini digunakan UNIVERSAL TESTING MATERIAL (UTM) merk SHIMATSU type UMH 30, kapasitas 30 ton, seperti pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Universal Testing Material Shimadzu UMH30

4.2.5. Mesin Uji Kuat Desak

Mesin uji kuat desak digunakan untuk mengetahui kuat desak silinder. Sedangkan kapasitas mesin uji kuat desak yang dimiliki oleh Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik, Universitas Islam Indonesia adalah 2000 KN merk *CONTROL*.

4.2.6. Mesin Pengaduk Beton

Agar diperoleh adukan bahan penyusun beton (semen, batu pecah, pasir, dan air) yang homogen digunakan mesin pengaduk beton.

4.2.7. Cetok dan Talam Baja

Cetok digunakan untuk memasukkan adukan beton kedalam cetakan balok dan silinder. Talam baja digunakan sebagai penampung sementara adukan beton yang dikeluarkan dari mesin pengaduk.

4.2.8. Kerucut Abrams

Alat ini digunakan untuk mengukur tingkat kelecakan beton, tinggi 30 cm dengan diameter atas 10 cm dan diameter bawah 20 cm dilengkapi dengan alat penumbuk besi panjang 60 cm dengan diameter 16 mm.

4.2.9. Cetakan Benda Uji

Cetakan benda uji dibuat dari kayu lapis dengan ketebalan 9 mm kemudian pada bagian luar dari cetakan diberi pengaku yang terbuat dari kayu reng ukuran 2x2 cm. Hal ini dimaksudkan agar dalam pembuatan sampel didapat ukuran yang tepat dan permukaan yang rata sesuai dengan apa yang telah direncanakan.

4.2.10. Tungku Pembakaran

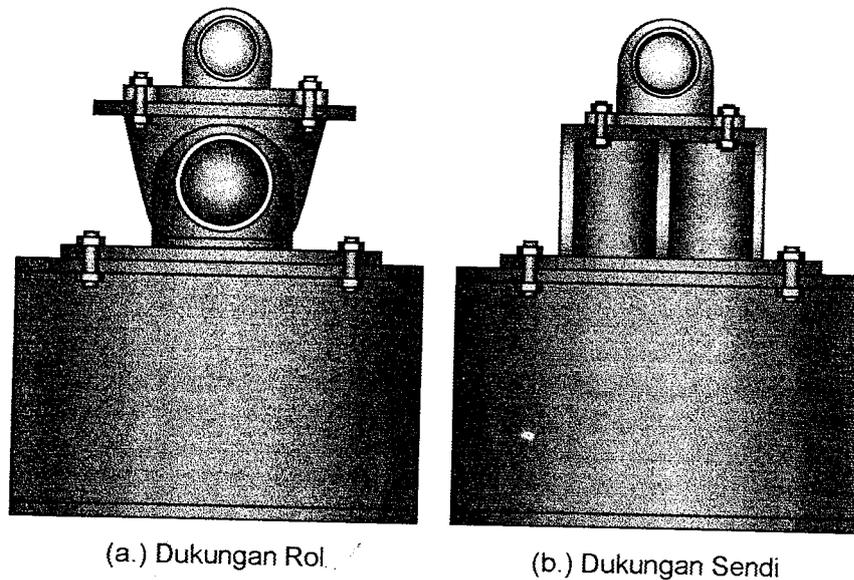
Dalam penelitian ini sengaja dibuat tungku pemanas yang mampu mencapai suhu sampai 1200° C. Hal ini dikarenakan tungku yang ada di UPT tidak mampu untuk melakukan penelitian, untuk itu kami sengaja membuat tungku sederhana yang mampu menampung benda uji sebanyak 4 buah setiap kali pembakaran.

4.2.11. Thermokopel

Thermokopel dipakai untuk mengetahui/mengukur besar suhu didalam tungku pembakaran .Pengukuran suhu pada alat ini dapat mencapai 1600°C.

4.2.12. Dukungan Sendi dan Rol

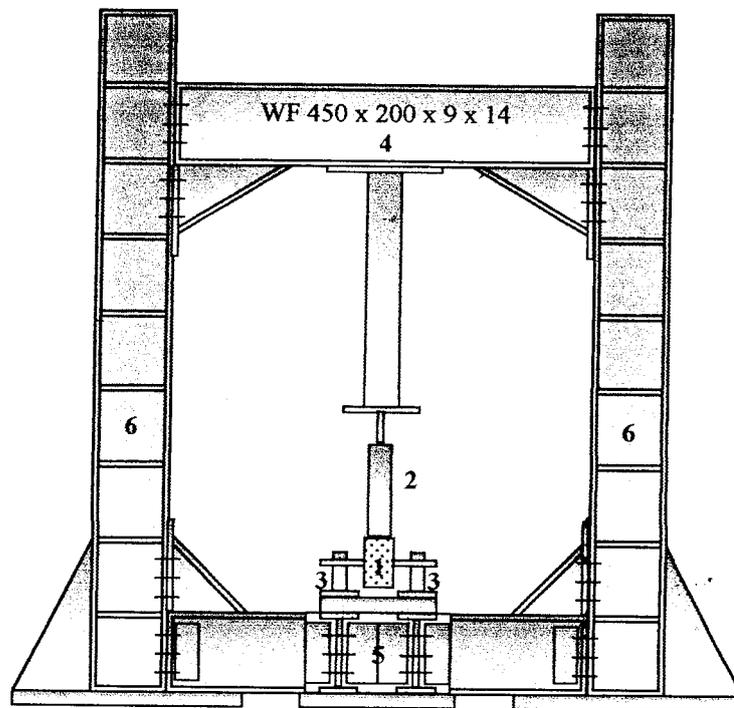
Untuk membuat model balok mendekati balok sederhana (*simple beam*), maka pada salah satu ujung model balok dipasang dukungan rol, sedangkan pada ujung yang lain dipasang dukungan sendi (*engsel*) lihat Gambar 4.3.



Gambar 4.3. Dukungan Sendi dan Rol

4.2.13. Loading Frame

Untuk keperluan penelitian ini dan penelitian-penelitian yang akan datang, dibuat Loading frame dari bahan baja profil WF 450x200x9x14. Seperti pada Gambar 4.4



Keterangan:

- | | |
|-------------------|----------------------------------|
| 1. Model balok | 4. Balok portal (bisa digeser) |
| 2. Hydraulic Jack | 5. Balok lintang |
| 3. Dukungan | 6. Kolom |

Gambar 4.4 Bentuk fisik *Loading Frame*

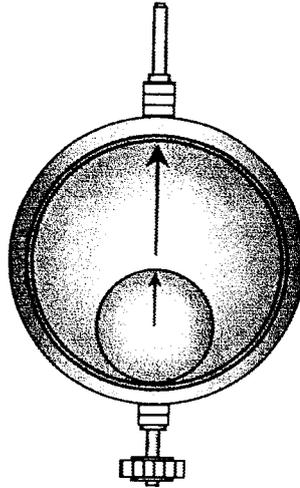
Bentuk dasar *Loading Frame* berupa portal segi empat yang berdiri diatas lantai beton (*rigid floor*) dengan perantara pelat dasar dari besi setebal 14 mm. Agar *Loading Frame* tetap stabil, pelat dasar dibaut ke lantai beton dan kedua kolomnya dihubungkan oleh balok WF 450x200x9x14mm. Posisi balok portal dapat diatur untuk menyesuaikan dengan bentuk dan ukuran model yang akan diuji dengan cara melepas sambungan baut.

4.2.14. Dial Gauge

Alat ini digunakan untuk mengukur besar lendutan yang terjadi. Untuk penelitian skala penuh digunakan *dial gauge* dengan kapasitas lendutan maksimum 50 mm dan ketelitian 0,01 mm. Pada pengujian balok kecil dipakai

dial gauge dengan kapasitas lendutan maksimum 20 mm – ketelitian 0,01 mm.

Pada penelitian tugas akhir ini, digunakan *dial gauge* sebanyak tiga buah.

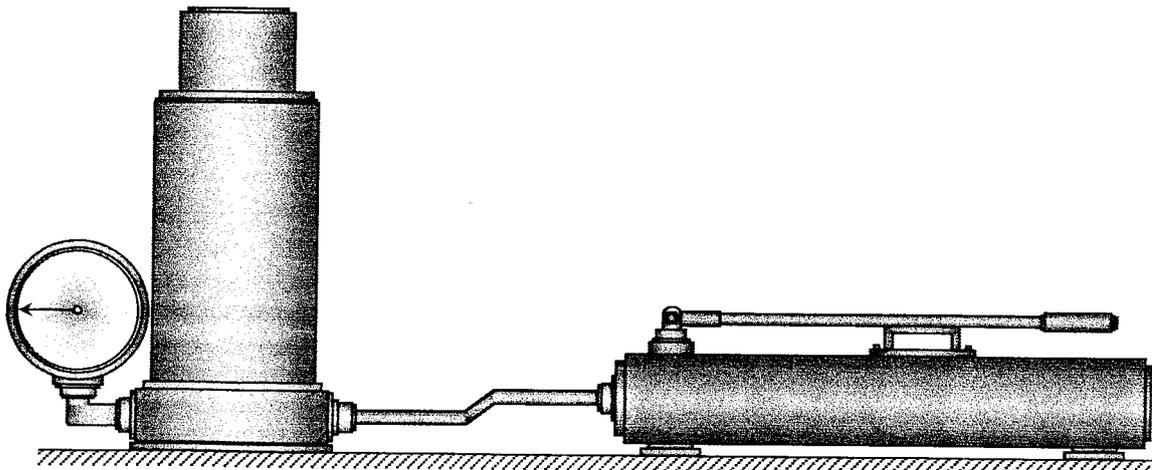


Gambar 4.5 Dial Gauge

4.2.15. Hidraulic Jack

Alat ini dipakai untuk memberikan pembebanan pada pengujian lentur balok skala penuh. Dalam penelitian ini digunakan hidraulic jack dengan kapasitas maksimum yang dimiliki adalah 25 ton dan ketelitian pembacaan sebesar 0.5 ton.

Bentuk fisik dari *hidraulic jack* dapat dilihat pada Gambar 4.6



Gambar 4.6 Hidraulic Jack

4.3. Pelaksanaan Penelitian

4.3.1. Persiapan Bahan

Pekerjaan persiapan meliputi: uji sifat-sifat teknis bahan susun beton (pasir, agregat dan semen), perancangan adukan beton, uji kuat desak silinder beton, uji kuat tarik baja tulangan, kalibrasi peralatan, set-up instrument pengujian dan uji pendahuluan. Sedangkan uji sifat-sifat teknis bahan susun beton dan uji pendahuluan yang perlu dilakukan antara lain meliputi:

a. Uji pasir

Uji pasir bertujuan memperoleh berat jenis keadaan SSD dan modulus kehalusan pasir. Didapat berat jenis SSD 2,63 dan modulus kehalusan butir 2,36.

b. Uji batu pecah

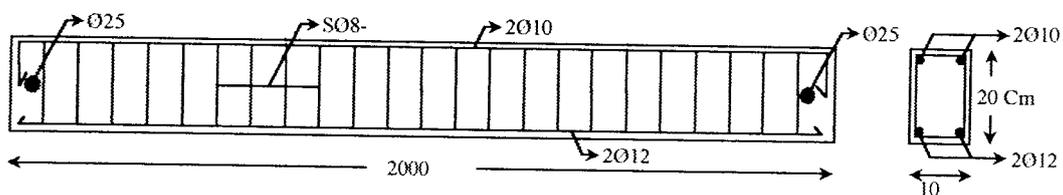
Uji batu pecah bertujuan mendapatkan berat jenis dan berat volume batu pecah keadaan SSD. Didapat berat jenis SSD 2,63 dan berat volume SSD 1,5095 T/m³

c. Perencanaan campuran adukan beton

Perencanaan campuran adukan beton menggunakan cara yang direkomendasikan oleh American Concrete Institute (ACI), hitungannya disajikan dalam lampiran 1. Untuk setiap satu sampel balok (100x200x2000)mm dan dua buah silinder beton (150x300)mm dengan kuat desak rencana 20 MPa diperlukan bahan penyusun sebagai berikut: semen 18,5 kg, pasir 34,2 kg, batu pecah 53,2 kg dan air 9,5 lt.

4.3.2. Pembuatan Sample

1. Membuat sepuluh buah balok beton ukuran (100x200x2000)mm (lihat Gambar 4.7). Rawatan keras (*curing*) terhadap balok uji dilaksanakan dengan menyelimuti balok dengan karung basah yang disiram setiap hari. Dengan cara ini diharapkan proses hidrasi semen dapat berlangsung dengan baik. Setelah balok berumur 28 hari baru dilakukan penelitian, yaitu: dengan pembakaran dan uji desak beban statis.
2. Dibuat 2 buah silinder beton dari setiap pencetakan balok. dengan tujuan memperoleh kuat desak beton pada setiap balok.



Gambar 4.7 Model Balok

4.3.3. Perawatan

Salah satu aspek dari pembuatan beton yang tidak layak dan kadangkala diabaikan adalah pada proses perawatan (*curing process*). Perawatan diartikan sebagai kegiatan yang bertujuan agar struktur tetap memenuhi atau mempunyai keadaan yang baik. Untuk menghasilkan beton yang baik, proses hidrasi yang terjadi harus diusahakan berlangsung secara kontinyu tanpa hambatan sejak awal penguangan beton sampai dengan pengerasan beton. Rawatan keras (*curing*) terhadap balok uji dilaksanakan dengan menyelimuti balok dengan karung basah

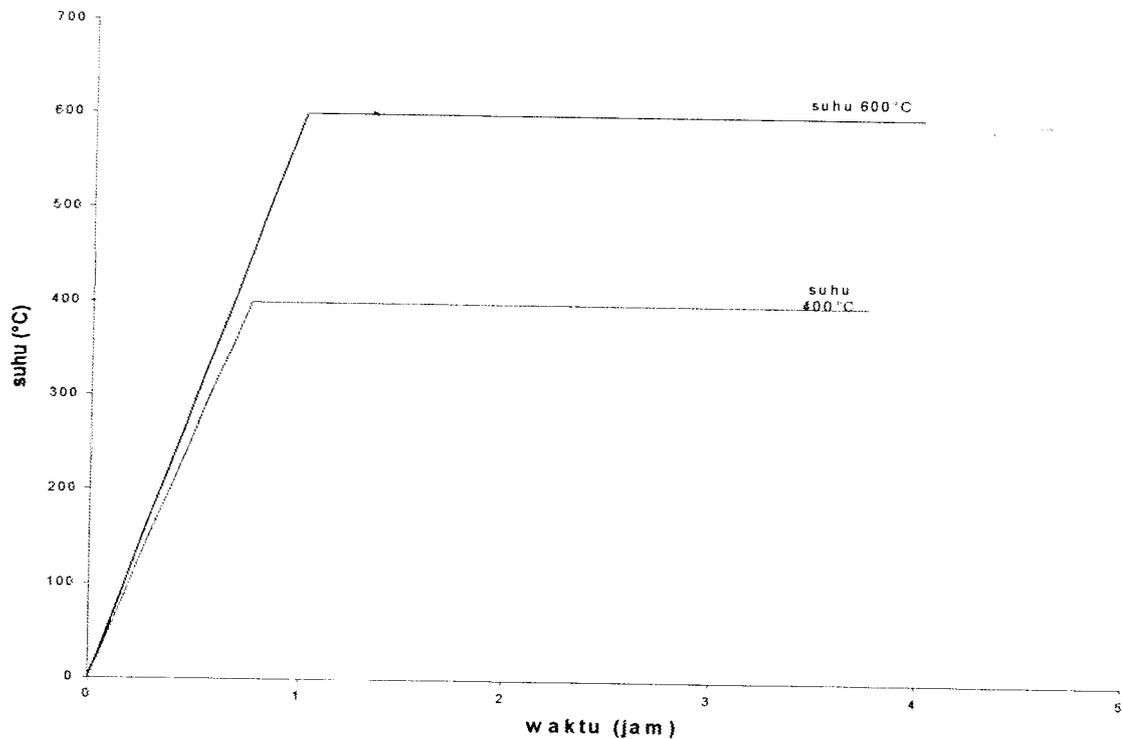
yang disiram setiap hari. Dengan cara ini diharapkan proses hidrasi semen dapat berlangsung dengan baik.

4.3.4. Pembakaran Sample

Dalam penelitian ini pembakaran benda uji dilakukan dengan menggunakan tungku bakar yang bisa mencapai suhu 1200°C.

Penggunaan tungku bakar ini dimaksudkan untuk mendekati kebakaran secara nyata yang terjadi pada kasus sebenarnya. Hal tersebut tidak seperti pembakaran dengan menggunakan oven yang mana hanya terjadi perambatan panas. Pendeteksian suhu pada pembakaran ini menggunakan thermokopel dan pengendalian suhu menggunakan keran yang dihubungkan menggunakan selang ke tungku bakar

Pembakaran sampel dilaksanakan setelah beton berumur 28 hari atau lebih. Pembakaran dilakukan dengan dua variasi suhu yang berbeda yaitu 400°C dan 600°C. Sampel yang dibakar sebanyak 4 buah untuk setiap variasi suhu. Lama pembakaran untuk setiap variasi suhu adalah 3 jam yang dihitung apabila suhu yang diinginkan telah tercapai. Pembakaran dilakukan di UPT Keramik, Kasongan, Bantul.



Gambar 4.8 Grafik hubungan suhu dan waktu pembakaran

4.3.5. Perbaikan Struktur Beton

a. Tingkat Kerusakan

Sebelum diputuskan metode perbaikan yang akan dilakukan perlu diketahui tingkat kerusakan pada struktur. Jenis kerusakan yang sering terjadi akibat kebakaran antara lain:

1. Retak ringan ; pecah pada bagian luar beton yang berupa garis-garis yang sempit dan tidak terlalu panjang dengan pola menyebar. Retak ini diakibatkan oleh proses penyusutan beton yang pada saat terjadi kebakaran.
2. Retak berat/struktur : ukuran retak lebih dalam dibandingkan dengan retak ringan yang terjadi secara tunggal atau kelompok yang kadang-kadang disertai dengan lendutan elemen struktur misalnya pada balok.

3. Beton pecah/terkelupas : permukaan beton terlepas dalam kepingan atau bongkahan kecil yang disebabkan oleh perbedaan pemuaian antara agregat dan mortar yang keduanya saling kontradiktif. Pada suhu yang membesar, agregat akan memuai, setelah suhu normal kembali ukuran agregat akan kembali seperti semula. Sedangkan mortar memuai hanya sampai sekitar suhu 200°C , setelah itu menyusut yang berlanjut sampai suhu normal. Perbedaan sifat ini dapat menimbulkan retak/pecah.
4. Beton terkelupas/tulangan tampak : pada balok bagian bawah pada daerah yang suhu kebakaran cukup tinggi.
5. Lendutan balok : terjadi akibat adanya pembebanan dan degradasi material (beton dan baja tulangan). Pada suhu tinggi terjadi penurunan tegangan leleh baja tulangan. Dimungkinkan pada saat kebakaran baja sudah leleh, regangan balok bagian tarik cukup besar, terjadi retak pada beton yang disertai lendutan pada balok. Pada suhu normal tegangan leleh balok kembali seperti semula, tetapi lendutan yang sudah terjadi tidak dapat kembali.
6. Tulangan putus atau tertekuk : terjadi akibat ketidakmampuan elemen menahan beban yang dapat diikuti oleh deformasi yang besar dan hancurnya beton bagian inti.

Melihat tingkatan kerusakan diatas, berdasar hasil pengamatan maka balok beton yang dibakar pada suhu 300°C dapat dikatagorikan pada kerusakan nomer satu. Balok beton dibakar pada suhu 600°C dapat dikategorikan pada kerusakkan nomer dua.

b. Metode perbaikan

Agar bangunan dapat difungsikan kembali, diperlukan usaha perbaikan (*retrofitting*) pada elemen-elemen struktur. Adapun konsep perbaikan harus tetap memperhatikan faktor-faktor antara lain: biaya, kekuatan, kekakuan dan stabilitas.

Beberapa metoda perbaikan yang dapat digunakan untuk menangani struktur pasca bakar diantaranya:

1. **Coating** : melapisi permukaan beton dengan cara mengoleskan atau menyemprotkan bahan yang bersifat cair. Bahan ini berfungsi untuk menyelimuti beton terhadap lingkungan yang membahayakan/merusak beton. Cara paling mudah dan murah adalah dengan memberi acian pasta semen (akan lebih baik jika menggunakan zat aditif) pada permukaan beton.
2. **Injeksi (grout)** : digunakan untuk perbaikan elemen yang retak. Dengan cara memasukkan bahan injeksi yang bersifat cair pada celah/retakan kemudian dipompa sampai cairan terlihat keluar dari retakan. Akan tetapi sebelumnya dibuat lubang-lubang dengan jarak tertentu sebagai tempat masuknya bahan injeksi. Kemudian setelah itu ditutup dengan plesteran.
3. **Shotcrete** : metode ini dilakukan dengan cara menembakkan mortar atau adukan beton (biasanya dengan menggunakan agregat yang kecil) pada permukaan beton yang diperbaiki. **Shotcrete** dapat digunakan untuk perbaikan permukaan struktur yang vertikal ataupun horizontal. Penggunaan bekisting sangat membantu dalam pekerjaan perbaikan.
4. **Prepacked Concrete** : yaitu dilakukan jika kerusakan beton sudah terlampaui parah. Misalnya jika keretakannya sangat besar dan mengalami penurunan

kuat tekan. Terlebih dahulu permukaan yang mengalami keretakan dikelupas dan dibersihkan lalu pada bagian yang kosong diberi agregat dan kemudian diinjeksi dengan mortar yang mempunyai sifat susutnya kecil dan mempunyai nilai ikatan yang baik dengan beton lama. Penggunaan bekisting pada daerah vertikal atau permukaan bawah sangat membantu dalam pekerjaan perbaikan ini.

5. **Penambahan baja** : digunakan untuk memperkuat elemen struktur yang mengalami kerusakan parah, agar dapat berfungsi kembali memikul beban. Perkuatan pada balok dilakukan jika balok sudah melendut dan berdasarkan analisis kekuatan sisa tidak mampu lagi memikul beban rencana. Penambahan tersebut dapat berupa tulangan longitudinal ataupun vertikal, begel atau plat baja. Cara ini hampir sama dengan *Prepacked Concrete* yaitu setelah beton dikupas sampai pada tulangan dan diberi tambahan tulangan atau plat baja kemudian ditutup dengan beton. Perlu diingat bahwa tulangan atau plat baja tambahan harus diangkerkan pada pondasi, balok atau pelat.

Pada penelitian ini digunakan metode perbaikan *Coating*. Balok beton setelah dibakar akan mengalami kerusakan yang berupa retak-retak rambut pada permukaan beton. Perbaikan dilakukan dengan cara mengelupas permukaan beton yang retak. Pengelupasan dengan menggunakan betel dan gerinda sedalam bagian yang mengalami retak. Untuk menghindari keretakan lebih lanjut, pengelupasan dilakukan dengan cermat dan hati-hati. Setelah pengelupasan selesai, beton dicor kembali dengan campuran semen, pasir dan air kemudian dilapisi pasta semen dengan sedikit memperbesar dimensi menjadi



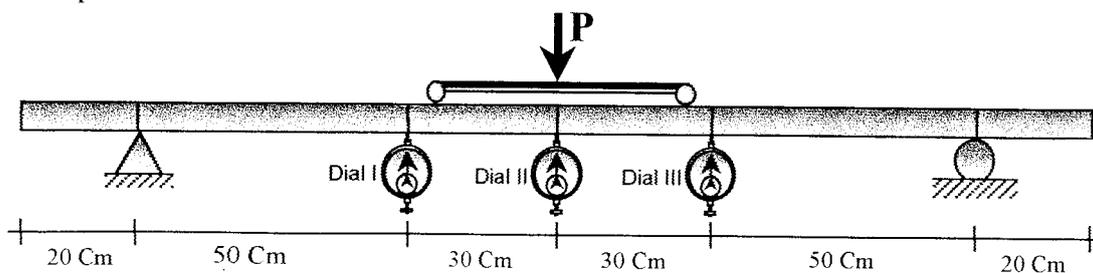
120x220x2020mm. Selanjutnya dilakukan perawatan beton selama 28 hari sebelum dilakukan pengujian.

4.3.6. Pengujian Sample

Pengujian sampel dilaksanakan setelah beton berumur 28 hari atau lebih. Hal ini dikarenakan pada umur 28 hari atau lebih kuat tekan beton cenderung stabil, sehingga pengujian balok beton dapat dilakukan setelah beton mengalami perawatan selama 28 hari atau lebih.

Sedangkan tahap-tahap pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini antara lain :

- Menguji kuat tekan beton dengan cara uji desak benda uji silinder.
- Menguji kuat tarik baja tulangan yang dipakai model balok beton, dengan tujuan untuk mengetahui kuat tarik dan kuat leleh baja tulangan
- Pengujian balok beton dengan beban statis 2 titik secara bertahap bertujuan untuk memperoleh kerusakan sample, dikerjakan bertahap dari nol sampai terjadi retak pertama dengan penambahan beban 0,5 Ton, kemudian beban ditingkatkan berdasarkan kondisi sample menggunakan alat *Loading Frame* dengan tujuan untuk mengetahui besar defleksi balok uji seperti pada gambar 4.8. Pencatatan hasil pengujian yang berupa defleksi balok dilakukan setiap penambahan beban



Gambar 4.9. Metoda Pembebanan



BAB V

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

5.1. Hasil penelitian

Dari pengujian didapatkan data primer berupa kuat desak beton silinder, kuat tarik baja tulangan, beban lendutan balok utuh dan balok pasca bakar. Data tersebut dianalisa untuk memperoleh grafik hubungan momen kelengkungan.

Dari grafik beban lendutan didapatkan kuat beban balok pasca bakar dengan dan tanpa perbaikan untuk variasi suhu dan waktu seperti dalam Tabel 5.4. Sedang nilai faktor kekakuan dapat dihitung dan diketahui seperti pada Tabel 5.6.

5.1.1. Hasil Uji Kuat Desak beton

Kekuatan desak beton rencana tergantung pada jenis campuran, sifat-sifat agregat serta kualitas perawatannya. Kuat desak beton diketahui dari uji desak duapuluh silinder beton ukuran diameter 15 cm, tinggi 30 cm. Rawatan keras (*curing*) silinder beton dilakukan dengan cara merendam didalam bak air dan pengujian dilakukan setelah beton berumur 28 hari. Kuat desak beton yang disyaratkan pada umur 28 hari adalah 20 MPa. Dari hasil uji desak beton didapat kuat desak 21 MPa, sehingga memenuhi kuat desak beton rencana yang disyaratkan.

Uji kuat tekan 20 buah silinder beton bertujuan mengetahui kuat tekan beton pada model, hasil uji disajikan pada Lampiran 6, sedangkan rangkuman hasil uji sebagai berikut :

$$\text{Kuat tekan rata-rata } (f_{cr}') = 26,3979 \text{ MPa}$$

$$\text{Standart deviasi } (s) = 3,6258 \text{ MPa}$$

Jika penyimpangan maksimum 5 % kuat desak karakteristik silinder beton dihitung dengan persamaan

$$f_c' = f_{cr}' - 1,64 s \dots\dots\dots(5.1)$$

didapat

$$f_c' = 26,3579 - 1,64 (3,6258)$$

$$= 21 \text{ Mpa}$$

Berdasarkan hasil uji ini, kuat desak beton pada model adalah 21 MPa

5.1.2. Hasil uji kuat Tarik Baja Tulangan

Untuk mengetahui kualitas baja tulangan yang terpasang dalam model balok, dilakukan uji tarik baja tulangan, hasilnya ditunjukkan pada Lampiran 7, rangkuman hasil uji kuat tarik baja ditunjukkan pada Tabel 5.1 :

Tabel 5.1. Hasil Uji Tarik Baja

Diameter (mm)	Kuat Leleh (MPa)	Kuat tarik (Mpa)
8	268,79	458,53
10	276,42	410,83
12	318,56	392,32

5.1.3. Hasil Pembakaran Balok Uji

Untuk mendapatkan kerusakan balok uji yang diakibatkan oleh kebakaran, dilakukan pembakaran terhadap balok uji. Pembakaran dilakukan dengan variasi

suhu 400°C dan 600°C dan dibakar selama 3 jam. Setelah pembakaran, benda uji disiram dengan air dengan maksud agar mendekati keadaan sesungguhnya dilapangan. Kemudian dilakukan pengamatan visual untuk mengetahui perubahan fisik benda uji, yaitu ditandai dengan adanya perubahan warna dan retak-retak yang terjadi pada benda uji, hasilnya disajikan dalam Tabel 5.2.

Tabel 5.2. Pengamatan visual

Kode	Suhu	Waktu	Hasil Pengamatan
Balok I Balok II Balok III Balok IV	400°C	3 JAM	<ul style="list-style-type: none"> • Warna putih sebagian hitam berjelaga • Timbul retak-retak rambut
Balok V Balok VI Balok VII Balok VIII	600°C	3 JAM	<ul style="list-style-type: none"> • Warna putih warna kuning semakin jelas • Terjadi retak mengelilingi batang balok yang banyak dan jelas

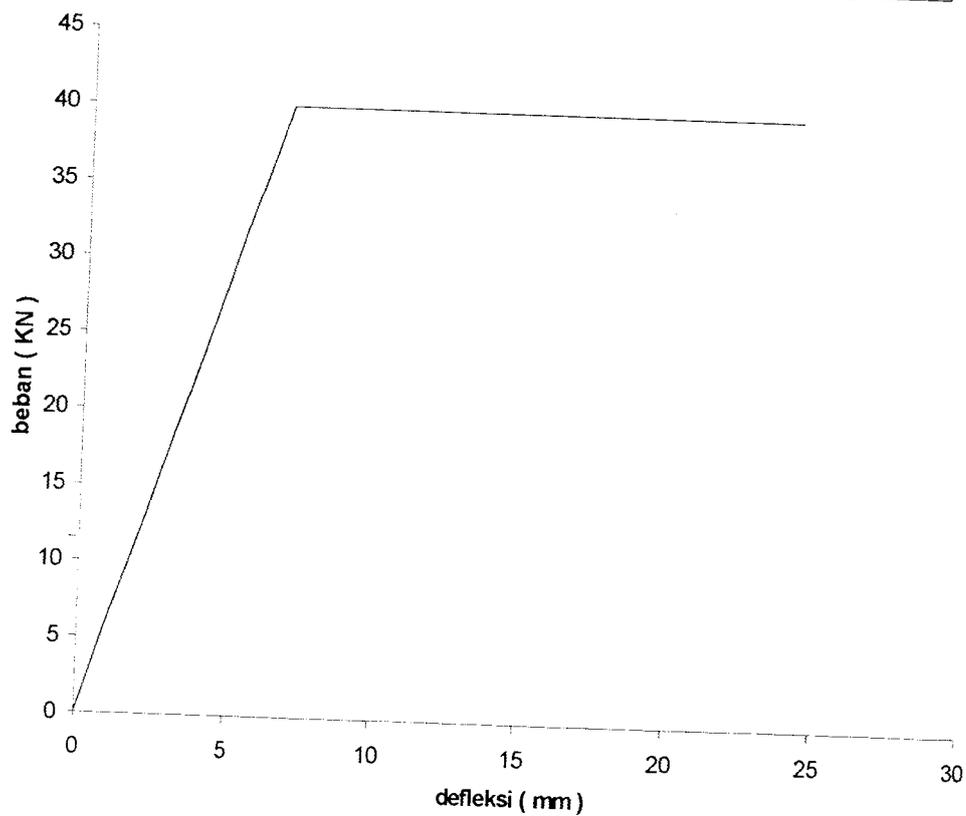
5.1.4. Hasil Uji lentur Balok

1. Hubungan Beban Dengan Lendutan

Setelah dilakukan pembakaran terhadap balok uji, selanjutnya dilaksanakan uji kuat lentur terhadap balok uji. Pelaksanaan uji kuat lentur dilakukan di Laboratorium Mekanika Rekayasa dan Struktur, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia. Pada pengujian kuat lentur ini, balok normal (tanpa dibakar) diberikan pembebanan pada dua titik. Secara bertahap balok diberi beban dengan kenaikan sebesar 500 kg (0,5 ton), kemudian pada setiap tahap pembebanan lendutan yang terjadi dicatat, hasilnya disajikan pada Tabel 5.3.

Tabel 5.3. Hasil Pengujian Lentur Balok Normal Suhu Ruang

Beban (kN)	Dial 1 (mm)	dial 2 (mm)	Dial 3 (mm)	Momen (kN-m)	Kelengkungan (1/m)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000
5	0.19	0.23	0.16	1.333	0.001
10	0.49	0.66	0.59	2.667	0.003
15	1.06	1.20	1.02	4.000	0.004
20	2.32	2.39	1.98	5.333	0.005
25	3.45	3.27	2.59	6.667	0.006
30	4.24	4.19	3.41	8.000	0.008
35	5.23	5.47	4.52	9.333	0.013
40	6.77	6.90	5.75	10.667	0.014
40	8.38	9.10	7.17	10.667	0.029
40	9.46	10.65	8.20	10.667	0.040
40	10.45	12.05	9.12	10.667	0.050
40	11.65	13.70	10.40	10.667	0.059
40	12.71	15.45	11.84	10.667	0.071
40	15.10	18.67	14.41	10.667	0.087
40	16.82	20.76	15.66	10.667	0.100
40	16.90	22.22	16.81	10.667	0.119
40	17.70	23.27	17.61	10.667	0.125
40	18.43	24.21	18.31	10.667	0.130

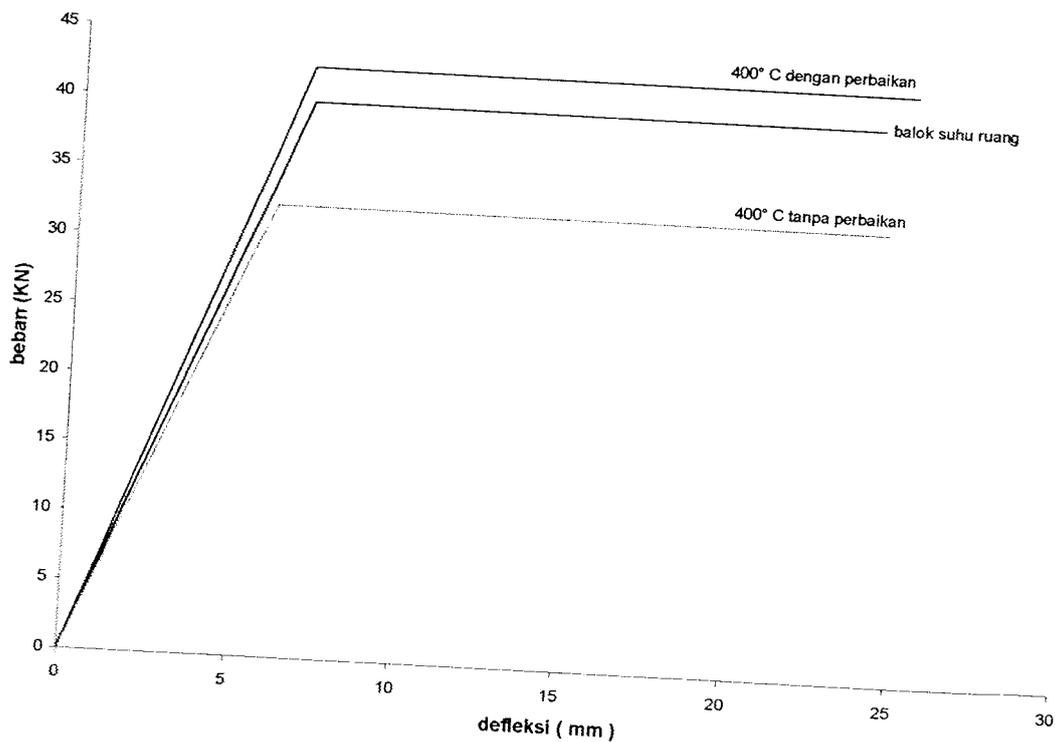


Gambar 5.1 Grafik beban dan lendutan balok normal suhu ruang

Hubungan beban – lendutan uji kuat lentur balok pasca bakar pada suhu 400°C dan 600°C tanpa perbaikan dan balok pasca bakar pada suhu 400°C dan 600°C dengan perbaikan ditunjukkan dalam Lampiran 10;11;12;13;14. Dari data tersebut dibuat Grafik hubungan beban – lendutan dan momen – kelengkungan.

2. Grafik Beban - lendutan Balok Normal, Balok Pasca Bakar Variasi Suhu 400°C Tanpa Perbaikan, dan Balok Pasca Bakar Variasi Suhu 400°C Dengan Perbaikan

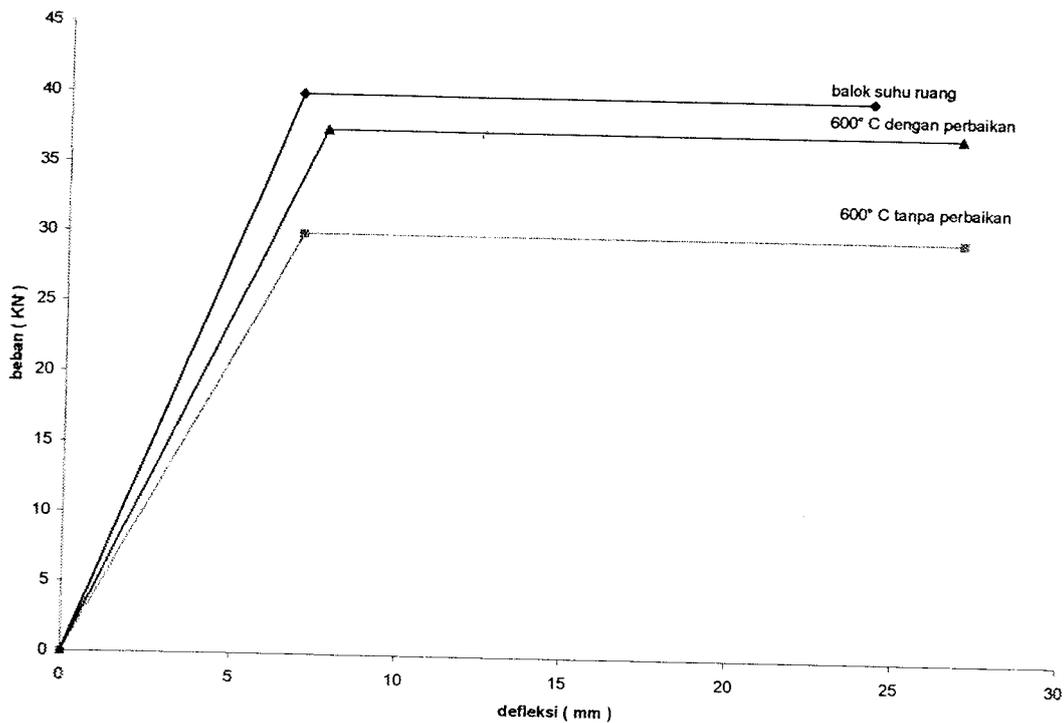
Grafik beban–lendutan balok normal, Balok pasca bakar variasi suhu 400°C tanpa perbaikan, dan balok pasca bakar variasi suhu 400°C dengan perbaikan ditunjukkan pada Gambar 5.2



Gambar 5.2 Grafik Hubungan Beban dan Lendutan balok suhu 400° C

3. Grafik Beban - Lendutan Balok Normal, Balok Pasca Bakar Variasi Suhu 600°C Tanpa Perbaikan, dan Balok Pasca Bakar Variasi Suhu 600°C Dengan Perbaikan

Grafik beban–lendutan balok normal, Balok pasca bakar variasi suhu 600°C tanpa perbaikan, dan balok pasca bakar variasi suhu 600°C dengan perbaikan ditunjukkan pada Gambar 5.3



Gambar 5.3 Grafik Hubungan Beban dan Lendutan balok suhu 600° C

4. Analisa Data Hubungan Beban Dengan Lendutan

Dari hasil pengamatan grafik hubungan beban dengan lendutan pada Gambar (5.1);(5.2) dan (5.3) dapat disimpulkan dalam Tabel 5.4.

Tabel 5.4. Analisa Data

SAMPEL	P (leleh) (Kg)	P (leleh) (%)	Lendutan (Δ) (mm)	Kekakuan (Φ)	Kekakuan (%)
Normal	4000	100.00	6.90	597.71	100.00
400°C Tanpa Perbaikan	3250	81.25	5.92	548.99	91.85
400°C Dengan Perbaikan	4250	106.25	6.85	620.44	103.80
600°C Tanpa Perbaikan	3000	75.00	6.80	441.18	73.81
600°C Dengan Perbaikan	3750	93.75	7.65	490.20	82.01

Dari data Tabel 5.4 dapat diamati dan diteliti pengaruh suhu terhadap kuat lentur balok pasca bakar yang tidak diperbaiki dan yang diperbaiki dalam menahan beban, serta perilaku lendutan yang terjadi pada benda uji.

5.1.5. Hubungan Momen Dengan Kelengkungan

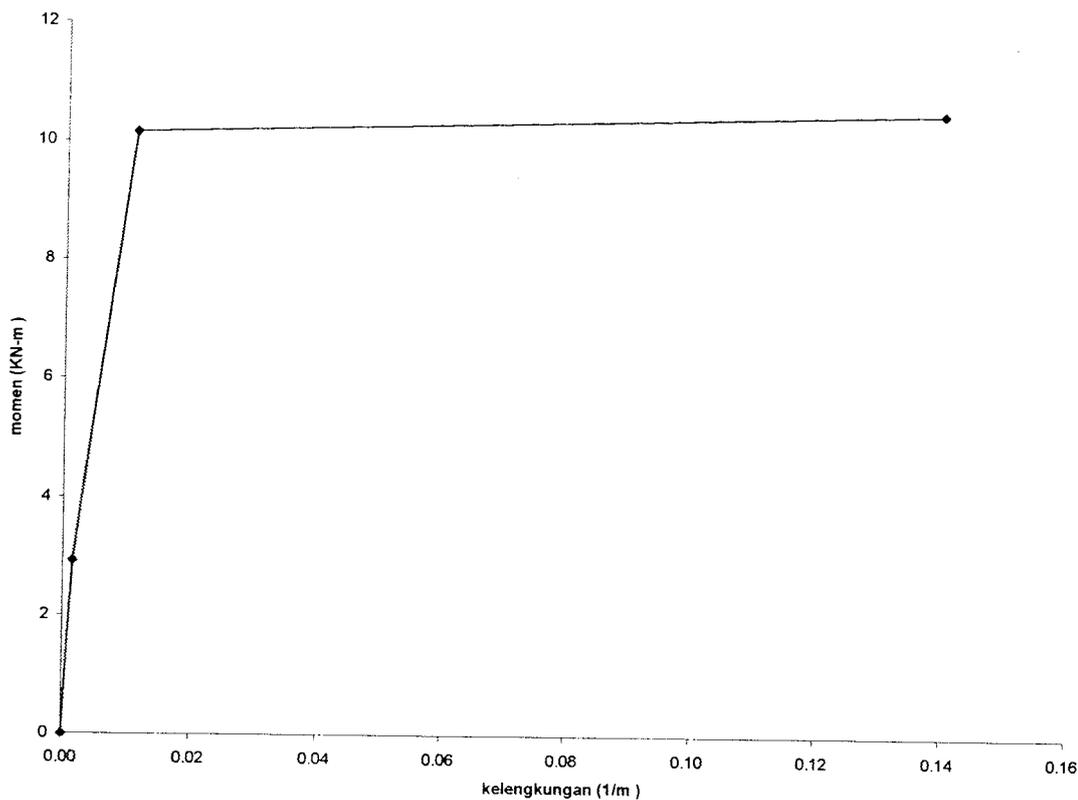
1. Momen Kelengkungan Teoritis

Mengacu pada tulisan **Park and Pauley**, nilai momen dan kelengkungan dapat dicari dengan perhitungan teoritis. Perhitungan momen kelengkungan disajikan pada Lampiran 9, sedang hasilnya dapat dilihat pada Tabel 5.5 dan kurva tri-linearnya pada Gambar 5.4.

Tabel 5.5 Hasil Perhitungan Momen Kelengkungan Teoritis

Keadaan	Momen (kNm)	Kelengkungan (1/m)
Retak (C_r)	2,94	$1,05 E^{-3}$
Leleh (y)	10,15	$10,8 E^{-3}$
Ultimit (u)	10,52	$140 E^{-3}$

Dari data perhitungan momen kelengkungan dapat digambarkan kurva tri-linear yang dijadikan pembanding dengan kurva momen kelengkungan balok normal.



Gambar 5.4 Kurva Momen Kelengkungan Tri-Linear Teoritis

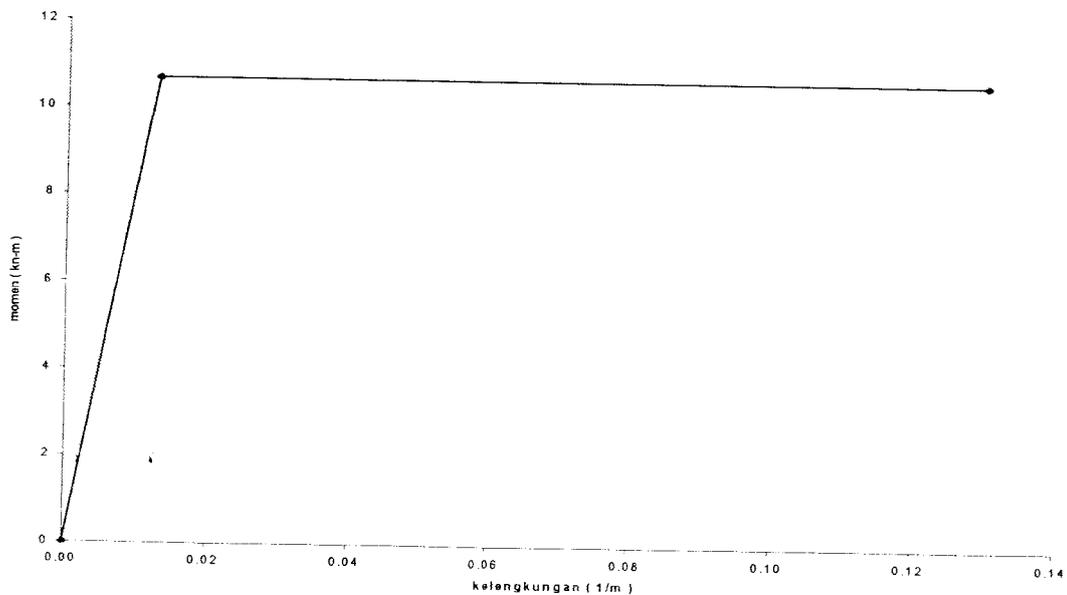
2. Grafik Momen Kelengkungan Balok Normal

Dari hasil data penelitian didapat grafik $P-\Delta$, sehingga dapat dicari momen dan kelengkungan untuk balok normal. Sedangkan grafik hubungan $M-\phi$ dapat digunakan untuk mencari faktor kekakuan.

Tabel 5.6 Hubungan Momen - Kelengkungan Balok Normal Suhu Ruang

Beban (Ton)	Dial 1 (mm)	dial 2 (mm)	Dial 3 (mm)	Momen (kN-m)	Kelengkungan (1/m)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000
0.50	0.19	0.23	0.16	1.333	0.001
1.00	0.49	0.66	0.59	2.667	0.003
1.50	1.06	1.20	1.02	4.000	0.004
2.00	2.32	2.39	1.98	5.333	0.005
2.50	3.45	3.27	2.59	6.667	0.006
3.00	4.24	4.19	3.41	8.000	0.008
3.50	5.23	5.47	4.52	9.333	0.013
4.00	6.77	6.90	5.75	10.667	0.014
4.00	8.38	9.10	7.17	10.667	0.029
4.00	9.46	10.65	8.20	10.667	0.040
4.00	10.45	12.05	9.12	10.667	0.050
4.00	11.65	13.70	10.40	10.667	0.059
4.00	12.71	15.45	11.84	10.667	0.071
4.00	15.10	18.67	14.41	10.667	0.087
4.00	16.82	20.76	15.66	10.667	0.100
4.00	16.90	22.22	16.81	10.667	0.119
4.00	17.70	23.27	17.61	10.667	0.125
4.00	18.43	24.21	18.31	10.667	0.130

Berdasarkan Tabel 5.6 dapat digambarkan grafik hubungan momen kelengkungan, sedangkan hasilnya ditunjukkan pada Gambar 5.6 yang merupakan Grafik Momen Kelengkungan Balok Normal suhu ruang.

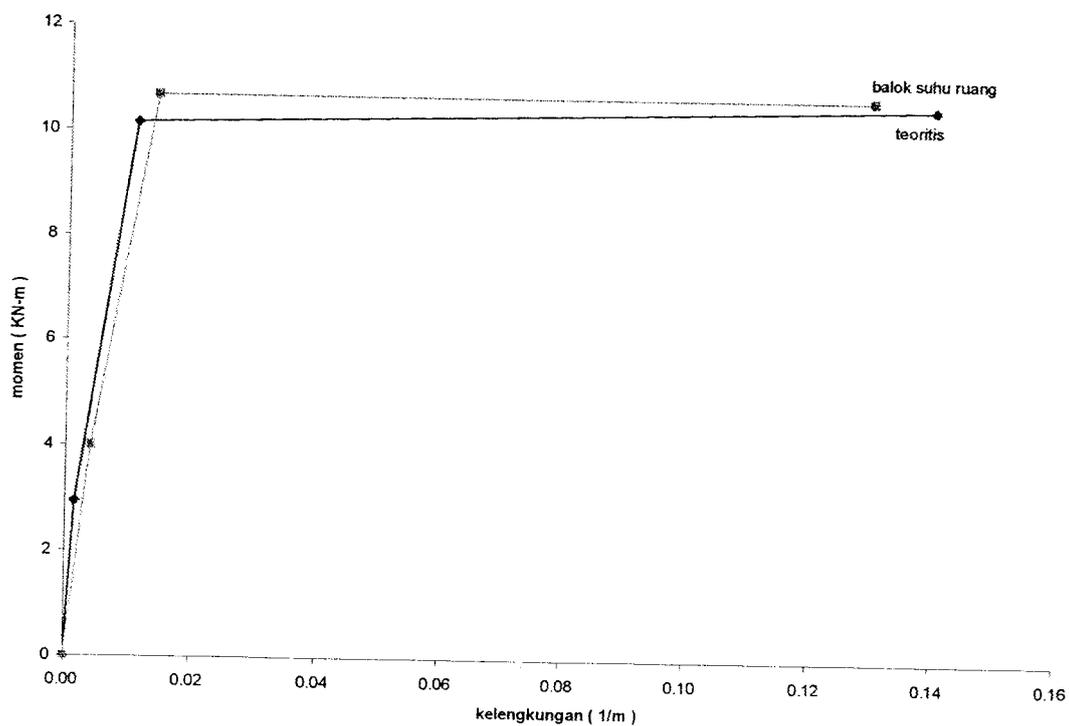


Gambar 5.5 Grafik momen dan kelengkungan balok normal suhu ruang

Hubungan momen – kelengkungan balok pasca bakar variasi suhu 400°C dan 600°C baik dengan perbaikan maupun tanpa perbaikan ditunjukkan pada Lampiran 11;12;13;14. Dari data-data tersebut kemudian dibuat grafik hubungan momen – kelengkungan untuk masing-masing benda uji tersebut.

3. Grafik Momen-Kelengkungan Balok Normal Dengan Momen-Kelengkungan Secara Teoritis

Grafik momen-kelengkungan balok normal dan momen kelengkungan secara teoritis ditunjukkan pada Gambar 5.6.

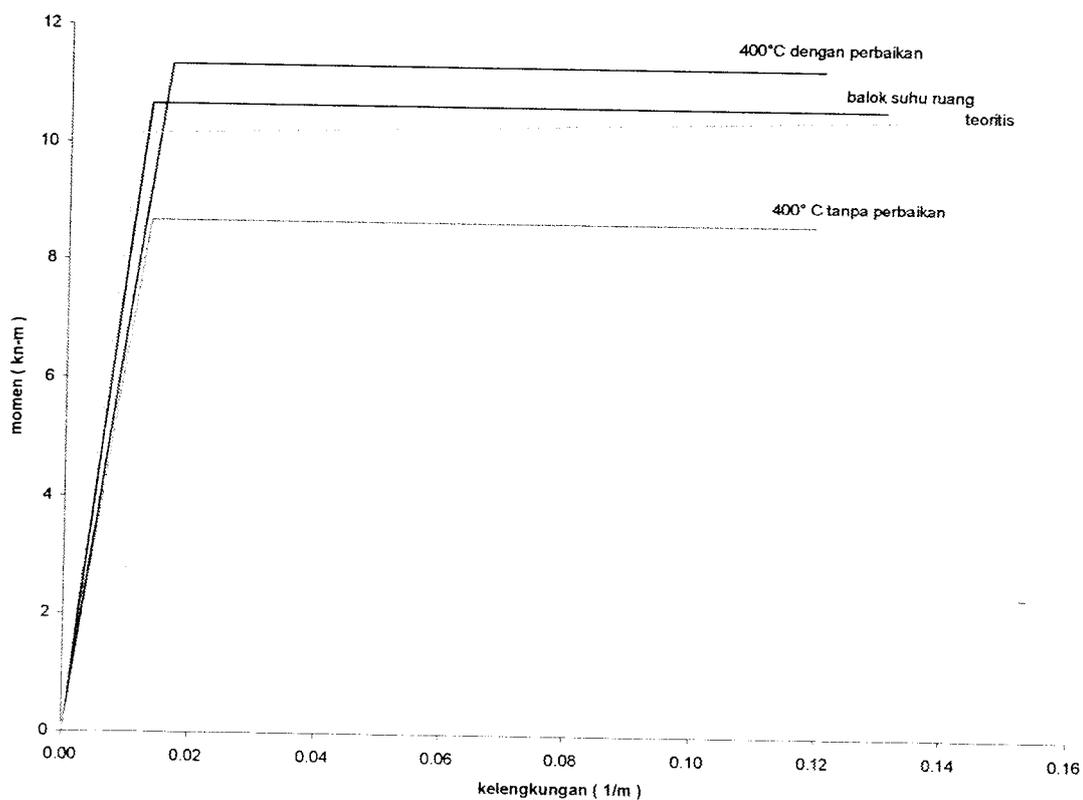


Gambar 5.6. Grafik Momen Kelengkungan Balok Normal Suhu Ruang dan Teoritis

Pada plotting Momen-kelengkungan terlihat Grafik teoritis lebih rendah dari Grafik kenyataan (Normal), Karena kuat tarik beton dalam perhitungan diabaikan. Sedangkan pada kenyataan beton mempunyai kuat tarik, sehingga grafik lebih tinggi dari perhitungan.

4. Grafik Momen-Kelengkungan Balok Normal, Balok Pasca Bakar Variasi Suhu 400°C Tanpa Perbaikan, dan Balok Pasca Bakar Variasi Suhu 400°C Dengan Perbaikan

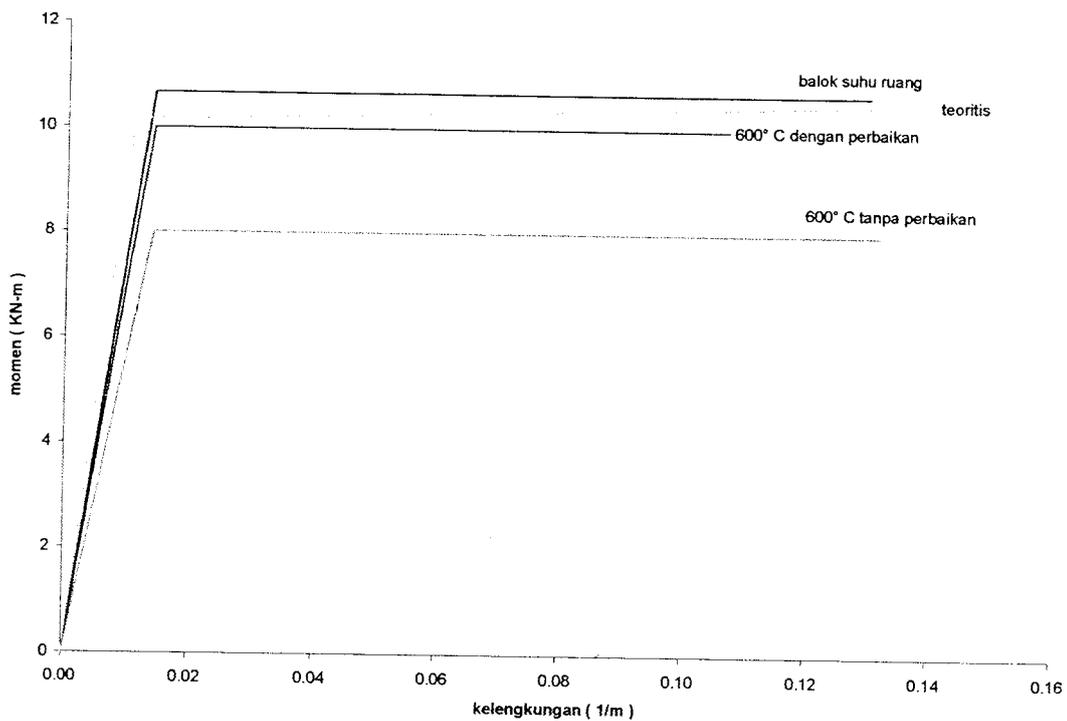
Grafik momen-kelengkungan balok normal, balok pasca bakar variasi suhu 400°C tanpa perbaikan, dan balok pasca bakar variasi suhu 400°C dengan perbaikan ditunjukkan pada Gambar 5.7



Gambar 5.7 Grafik Momen Kelengkungan Balok 400°C Dengan dan Tanpa Perbaikan

5. Grafik Momen-Kelengkungan Balok Normal, Balok Pasca Bakar Variasi Suhu 600°C Tanpa Perbaikan, dan Balok Pasca Bakar Variasi Suhu 600°C Dengan Perbaikan

Grafik momen–kelengkungan balok normal, balok pasca bakar variasi suhu 600°C tanpa perbaikan, dan balok pasca bakar variasi suhu 600°C dengan perbaikan ditunjukkan pada Gambar 5.8.

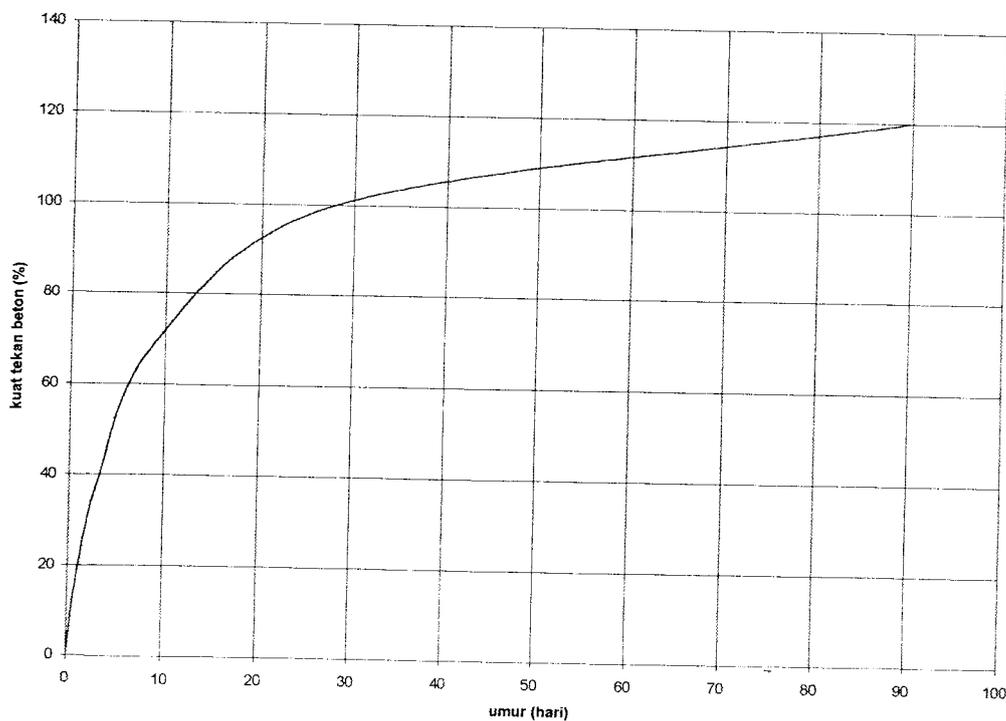


Gambar 5.8 Grafik Momen Kelengkungan Balok 600°C Dengan dan Tanpa Perbaikan

5.2. Pembahasan

5.2.1. Pengaruh Waktu Terhadap Kuat Tekan Beton

Pelaksanaan penelitian dan pembakan sampel balok beton dilakukan setelah semua sampel balok beton mencapai umur 28 hari atau lebih. Hal ini dikarenakan semakin bertambah umur beton, maka kuat tekan akan bertambah pula, akan tetapi setelah umur 28 hari kenaikan kuat tekan beton tidak terlalu besar. Pada umur 7 hari kuat tekan beton mencapai 70% dan pada umur 14 hari mencapai 85%-90% dari kuat tekan beton umur 28 hari. Hal ini terlihat pada Gambar 5.9.



Gambar 5.9 Grafik hubungan kuat tekan dan umur beton

Pada balok beton pasca bakar dengan perbaikan, pembakaran dilakukan setelah beton berumur 28 hari, balok beton kemudian diperbaiki. Cara perbaikan

dijelaskan pada bab sebelumnya. Selanjutnya dilakukan perawatan untuk kedua kali selama 28 hari sebelum dilaksanakan pengujian.

5.2.2. Kuat Lentur Sisa Ditinjau Dari Hubungan Beban dan Lendutan

Dari penelitian didapatkan hubungan beban (P) dan lendutan (Δ), dalam hal ini nilai kekakuan. Nilai kekakuan didapat dari P/Δ , kekakuan pada balok pasca bakar yang tidak diperbaiki dan yang diperbaiki secara umum mempunyai perilaku kekakuan yang berbeda. Hal ini dapat dilihat pada pola grafik lendutan yang diperoleh dari data percobaan di laboratorium. Pola grafik lendutan tersebut sesuai dengan teori yang diharapkan.

Pada perbandingan grafik lendutan balok standar dengan grafik lendutan balok yang dibakar dengan dan tanpa perbaikan, grafik lendutan balok yang tidak dibakar dianggap mempunyai kuat lentur dan kelengkungan 100%. Sedangkan grafik lendutan balok yang dibakar dengan dan tanpa perbaikan dibandingkan dengan grafik lendutan balok yang tidak dibakar dapat diketahui besarnya kuat lentur dan nilai kekakuan dalam prosen (%). Dari hasil perhitungan tersebut dapat diperoleh angka kenaikan atau penurunan kuat lentur dan nilai kekakuan dari balok yang dibakar dengan dan tanpa perbaikan.

Pembakaran balok uji pada suhu 400°C selama 3 jam tanpa perbaikan mengalami *penurunan* kuat lentur sebesar 18,75 % atau mempunyai kuat lentur sebesar 81,25 %. dan mengalami *penurunan* kekakuan 8,15 %.

Balok pasca bakar pada suhu 400°C selama 3 jam dengan perbaikan mengalami *peningkatan* kuat lentur sebesar 6,25 % atau dengan kata lain memiliki kuat lentur 106,25 % dari kekuatan balok standar dan kekakuan

mengalami *peningkatan* 3,8 % atau memiliki kekakuan sebesar 103,8 % dari kekakuan balok standar.

Pada balok pasca bakar variasi suhu 600°C selama 3 jam tanpa perbaikan mengalami *penurunan* kuat lentur sebesar 25 % atau mempunyai kuat lentur sebesar 75 % dengan kekakuan 73,81 % dari kekakuan balok standar.

Balok pasca bakar pada suhu 600°C selama 3 jam dengan perbaikan mengalami *penurunan* kuat lentur sebesar 13,46 % atau dengan kata lain memiliki kuat lentur 86,46 % dari kekuatan balok standar dan kekakuan mengalami *penurunan* 17,99 % atau memiliki kekakuan sebesar 82,01 % dari kekakuan balok standar.

Hal tersebut membuktikan bahwa balok beton akan mengalami penurunan kuat lentur apabila terbakar, tetapi apabila dilakukan perbaikan terhadap balok beton yang terbakar maka kuat lenturnya akan meningkat mendekati kuat lentur balok normal atau bahkan melebihinya.

5.2.3. Penurunan Momen Akibat Kebakaran Secara Analisis

Proses pembakaran akan mengakibatkan kuat tekan beton menurun. Hal itu disimpulkan dalam penelitian Amat Qolyubi dan Dina Rahmani (1998), yaitu penurunan kuat tekan sebesar 23,22% sehingga kekuatan beton tinggal 76,78% untuk suhu 400°C dan penurunan sebesar 31,66% sehingga kekuatan beton tersisa 68,34% terhadap kuat tekan beton normal. Penurunan kuat tekan juga berpengaruh terhadap tinggi blok tegangan ekuivalen a .

Penurunan kekuatan baja diabaikan, karena penurunan hanya pada proses pembakaran, setelah temperatur kembali normal kekuatan baja akan pulih kembali. Perubahan yang terjadi sangat kecil, sehingga tidak diperhitungkan.

Dengan substitusi besar nilai yang diperoleh dari perhitungan awal lampiran 9, terhadap persamaan 3.41 dan 3.42, maka

1. Suhu 400°C

Pada pembakaran suhu 400°C kuat tekan yang tersisa sebesar 76,78%, sehingga,

Dianggap tulangan tekan telah leleh

$$a = \frac{(A_s f_y) - (A_s' f_y)}{0,85 f_c' b} = \frac{(226.318,56) - (158.276,42)}{0,85.21.0,7678.100} = 20,66 \text{ mm}$$

$$\text{Jadi } \rightarrow c = \frac{a}{0,85} = \frac{20,66}{0,85} = 24,3 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_s' = 0,003 \cdot \frac{c - 15}{c} = 0,003 \cdot \frac{24,3 - 15}{24,3} = 1,15 \cdot 10^{-4} < \varepsilon_s$$

$$\text{tulangan tekan belum leleh, karena : } \varepsilon_s = \frac{f_y}{E_s} = \frac{318,56}{200000} = 1,5 \cdot 10^{-3}$$

dicoba $f_s' = 260 \text{ Mpa}$

$$a = \frac{(A_s \cdot f_y) - (A_s' \cdot f_s')}{0,85 \cdot f_c' \cdot b} = \frac{(226.318,56) - (158.260)}{0,85.21.0,7678.100} = 22,56$$

$$C = \frac{a}{0,85} = \frac{22,56}{0,85} = 26,54$$

$$\varepsilon_s' = 0,003 \frac{C - d'}{C} = 0,003 \frac{26,54 - 15}{26,54} = 1,3 \cdot 10^{-3}$$

$$f_s' = \varepsilon_s' \cdot E_c = 1,3 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^5 = 260,8 \text{ Mpa OK.}$$

$$\begin{aligned}
 Mu &= \left[(0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a) \left(d - \frac{a}{2} \right) \right] + [(As' \cdot f'_s)(d - d')] \\
 &= \left[(0,85 \cdot 21.07678 \cdot 100 \cdot 22,56) \left(185 - \frac{22,56}{2} \right) \right] + [(158 \cdot 260,8)(185 - 15)] \\
 &= 12376336,49 \text{ Nmm} = 12,38 \text{ KNm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Phi u &= \frac{\varepsilon_c}{C} = \frac{0,003}{26,54} = 1,13 \cdot 10^{-4} \text{ rad/mm} \\
 &= 1,13 \cdot 10^{-1} \text{ rad/m}
 \end{aligned}$$

2. Suhu 600°C

Pada pembakaran suhu 600°C kuat tekan beton yang tersisa 68,34%, sehingga

Dianggap tulangan tekan telah leleh

$$a = \frac{(As \cdot f_y) - (As' \cdot f_y)}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} = \frac{(226.318,56) - (158.276,42)}{0,85 \cdot 21.06834 \cdot 100} = 23,22 \text{ mm}$$

$$\text{Jadi } \rightarrow c = \frac{a}{0,85} = \frac{23,22}{0,85} = 27,3 \text{ mm}$$

$$\varepsilon'_s = 0,003 \cdot \frac{c - 15}{c} = 0,003 \cdot \frac{27,3 - 15}{27,3} = 1,35 \cdot 10^{-3} < \varepsilon_s$$

$$\text{tulangan tekan belum leleh, Karena : } \varepsilon_s = \frac{f_y}{E_s} = \frac{318,56}{200000} = 1,5 \cdot 10^{-3}$$

dicoba $f'_s = 274 \text{ Mpa}$

$$a = \frac{(As \cdot f_y) - (As' \cdot f'_s)}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} = \frac{(226.318,56) - (158.274)}{0,85 \cdot 21.06834 \cdot 100} = 23,53$$

$$C = \frac{a}{0,85} = \frac{23,53}{0,85} = 27,68$$

$$\varepsilon'_s = 0,003 \frac{C - d'}{C} = 0,003 \frac{27,68 - 15}{27,68} = 1,37 \cdot 10^{-3}$$

$$f'_s = \varepsilon'_s \cdot E_c = 1,37 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 10^5 = 274,8 \text{ Mpa. OK.}$$

$$\begin{aligned}
Mu &= \left[(0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a) \left(d - \frac{a}{2} \right) \right] + [(As' \cdot f'_s)(d - d')] \\
&= \left[(0,85 \cdot 21 \cdot 0,6834 \cdot 100 \cdot 23,53) \left(185 - \frac{23,53}{2} \right) \right] + [(158 \cdot 274,8)(185 - 15)] \\
&= 12353581,87 \text{ Nmm} = 12,35 \text{ KNm} \\
\Phi_u &= \frac{\varepsilon_c}{C} = \frac{0,003}{27,68} = 1,08 \cdot 10^{-4} \text{ rad/mm} \\
&= 1,08 \cdot 10^{-1} \text{ rad/m}
\end{aligned}$$

Dari perhitungan analisis diatas, dapat di dikatakan bahwa, penurunan kuat tekan beton akibat kebakaran pada suhu 400°C sebesar 23,22% dan suhu 600°C sebesar 31,66% belum tentu akan mengakibatkan penurunan momen dengan besar penurunan yang sama. Pembakaran balok uji pada suhu 400°C momen ultimit mengalami penurunan sebesar 0,32%, sedangkan pada suhu 600°C penurunan sebesar 0,56%.

5.2.4. Degradasi Momen dan Faktor Kekakuan Ditinjau dari Grafik Momen-Kelengkungan

Hubungan momen dan kelengkungan menunjukkan faktor kekakuan. Dalam hal ini didapat dari M/ϕ , faktor kekakuan pada balok pasca bakar secara umum mempunyai perilaku yang berbeda. Hal ini dapat dilihat pada pola grafik M/ϕ yang diperoleh data percobaan di laboratorium.

Pada perbandingan grafik momen kekakuan balok standard dengan grafik momen kekakuan balok pasca bakar, pada grafik momen-kelengkungan balok standard dianggap mempunyai faktor kekakuan 100%. Sedang grafik momen-kelengkungan balok pasca bakar dibandingkan grafik momen-kelengkungan balok

standard dapat diketahui besarnya faktor kekakuan dalam (%) seperti disajikan dalam Tabel 5.7

Tabel 5.7 Hasil Analisa

SAMPEL	M (kN-m)	Φ (m^{-1})	EI (kN-m ²)	M (%)	EI (%)
Normal	10.667	0.014	761.93	100.00	100.00
400°C Tanpa Perbaikan	8.667	0.013	666.69	81.25	87.50
400°C Dengan Perbaikan	11.33	0.016	708.125	106.21	92.94
600°C Tanpa Perbaikan	8.00	0.015	533.33	75.00	70.00
600°C Dengan Perbaikan	10.00	0.014	714.26	93.75	93.74

Dari Tabel 5.7 dapat dilihat terjadinya penurunan serta kenaikan Momen dan Faktor Kekakuan. Sedangkan penurunan serta kenaikan yang terjadi adalah sebesar :

Pada balok pasca bakar variasi suhu 400°C tanpa perbaikan balok uji mengalami *penurunan* momen sebesar 18,75 % dan *penurunan* faktor kekakuan sebesar 12,5 %.

Pada balok pasca bakar variasi suhu 400° C dengan perbaikan balok uji mengalami *kenaikan* momen sebesar 6,21 % dan *penurunan* faktor kekakuan sebesar 7,06 % terhadap balok normal, sedangkan terhadap balok suhu 400°C mengalami *kenaikan* momen sebesar 30,73 % dan *kenaikan* faktor kekakuan sebesar 28,49 %.

Pada balok pasca bakar variasi suhu 600°C tanpa perbaikan balok uji mengalami *penurunan* momen sebesar 25% dan *penurunan* faktor kekakuan sebesar 30 %.

Pada balok pasca bakar variasi suhu 600°C dengan perbaikan balok uji mengalami *penurunan* momen sebesar 6,25% dan mengalami *penurunan* faktor

kekakuan sebesar 6,26% terhadap balok normal, sedangkan terhadap balok suhu 600°C mengalami *kenaikan* momen sebesar 18,75 % dan *kenaikan* faktor kekakuan sebesar 23,74%.

Hal ini membuktikan bahwa perbaikan pada balok yang mengalami kerusakan akibat kebakaran dapat meningkatkan nilai *EI* dan dapat mempertinggi faktor daktilitas beton.

Dari Tabel 5.7. balok uji 600°C dengan perbaikan tidak mengalami peningkatan momen seperti pada balok uji 400°C dengan perbaikan, tetapi mengalami peningkatan daktilitas. Hal ini disebabkan suhu yang terlalu tinggi pada saat pembakaran sehingga beton tidak dapat mencapai kembali kapasitas momen seperti balok standar.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. KESIMPULAN

Dari penelitian balok uji dapat diambil kesimpulan mengenai perilaku Beton Balok Bertulang Pasca Bakar dengan variasi suhu dan waktu sebagai berikut :

1. Balok beton pasca bakar secara fisik akan timbul warna coklat hitam (karena jelaga) dan kuning putih (akibat temperatur tinggi).
2. Dari pola retak yang terjadi pada balok beton pasca bakar, menunjukkan bahwa retak timbul karena temperatur tinggi. Retak akibat temperatur tinggi timbul pada suhu diatas 400°C (retak rambut), dan hanya pada permukaan balok beton.
3. Kuat lentur balok beton pasca bakar bervariasi sebagai fungsi suhu dan lama pembakaran. Dengan penurunan kuat lentur pada suhu 400°C lama pembakaran 3 jam tanpa perbaikan yaitu 18,75 % dan penurunan kekakuan 8,15 %.
4. Balok pasca bakar suhu 400°C selama 3 jam dengan perbaikan mengalami peningkatan kekuatan sebesar 6,25 %, dengan peningkatan nilai kekakuan 3,8%. Hal tersebut menunjukkan bahwa pada balok pasca bakar yang diperbaiki akan mengalami peningkatan kuat lentur.

5. Balok pasca bakar pada suhu 600°C selama 3 jam tanpa perbaikan mengalami penurunan kekuatan sebesar 25% dengan penurunan kekakuan 26,19%.
6. Balok pasca bakar pada suhu 600°C selama 3 jam dengan perbaikan mengalami penurunan kekuatan sebesar 6,25% dengan penurunan kekakuan 17,99% terhadap balok standar, tetapi mengalami peningkatan kekuatan sebesar 18,75% dan kekakuan 8,2% terhadap balok suhu 600°C tanpa perbaikan. Hal ini menunjukkan bahwa balok yang diperbaiki dapat meningkatkan kekuatan dari balok pasca bakar tanpa perbaikan walaupun tidak mencapai kekuatan balok standar.
7. Degradasi Momen dan Faktor Kekakuan bervariasi menurut suhu dan lama pembakaran. Pada suhu 400°C lama pembakaran 3 jam momen mengalami penurunan 25% dan penurunan faktor kekakuan 12,5 %. Sedangkan pada suhu 400°C lama pembakaran 3 jam dengan perbaikan, momen akan mengalami peningkatan 6,21%, dengan penurunan faktor kekakuan 7,06%.
8. Degradasi momen dan faktor kekakuan pada balok pasca bakar dengan suhu 600°C tanpa perbaikan mengalami penurunan momen 25 % dan penurunan faktor kekakuan sebesar 30 %. Pada balok dengan perbaikan mengalami penurunan momen yang tidak terlalu besar yaitu 6,25 %, dengan penurunan faktor kekakuan 6,26%.
9. Penurunan kuat tekan beton akibat kebakaran pada suhu 400°C sebesar 23,22% dan suhu 600°C sebesar 31,66% belum tentu akan mengakibatkan penurunan momen dengan besar penurunan yang sama. Pembakaran balok uji

pada suhu 400°C momen ultimit mengalami penurunan sebesar 2,2%, sedangkan pada suhu 600°C penurunan sebesar 2,5%.

6.2 SARAN

Untuk memperoleh gambar yang lebih luas tentang kuat lentur balok pasca bakar, dikemukakan saran sebagai berikut

1. Pengujian kuat lentur dilakukan dengan dua titik pembebanan, sehingga diperoleh kuat lentur murni (tanpa gaya geser).
2. Pada saat pembakaran, balok diberi beban sehingga mendekati keadaan struktur yang sebenarnya.
3. Pada penelitian ini hanya menggunakan data lendutan balok, sehingga belum dapat diketahui diagram regangan dan tegangan yang terjadi pada balok pasca bakar. Disarankan pada penelitian yang akan datang, dipasang *strain gauge* pada balok untuk mengetahui distribusi tegangan dan regangan yang terjadi.
4. Pada saat pengujian perlu diperhatikan ketelitian dan kecermatan pengamatan dalam membaca dial pembebanan dan munculnya retak sehingga didapat data yang valid.

DAFTAR PUSTAKA

-----, 1971, **PERATURAN BETON BERTULANG INDONESIA**, Departemen Pekerjaan Umum, Bandung.

-----, 1991, **TATA CARA PERHITUNGAN STRUKTUR BETON UNTUK BANGUNAN GEDUNG, SK SNI T-15-1991-03**, Departemen Pekerjaan Umum, Bandung.

-----, 1990, **ACI 318-89, BUILDING CODE REQUIREMENTS FOR REINFORCED CONCRETE**, Edited by: S.K. GHOSH and BASILE G. RABBAT

-----, 1999, **STUDIUM GENERAL ANALISA STRUKTUR GEDUNG PASCA KEBAKARAN**, Fakultas Teknik Sipil UGM, Yogyakarta.

AMAT QOLYUBI ,DINA RAHMANI ,1998, **PENGARUH VARIASI SUHU PEMBAKARAN DAN PERLAKUAN BETON PASCA BAKAR TERHADAP PENURUNAN KUAT DESAK, MODULUS ELASTISITAS DAN KUAT GESER BETON**, Fakultas Teknik Sipil UII, Yogyakarta.

ANANG SURYA J, SRI CAHYO LALITO, 2000, **KUAT LENTUR SISA BALOK BETON BERTULANG PASCA BAKAR VARIASI SUHU DAN WAKTU**, Fakultas Teknik Sipil UII, Yogyakarta.

EDWARD G. NAWY, 1990, **BETON BERTULANG SUATU PENDEKATAN DASAR**, Diterjemahkan Oleh Bambang Suryo Atmono Eresco, Bandung.

E.P. POPOV, 1995, **MEKANIKA TEKNIK**, Diterjemahkan oleh Zainul Astamar, Erlangga, Jakarta.

HANSEN, TC. 1976, **TEXT BOOK OF CONCRETE TEHNOLOGY**.

ISTIMAWAN DIPOHUSODO, 1994, **STRUKTUR BETON BERTULANG**, Gramedia Pustaka Umum, Jakarta.

KARDIYONO COKROMULYO, 1992, **TEKNOLOGI BETON**, Fakultas Teknik Sipil UGM, Yogyakarta.

NEVILE AM, 1975, **PROPERTIES OF CONCRETE**

PARK R, PAULAY, 1975, **REINFORCED CONCRETTE STRUCTURES**, John Wiley & Sons, Inc.

Program ILMU
TA 366

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
JURUSAN TEKNIK SIPIL
Jl. Kaliurang Km. 14,4 Telp. 95330 Yogyakarta

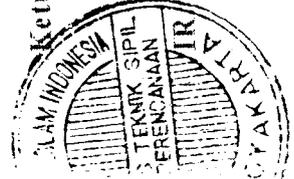
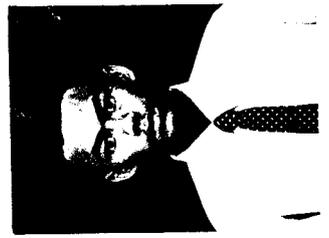


KARTU PESERTA TUGAS AKHIR

No.	Nama	No. Mhs.	N.I.R.M.	Bidang Studi
1.	TONY PRASETYO	95 310 186		TSS.
2.	SRI PALUPLISYANI	95 310 266		TSS.

JUDUL TUGAS AKHIR : KUALIFIKASI BALOK BETON BERTULANG
PASCA BAKAR DENGAN PERBAIKAN (MENGUNAKAN PASTA SEMEN).

Dosen Pembimbing I : IR. H.M.SAMSUDIN, MT
Dosen Pembimbing II : IR. FATKHURROHMAN NS, MT



Ketua Jurusan Teknik Sipil

[Signature]

IR. H.T. ADJUDDIN BM ARIS, MS



LABORATORIUM BAHAN KONSTRUKSI TEKNIK
 FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
 UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
 Jln. Kaliurang Km. 14,4 telp. (0274) 895707, 895042 Sleman Yogyakarta

DATA PEMERIKSAAN BERAT JENIS AGREGAT HALUS

Jenis Benda Uji : _____
 Nama Benda uji : Pasir
 Asal : Kali Boyang
 Keperluan : _____

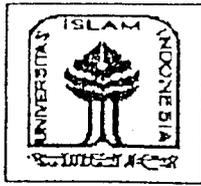
Diperiksa oleh :
 1) Tommy P 95-186
 2) S. Pajupil 95-266
 Tanggal : 15 4 '00

ALAT - ALAT

1. Gelas ukur kapasitas 1000 cc
2. Timbangan ketelitian 0,01 gram
3. Piring, sekop kecil

	BENDA UJI I	BENDA UJI II
Berat Agregat (W)	..500.. Gram	500.... Gram
Gelas ukur + Air (V1)	..500.. Cc	500.... Cc
Gelas ukur + Air + Agregat (V2)	..690.. Cc	..690.. Cc
BERAT JENIS (BJ) = $\frac{W}{V2 - v1}$	$\frac{500}{(690-500)} = 2,63$	$\frac{500}{(690-500)} = 2,63$
BERAT JENIS (BJ) RATA-RATA	$\frac{2 \cdot 2,63}{2} = 2,63$	

LABORATORIUM
 BAHAN KONSTRUKSI TEKNIK
 FAKULTAS TEKNIK SIPIL
 UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
 YOGYAKARTA



DATA PEMERIKSAAN GRADASI AGREGAT HALUS

Jenis Benda Uji : Pasir (MHB)
 Nama Benda uji : Pasir
 Asal : _____
 Keperluan : _____

Diperiksa oleh :
 1) Tony P 95-186
 2) S. Balupid 95-266

Tanggal : 14 04 '00

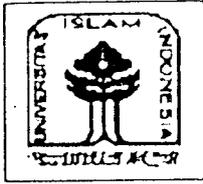
ALAT - ALAT :

1. Timbangan kapaitas 20 kg
2. Mesin penggetar / mesin ayak
3. Saringan 1 (satu) set (40, 20, 10, 4.80, 2.40, 1.20, 0.60, 0.30, 0.15, pan) mm
4. Sikat baja (Kasar / halus)
5. Kuas , Lap kaos
6. Piring, serok . dll

LUBANG AYAKAN (mm)	BERAT TERTINGGAL (gram)		BERAT TERTINGGAL (%)		BERAT TERTINGGAL KUMULATIF	
	I	II	I	II	I	II
PERCOBAAN KE :						
40	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-
4.80	0	0	0	0	0	0
2.40	16	18	0,8	0,9	0,8	0,9
1.20	321	265	16,05	13,25	16,85	14,15
0.60	657	631	32,85	31,55	49,7	45,7
0.30	570	595	28,5	29,75	78,2	75,45
0.15	339	394	16,95	19,75	95,15	95,15
SISA	97	97	4,85	4,85	---	---
Jumlah	2000	2000	100	100	240,7	231,35
Jumlah rata-rata	2000		100		236,025	

Modulus Halus Butir (MHB) _____

$\frac{236,025}{100} = 2,36$
 LABORATORIUM
 BAHAN KONSTRUKSI TEKNIK
 FAKULTAS TEKNIK SIPIL



LABORATORIUM BAHAN KONSTRUKSI TEKNIK
 FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
 UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
 Jln. Kaliurang Km. 14,4 telp. (0274) 895707, 895042 Sleman Yogyakarta

DATA PEMERIKSAAN BERAT JENIS AGREGAT KASAR

Jenis Benda Uji :
 Nama Benda uji : Kerkil (split)
 Asal : Clereng
 Keperluan :
 Diperiksa oleh :
 1) Tommy P 95-186
 2) S. Balupi L 95-266
 Tanggal : 15 4 00

ALAT - ALAT

1. Gelas ukur kapasitas 1000 cc
2. Timbangan ketelitian 0,01 gram
3. Piring, sekop kecil

	BENDA UJI I	BENDA UJI II
Berat Agregat (W)	..500... Gram	..500... Gram
Gelas ukur + Air (V1)	..500... Cc	..500... Cc
Gelas ukur + Air + Agregat (V2)	..690... Cc	..690... Cc
BERAT JENIS (BJ) = $\frac{W}{V2 - v1}$	$\frac{500}{(690-500)} = 2,63$	$\frac{500}{(690-500)} = 2,63$
BERAT JENIS (BJ) RATA-RATA	$\frac{2 \cdot 2,63}{2} = 2,63$	

LABORATORIUM
 Yogyakarta
 BAHAN KONSTRUKSI TEKNIK
 FAKULTAS TEKNIK SIPIL



LABORATORIUM BAHAN KONSTRUKSI TEKNIK
 FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
 UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
 Jln. Kaliurang Km. 14,4 telp. (0274) 895707, 895042 Sleman Yogyakarta

DATA PEMERIKSAAN
 BERAT VOLUME AGREGAT HALUS KASAL

Jenis Benda Uji : _____
 Nama Benda uji : _____
 Asal : _____
 Keperluan : _____

Diperiksa oleh :
 1) Tenny P 95-166
 2) S. Palupi L 95-166

Tanggal : 17 4 00

ALAT - ALAT

1. Timbangan Kapasitas minimal 20 Kg
2. Cetakan silinder ($\varnothing 15 \times t 30$) cm
3. Tongkat penumbuk $\varnothing 16$ mm panjang 60 cm
4. Serok /cetok
5. Dan lain-lain

	BENDA UJI I	BENDA UJI II
Berat cetakan silinder (W1)	5,628 Kg	5,628 Kg
Berat cetakan silinder + Agregat (W2)	13,610 Kg	13,645 Kg
Volume silinder (V) $\frac{1}{4} \pi \cdot d^2 \cdot t$	5,3 $\cdot 10^{-3}$ M ³	5,3 $\cdot 10^{-3}$ M ³
Berat Volume Agregat = $\frac{W2 - W1}{V}$	1,506 ton/m ³	1,513 ton/m ³
Berat Volume Agregat Rata - rata		1,5095 ton/m ³

LABORATORIUM
 BAHAN KONSTRUKSI TEKNIK
 FAKULTAS TEKNIK SIPIL
 DAN PERENCANAAN
 UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

DATA KUAT TEKAN SILINDER BETON.

$$\text{Kuat Desak Beton 28 hari} = \frac{\text{Beban Maksimal}}{\text{luas Penampang}}$$

$$f_c' = \frac{P_{\max}}{1/4 \pi d^2}$$

$$1.a. \text{ KuatDesak} = \left(\frac{380 \times 101,936}{1/4 \times \pi \times 15,04^2} \right) = 218,0 \text{ kg/cm}^2 = 21,8 \text{ MPa}$$

$$b. \text{ KuatDesak} = \left(\frac{485 \times 101,936}{1/4 \times \pi \times 14,89^2} \right) = 283,9 \text{ kg/cm}^2 = 28,39 \text{ MPa}$$

$$2.a. \text{ KuatDesak} = \left(\frac{430 \times 101,936}{1/4 \times \pi \times 15,09^2} \right) = 245,1 \text{ kg/cm}^2 = 24,51 \text{ MPa}$$

$$b. \text{ KuatDesak} = \left(\frac{510 \times 101,936}{1/4 \times \pi \times 15,00^2} \right) = 294,2 \text{ kg/cm}^2 = 29,42 \text{ MPa}$$

$$3.a. \text{ KuatDesak} = \left(\frac{370 \times 101,936}{1/4 \times \pi \times 15,00^2} \right) = 213,4 \text{ kg/cm}^2 = 21,34 \text{ MPa}$$

$$b. \text{ KuatDesak} = \left(\frac{480 \times 101,936}{1/4 \times \pi \times 14,92^2} \right) = 279,9 \text{ kg/cm}^2 = 27,99 \text{ MPa}$$

$$4.a. \text{ KuatDesak} = \left(\frac{490 \times 101,936}{1/4 \times \pi \times 15,08^2} \right) = 279,5 \text{ kg/cm}^2 = 27,95 \text{ MPa}$$

$$b. \text{ KuatDesak} = \left(\frac{410 \times 101,936}{1/4 \times \pi \times 15,01^2} \right) = 233,4 \text{ kg/cm}^2 = 23,34 \text{ MPa}$$

$$5.a. \text{ KuatDesak} = \left(\frac{400 \times 101,936}{1/4 \times \pi \times 15,00^2} \right) = 230,7 \text{ kg/cm}^2 = 23,07 \text{ MPa}$$

$$b. \text{ KuatDesak} = \left(\frac{500 \times 101,936}{1/4 \times \pi \times 15,00^2} \right) = 288,4 \text{ kg/cm}^2 = 28,84 \text{ MPa}$$

$$6.a. \text{ KuatDesak} = \left(\frac{400 \times 101,936}{1/4 \times \pi \times 15,00^2} \right) = 230,7 \text{ kg/cm}^2 = 23,07 \text{ MPa}$$

$$b. \text{ KuatDesak} = \left(\frac{420 \times 101,936}{1/4 \times \pi \times 15,09^2} \right) = 239,6 \text{ kg/cm}^2 = 23,96 \text{ MPa}$$

$$7.a. \text{Kuat desak} = \left(\frac{430 \times 101,93}{1/4 \times \pi \times 15,09^2} \right) = 245,1 \text{ kg/cm}^2 = 24,51 \text{ MPa}$$

$$b. \text{Kuat desak} = \left(\frac{500 \times 101,93}{1/4 \times \pi \times 15,02^2} \right) = 287,6 \text{ kg/cm}^2 = 28,76 \text{ MPa}$$

$$8.a. \text{Kuat desak} = \left(\frac{565 \times 101,93}{1/4 \times \pi \times 15,00^2} \right) = 325,9 \text{ kg/cm}^2 = 32,59 \text{ MPa}$$

$$6. \text{Kuat desak} = \left(\frac{565 \times 101,93}{1/4 \times \pi \times 15,04^2} \right) = 324,2 \text{ kg/cm}^2 = 32,42 \text{ MPa}$$

$$9.a. \text{Kuat desak} = \left(\frac{595 \times 101,93}{1/4 \times \pi \times 15,08^2} \right) = 339,6 \text{ kg/cm}^2 = 33,96 \text{ MPa}$$

$$b. \text{Kuat desak} = \left(\frac{510 \times 101,93}{1/4 \times \pi \times 15,09^2} \right) = 290,6 \text{ kg/cm}^2 = 29,06 \text{ MPa}$$

$$10.a. \text{Kuat desak} = \left(\frac{505 \times 101,93}{1/4 \times \pi \times 15,07^2} \right) = 288,6 \text{ kg/cm}^2 = 28,86 \text{ MPa}$$

$$b. \text{Kuat desak} = \left(\frac{430 \times 101,93}{1/4 \times \pi \times 15,02^2} \right) = 247,4 \text{ kg/cm}^2 = 24,74 \text{ MPa}$$

Kuat tekan rata-rata silinder beton

$$f_{cr} = \frac{\sum f_c'}{20} = \frac{5279,85}{20} = 263,979$$

$$S_d = 36,2582$$

$$f_c' = f_{cc} - 1,64 S_d$$

$$f_c' = 263,979 - 1,64 \cdot 36,2582 = 209,83 \text{ kg/cm}^2 = 21 \text{ Mpa}$$

jadi kuat tekan beton = 21 Mpa

HASIL PENGUJIAN KUAT TARIK BAJA

No	Diameter Pengenal mm	Diameter uji mm	Luas mm ²	Beban Luluh Kgf	Beban Maksimum Kgf	Tegangan Luluh Kg/mm ²	Kuat tarik Kg/mm ²
1	12	10,5	86,59	27512,67	28587	317,73	448,12
2	12	10,3	83,32	26706,64	27946	320,35	469,67
3	12	10,6	88,25	28011,87	29231	317,41	457,79
4	10	8,5	56,75	15631,96	16368	275,45	415,33
5	10	9,0	63,62	17657,54	18460	277,54	407,43
6	10	9,0	63,62	17575,98	18375	276,26	409,74
7	8	6,5	33,18	10150,00	14150	305,90	426,46
8	8	7,5	44,18	10600,00	14250	239,92	322,54
9	8	6,5	33,18	10400,00	14200	313,44	427,96

PERENCANAAN CAMPURAN BETON

Kuat beton yang disyaratkan $f'_c = 20 \text{ Mpa}$

Volume pekerjaan kecil dan mutu pekerjaan cukup, diperkirakan $S_d = 4 \text{ MPa}$

Beton didalam ruangan dengan keadaan sekeliling non-korosif

Jenis struktur adalah balok

Ukuran maksimum kerikil 30 mm

Berat volume agregat = $1,5059 \text{ ton/m}^3$

Berat jenis kerikil = 2,63

Berat jenis pasir = 2,63

Modulus halus butir pasir (mhb) = 2,36

PERENCANAAN

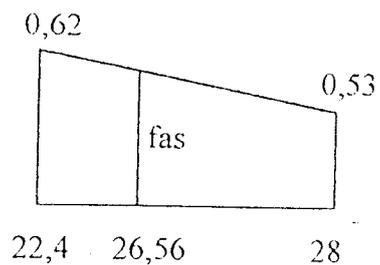
1. Menghitung mutu beton

$$S_d = 4 \text{ MPa}$$

$$m = 1,64 S_d = 1,64 \cdot 4 = 6,56 \text{ MPa}$$

$$f'_{cr} = f'_c + m = 20 + 6,56 = 26,56 \text{ MPa}$$

2. Menghitung nilai faktor air semen



$$\frac{0,62 - 0,53}{28 - 24,2} = \frac{\text{fas} - 0,53}{28 - 26,56}$$

$$\begin{aligned} \text{fas} &= 0,53 + \frac{0,62 - 0,53}{28 - 26,56} (28 - 26,56) \\ &= 0,53 + 0,02 = 0,55 \end{aligned}$$

fas maksimum = 0,60

sehingga fas yang digunakan = 0,55

3. Nilai slam

Untuk struktur balok nilai slam = 75 – 150 mm

4. Jumlah air yang diperlukan per meter kubik beton

Berdasarkan nilai slam dan ukuran maksimum kerikil 30 mm, maka diperoleh kebutuhan air sebesar 190 lt atau $0,19 \text{ m}^3$ dan udara terperangkap 1,5%

5. Jumlah semen yang diperlukan per meter kubik beton

$$W_s = A / \text{fas}$$

$$= 0,203 / 0,55 = 0,369 \text{ ton}$$

6. Menghitung volume kerikil

Berdasarkan ukuran maksimum kerikil 30 mm dan modulus halus butir pasir 2,36 maka diperoleh kebutuhan volume kerikil $0,705 \text{ m}^3$

$$\text{Berat volume kerikil} = 1,5095 \text{ ton/m}^3$$

$$\text{Berat kerikil } W_k = 1,5095 \times 0,705 = 1,064 \text{ ton}$$

7. Jumlah volume absolut air, semen, kerikil dan udara

$$V_a + V_s + V_k + V_u = 0,203 + \frac{0,369}{3,15} + \frac{1,064}{2,63} + 0,02$$

$$= 0,203 + 0,117 + 0,404 + 0,02$$

$$= 0,74 \text{ m}^3$$

Volume absolut pasir

$$V_p = 1 - 0,74 = 0,26 \text{ m}^3$$

$$\text{Berat pasir} = 0,26 \times 2,63 = 0,684 \text{ ton}$$

8. Kebutuhan Material per meter kubik beton

$$\text{Semen} = 0,369 \text{ ton} = 369 \text{ kg}$$

$$\text{Pasir} = 0,684 \text{ ton} = 684 \text{ kg}$$

$$\text{Kerikil} = 1,064 \text{ ton} = 1064 \text{ kg}$$

$$\text{Air} = 190 \text{ lt}$$

9. Volume pekerjaan

$$\text{Balok (10 buah)} = 0,1 \times 0,2 \times 2 \times 10 = 0,4 \text{ m}^3$$

$$\text{Silinder (20 buah)} = \frac{1}{4} \times \pi \times 0,15^2 \times 0,3 \times 20 = 0,1 \text{ m}^3$$

$$\text{Total volume pekerjaan} = 0,5 \text{ m}^3$$

10. Kebutuhan material

$$\text{Semen} = 369 \times 0,5 = 184,5 \text{ kg}$$

$$\text{Pasir} = 684 \times 0,5 = 342 \text{ kg}$$

$$\text{Kerikil} = 1064 \times 0,5 = 532 \text{ kg}$$

$$\text{Air} = 190 \times 0,5 = 95 \text{ lt}$$

11. Kebutuhan kerikil

$$\text{Berat total kerikil} = 581 \text{ kg}$$

Kerikil dibagi dalam tiga gradasi

$$\text{Ukuran 0 - 1 cm} = 24 \text{ kg}$$

$$\text{Ukuran 1 - 2 cm} = 292,5 \text{ kg}$$

$$\text{Ukuran 2 - 3 cm} = 264,5 \text{ kg}$$

$$\text{Perbandingan gradasi kerikil} = 1 : 12,2 : 11,1$$

12. Kebutuhan material setiap kali campuran (mix) beton

$$\text{Volume molen (mixer)} = 0,05 \text{ m}^3$$

$$\text{Semen} = 369 \times 0,05 = 18,5 \text{ kg}$$

$$\text{Pasir} = 684 \times 0,05 = 34,2 \text{ kg}$$

$$\text{Kerikil} = 1064 \times 0,05 = 53,2 \text{ kg}$$

$$\text{Air} = 190 \times 0,05 = 9,5 \text{ kg}$$

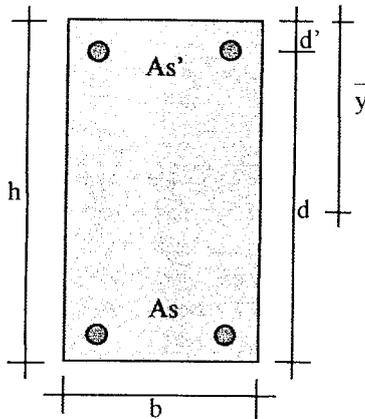
Kebutuhan kerikil setiap campuran

$$\text{Ukuran } 0 - 1 \text{ cm} = 1/24,3 \times 53,2 = 2,2 \text{ kg}$$

$$\text{Ukuran } 1 - 2 \text{ cm} = 12,2/24,3 \times 53,2 = 26,7 \text{ kg}$$

$$\text{Ukuran } 2 - 3 \text{ cm} = 11,1/24,3 \times 53,2 = 24,3 \text{ kg}$$

PERHITUNGAN MOMEN KELENGKUNGAN SECARA TEORITIS



$$f_{y_{\phi 12}} = 318,56 \text{ Mpa} \quad f_{y_{\phi 10}} = 276,42 \text{ Mpa}$$

$$f_c' = 21 \text{ Mpa}$$

$$A_s = 2 \times \frac{1}{4} \times \pi \times 12^2 = 226 \text{ mm}^2$$

$$A_s' = 2 \times \frac{1}{4} \times \pi \times 10^2 = 158 \text{ mm}^2$$

$$\rho = \frac{A_s}{bd} = \frac{226}{100 \times 200} = 11,3 \times 10^{-3}$$

$$\rho' = \frac{A_s'}{bd} = \frac{158}{100 \times 200} = 7,9 \times 10^{-3}$$

$$E_c = 4700 \sqrt{f_c'} = 4700 \sqrt{21} = 21538,1 \text{ Mpa}$$

$$\text{Modulus rasio, } n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200000}{21538,1} = 9,3$$

1. Sebelum Retak

$$\begin{aligned} A &= bh + (n-1)(A_s + A_s') \\ &= (100 \times 200) + (9,3-1)(226 + 158) \\ &= 23187,2 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\bar{y} = \frac{(100 \times 200) \times 100 + (9,3-1) \times 226 \times 185 + (9,3-1) \times 158 \times 15}{23187,2} = 102 \text{ mm}$$

$$I = \frac{1}{12} \times 100 \times 200^3 + (100 \times 200 \times 2^2) + (1875,8 \times 83^2) + (1311,4 \times 87^2) = 8,96 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

$$\text{Modulus retak} \rightarrow f_r = 0,7 \sqrt{f_c'} = 0,7 \sqrt{21} = 3,21 \text{ Mpa}$$

$$\begin{aligned} M_{crack} &= \frac{f_r \times I}{Y'} = \frac{3,21 \times 8,96 \cdot 10^7}{(200 - 102)} = 2,94 \cdot 10^6 \text{ Nmm} \\ &= 2,94 \text{ KN - m} \end{aligned}$$

$$\Phi_{crack} = \frac{f_r}{E_c} = \frac{3,21}{21538,1} = 1,5 \times 10^{-6} \text{ rad/mm}$$

$$= 1,49 \times 10^{-3} \text{ rad/m}$$

2. Setelah Retak Pada Saat Leleh Pertama

Dengan menganggap beban elastis, maka :

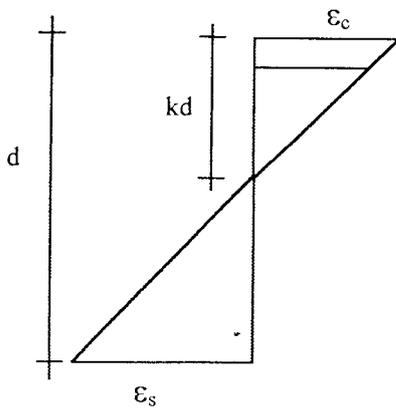
$$k = \left[(\rho + \rho')^2 n^2 + 2 \left(\rho + \frac{\rho' d'}{d} \right) n \right]^{1/2} - (\rho + \rho') n$$

$$= \left[(11,3 \cdot 10^{-3} + 7,9 \cdot 10^{-3})^2 (9,3)^2 + 2 \left(11,3 \cdot 10^{-3} + \frac{7,9 \cdot 10^{-3} \times 15}{185} \right) \times 9,3 \right]^{1/2}$$

$$- (11,3 \cdot 10^{-3} + 7,9 \cdot 10^{-3}) \times 9,3 = 0,325$$

maka : $kd = 0,325 \times 185 = 60,1 \text{ mm}$

$$\varepsilon_s = \frac{f_y}{E_s} = \frac{318,56}{200000} = 1,6 \cdot 10^{-3}$$



Dari diagram didapat :

$$\varepsilon_c = \varepsilon_s \frac{kd}{180 - kd} = 1,6 \cdot 10^{-3} \frac{60,1}{180 - 60,1} = 8,02 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{jadi} \rightarrow f_c = \varepsilon_c \times E_c = 8,02 \cdot 10^{-4} \times 2,15381 \cdot 10^4 = 17,3 \text{ Mpa}$$

$$\varepsilon'_s = \varepsilon_s \left(\frac{kd - 15}{kd} \right) = 1,6 \cdot 10^{-3} \left(\frac{60,1 - 15}{60,1} \right) = 12 \times 10^{-4}$$

$$f'_s = \epsilon'_s \times E_s = 12 \times 10^{-4} \times 2 \times 10^5 = 240 \text{ MPa}$$

$$C_c = \frac{1}{2} \times f_c \times b \times kd = \frac{1}{2} \times 17,3 \times 100 \times 60,1 = 51986,5 \text{ N} = 51,9865 \text{ KN}$$

$$C'_s = A'_s \times f'_s = 158 \times 240 = 37920 \text{ N} = 37,92 \text{ KN}$$

Jadi gaya tekan total yang bekerja pada y dari serat atas adalah

$$C = 51986,5 + 37920 = 89906,5 \text{ N}$$

$$y = \frac{(d' \times C'_s) + (C_c \times kd/C)}{C} = \frac{(15 \times 37920) + (51986,5 \times 60,1/3)}{89906,5} = 17,9 \text{ mm}$$

$$\text{Jadi } \rightarrow jd = d - y = 185 - 17,9 = 167,1 \text{ mm}$$

maka :

$$My = A_s \times f_y \times jd = 226 \times 318,56 \times 167,1 = 12,03 \text{ KNm}$$

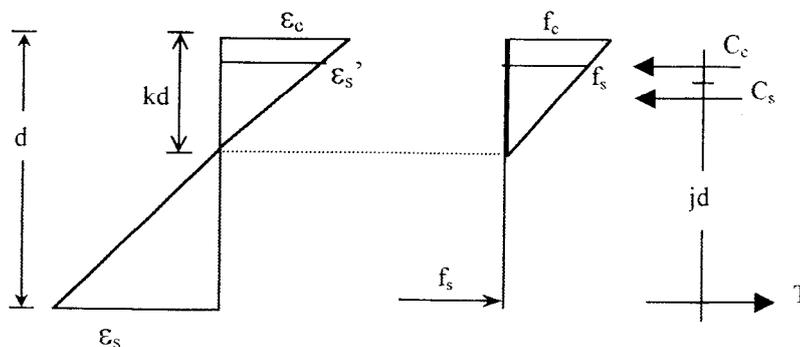
$$\Phi_y = \frac{f_y/E_s}{d - kd} = \frac{318,56/2 \times 10^5}{185 - 60,1} = 1,28 \times 10^{-5} \text{ rad/mm} = 1,28 \times 10^{-2} \text{ rad/m}$$

3. Setelah leleh pada saat beban maksimum (ultimit)

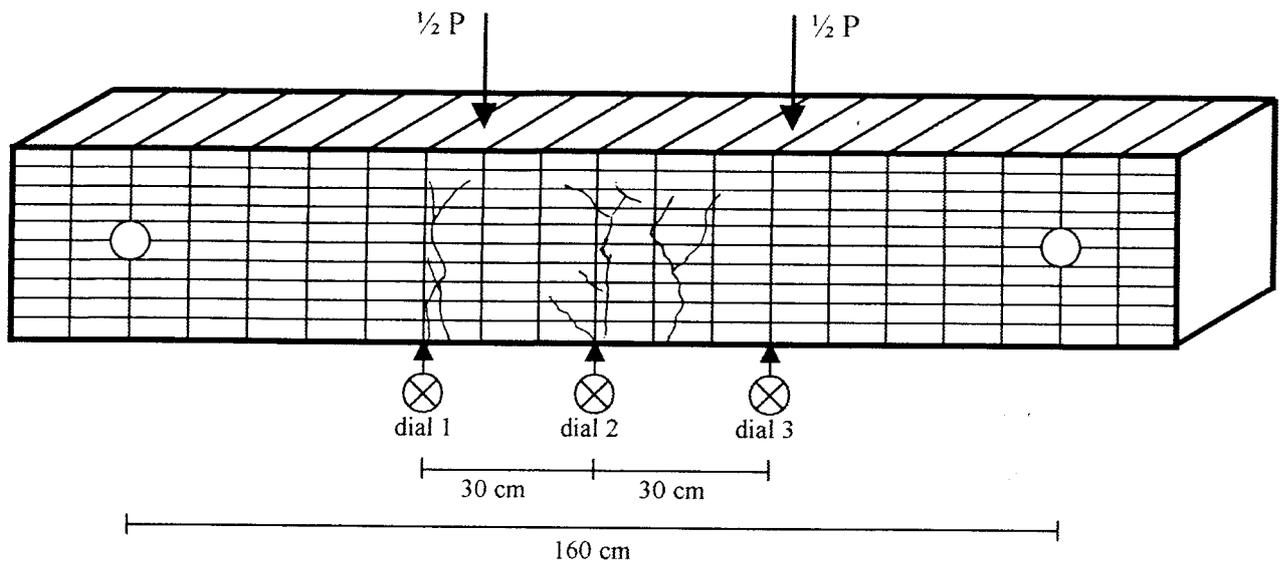
Dianggap tulangan tekan telah leleh

$$a = \frac{(A_s \times f_y) - (A'_s \times f'_y)}{0,85 \times f'_c \times b} = \frac{(226 \times 318,56) - (158 \times 276,42)}{0,85 \times 21 \times 100} = 15,87 \text{ mm}$$

$$\text{Jadi } \rightarrow c = \frac{a}{0,85} = \frac{15,87}{0,85} = 18,67 \text{ mm}$$

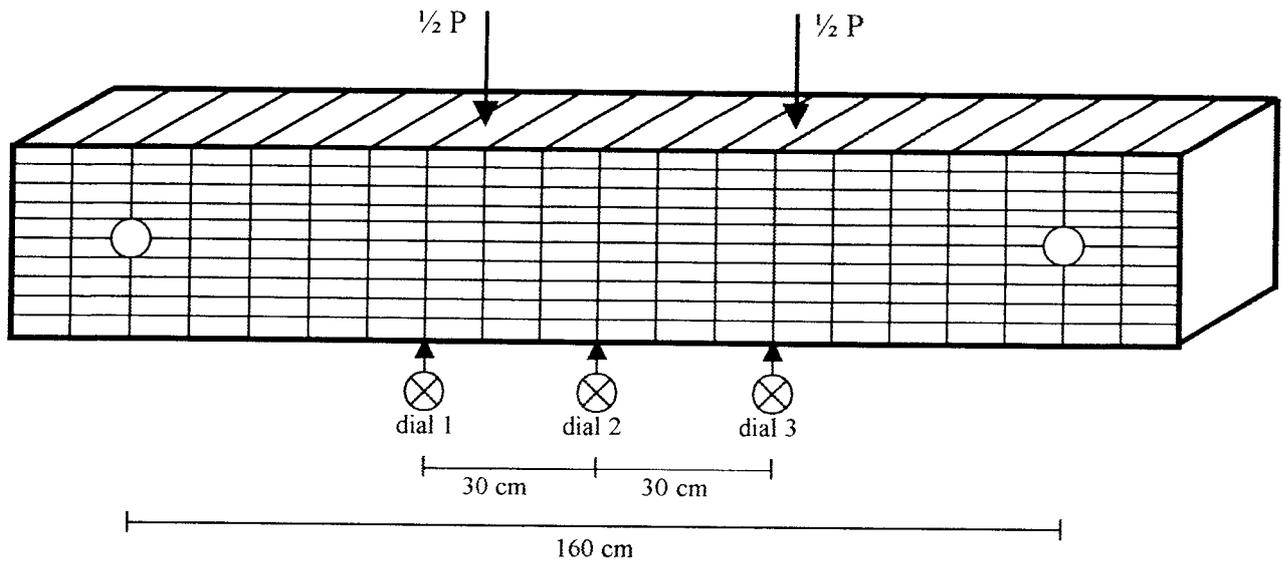


Data hasil pengujian kuat lentur balok beton bertulang suhu ruang



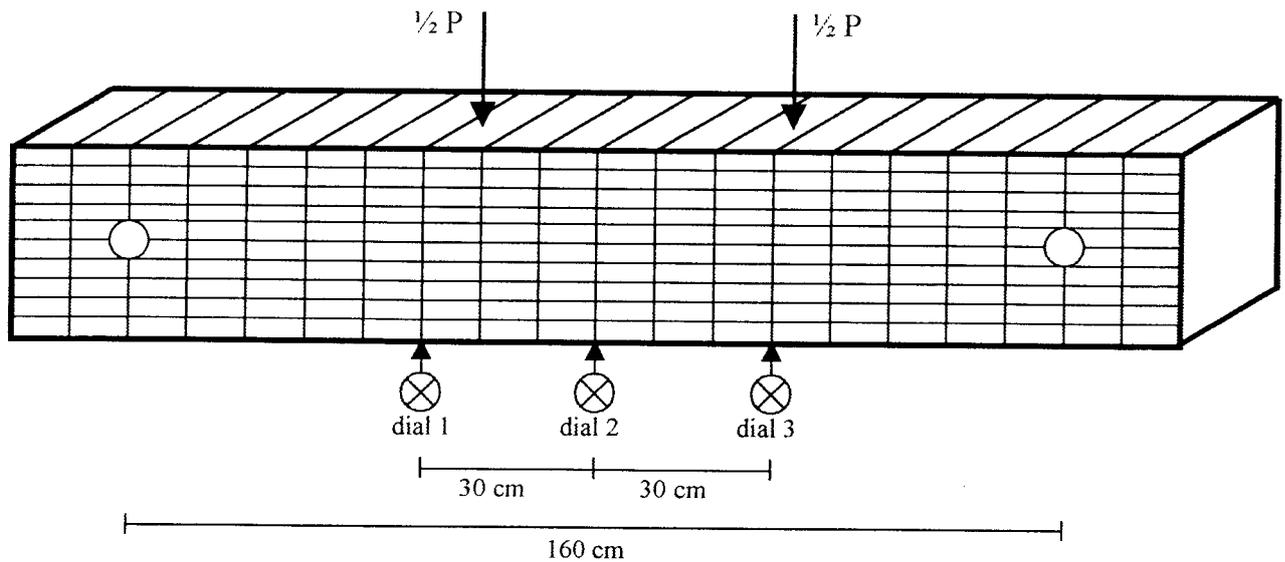
Beban (ton)	dial 1 (mm)	dial 2 (mm)	dial 3 (mm)	Momen (kN-m)	Kelengkungan (1/m)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000
0.50	0.19	0.23	0.16	1.333	0.001
1.00	0.49	0.66	0.59	2.667	0.003
1.50	1.06	1.20	1.02	4.000	0.004
2.00	2.32	2.39	1.98	5.333	0.005
2.50	3.45	3.27	2.59	6.667	0.006
3.00	4.24	4.19	3.41	8.000	0.008
3.50	5.23	5.47	4.52	9.333	0.013
4.00	6.77	7.05	5.75	10.667	0.018
4.00	8.38	9.10	7.17	10.667	0.029
4.00	9.46	10.65	8.20	10.667	0.040
4.00	10.45	12.05	9.12	10.667	0.050
4.00	11.65	13.70	10.40	10.667	0.059
4.00	12.71	15.45	11.84	10.667	0.071
4.00	15.10	18.67	14.41	10.667	0.087
4.00	16.82	20.76	15.66	10.667	0.100
4.00	16.90	22.22	16.81	10.667	0.119
4.00	17.70	23.27	17.61	10.667	0.125
4.00	18.43	24.21	18.31	10.667	0.130

**Data hasil pengujian kuat lentur balok beton bertulang pasca bakar suhu 400°C
tanpa perbaikan**



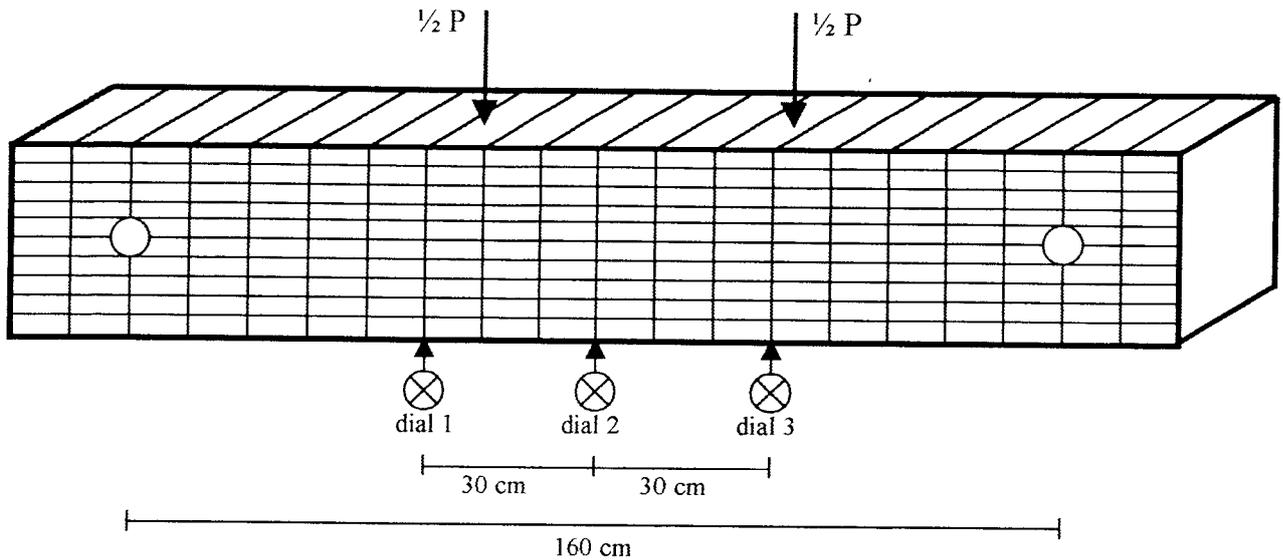
Beban (ton)	dial 1 (mm)	dial 2 (mm)	dial 3 (mm)	Momen (kN-m)	Kelengkungan (1/m)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000
0.50	0.98	0.97	0.82	1.280	0.002
1.00	1.37	1.57	1.48	2.667	0.003
1.50	2.29	2.35	2.04	4.000	0.004
2.00	2.85	3.02	2.65	5.333	0.006
2.50	4.01	4.20	3.77	6.667	0.007
3.00	4.57	4.85	4.30	8.000	0.009
3.25	5.43	5.92	5.25	8.667	0.013
3.25	6.53	7.48	6.35	8.667	0.023
3.25	8.29	9.80	7.95	8.667	0.037
3.25	10.01	12.25	9.72	8.667	0.053
3.25	11.49	14.28	11.28	8.667	0.064
3.25	13.06	16.50	13.13	8.667	0.076
3.25	14.26	18.25	14.50	8.667	0.086
3.25	15.38	19.73	15.47	8.667	0.096
3.25	17.12	21.96	17.15	8.667	0.107
3.25	18.36	23.45	18.26	8.667	0.114
3.25	19.33	24.50	19.00	8.667	0.119

Data hasil pengujian kuat lentur balok beton bertulang pasca bakar suhu 400°C dengan perbaikan

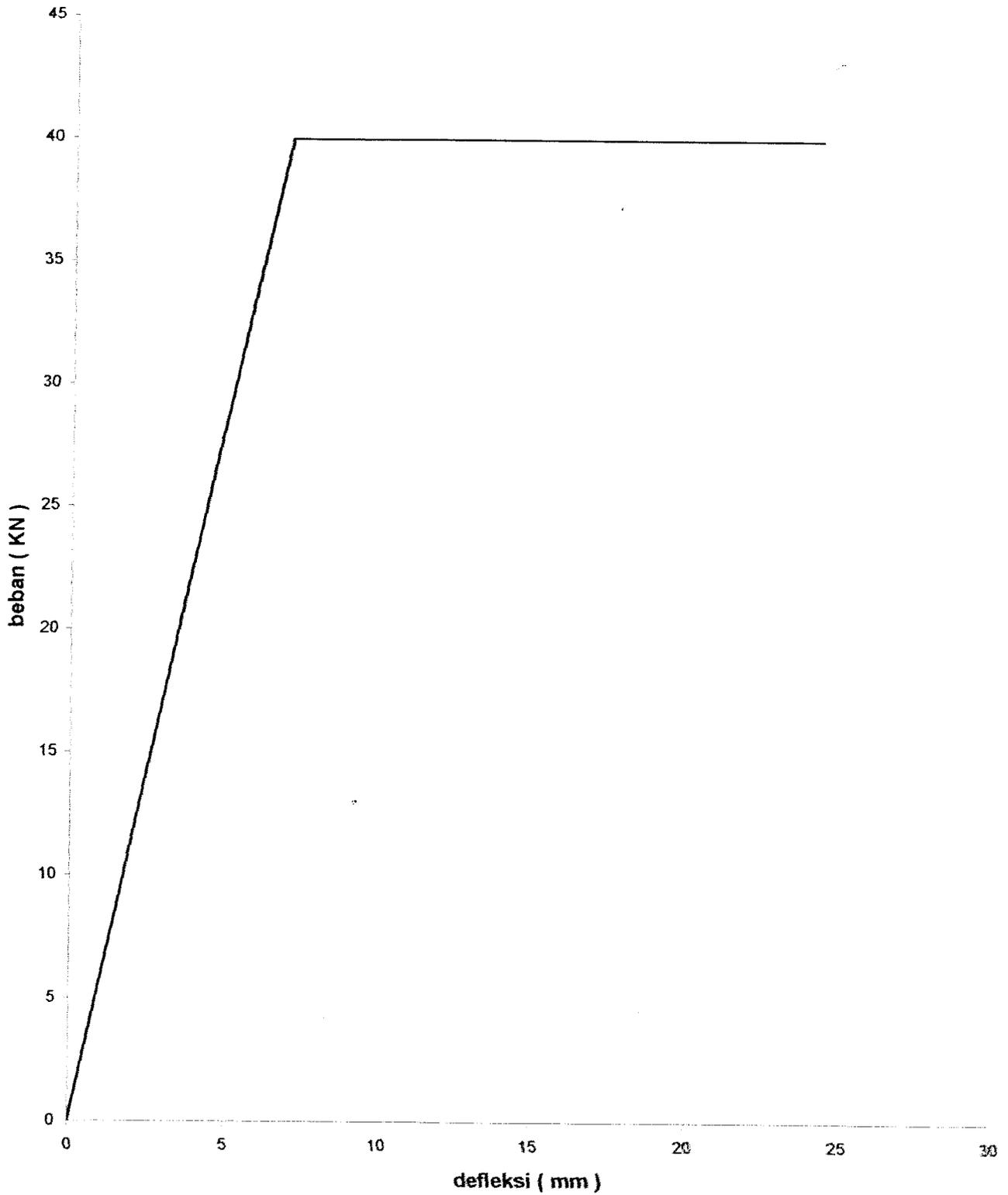


Beban (ton)	dial 1 (mm)	dial 2 (mm)	dial 3 (mm)	Momen (kN-m)	Kelengkungan (1/m)
0	0	0	0	0.00	0.000
0.5	0.29	0.32	0.3	1.33	0.001
1	1.14	1.14	0.93	2.67	0.002
1.5	2.57	2.47	2.05	4.00	0.004
2	3.64	3.5	2.93	5.33	0.005
2.5	4.28	4.2	3.58	6.67	0.006
3	4.71	4.67	4	8.00	0.007
3.5	5.19	5.22	4.48	9.33	0.009
4	5.62	5.79	4.98	10.67	0.011
4.25	6.34	6.85	5.95	11.33	0.016
4.25	7	7.89	6.8	11.33	0.022
4.25	7.7	9	7.71	11.33	0.029
4.25	9.05	11.36	9.7	11.33	0.044
4.25	9.97	13.04	11.09	11.33	0.056
4.25	10.51	14	11.98	11.33	0.061
4.25	11	14.98	13.09	11.33	0.065
4.25	11.87	16.3	14.43	11.33	0.070
4.25	12.47	17.2	15.34	11.33	0.073
4.25	13.2	18.45	16.79	11.33	0.077
4.25	13.79	20.05	18.3	11.33	0.089
4.25	14.28	21.7	19.92	11.33	0.102
4.25	15.72	23.5	21.48	11.33	0.109
4.25	16.58	25.2	23.02	11.33	0.120

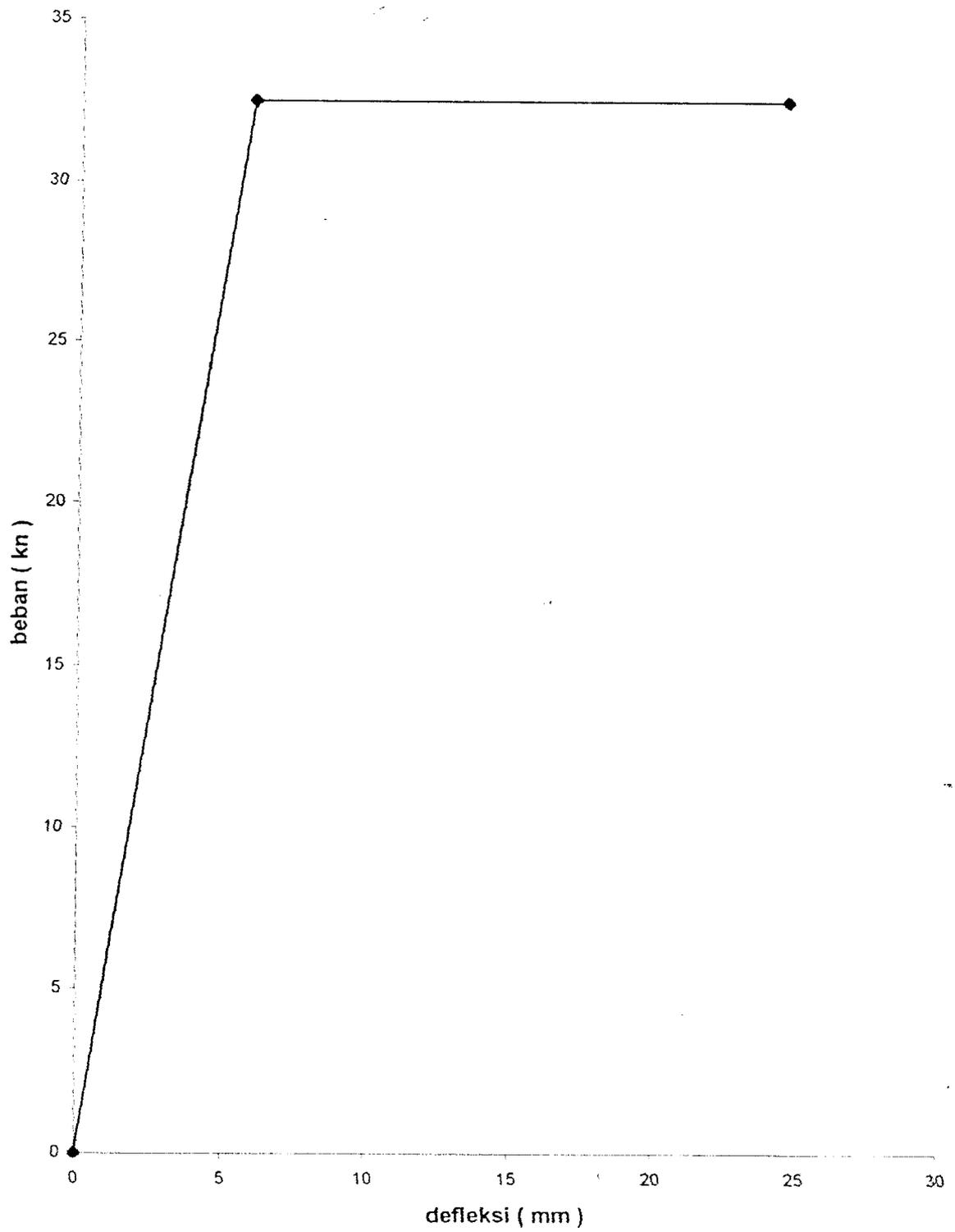
Data hasil pengujian kuat lentur balok beton bertulang pasca bakar suhu 600°C dengan perbaikan



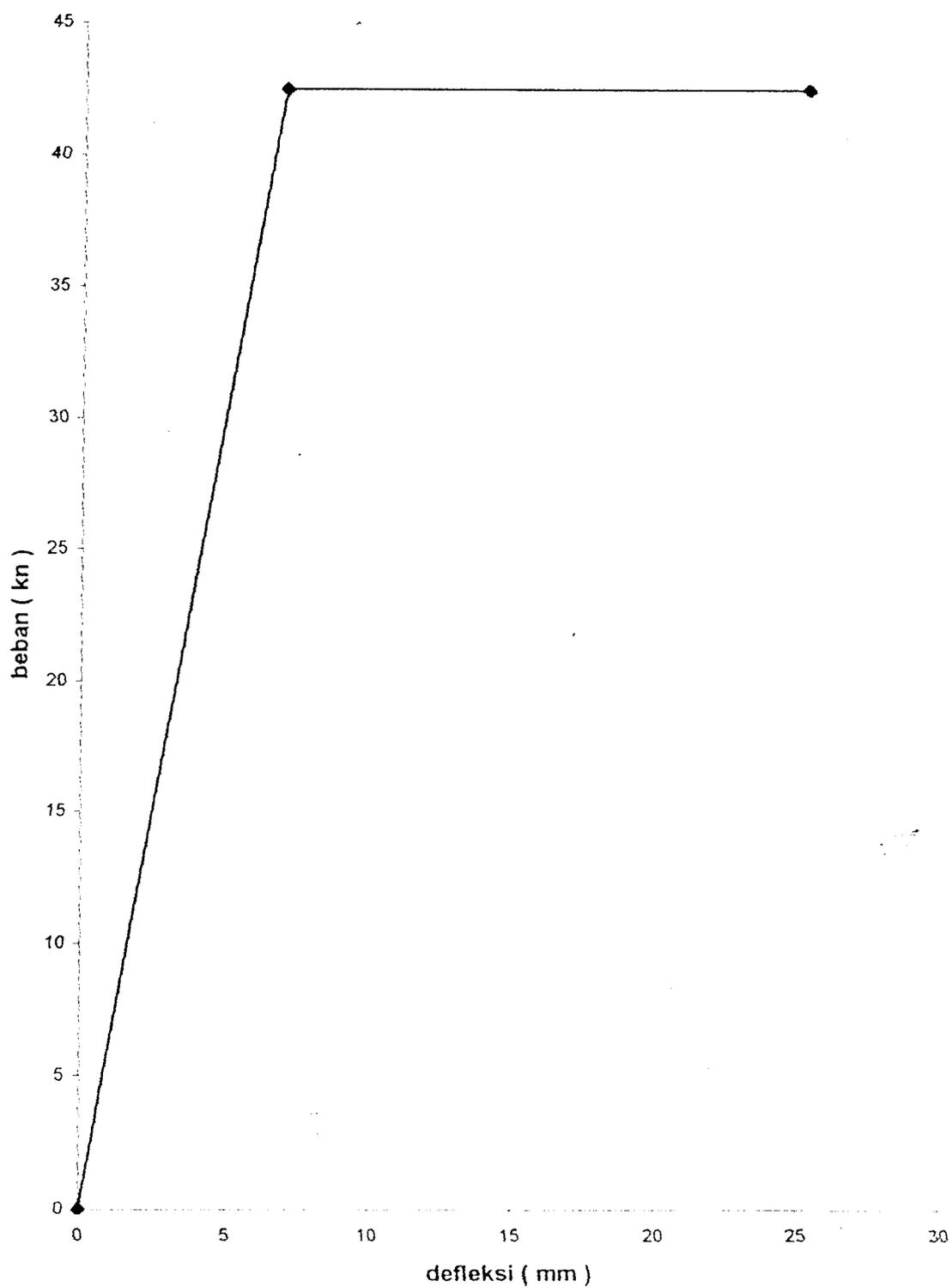
Beban (ton)	dial 1 (mm)	dial 2 (mm)	dial 3 (mm)	Momen (kN-m)	kelengkungan (1/m)
0	0	0	0	0.00	0.000
0.5	0.29	0.38	0.35	1.33	0.001
1	1.09	1.2	1.08	2.67	0.003
1.5	1.98	2.06	1.85	4.00	0.003
2	2.67	2.78	2.5	5.33	0.004
2.5	3.44	3.53	3.15	6.67	0.005
3	4.24	4.39	3.85	8.00	0.008
3.5	5.27	5.44	4.88	9.33	0.008
3.75	6.82	7.65	7.18	10.00	0.014
3.75	7.86	8.98	8.52	10.00	0.018
3.75	10.77	12.36	10.84	10.00	0.035
3.75	12.06	14	12.03	10.00	0.043
3.75	13.07	15.55	13.18	10.00	0.054
3.75	13.94	16.72	14.1	10.00	0.060
3.75	15.12	18.19	15.24	10.00	0.067
3.75	16.18	19.42	16.42	10.00	0.069
3.75	17.17	20.6	17.23	10.00	0.076
3.75	18.05	21.82	18.31	10.00	0.081
3.75	19.14	23.27	19.72	10.00	0.085
3.75	20.28	24.81	21.09	10.00	0.092
3.75	22.09	26.89	22.03	10.00	0.107

Grafik beban dan defleksi balok beton normal suhu ruang

Grafik beban dan defleksi balok beton pasca bakar suhu
400°C tanpa perbaikan

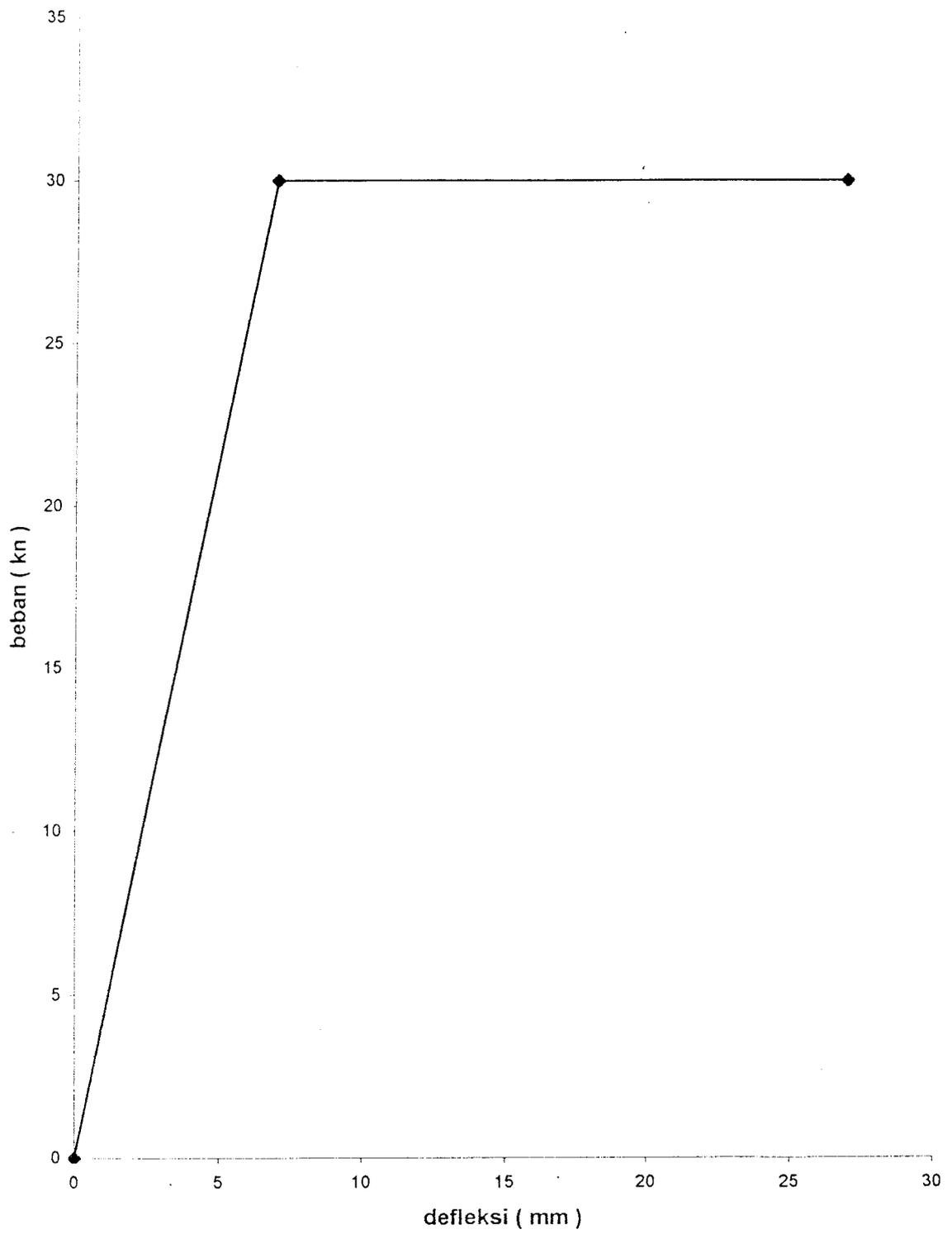


Grafik beban dan defleksi balok beton pasca bakar suhu 400°C dengan perbaikan

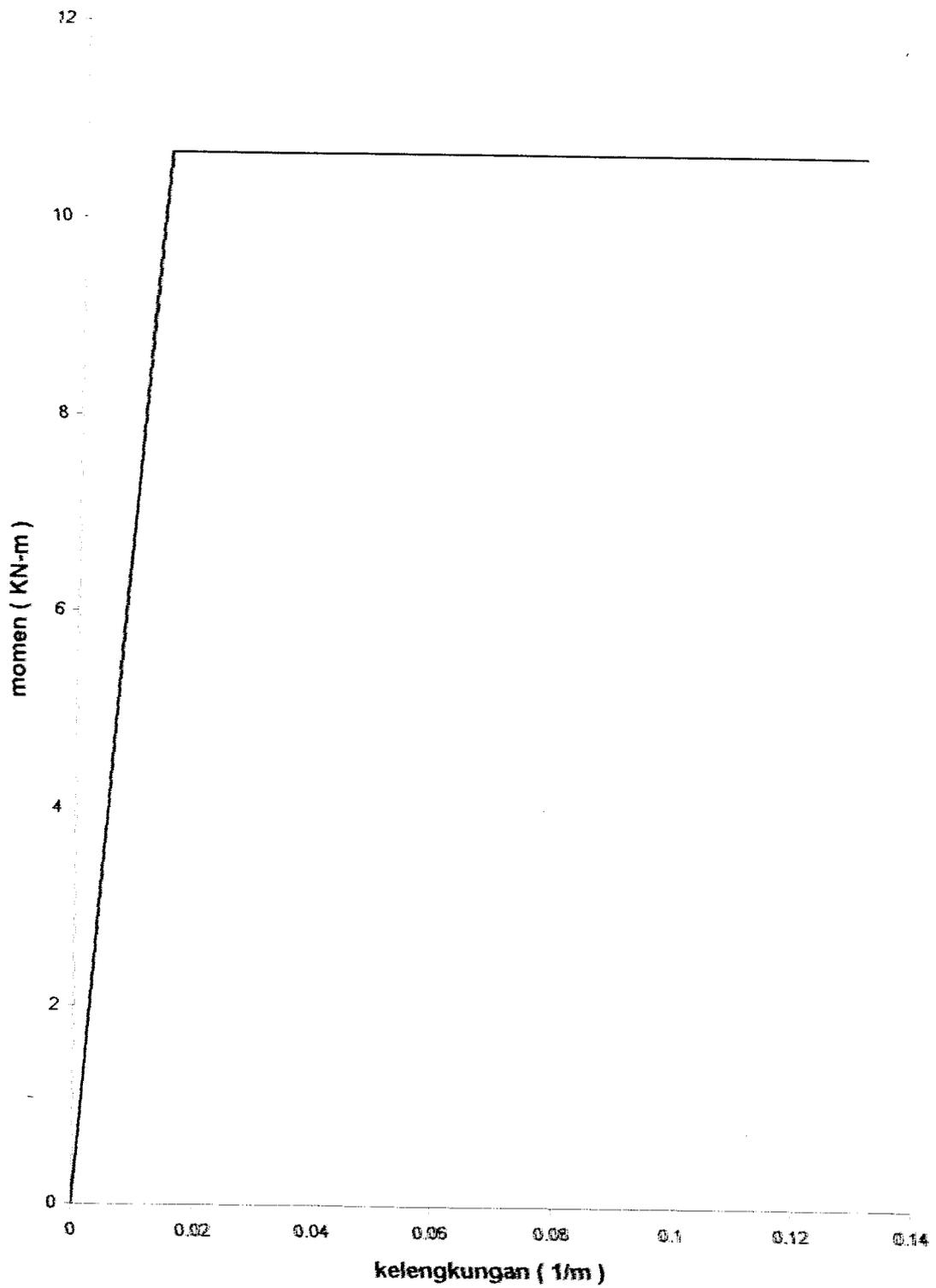


Graf

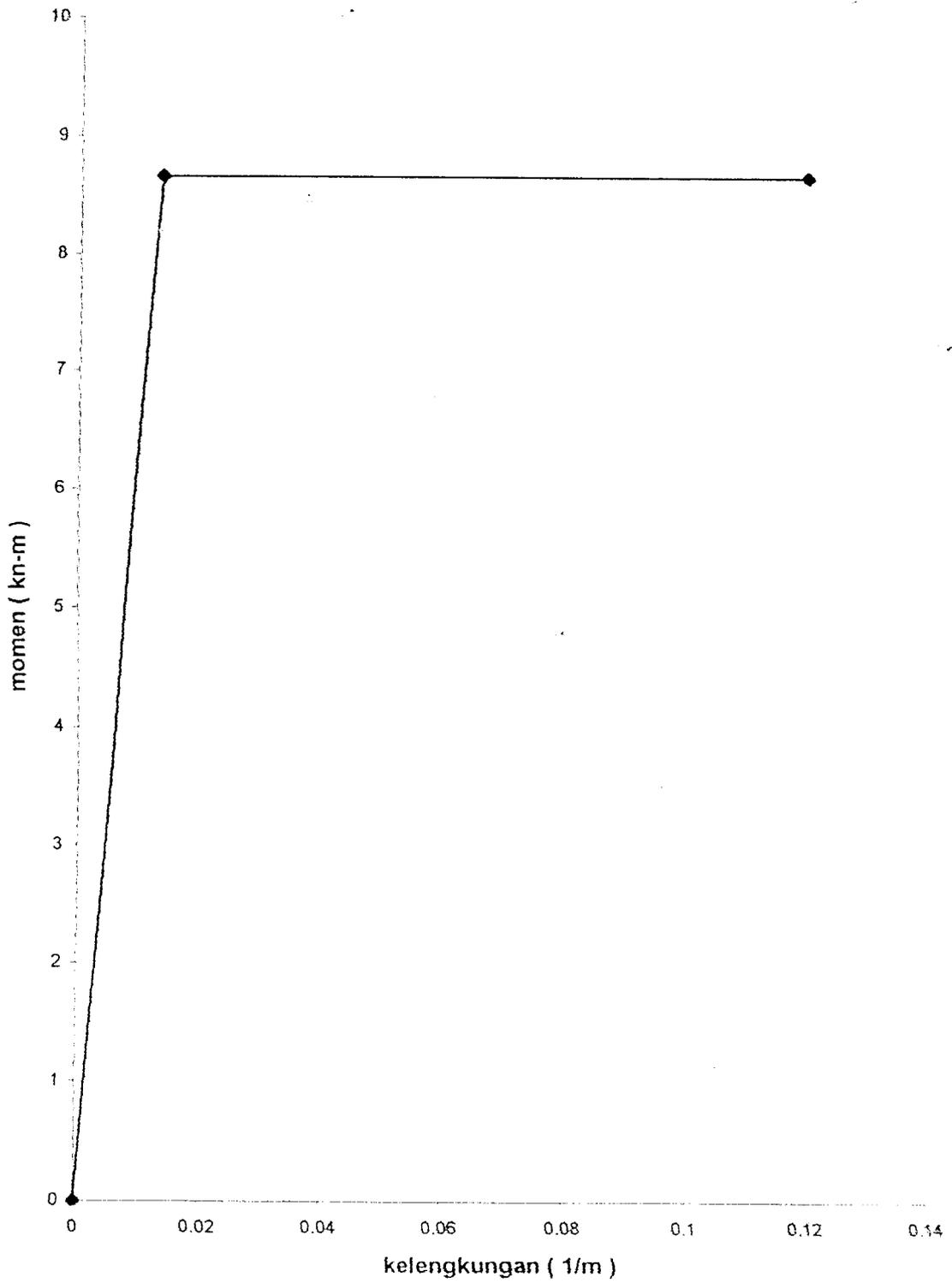
0Grafik beban dan defleksi balok beton pasca bakar suhu
600C tanpa perbaikan



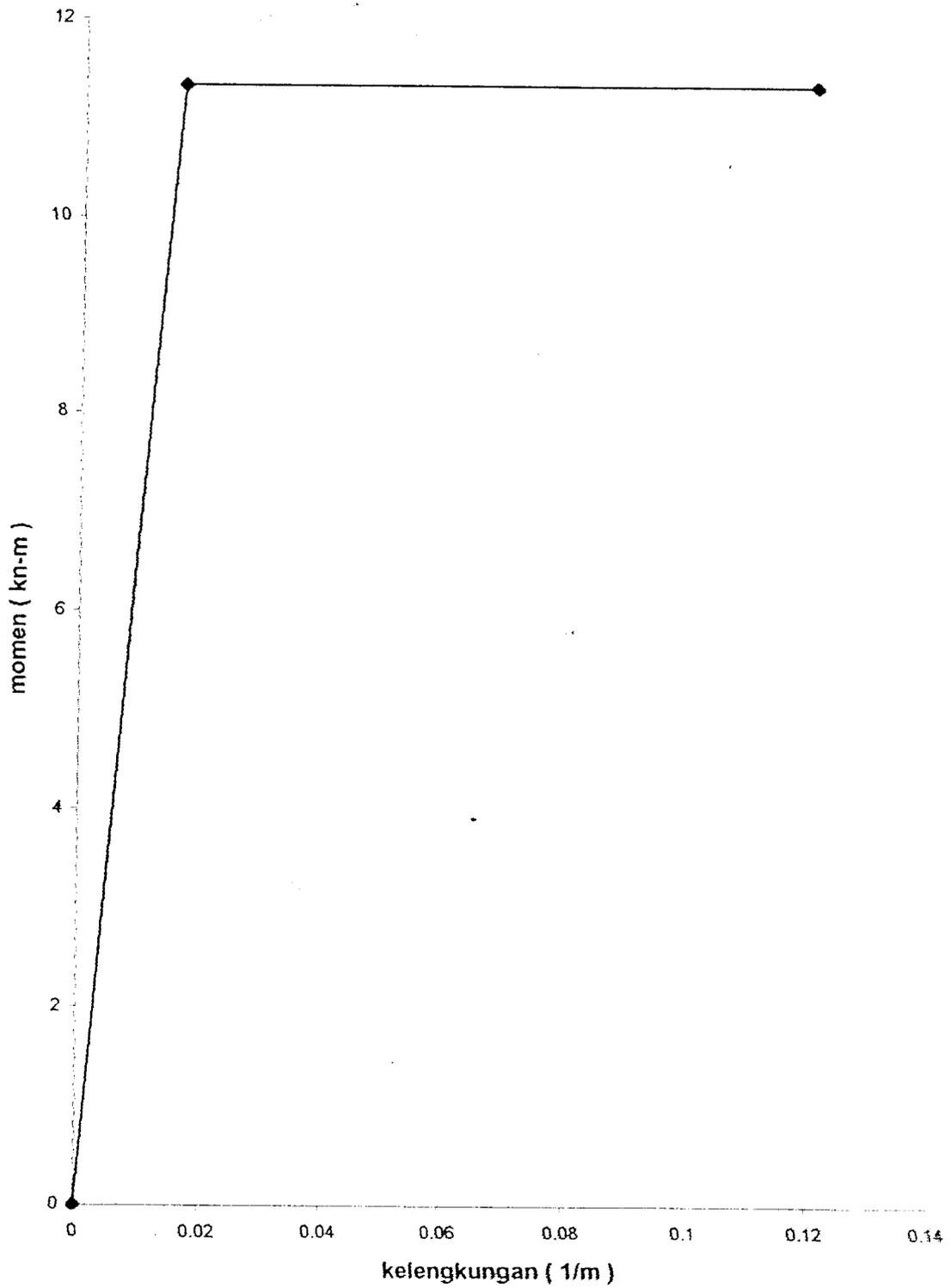
Grafik momen dan kelengkungan balok normal suhu ruang



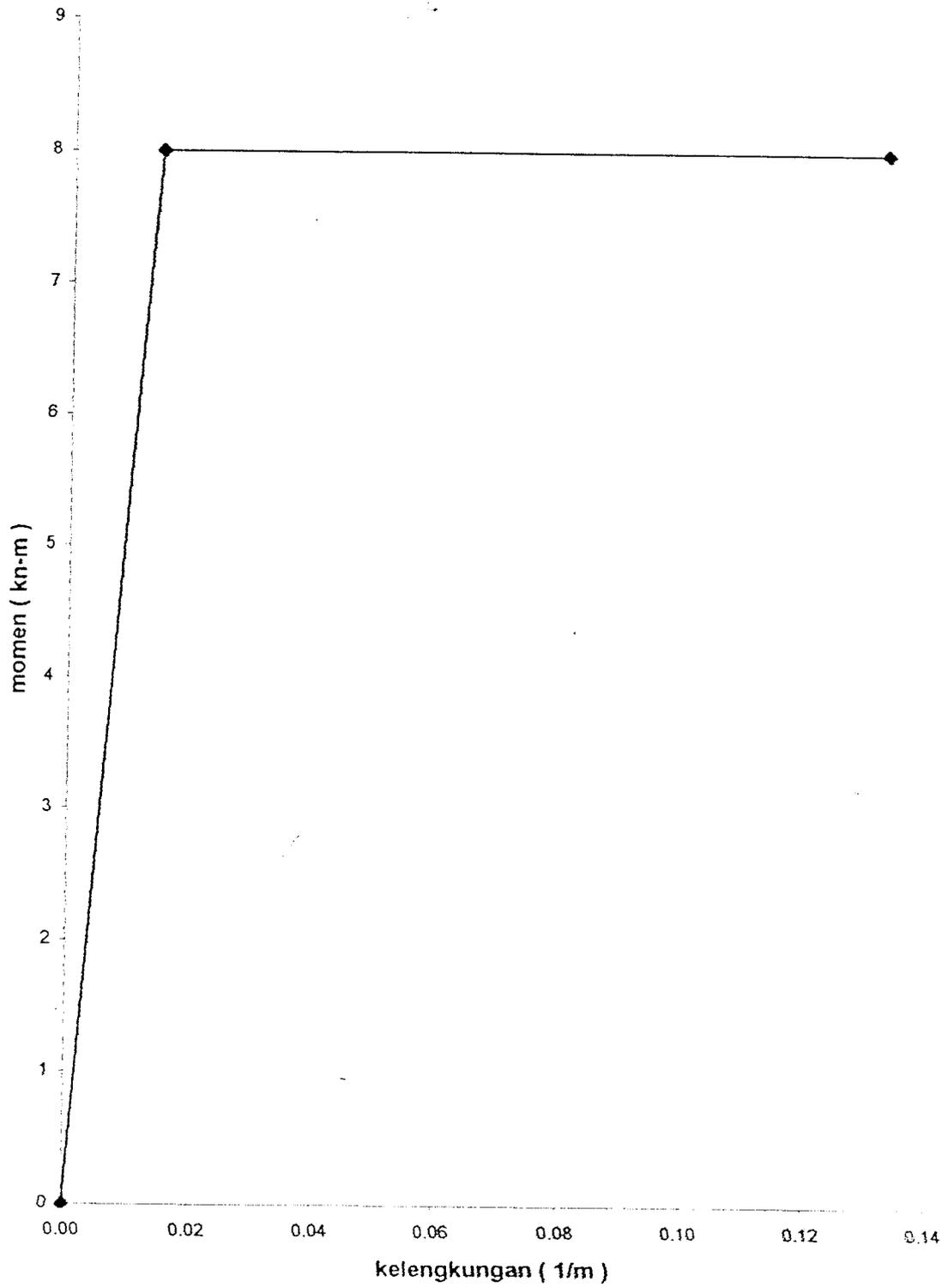
Grafik momen dan kelengkungan balok beton pasca bakar suhu 400°C tanpa perbaikan



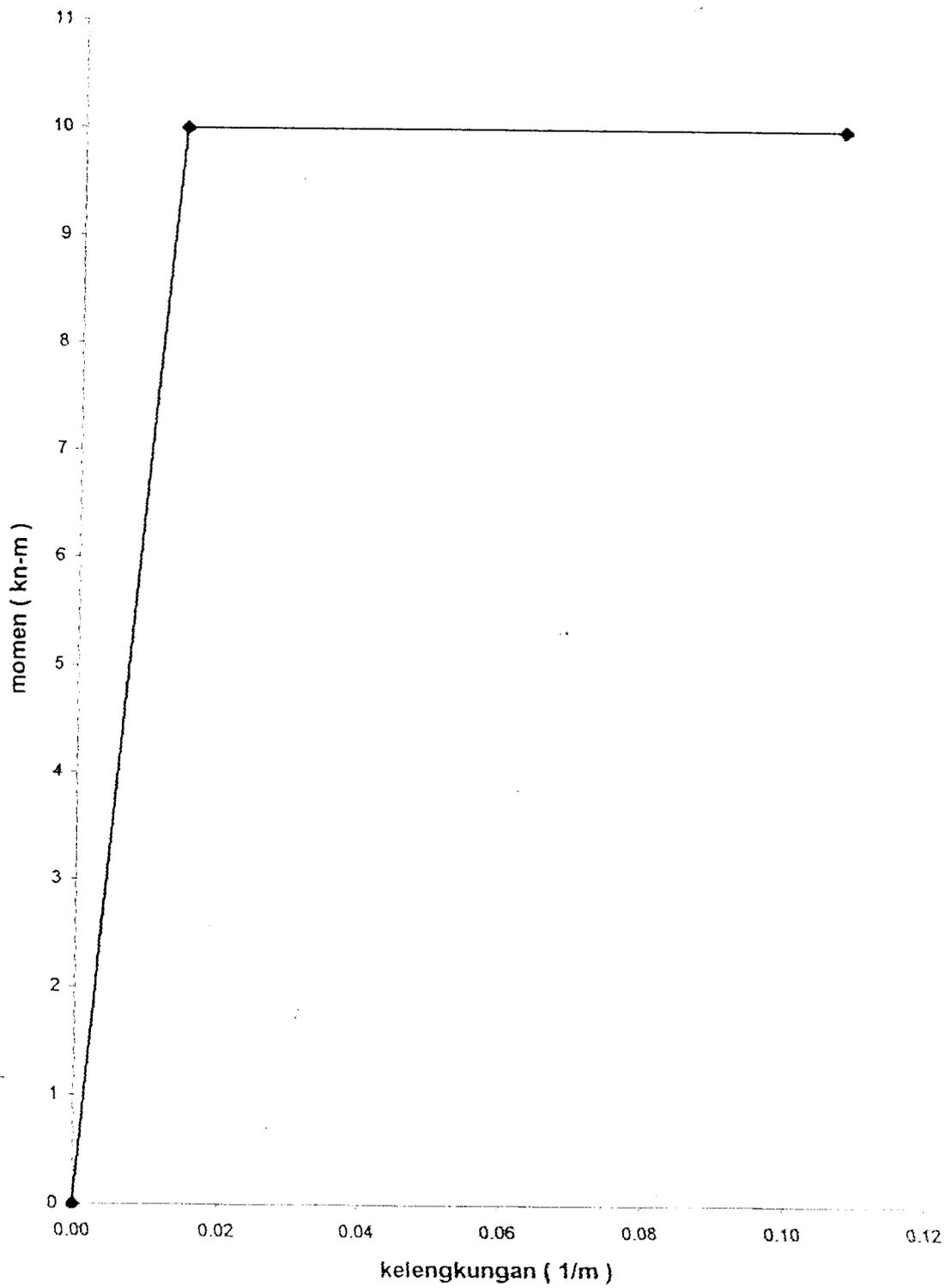
Grafik momen dan kelengkungan balok beton pasca bakar suhu 400 C dengan perbaikan



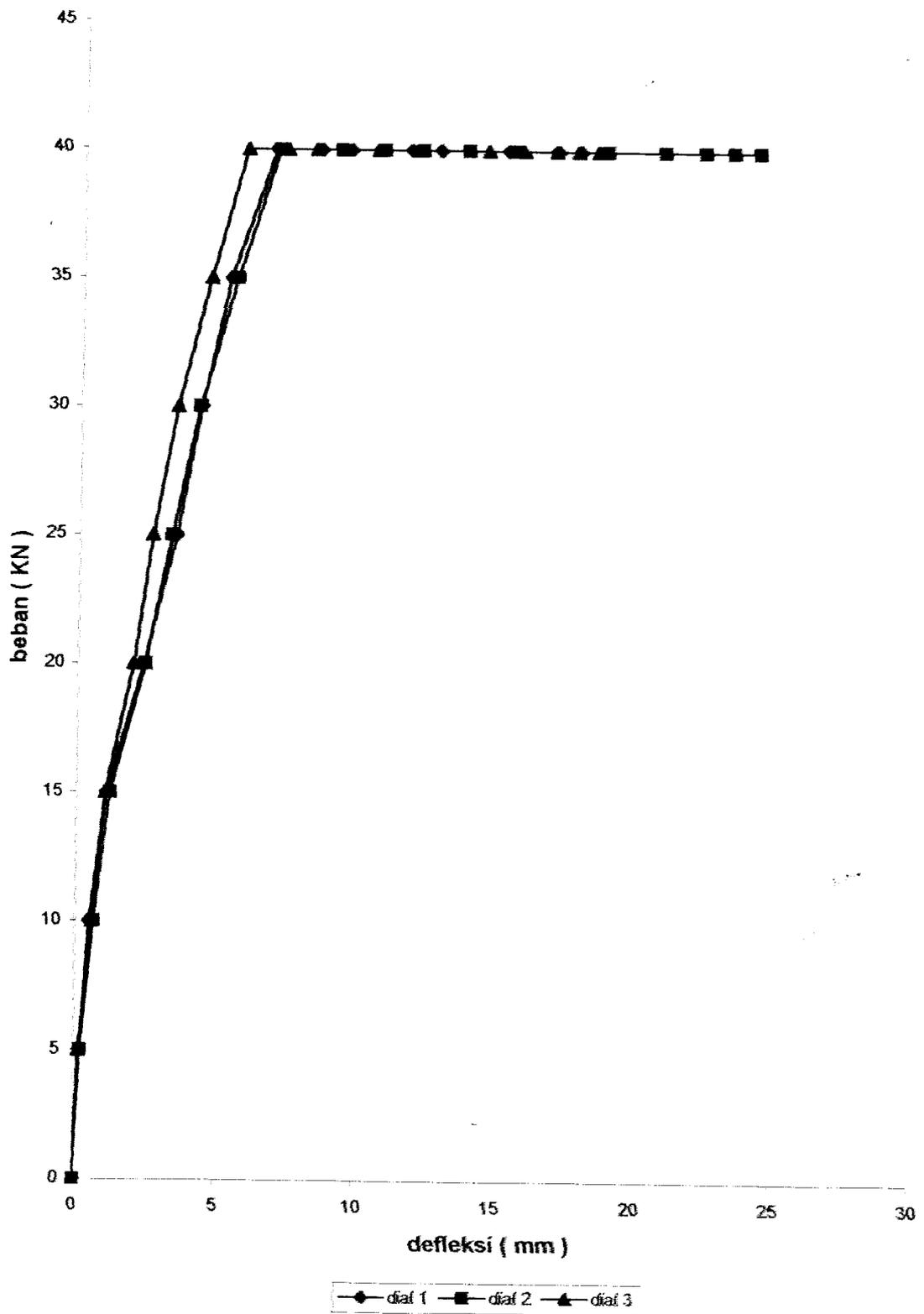
Grafik momen dan kelengkungan balok beton pasca bakar suhu 600 C tanpa perbaikan



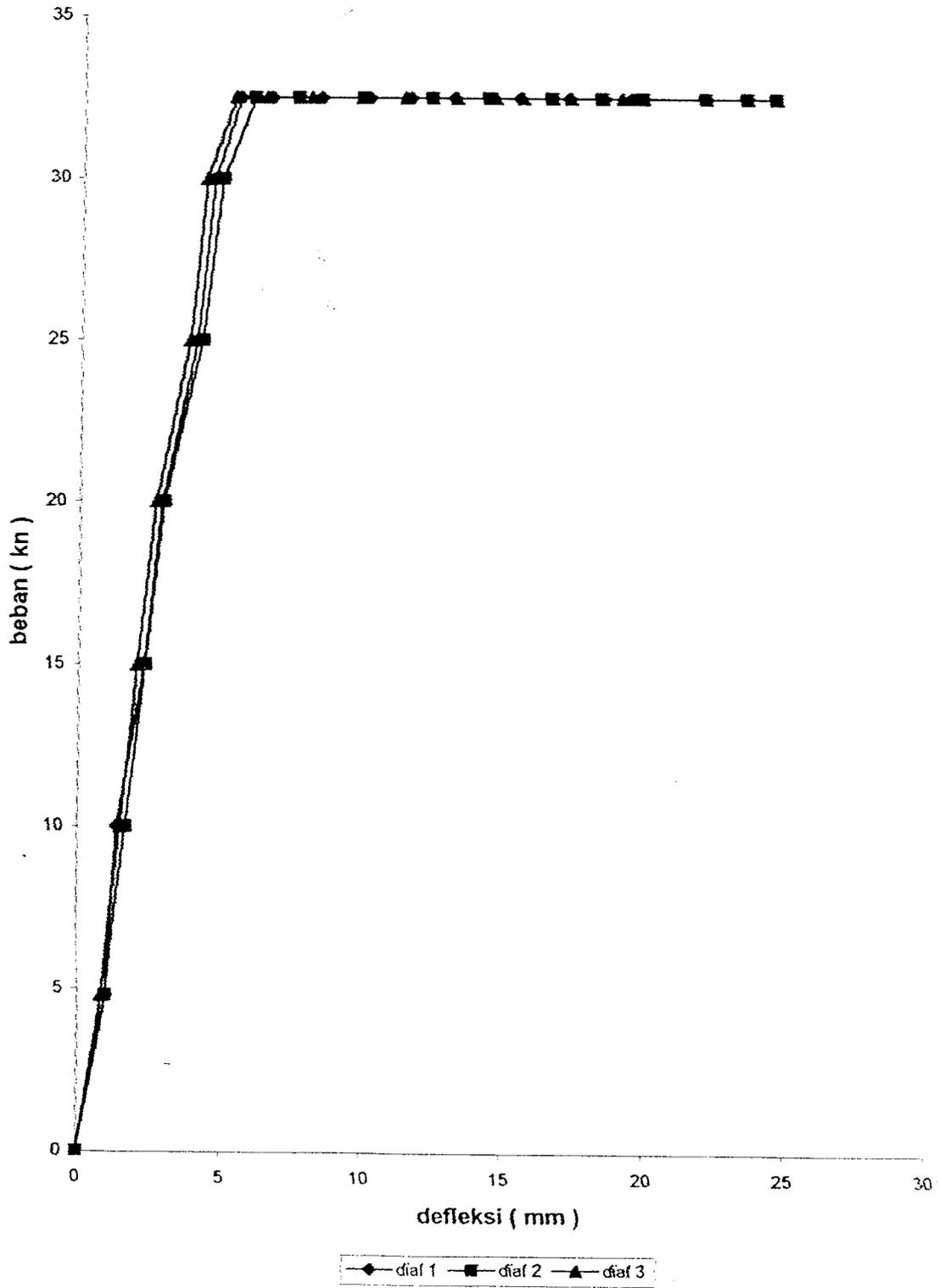
Grafik momen dan kelengkungan balok beton pasca bakar suhu 600 C dengan perbaikan



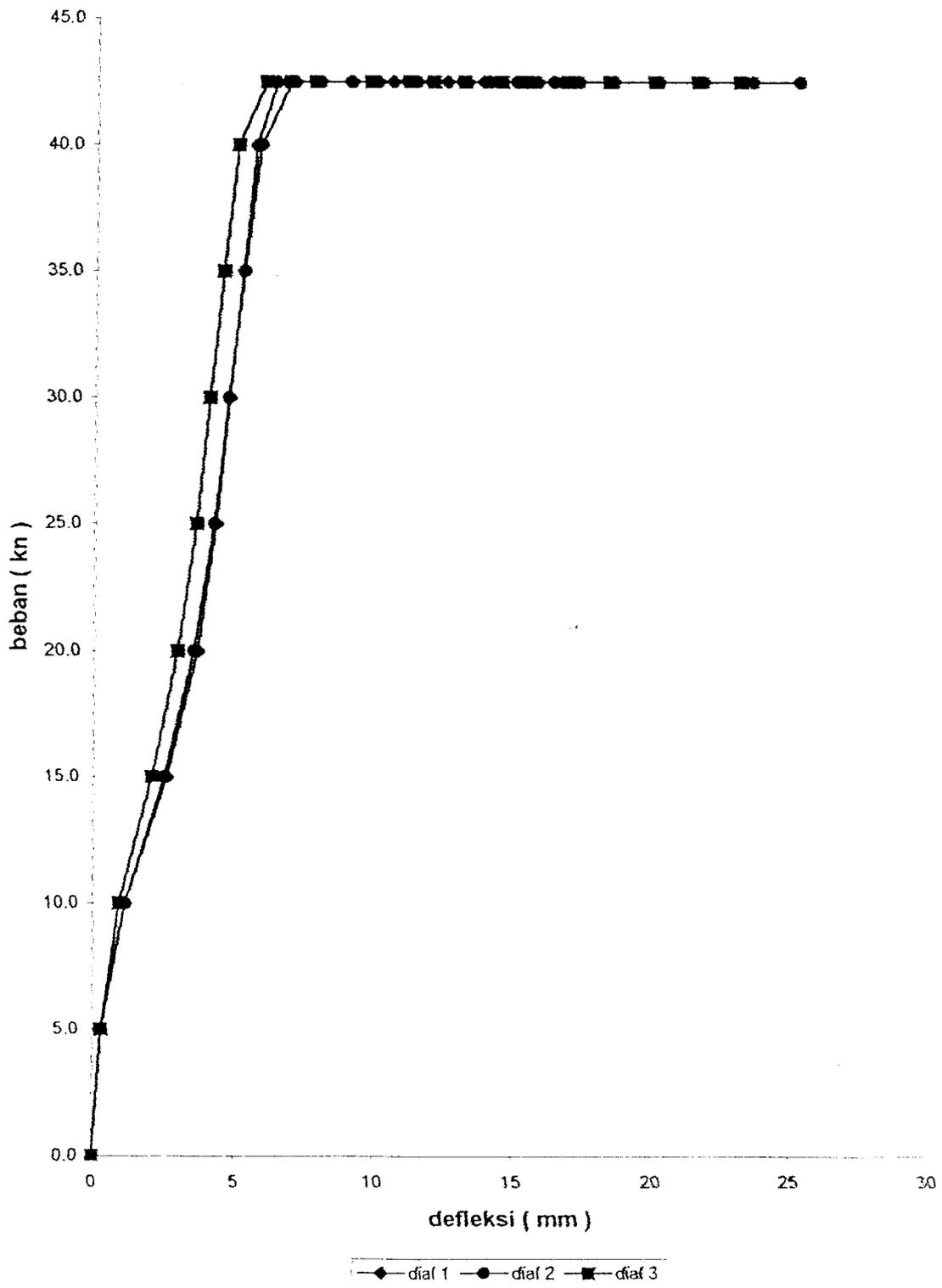
Grafik beban dan defleksi balok beton normal suhu ruang



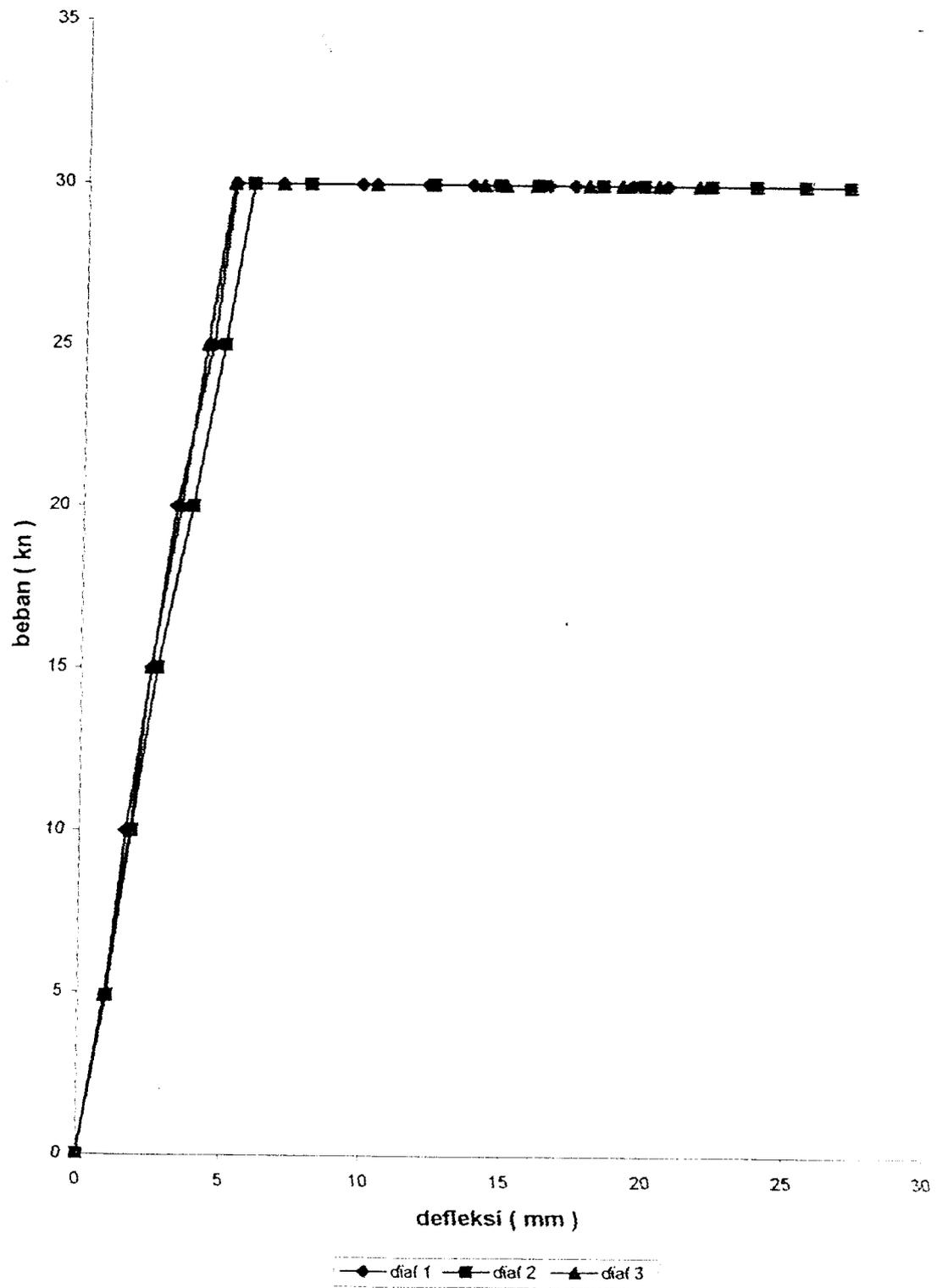
Grafik awal beban dan defleksi balok beton pasca bakar suhu 400°C tanpa perbaikan



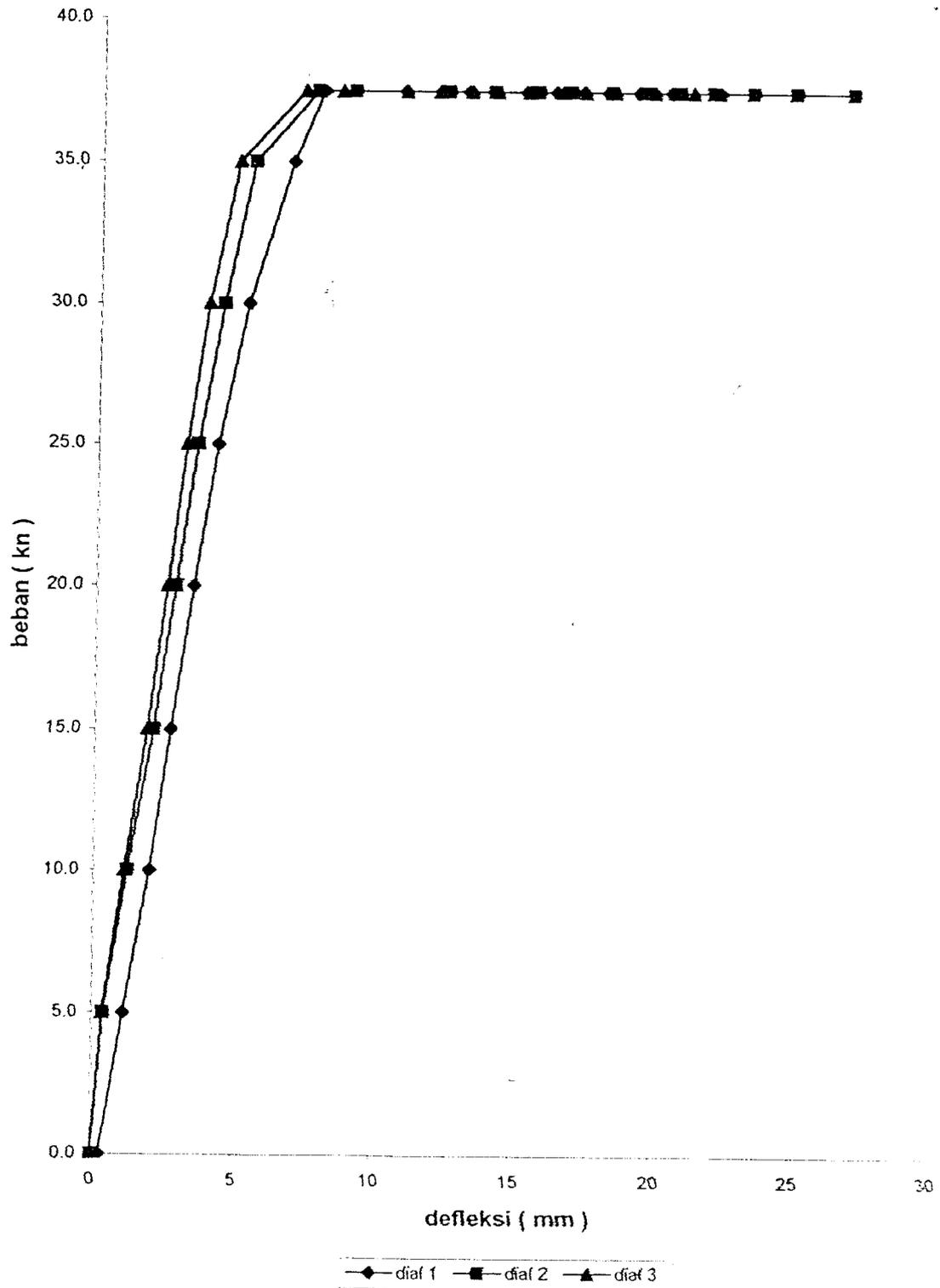
Grafik awal beban dan defleksi balok beton pasca bakar suhu 400 C dengan perbaikan



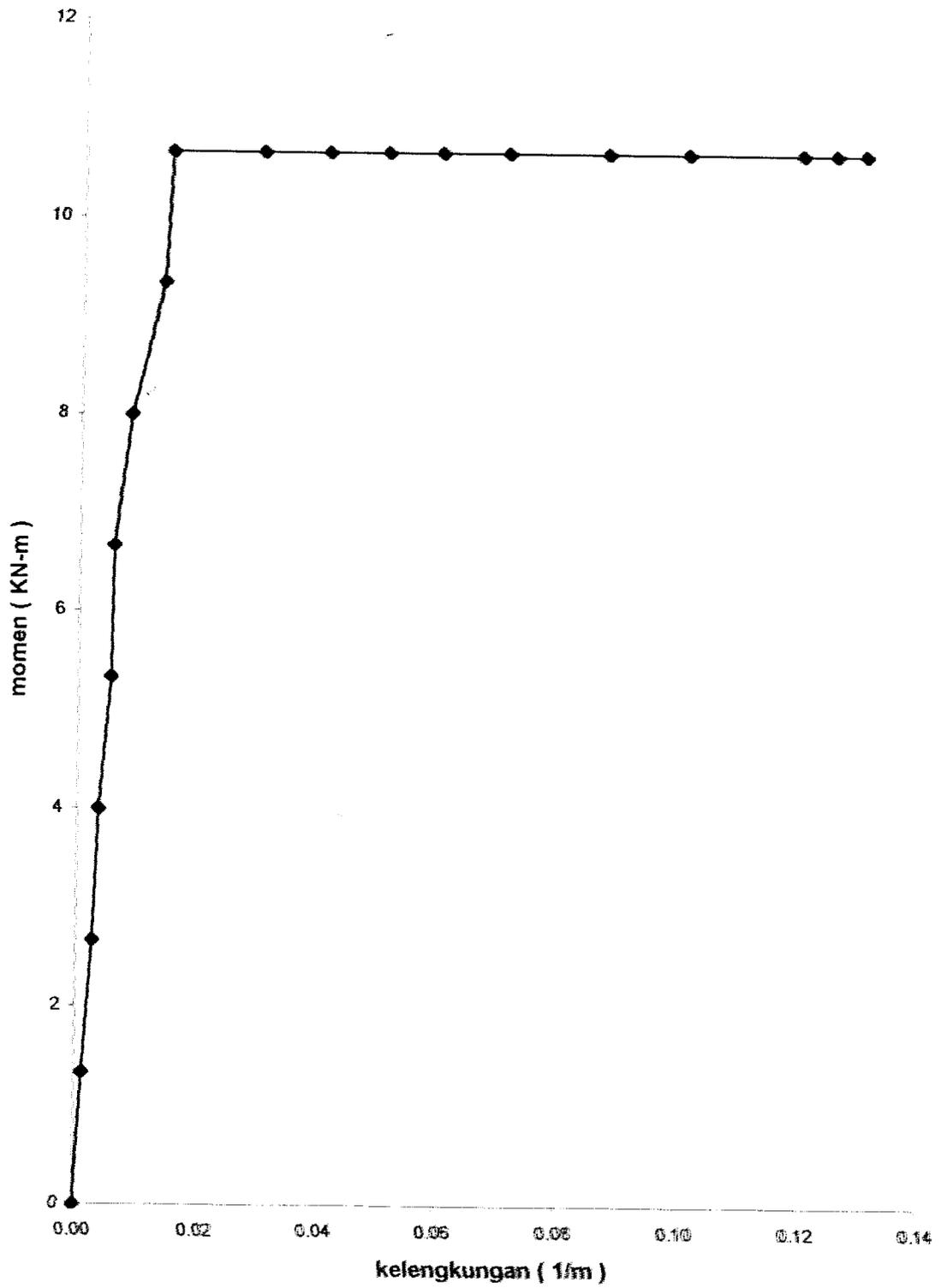
Grafik awal beban dan defleksi balok beton pasca bakar suhu 600 C tanpa perbaikan



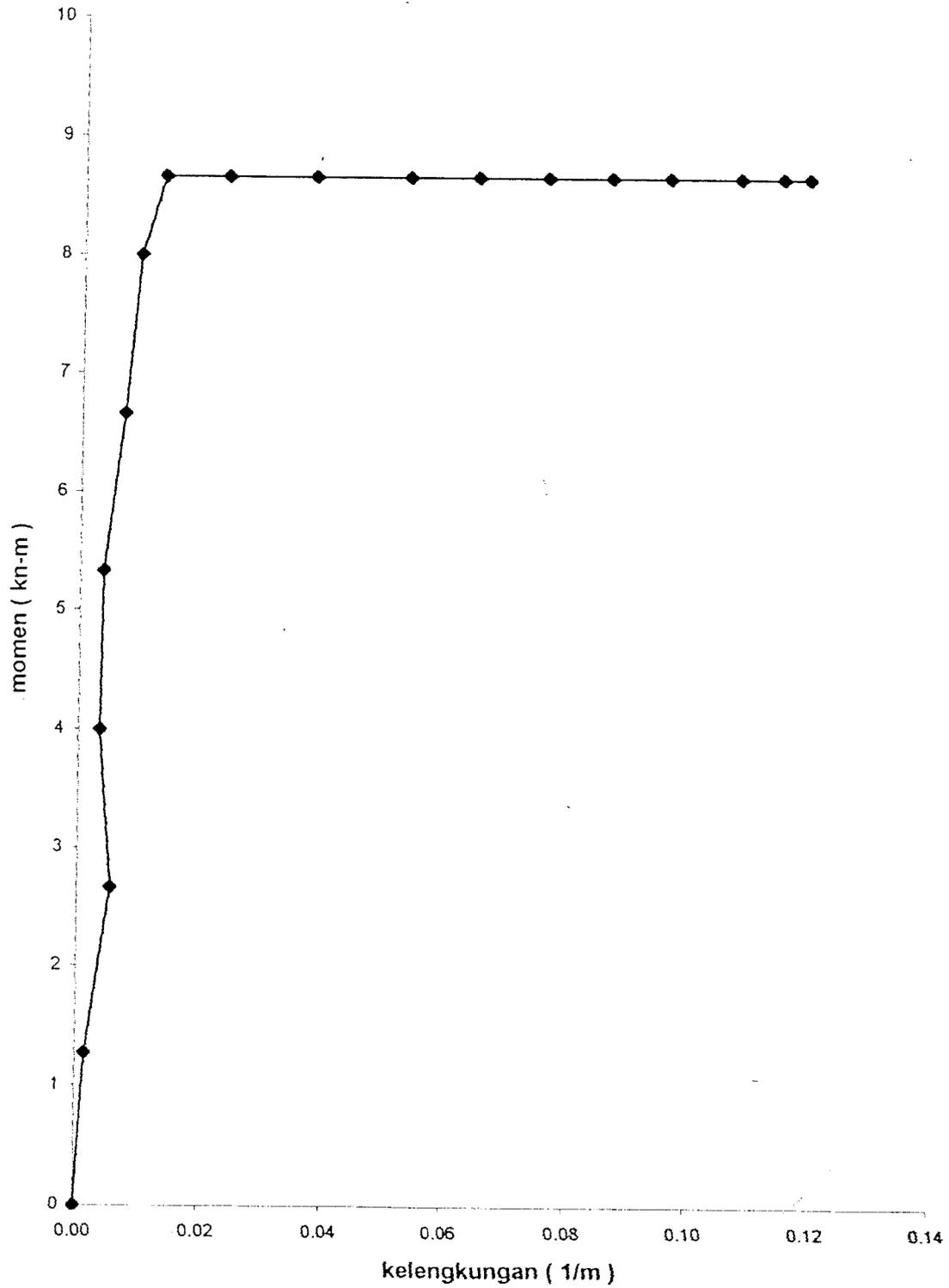
Grafik awal beban dan defleksi balok beton pasca bakar suhu 600 C dengan perbaikan



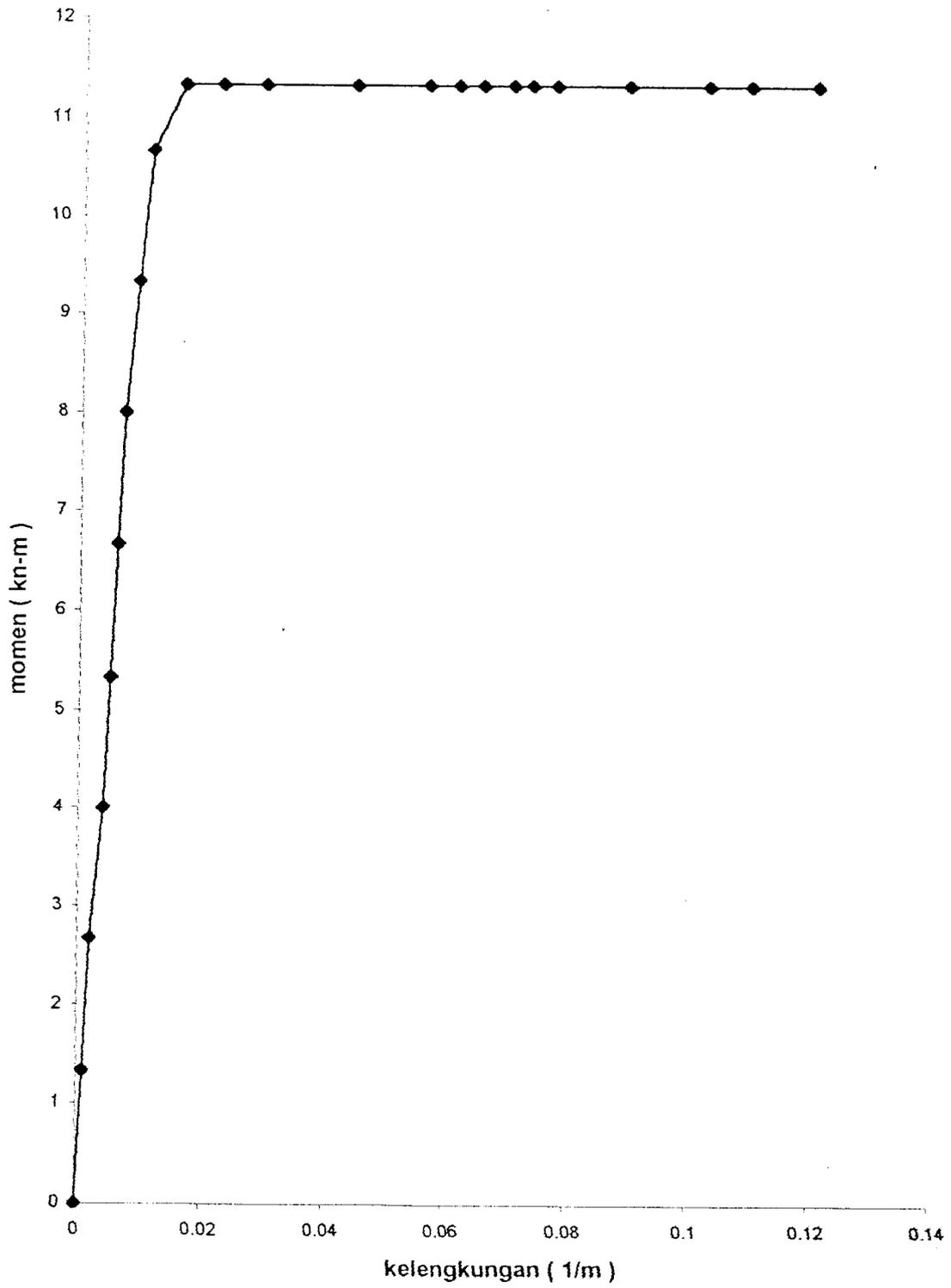
Grafik momen dan kelengkungan balok beton normal suhu ruang



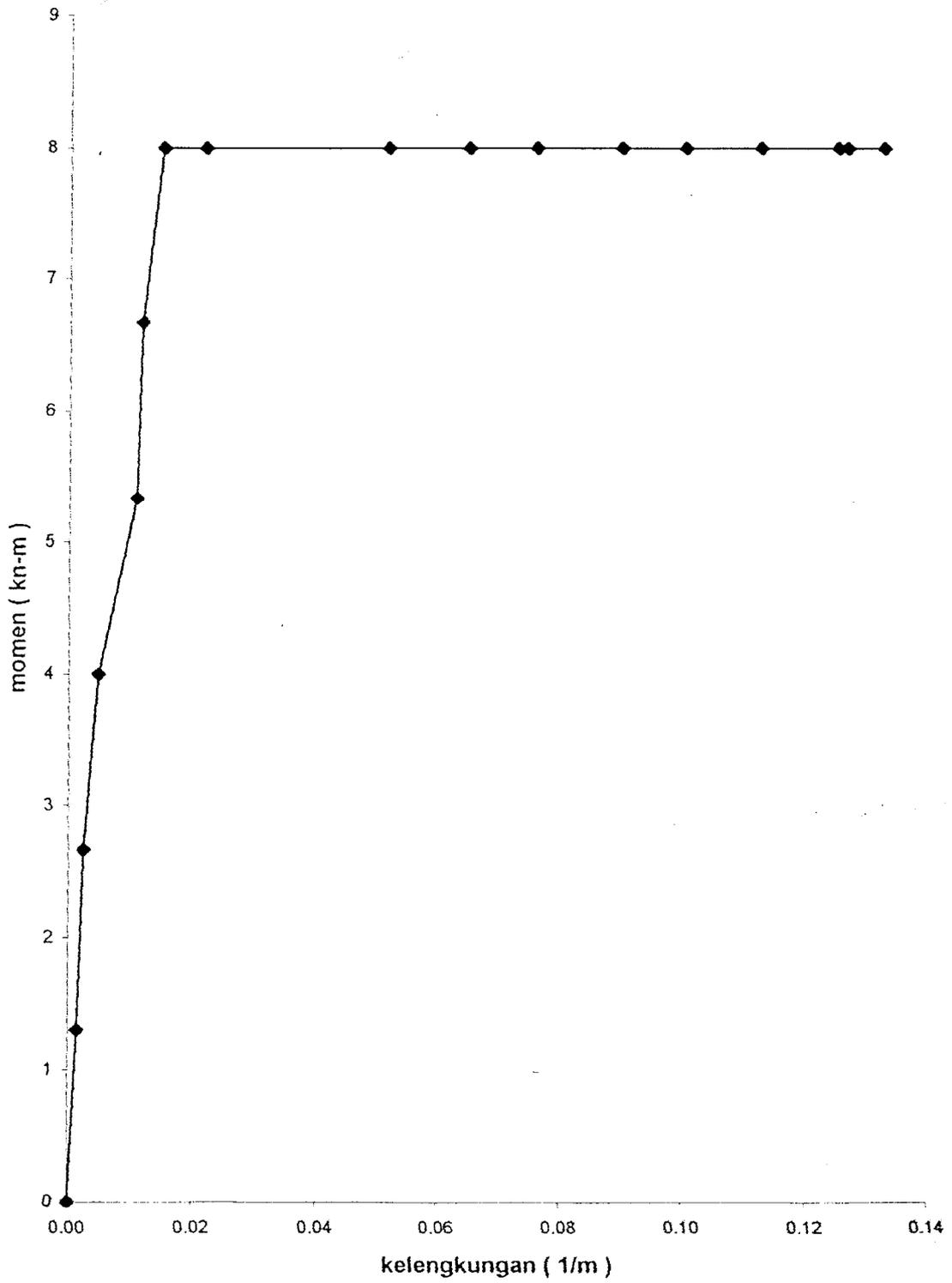
Grafik awal momen dan kelengkungan balok beton pasca bakar suhu 400°C tanpa perbaikan



Grafik awal momen dan kelengkungan balok beton pasca bakar suhu 400 C dengan perbaikan



Grafik awal momen dan kelengkungan balok beton pasca bakar suhu 600 C tanpa perbaikan



Grafik awal momen dan kelengkungan balok beton pasca bakar suhu 600 C dengan perbaikan

