

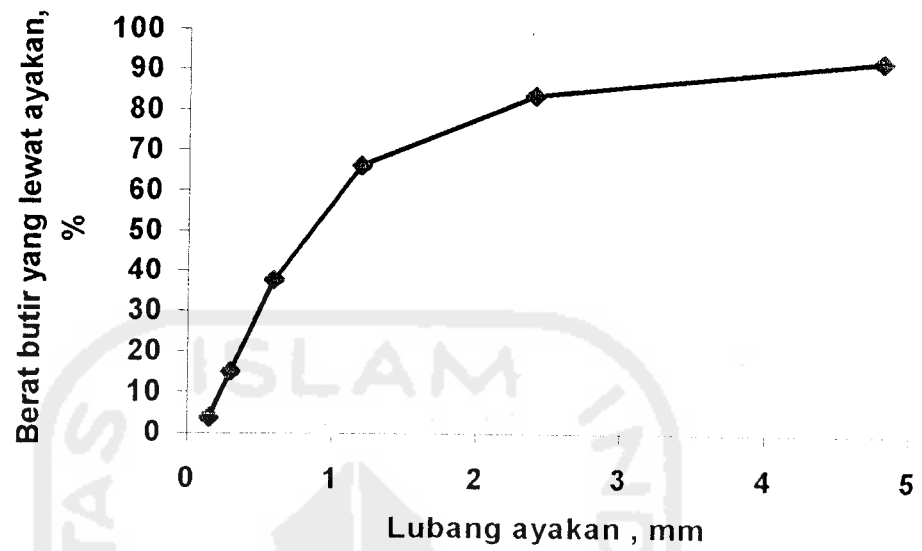
BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

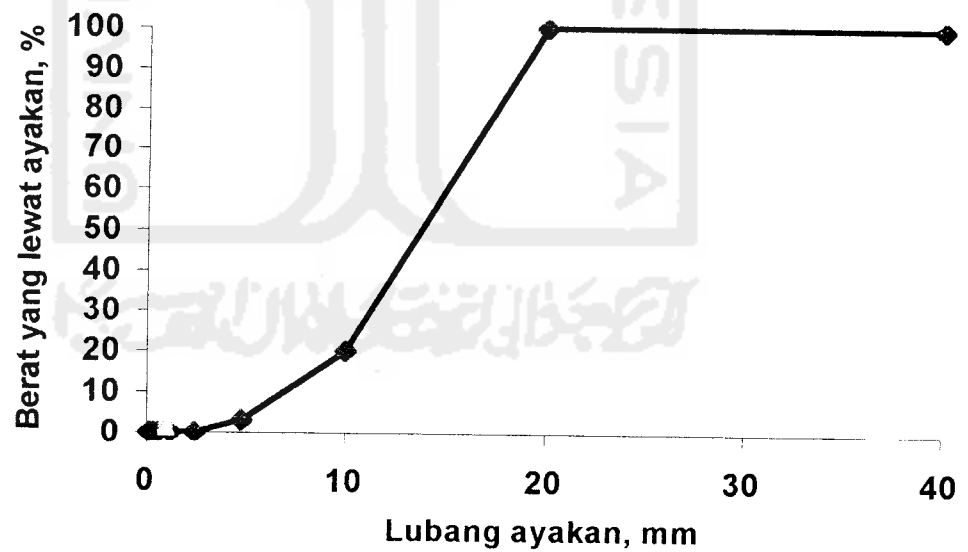
4. Hasil pengujian bahan

4.1 Agregat halus dan kasar

Bahan dasar pembuatan beton yang berupa agregat halus dan kasar harus memenuhi aturan yang disyaratkan. Data bahan agregat halus dan kasar sangat berpengaruh dan penting dalam menentukan proporsi campuran beton guna menghasilkan mutu tertentu antara lain ukuran butir maksimum agregat yang dipilih, tingkat ukuran gradasi, berat jenis dan kadar lumpur untuk agregat halus (pasir). Ukuran maksimum agregat kasar yang ditentukan berdasarkan kerapatan antar tulangan sehingga dipakai butiran maksimum 20 mm. Gradasi pasir hasil analisis ayakan dalam penelitian ini masuk daerah IV (halus) dengan modulus halus butir = 3,018 sedangkan untuk kerikil modulus halus butir = 6,768. Hasil pemeriksaan kadar lumpur pasir krasak pada penelitian ini adalah 1,7287 %. Hasil pemeriksaan ayakan untuk pasir dan kerikil diperlihatkan pada lampiran 1 dan 2. Gradasi pasir diperlihatkan pada gambar 4.1 dan untuk kerikil pada gambar 4.2



Gambar 4.1 Gradasi pasir hasil pengujian



Gambar 4.2 Gradasi butiran maksimum 20 mm hasil pengujian

Hasil uji kadar lumpur dapat dilihat pada lampiran 3. Persentase kadar lumpur didapatkan sebesar 1,7287 %. Dengan demikian memenuhi syarat 5,00% (PUBI,1982), hasil ini didapat setelah dilakukan pencucian lebih dahulu.

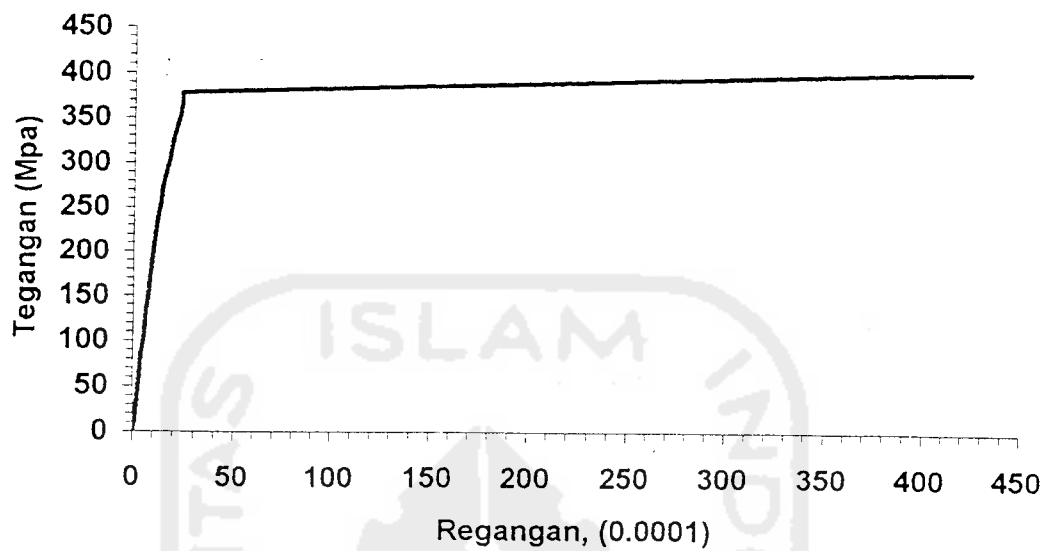
4.2 Baja Tulangan

Baja tulangan yang dipakai dalam penelitian ini adalah produksi Krakatau Steel Cilegon. Pengujian tarik baja dilakukan untuk tulangan baja ulir berdiameter 13 mm dan 10 mm yang bertujuan mengetahui tegangan dan regangan leleh serta modulus elastisitasnya. Untuk tulangan baja ulir diameter 13 mm diambil benda uji sebanyak 1 buah dan diameter 10 mm diambil benda uji 1 buah. Hasil pengujian dari uji tarik baja ini diperlihatkan pada lampiran 4 dan rangkuman hasil uji ditunjukkan pada tabel 4.1

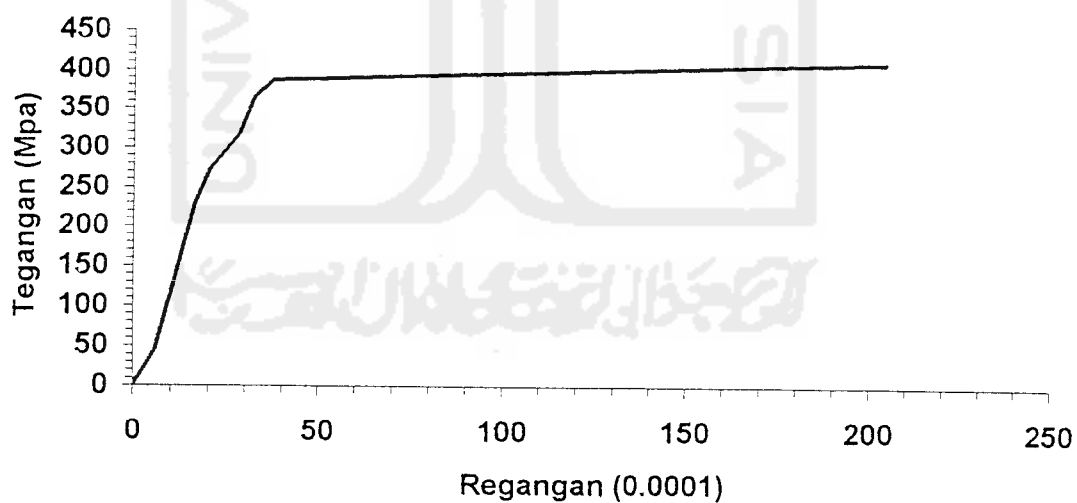
Tabel 4.1 Hasil uji tarik baja tulangan

Kode Benda uji	Tegangan leleh	Tegangan ultimit (Mpa)	Regangan leleh	Modulus Elastisitas (Mpa)
φ13	377	449	0,00270	146296,3
φ10	386	473	0,00275	145181,8

Pada tabel 4.1 terlihat bahwa tulangan ulir diameter 10 mempunyai tegangan leleh sebesar 386 Mpa dan nilai regangan 0,00275. Untuk tulangan ulir diameter 13 mm tegangan leleh sebesar 377 Mpa dan nilai regangan 0,00270.



Gambar 4.3 Grafik tegangan -regangan baja D10



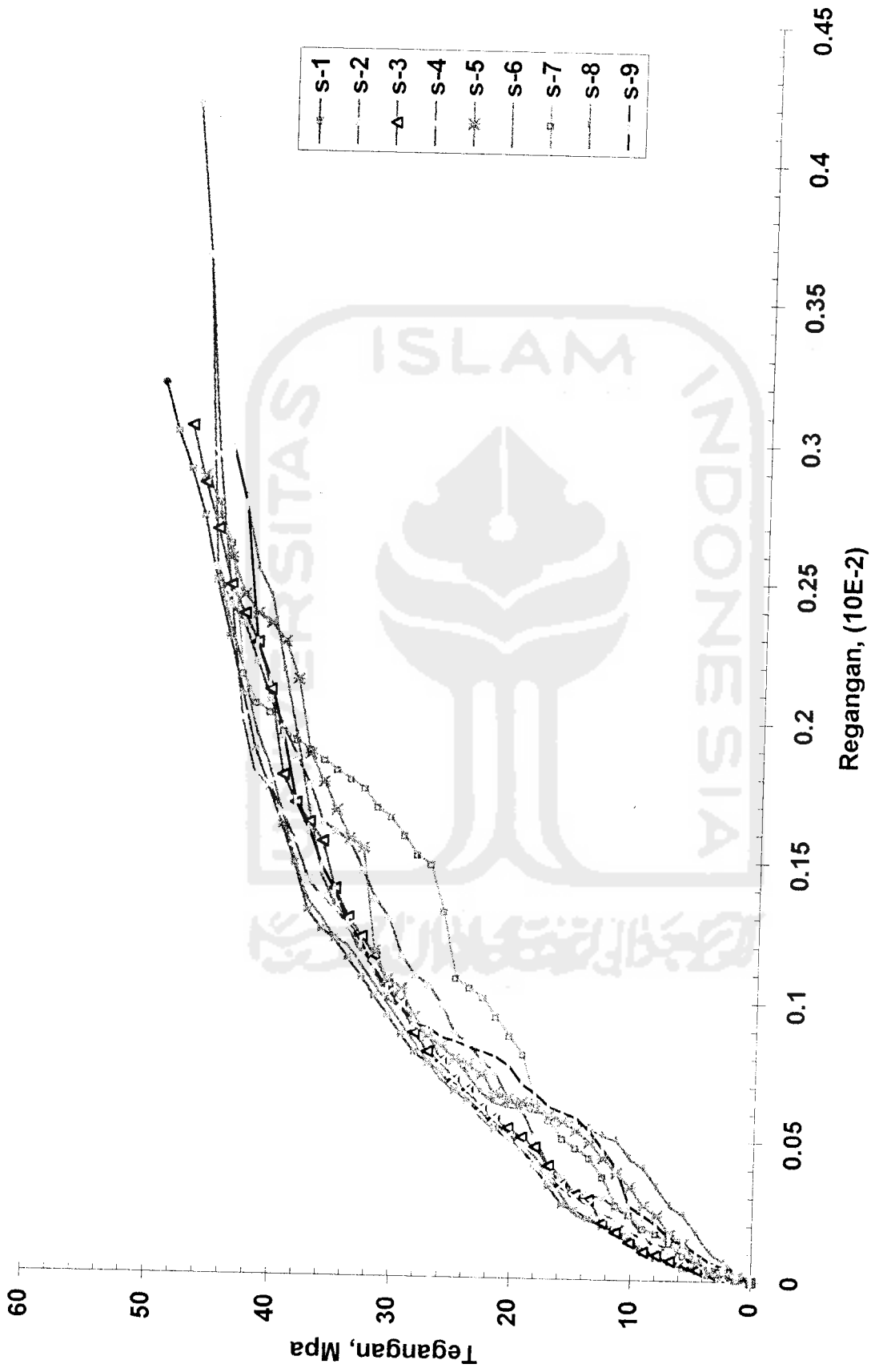
Gambar 4.4 Grafik tegangan-regangan baja D13

4.3 Adukan Beton

Perancangan adukan beton dilakukan dengan cara *trial mix* untuk mendapatkan beton mutu tinggi yang direncanakan yaitu 41 Mpa. Hasil rancangan adukan beton dan uji desak silinder *trial mix* dapat dilihat pada lampiran 4C. Untuk mutu beton 41 Mpa diperoleh proporsi campuran beton per m³ sebagai berikut :

Semen	= 455 kg
Air	= 191,5 liter
Agregat halus (Pasir)	= 576 kg
Agregat kasar	= 1165 kg
Silica fume	= 24 kg
Superplastisizer	= 4,6 liter

Pada saat pengecoran benda uji diperoleh slump 50 mm yang menghasilkan adukan yang *workability* sehingga dalam pelaksanaan tidak mengalami kesulitan. Kuat desak benda uji didapat dari uji desak silinder beton diameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Untuk seluruh penelitian ini diambil sebanyak 9 (sembilan) buah silinder benda uji yang diambil pada saat pengecoran kolom. Setelah direndam selama 28 hari, dilakukan uji desak untuk mengetahui kuat desaknya. Pengujian dengan alat desak yang dilengkapi *strainometer* untuk mencatat perpendekan yang terjadi. Hasil pembacaan beban dan *strainometer* dapat dilihat pada lampiran 4.



Gambar 4.5 Grafik tegangan-regangan silinder 1-9



Berdasarkan hasil percobaan desak silinder uji dapat dibuat grafik yang menyatakan nilai tegangan yang berkesesuaian dengan nilai regangan betonnya. Regangan dihitung berdasarkan $\epsilon_c = \Delta l / l_0$, dengan ϵ_c = regangan beton, Δl = perpendekan, l_0 = tinggi awal, ternyata semua nilai tegangan dan regangan menghasilkan suatu grafik tipikal seperti pada gambar 4.5. Bagian awal dari grafik tersebut berbentuk parabola yang dapat diidealisasikan sebagai garis lurus yang nilai tegangan dan regangan silinder beton dapat dianggap proporsional. Untuk beton mutu tinggi pada penelitian ini mempunyai grafik tinggi lebih tajam dengan tipikal sama. Nilai tegangan rata-rata untuk 9 (sembilan) silinder beton adalah 43,97 Mpa dan nilai regangan rata-rata mencapai 0,00244. Bila diamati grafik ini menunjukkan bahwa umumnya kuat desak maksimum tercapai pada saat nilai suatu regangan mencapai 0,003.

Tabel 4.2 Modulus elastisitas beton normal dan beton mutu tinggi

Kode Benda uji	Kuat tekan f_c' (Mpa)	Modulus elastisitas (Mpa)		Selisih (%)
		Beton normal	Beton mutu tinggi	
S-1	44,16	31232,91	27251,53	14,6
S-2	45,29	31629,98	27513,13	14,9
S-3	43,03	30830,71	26970,71	14,3
S-4	45,30	31633,48	27437,08	15,3
S-5	41,89	30356,87	26700,03	13,7
S-6	47,60	32425,59	28021,42	15,7
S-7	44,20	31247,04	27244,82	14,7
S-8	43,50	30998,63	27081,27	14,5
S-9	42,00	30459,48	26726,3	13,9
Rata-rata	43,97	31165,64	27216,25	14,5

Dari tabel 4.2 terlihat bahwa nilai desak menyebar diantara 41 dan 48 Mpa dan kuat tekan rata-rata = 43,97 Mpa dan pada tabel 4.4 disajikan nilai modulus elastisitas beton yang ditentukan dengan berdasarkan nilai beton normal dihitung berdasarkan persamaan $E_c = 4700\sqrt{f'_c}$, dengan E_c = modulus elastis beton normal, f'_c = tegangan desak maksimum. Modulus elastisitas beton mutu tinggi dihitung dengan persamaan (2.1). Kemudian nilai keduanya dibandingkan hingga

didapatkan selisih dalam persentase, hal ini menunjukkan perbedaan yang signifikan nilai elastisitas beton mutu tinggi untuk penelitian ini. Nilai E beton mutu tinggi rata-rata didapatkan sebesar 27216,25 Mpa dan E beton normal 31165,64 Mpa, artinya terdapat selisih persentase sebesar 14,5 % nilai E beton normal terhadap nilai E beton mutu tinggi. Hal ini karena persamaan modulus elastisitas untuk beton normal dipandang *over estimate* dan hanya digunakan untuk $f_c' < 41$ Mpa dan tidak memenuhi bila dipakai pada beton mutu tinggi dengan $f_c' > 41$ Mpa. Pada penelitian beton mutu tinggi ini mendapatkan $f_c' = 43,97$ Mpa maka untuk menghitung modulus elastisitas beton digunakan persamaan (2.1).

4.4 Beban aksial

Dua benda uji berupa kolom yang diberi beban aksial adalah kolom-1 dan kolom-2 masing-masing secara gradual sebesar 0,5000, 10000, 15000 (N) dan seterusnya hingga ditandai retak-retak dan *spalling* sampai terjadi keruntuhan kolom. Dengan penambahan beban aksial yang bekerja, maka akan terjadi peningkatan tegangan tarik dan regangan pada tulangan memanjang dan beton kolom. Peningkatan tegangan tarik dan regangan akan dicatat oleh *strain indicator* yang dipasang seperti tabel 4.3 dan hasil pengujian kolom-1 dan kolom-2 bisa dilihat pada lampiran 6 dan 7.

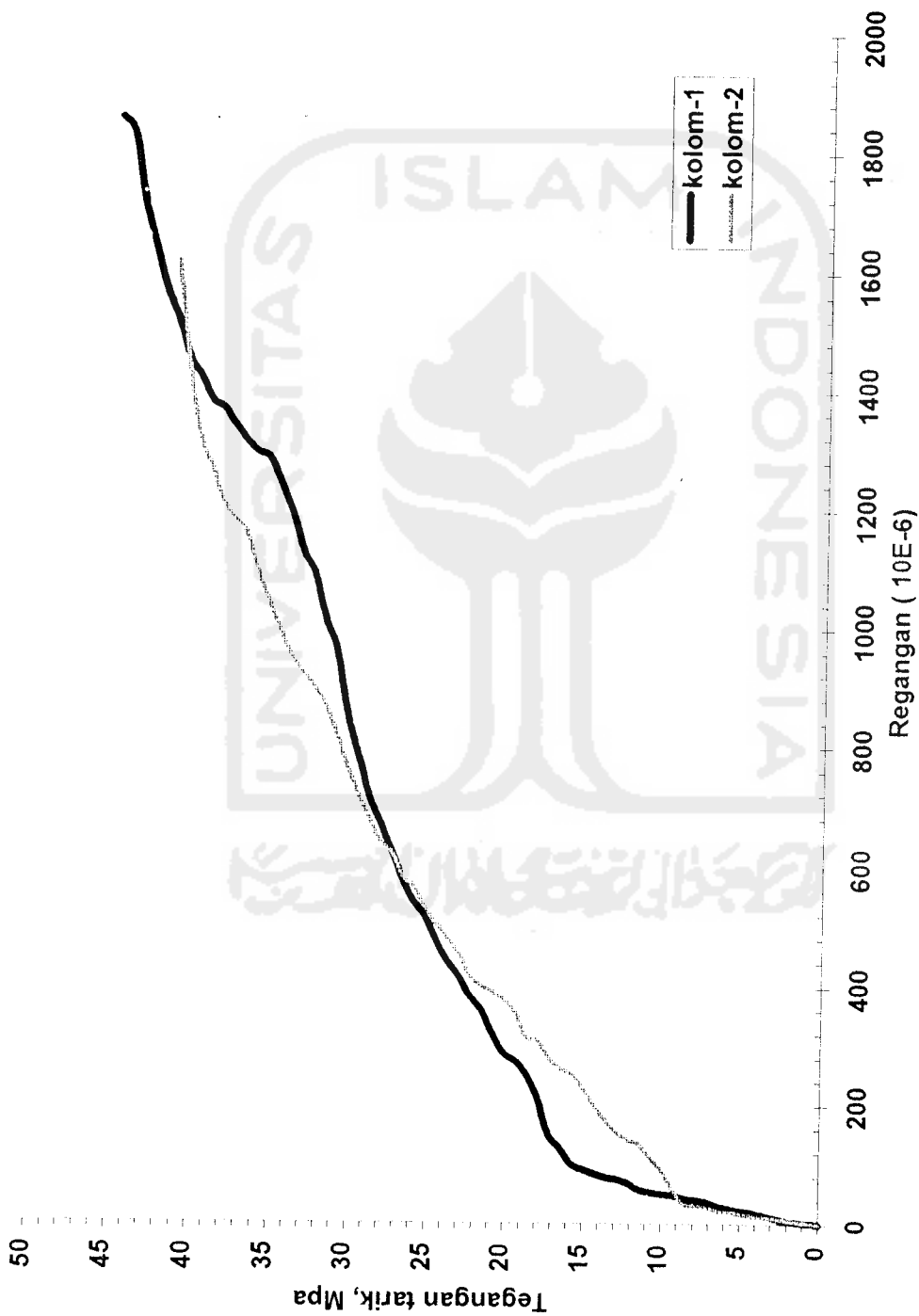
Tabel 4.3 Beban, momen dan regangan maksimal dengan *strain gage*

Kode Benda Uji	Beban aksial maksimal (kN)	Momen Maksimal (kN.mm)	R e g a n g a n (ϵ)	
			(10E-6)	
			Baja (ϵ_s)	Beton (ϵ_c)
K-1	310	46500	245	-1857
K-2	285	42750	459	-1619

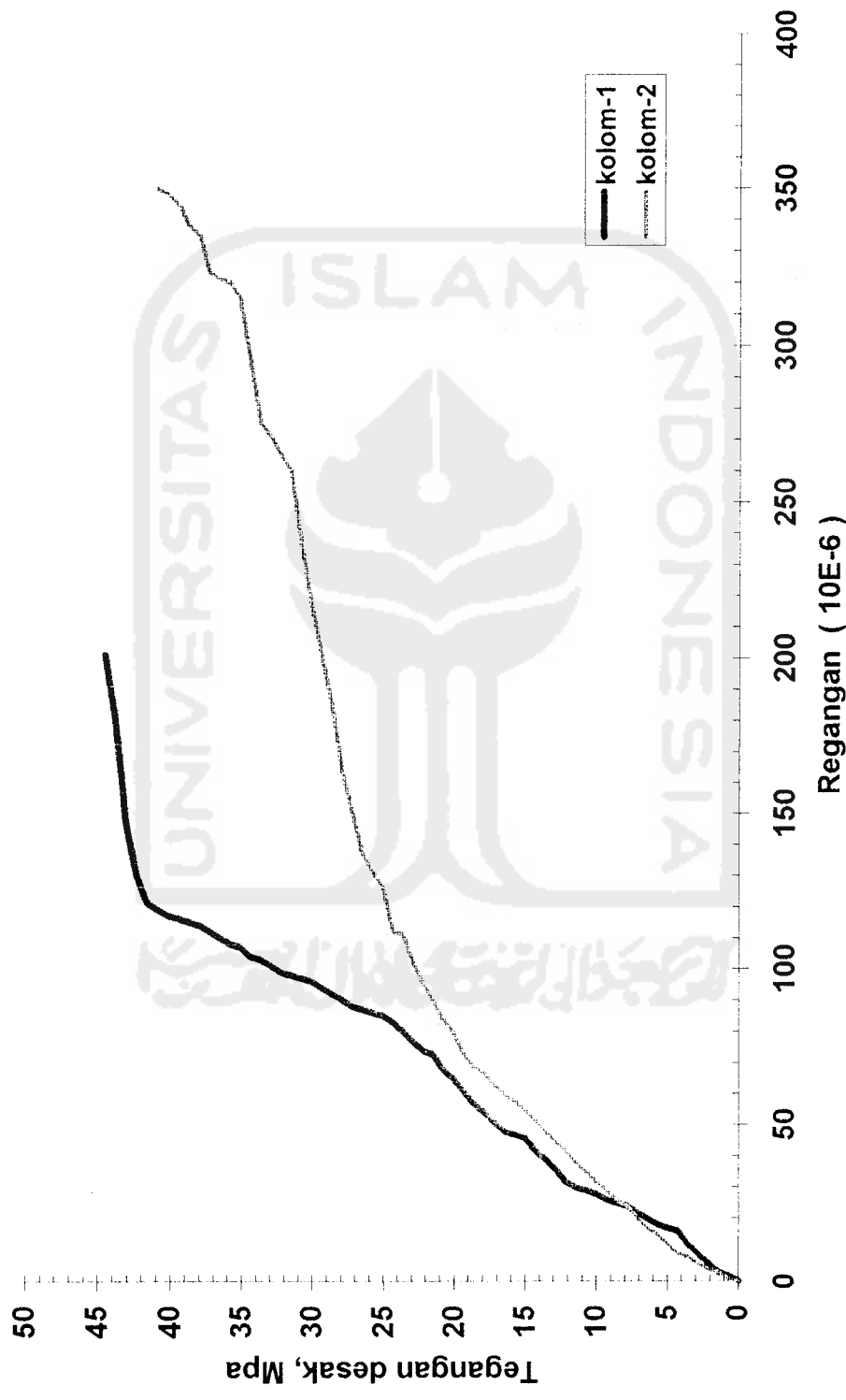
Untuk memberikan gambaran respon benda uji terhadap beban, maka dari data *strain gage* baja dan beton masing- masing dibuat grafik hubungan tegangan tarik-regangan baja dan grafik hubungan tegangan desak-regangan beton.

Kedua kolom tersebut mempunyai kapasitas ultimate $P_n = 2459,588 \text{ kN}$ (245,9 ton), kapasitas tersebut belum mempertimbangkan pengaruh kekangan (*confined*) akibat kontribusi yang diberikan pengikat spiral dan penempatan spiral yang relatif rapat dapat memperbaiki sifat beton dan jarak spasi diambil minimum 30 mm.

Untuk memberikan gambaran respons peningkatan beban aksial terhadap kolom-1 dan kolom-2, dari data yang tercatat dari dial diolah menjadi nilai tegangan dan nilai regangan, kemudian dibuat grafik guna memperlihatkan hubungan tegangan desak-regangan kolom. Nilai dari data *strain gage* baja dan beton dibuat grafik hubungan tegangan tarik -regangan untuk masing-masing dan grafik tersebut diperlihatkan pada gambar 4.6 dan 4.7.



Gambar 4.6 Grafik tegangan tarik-regangan tulangan kolom-1 dan kolom-2



Gambar 4.7 Grafik tegangan desak-regangan beton kolom-1 dan kolom-2

Berdasarkan gambar 4.6 grafik tegangan tarik dan regangan kolom-1 dan kolom-2 mempunyai tipikal yang hampir sama. Nilai regangan aktual yang terjadi cukup besar .

Berdasarkan gambar 4.7 grafik tegangan desak kolom-1 dan regangan beton menunjukkan ketika nilai tegangan mencapai 43 Mpa maka nilai regangan aktual yang terjadi adalah 0,00124. Hal ini menunjukkan sudut awal grafik lebih curam dengan batas nilai regangan yang lebih rendah. Apabila diperhatikan data yang diplotkan sepanjang nilai regangan tersebut menampilkan detail titik-titik yang nilainya berdekatan dan rapat. Hal ini menerangkan bahwa pori-pori yang terbentuk dalam beton relatif sedikit sehingga memberikan gambaran kualitas kolom tersebut cukup baik, ini dimungkinkan pematatan beton ketika pengecoran cukup baik.

Lain halnya seperti ditunjukkan kolom-2, hubungan nilai tegangan dan nilai regangan yang tercatat pada kolom-2 menampilkan grafik tipikal linier. Saat nilai tegangan mencapai 43 Mpa pada grafik nilai regangan aktual menunjukkan 0,00350, serupa dengan kolom-1 terlihat sudut awal grafik yang curam dan batas nilai regangan rendah namun memiliki regangan relatif panjang. Detail titik-titik regangan yang rapat menunjukkan peningkatan nilai tegangan dan nilai regangan aktual yang tipikal linier. Hal ini menggambarkan pori-pori yang terdapat dalam kolom-2 relatif sedikit, dan ini mengindikasikan parameter kualitas pengontrolan pematatan saat pengecoran adalah baik .

4.5 Analisis data *strain gage*

Pada penelitian ini, *strain gage* untuk baja dan beton masing-masing dipasang di tulangan memanjang dan di permukaan kolom. Maksud dari pemasangan *strain gage* ini adalah untuk mengetahui secara aktual regangan yang terjadi pada tulangan dan beton terutama pada tempat yang dipasang *strain gage* ketika kolom secara bertahap dibebani hingga terjadi runtuh kolom.

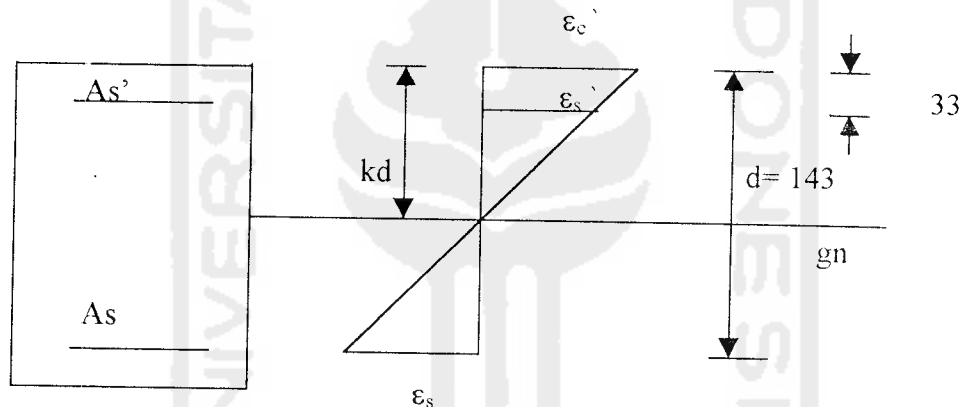
Strain gage dipasang pada tulangan memanjang dan beton pada setiap benda uji. Penempatannya pada tulangan memanjang tepat terletak di tengah-tengah bentang kolom uji, hal ini atas dasar asumsi awal bahwa tegangan akan terjadi pada tempat ini, tegangan tarik akan meningkat sesuai dengan penambahan momen yang terjadi akibat peningkatan beban. Jika ini benar, regangan tarik terus meningkat dan terbaca oleh *strain indicator*.

Penempatan *strain gage* beton pada permukaan kolom sejarak 45 cm dari dasar, berdasarkan asumsi bahwa akan terjadi retak-retak dan *spalling* pada lokasi tengah-tengah bentangan kolom, karena pada tempat ini regangan tekan terus meningkat sesuai peningkatan momen yang terbaca oleh *strain indicator*. Hal ini dapat mengakibatkan terlepasnya *strain gage* beton dari permukaan kolom. Jika hal ini terjadi, data *strain gage* beton yang dicatat kurang lengkap, maka kurang menggambarkan regangan beton aktual. Pada kolom-1 retak kecil mulai nampak ketika beban menunjukkan 85 kN dan beban berangsur-angsur meningkat 165 kN terjadi sedikit *spalling* di bagian tengah kolom, kemudian pada beban mencapai 310 kN *strain gage* beton terlepas tiba-tiba karena *spalling* besar terjadi tepat di tempat pemasangannya. Sedangkan pada kolom-2, retak mulai terlihat ketika

beban menunjukkan 70 kN, pada saat beban mencapai 285 kN terjadi *spalling* besar, dan *spalling* besar itu mengakibatkan *strain gage* beton terhempas bersamaan penutup beton dari tempat pemasangannya. Kedua *strain gage* beton yang terlepas tersebut masih utuh dan tidak rusak, hal ini diketahui setelah *strain gage* tersebut di tes ulang, *strain indicator* masih menampilkan nilai regangan terakhir yaitu 0,001857 dan 0,001619. Kedua nilai regangan tersebut menunjukkan bahwa regangan beton yang terjadi pada kedua kolom tersebut masih relatif kecil dan belum menggambarkan hancur beton. Untuk itu dibutuhkan pemasangan *strain gage* beton yang mencukupi pada tempat tertentu lainnya, agar nilai regangan beton kolom yang tercatat dapat menampilkan respons dan gambaran yang lebih akurat. Sama halnya untuk mengetahui tulangan memanjang sudah leleh atau belum terutama pada tempat runtuh tarik, dibutuhkan lebih banyak *strain gage* yang harus dipasang pada tulangan memanjang, mengingat tempat keruntuhan belum dapat diperkirakan sebelumnya. Secara keseluruhan regangan yang terjadi pada tulangan memanjang berdasarkan data *strain gage* belum menunjukkan tanda-tanda bajanya leleh, karena beban yang bekerja masih jauh di bawah beban leleh.

4.6 Pendekatan Ekstrapolasi

Pada penelitian ini nilai regangan beton dan baja dari data eksperimental *strain gage* yang dibaca *strain gage indicator* dari kolom kemudian diolah dengan pendekatan ekstrapolasi berdasarkan asumsi bahwa regangan yang terjadi dianggap linier. Sebenarnya pendekatan ekstrapolasi merupakan suatu pendekatan yang tidak lazim digunakan tetapi dalam penelitian ini pendekatan tersebut merupakan solusi satu-satunya yang dipakai, disebabkan pada saat pelaksanaan pengecoran benda uji terjadi kesalahan peletakan *strain gage* beton dan baja pada kolom.



Gambar 4.8 Ekstrapolasi regangan aktual

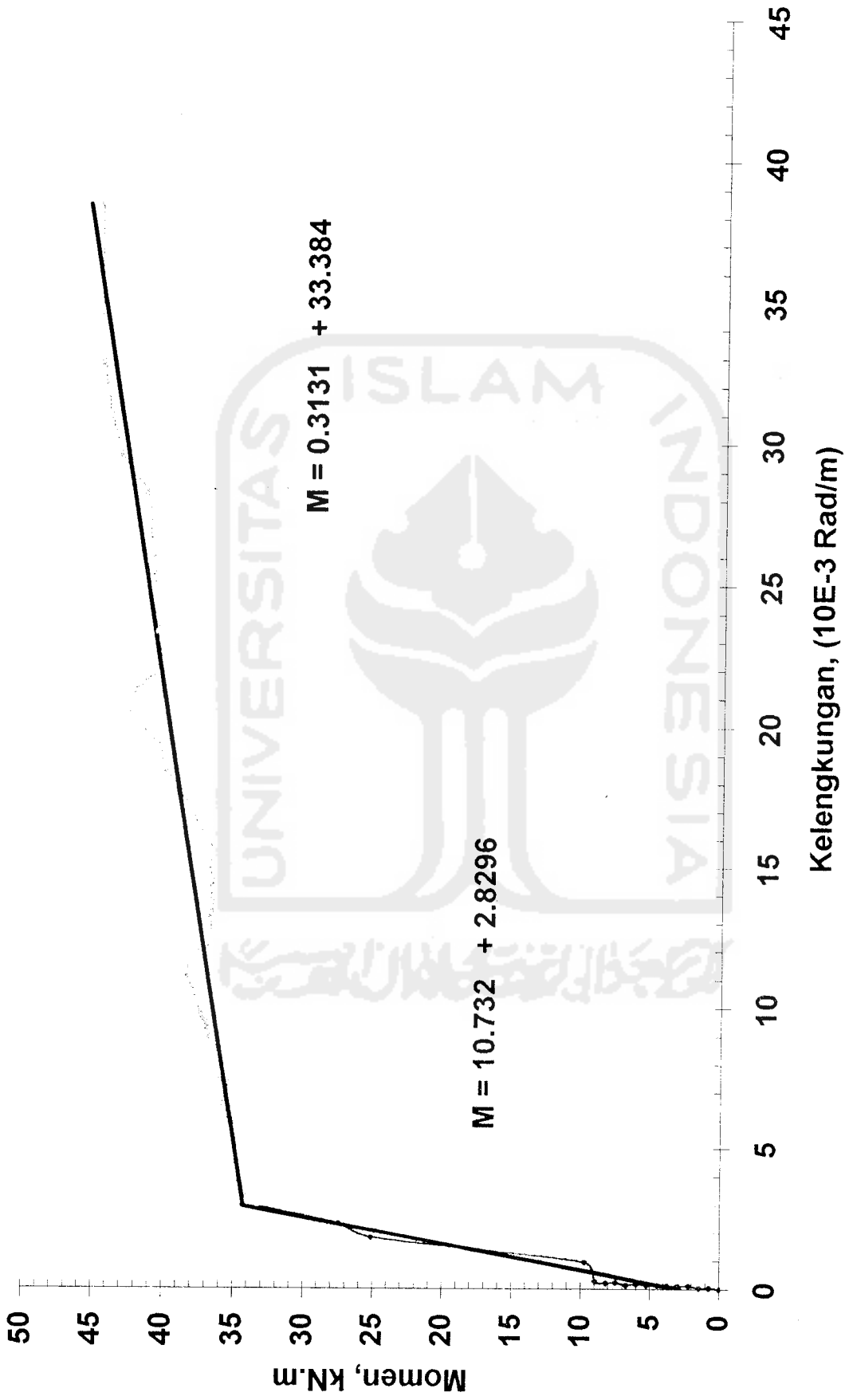
Benda uji yang merupakan kolom penampang bulat, kemudian untuk dianalisis kolom bulat tersebut ditransformasikan menjadi kolom segiempat ekuivalen. Gambar 4.8 menjelaskan pola pendekatan ekstrapolasi regangan aktual dengan asumsi regangan yang terjadi dianggap linier dan hasil perhitungan dari ekstrapolasi dan transformasi kolom segiempat ekuivalen dapat dilihat lampiran 8, 9 dan 10.

4.7 Momen-Kelengkungan Kolom

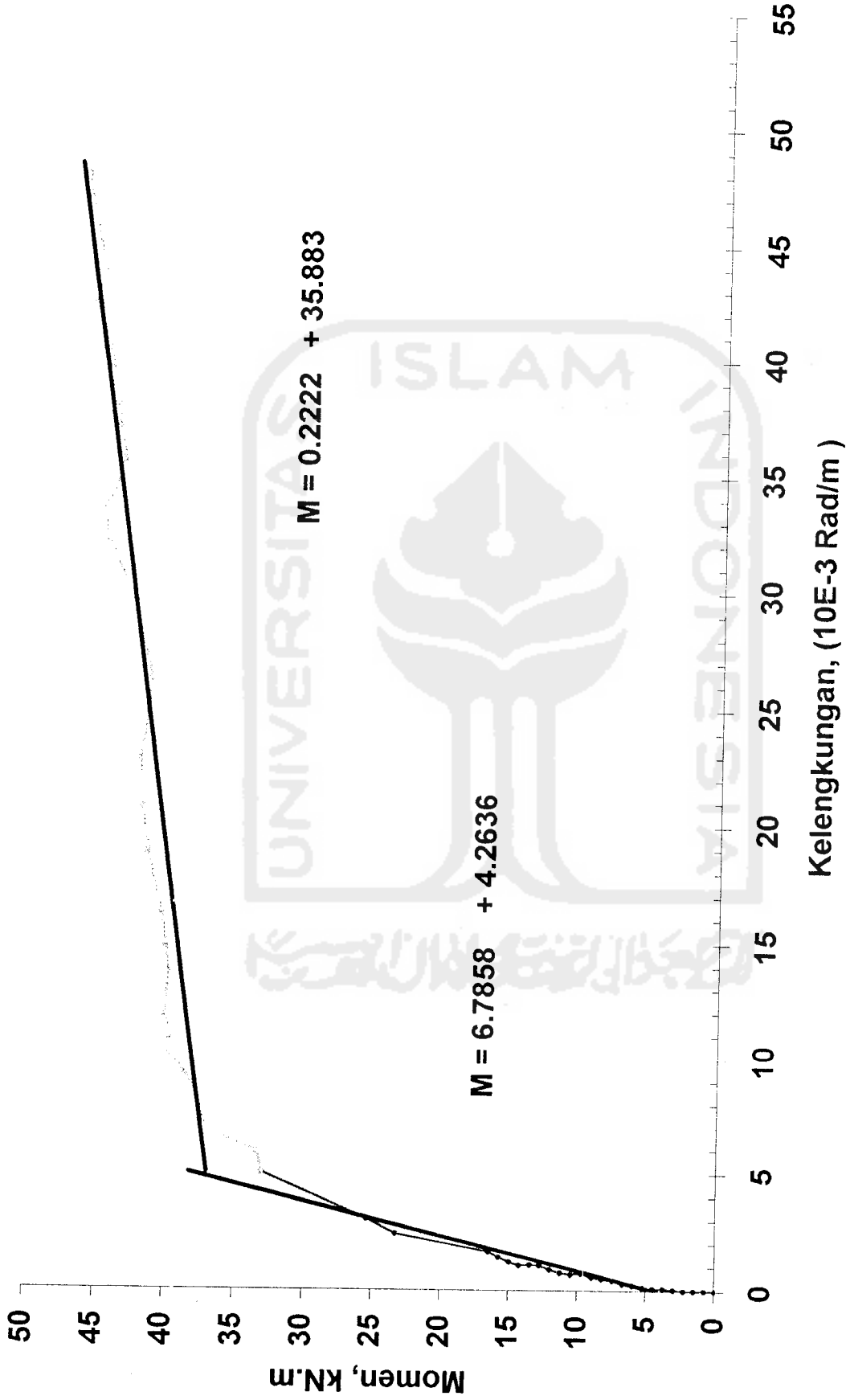
Penentuan grafik momen-kelengkungan pada kolom-1 dan kolom-2 masing-masing ditinjau secara eksperimental dan teoritis. Kemudian grafik momen-kelengkungan yang didapat dari masing-masing tinjauan, kemudian dikomparasikan.

4.7.1 Momen-Kelengkungan Eksperimental

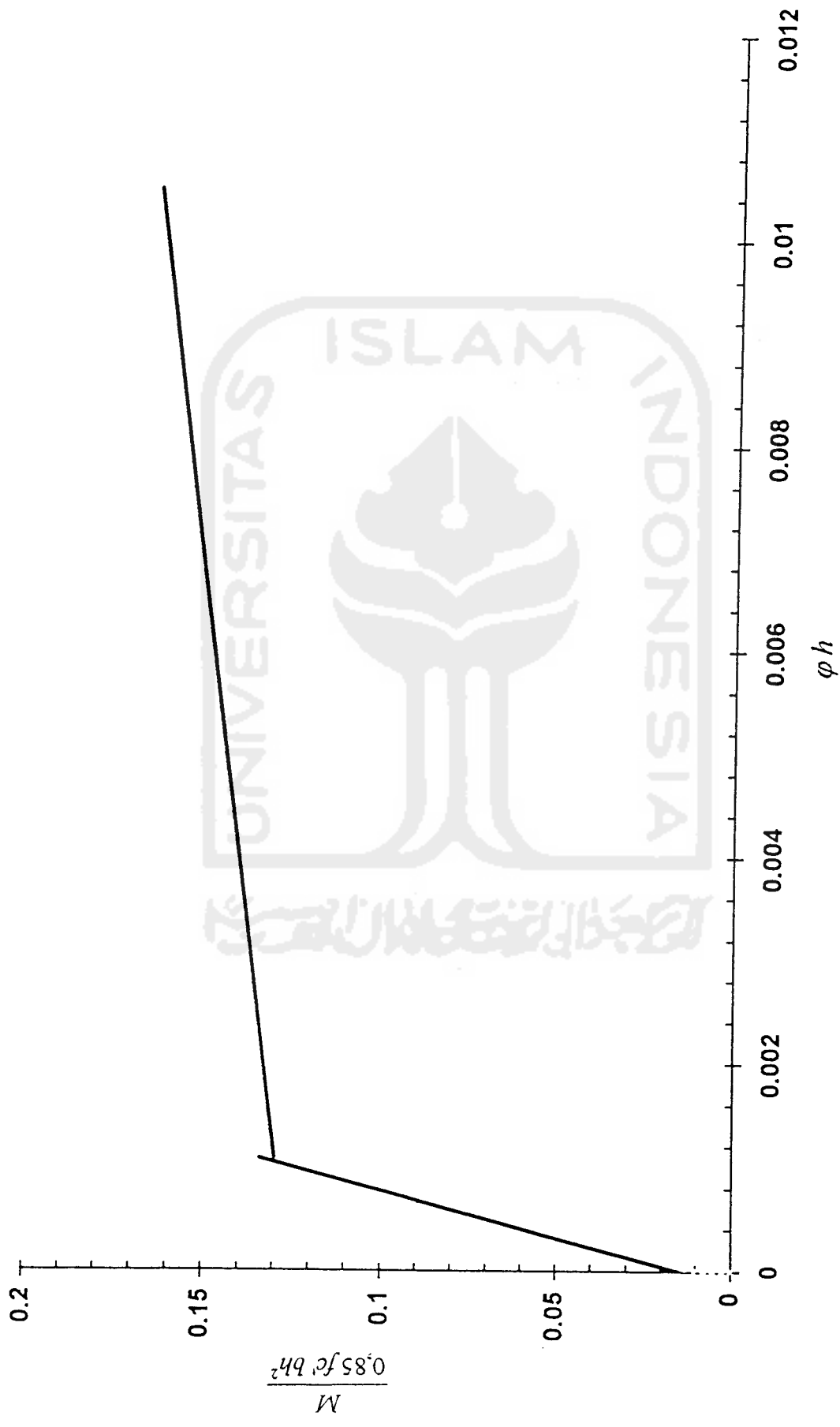
Dari lampiran dengan metode pendekatan ekstrapolasi nilai ε_s aktual dan ε_s' serta nilai k_d diketahui. Kemudian dengan persamaan (2.11) momen dan nilai kelengkungan dapat dihitung. Hasil rangkuman perhitungan momen dan nilai kelengkungan diperlihatkan pada lampiran 13 dan 14. Momen dan nilai kelengkungan yang hasilnya dihitung dari persamaan (2.11), kemudian diplotkan dan disajikan dalam grafik. Grafik tersebut berfungsi menjelaskan hubungan momen-kelengkungan kolom-1 dan kolom-2. Untuk lebih jelas grafik tersebut dapat dilihat pada gambar 4.9, 4.10, 4.11 dan 4.12.



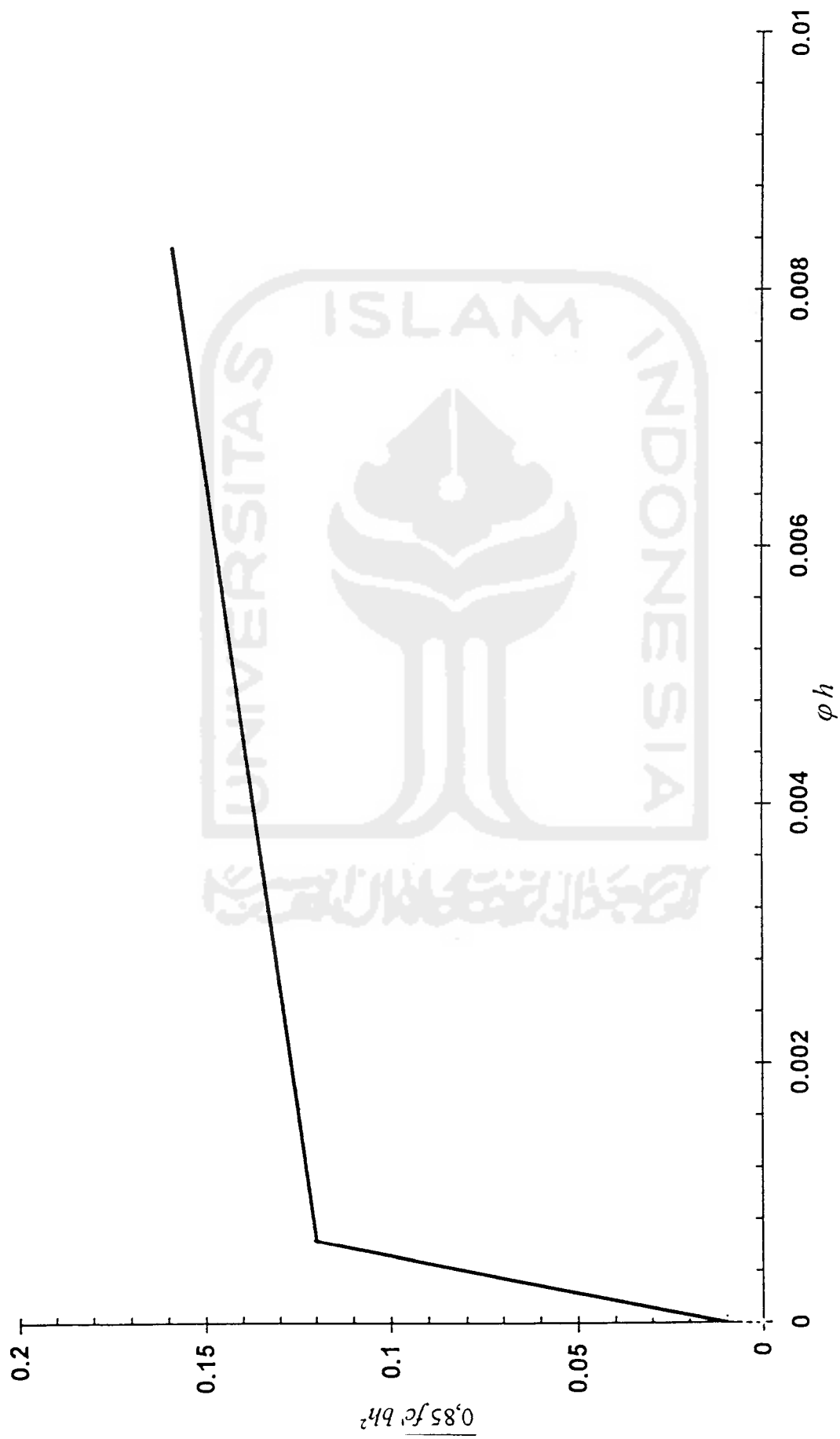
Gambar 4.9 Grafik momen-kelengkungan eksperimental kolom-1



Gambar 4.10 Grafik momen-kelengkungan eksperimental kolom-2



Gambar 4.11 Grafik momen-kelengkungan non dimensional kolom-1



Gambar 4.12 Grafik momen-keleengkungan non dimensional kolom-2

Gambar 4.9 dan 4.10 merupakan grafik momen-kelengkungan yang menggambarkan respon terhadap gaya yang bekerja dan menunjukkan tingkat kapasitas dan daktilitas kolom-1 dan kolom-2. Semakin naik (*ascend*) grafik momen- kelengkungan semakin besar kapasitas kolom tersebut dalam menahan momen yang terjadi. Tingkat daktilitas yaitu perbandingan luluh awal terhadap kondisi runtuh yang terjadi pada elemen struktur. Daktilitas disini bertujuan mempertahankan dan mengendalikan perilaku elasto-plastis dala struktur sewaktu menahan gaya gempa. Grafik ini juga menunjukkan pemencaran energi yang mampu diserap struktur. Semakin panjang garis kelengkungan semakin banyak dan besar energi yang mampu diserap sehingga struktur mampu mempertahankan perilaku perubahan bentuk secara daktil (liat) dan menjadi terkendali dan tidak mengakibatkan keruntuhan fatal ketika ada gaya gempa.

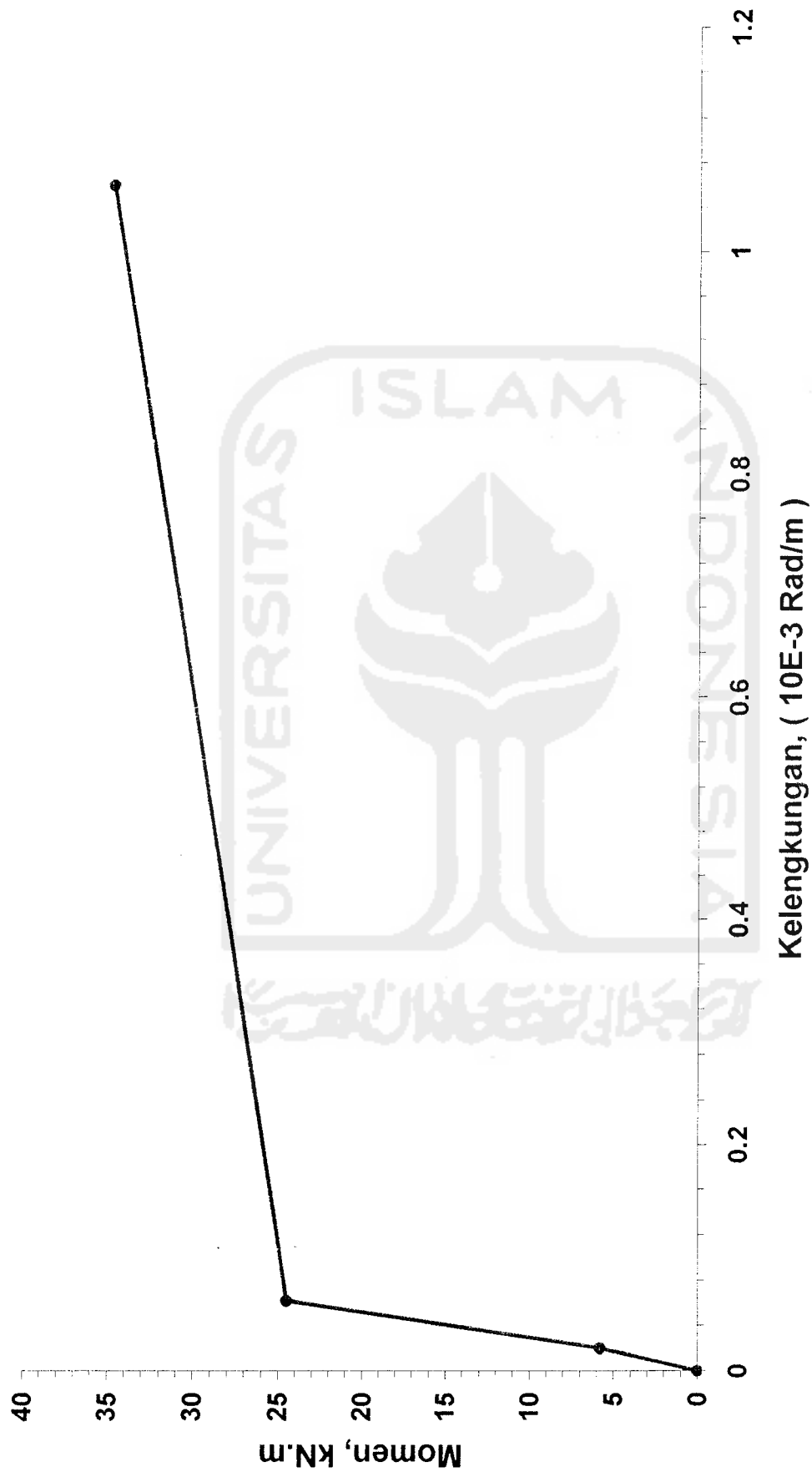
4.7.2 Momen-Kelengkungan secara teoritis

Menentukan hubungan momen-kelengkungan teoritis yaitu menghitung momen dan kelengkungan pada kondisi awal sebelum retak, kondisi setelah retak dan kondisi ultimate. Perhitungan lengkap tiap kondisi disajikan pada lampiran 11, sedangkan pada tabel 4.4 dicantumkan rangkuman hasil perhitungan momen dan kelengkungan tiap-tiap kondisi. Rangkuman tersebut diplotkan menjadi grafik momen –kelengkungan teoritis dan bisa dijelaskan pada gambar 4.13.

Tabel 4.4 Rangkuman momen dan kelengkungan teoritis

Kondisi	Momen, kN.m	Kelengkungan, rad/m
Kondisi sebelum retak	5,865	2.0137E-03
Kondisi setelah retak bet	24,527	6.1500E-03
Kondisi ultimate	34,637	1.0664E-01

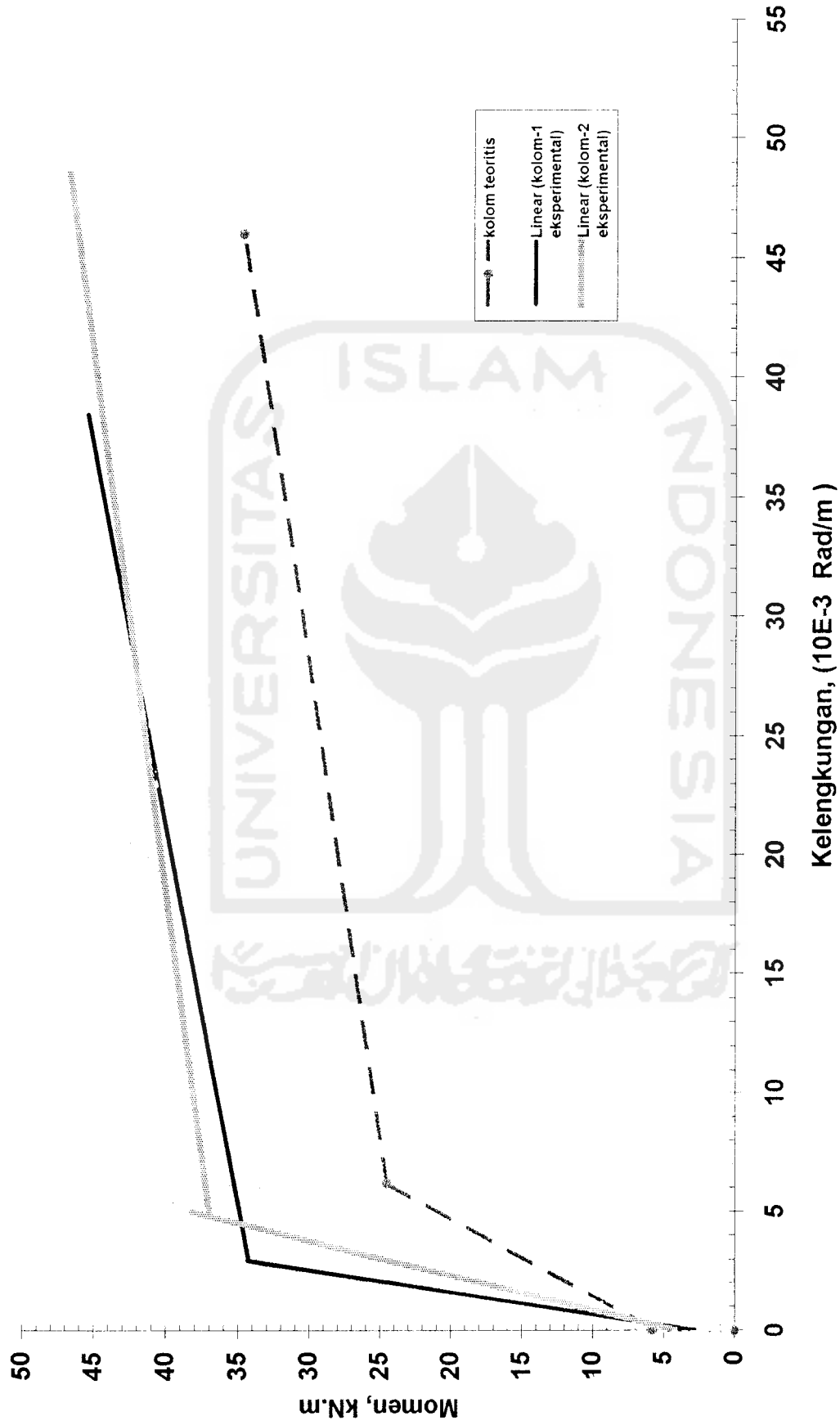




Gambar 4.13 Grafik momen- kelengkungan kolom Teoritis

4.7.3 Komparasi Momen-Kelengkungan Eksperimental dan Teoritis

Hasil penelitian ini menghasilkan grafik momen-kelengkungan eksperimental dan teoritis, kemudian masing-masing dikomparasikan seperti terlihat di gambar 4.14. Grafik tersebut menerangkan bahwa perilaku momen-kelengkungan menunjukkan pola grafik yang sama walaupun mempunyai perbedaan yang mencolok pada momennya. Perbedaan yang mencolok itu yaitu perhitungan kapasitas momen teoritis pada kondisi ultimate mencapai 34,637 kN.m sedangkan untuk kolom-1 dan kolom-2 eksperimental pada kondisi yang sama kapasitas momen mencapai 46,5 kN.m dan 42,75 kN.m. Perbedaan kapasitas momen ini menunjukkan peningkatan mencapai rata-rata 28 % dari kapasitas momen teoritis. Hal ini memperlihatkan bahwa pengaruh spiral memberikan kontribusi 28 % lebih tinggi dari momen teoritis, padahal dalam perhitungan momen teoritis kolom, pengaruh pengekangan (spiral) dianggap tidak memberikan kontribusi terhadap kekuatan kolom. Grafik tersebut menerangkan bahwa didapatkan kapasitas momen eksperimental yang lebih baik dari teoritis yang tetap menunjukkan pola keruntuhan yang sama.



Gambar 4.14 Grafik momen-kelengkungan kolom eksperimental dan teoritis

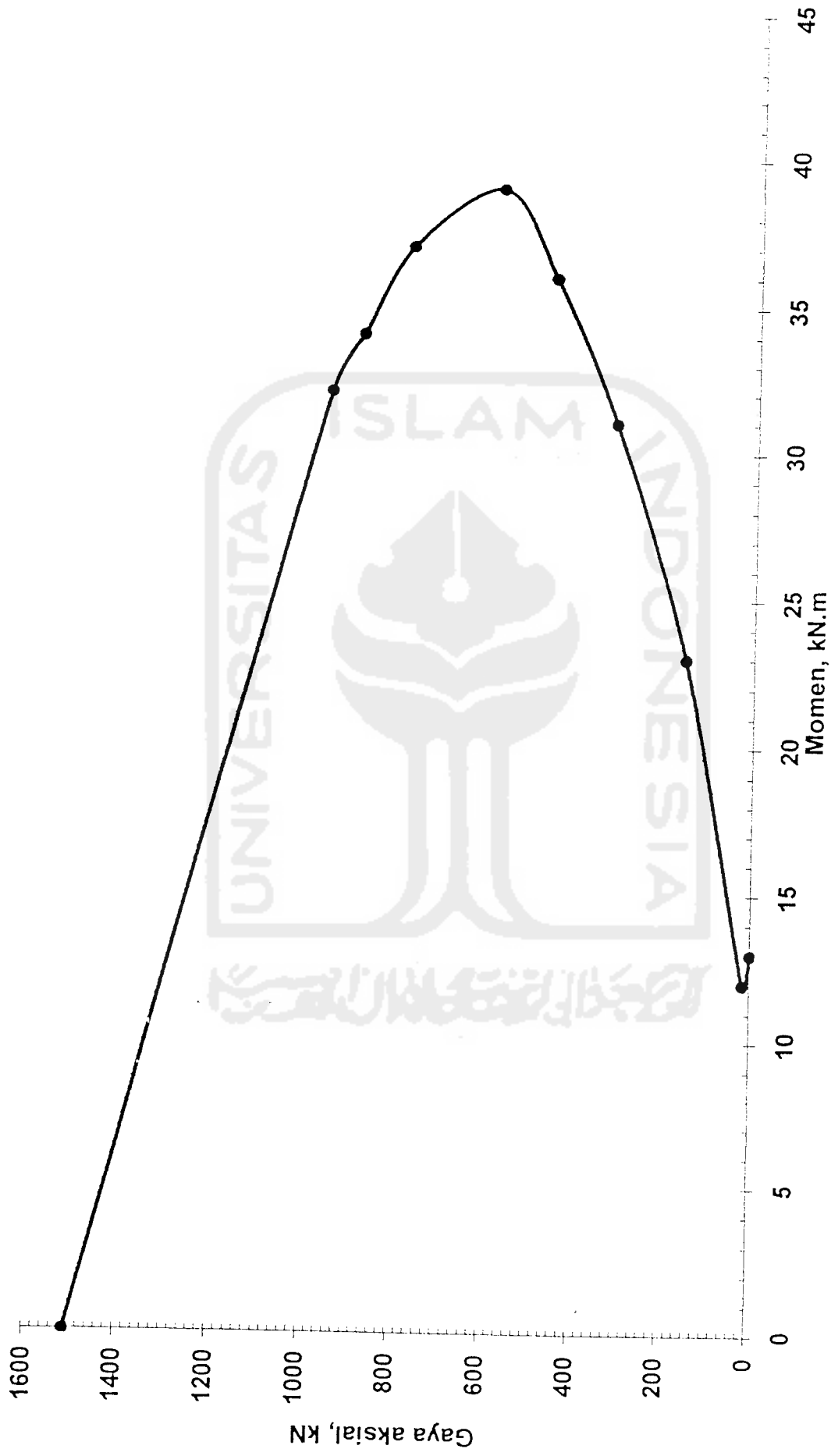
4.8 Diagram Interaksi Tipikal Kolom Uji

Diagram interaksi tipikal kolom uji pada penelitian ditentukan agar kapasitas kolom untuk masing-masing asumsi dapat diketahui yaitu ketika keruntuhan imbang, keruntuhan tekan, keruntuhan tarik, kondisi tekan murni atau kondisi lentur murni. Perhitungan lengkap masing-masing kondisi dijelaskan pada lampiran 12, sedangkan rangkuman nilai gaya aksial dan momen lentur akan dicantumkan pada tabel 4.5 dibawah ini.

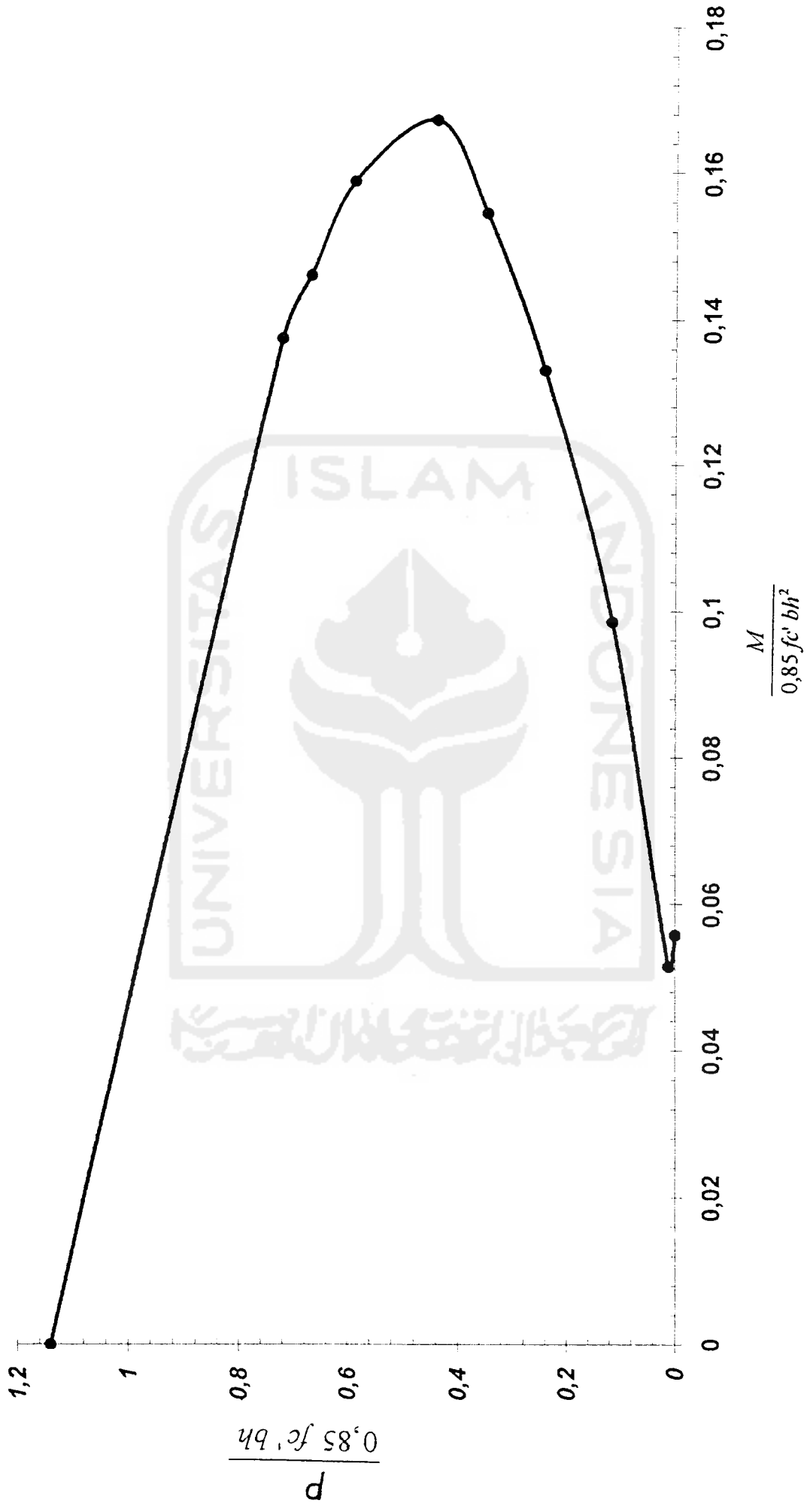
Tabel 4.5 Rangkuman gaya aksial dan momen

Kondisi	Gaya Aksial, kN	Momen, kN.m
Keruntuhan Imbang	721,568	126,717
Keruntuhan Tekan	860,941	120,006
Keruntuhan Tarik	521,335	111,964
Tekan Murni	2459,588	0
Lentur Murni	0	61,46

Nilai gaya aksial dan momen di tabel 4.5 diatas diplotkan dan disajikan dalam grafik yaitu grafik interaksi tipikal kolom (P_n - M_n). Grafik tersebut ditunjukkan oleh gambar 4.15 dan gambar 4.16 adalah grafik interaksi tipikal non dimensional kolom tersebut.



Gambar 4.15 Diagram interaksi tipikal kolom (Pn-Mn)



Gambar 4.16 Diagram interaksi Pn - Mn tipikal non dimensional

Berdasarkan tulangan lentur yang terpasang pada kolom uji pada penelitian ini, maka didapatkan diagram interaksi tipikal kolom $P_n - M_n$ sebagaimana yang dapat dijelaskan pada gambar 4.15 dan 4.16 :

1. apabila kolom ini mengalami gaya aksial murni maka kapasitas teoritis dengan $e = 0$ pada diagram interaksi tipikal kolom adalah 1510,59 kN,
2. sedangkan bila kolom dianggap berperilaku momen murni maka didapatkan kapasitas momen 12,706 kN.m,
3. pada kondisi seimbang kolom tersebut mampu menahan gaya aksial sebesar 577,818 kN beserta momen sebesar 38,818kN.m,
4. untuk keperluan praktis di lapangan kemudian dibuat diagram interaksi tipikal kolom $P_n - M_n$ non dimensional yang bertujuan menentukan persentase tulangan terhadap penampang kolom di lapangan. Maksudnya diagram tersebut dalam penggunaannya tidak terfokus dalam dimensi satuan tertentu sehingga penggunaan diagram dalam dimensi satuan apapun tidak menjadi masalah.