

Orasi Ilmiah Guru Besar

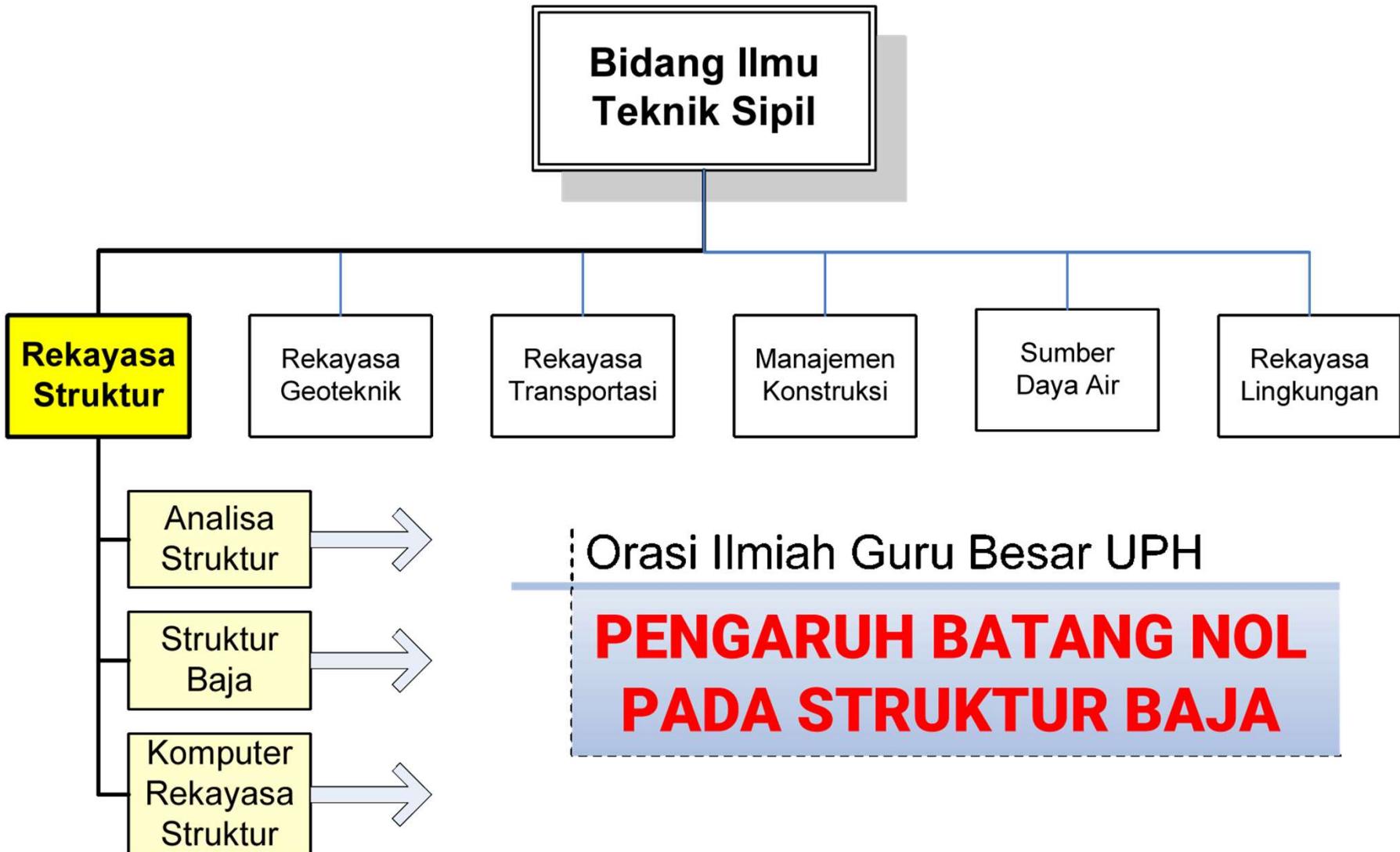
Senin, 4 November 2019
Karawaci, Tangerang

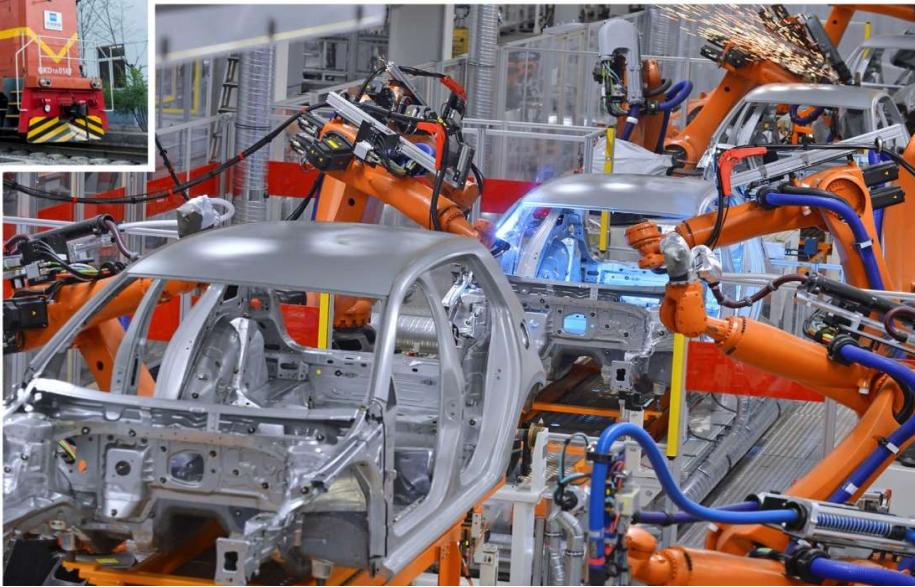
PENGARUH BATANG NOL PADA STRUKTUR BAJA

Profesor Wiryanto Dewobroto

Guru Besar Bidang Ilmu Teknik Sipil

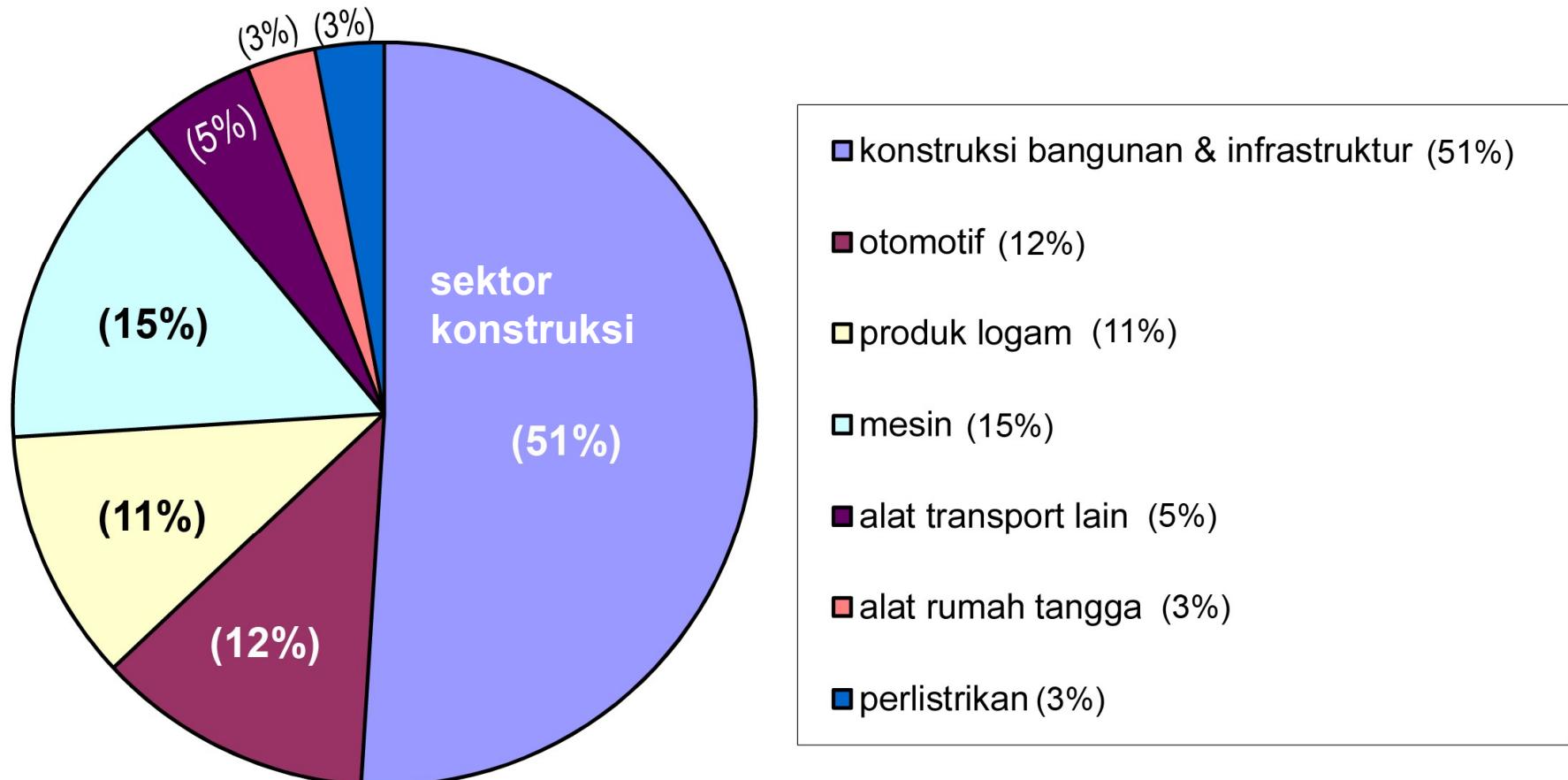






Material baja dan aplikasinya

Prosentasi pemakaian material baja dunia





Konstruksi baja dan proyek infrastruktur Indonesia



Konstruksi baja ikon baru untuk pariwisata



Potensi Konstruksi Baja, dan Kesiapan SDM



KEMENTERIAN PEKERJAAN UMUM DAN PERUMAHAN RAKYAT

Launching & Seminar

**“KATALOG PRODUK BAJA RINGAN KONSTRUKSI 2018 DAN
APLIKASI INFORMASI MATERIAL DAN PERALATAN KONSTRUKSI”**

Tema :

- “Dukungan Ketersediaan Informasi Sumber Daya Material dan Peralatan Konstruksi
dalam Menyukseskan Pelaksanaan Pembangunan Infrastruktur Nasional”

PENGUKUHAN MASYARAKAT KONSTRUKSI BAJA INDONESIA

(Indonesian Society Of Steel Construction - ISSC)



Indonesian Society of Steel Construction



KEMENTERIAN
PEKERJAAN UMUM &
PERUMAHAN RAKYAT

LAUNCHING KATALOG PRODUK
BAJA RINGAN KONSTRUKSI 2018
APLIKASI INFORMASI MATERIAL DAN
PERALATAN KONSTRUKSI, SERTA SEMINAR
PROSES DAN APLIKASI PRODUK

Baja Ringan Konstruksi

16 Oktober
2018
Ruang Auditorium
Kementerian PUPR

Pengukuhan



Komite Riset & Publikasi **ISSC**

Slide #9

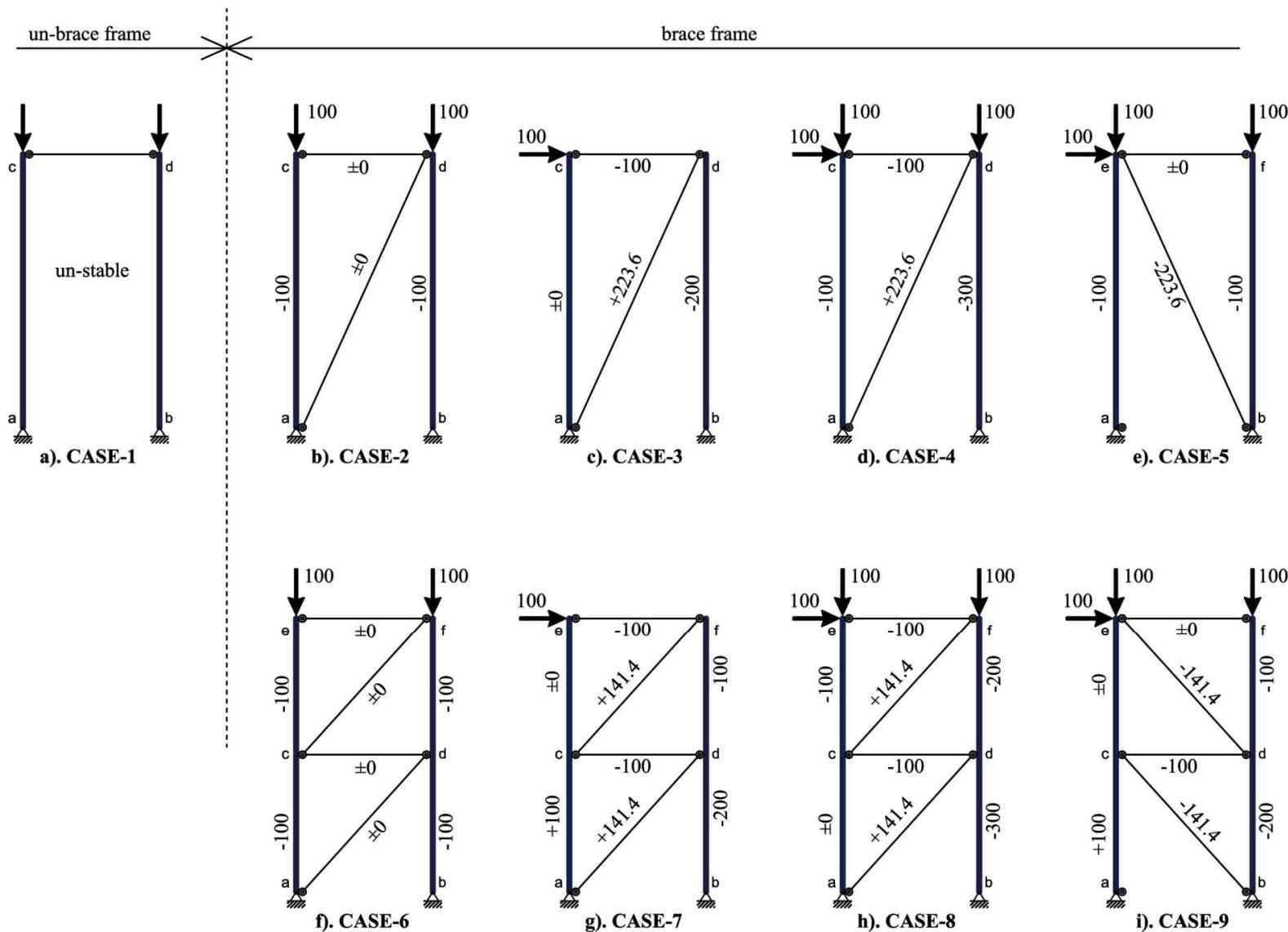


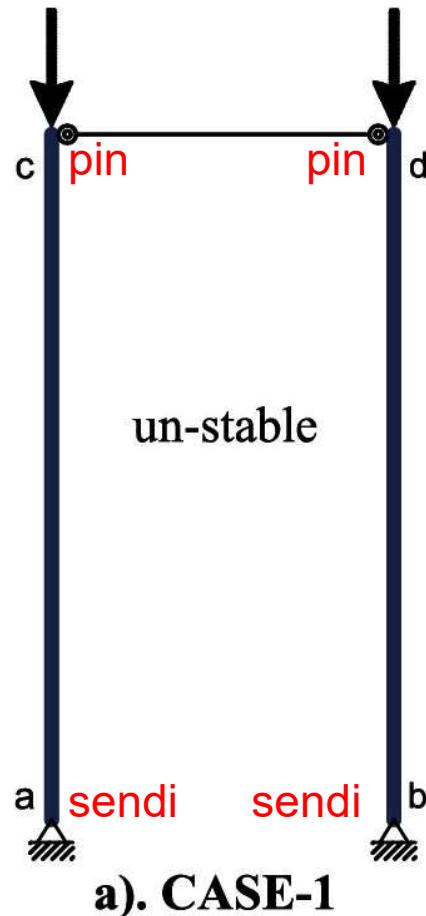
Ref. Dr.P.Venkateswara Rao



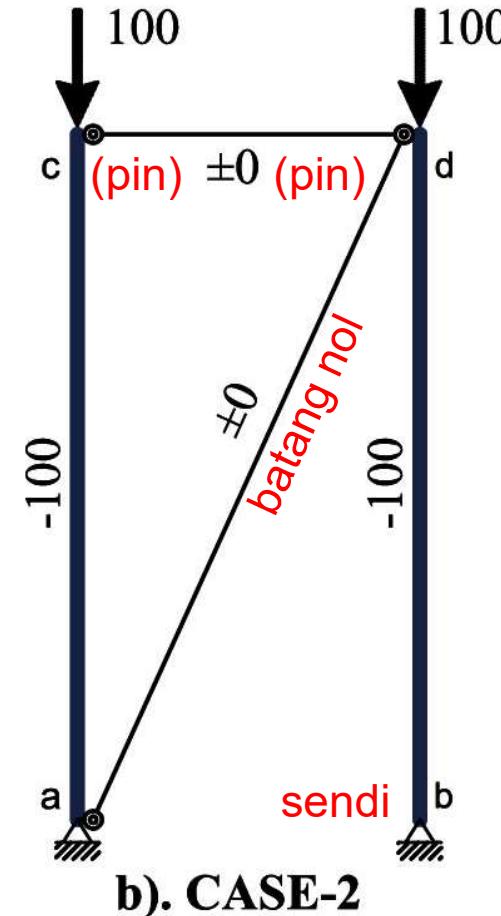
Ref. Dr.P.Venkateswara Rao

Permasalahan stabilitas (*buckling*)


 Respon konfigurasi rangka untuk memahami apa itu bracing, ikatan angin atau batang NOL sli

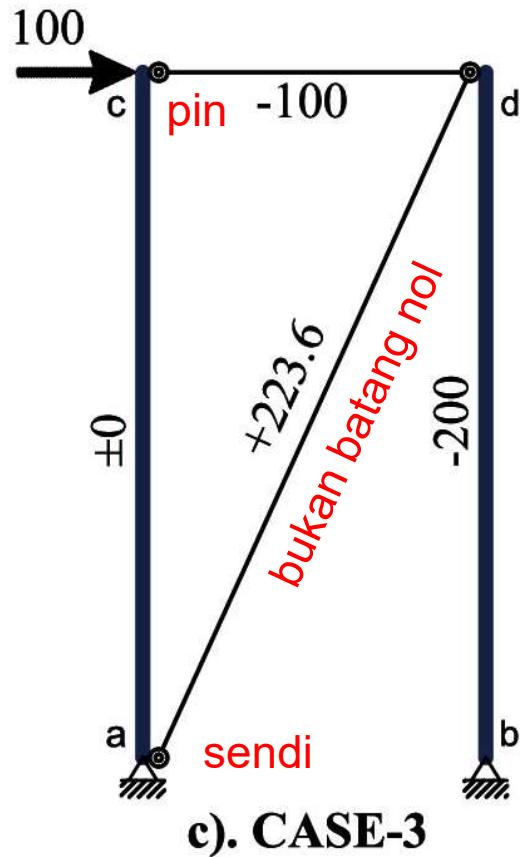


a). CASE-1



b). CASE-2

Case 1 (tidak stabil) dan Case 2 (stabil)

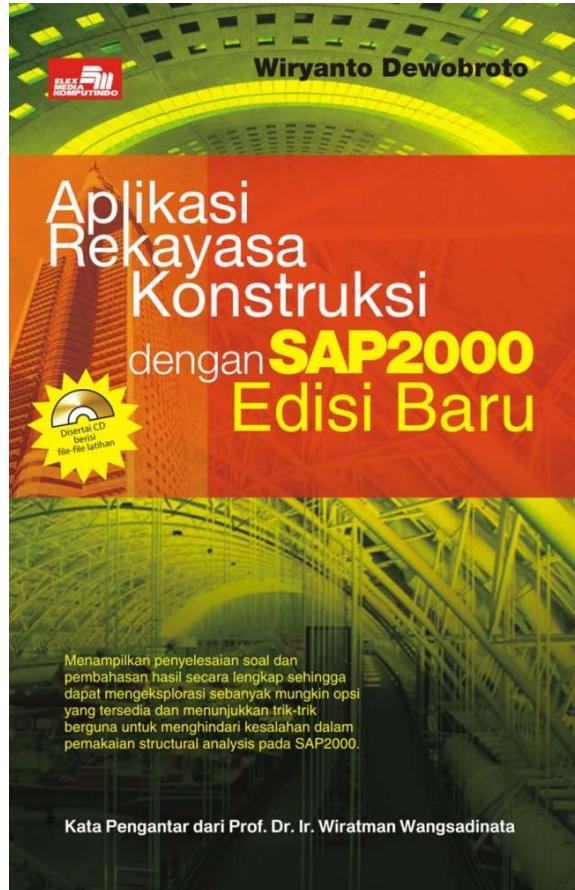


Case 3 (bracing menyalurkan beban)

Komputer Rekayasa Struktur



2003



2007



2013

Slide #14

Perencanaan Struktur Baja

- LRFD sesuai AISC 360-2010 yang telah diadopsi utuh dengan cara terjemahan jadi SNI 1729:2015 sebagai berikut :

$$R_u \leq \phi R_n$$

Gaya maksimum terjadi

<<<

Kapasitas elemen

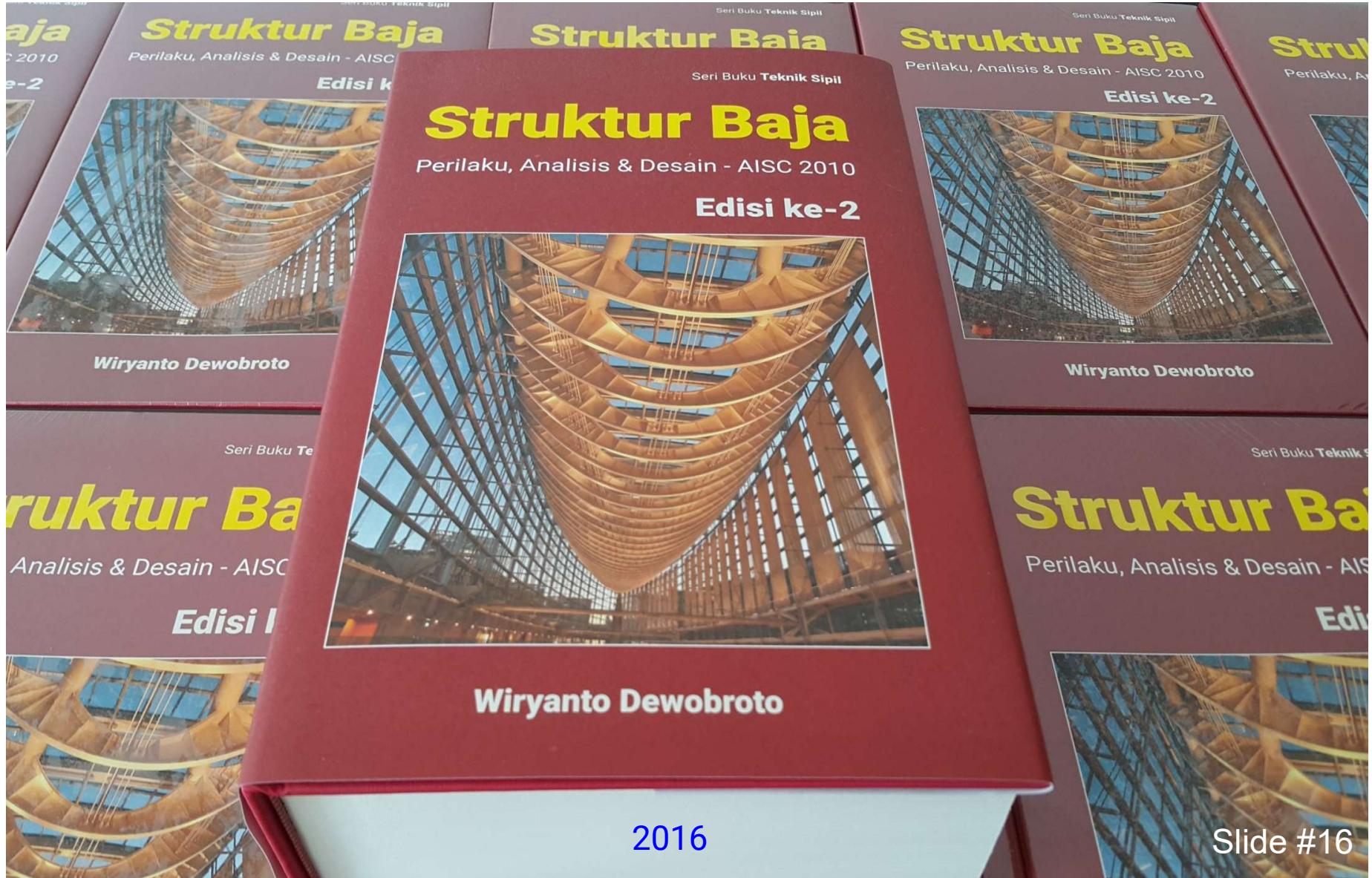


Analisa struktur



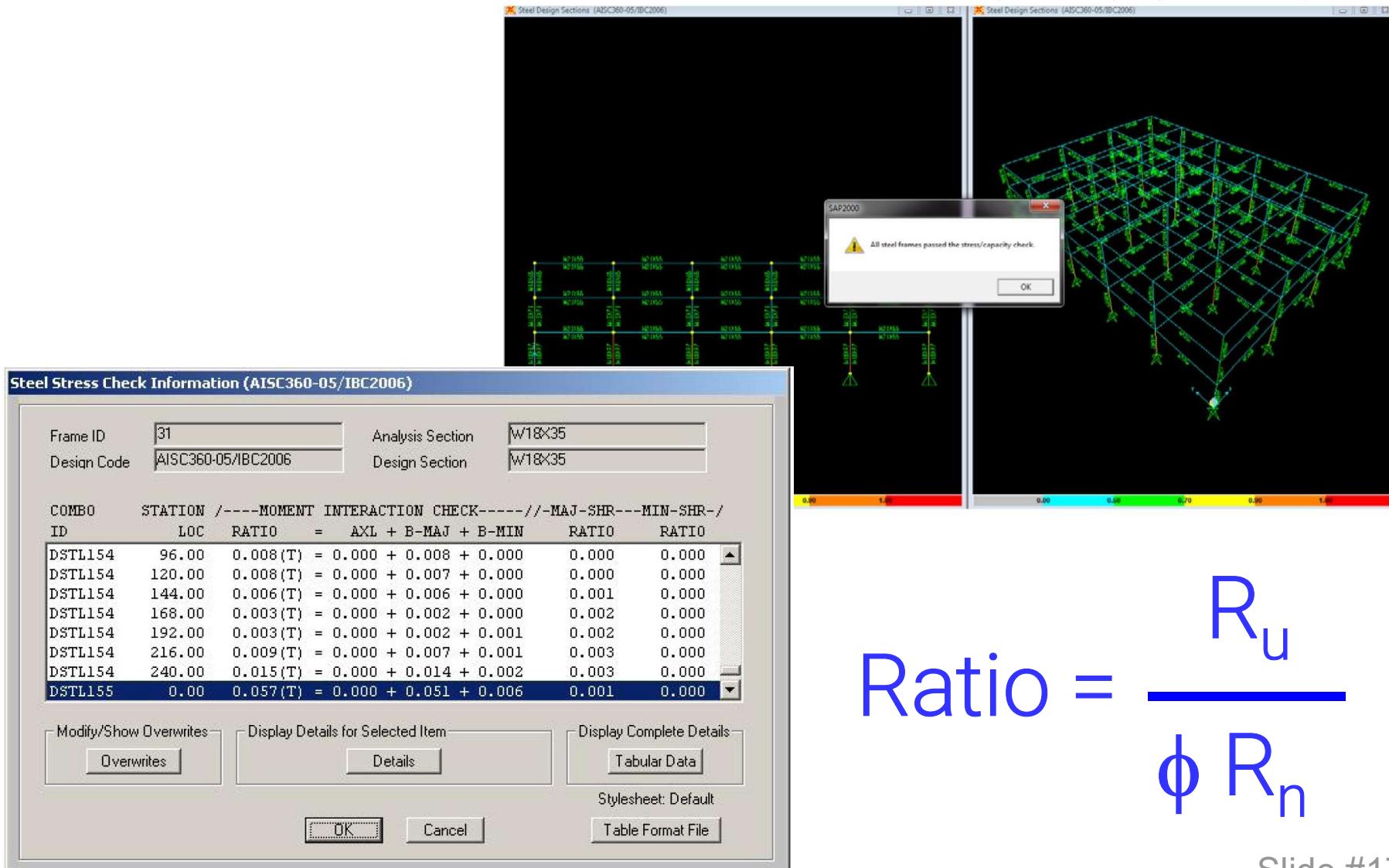
Desain penampang

Desain Elemen Struktur Baja



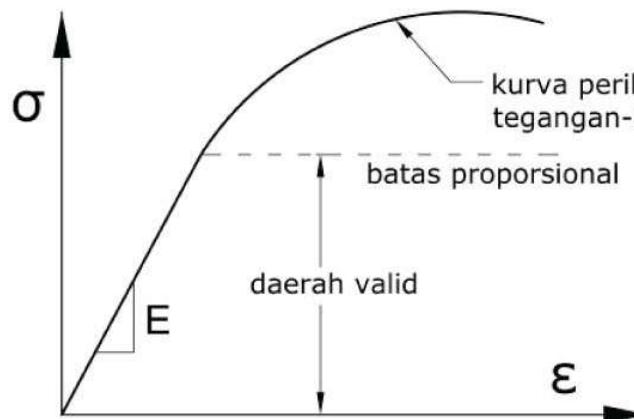
Perencanaan Baja dengan Program Komputer

SAP2000's beam and column individual member check for stress/capacity. All members passed.

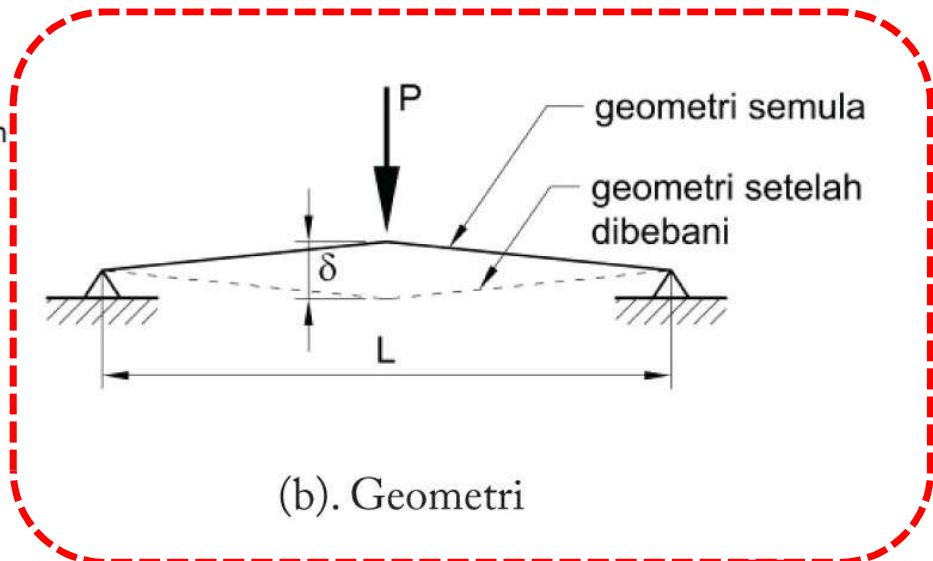


$$\text{Ratio} = \frac{R_u}{\phi R_n}$$

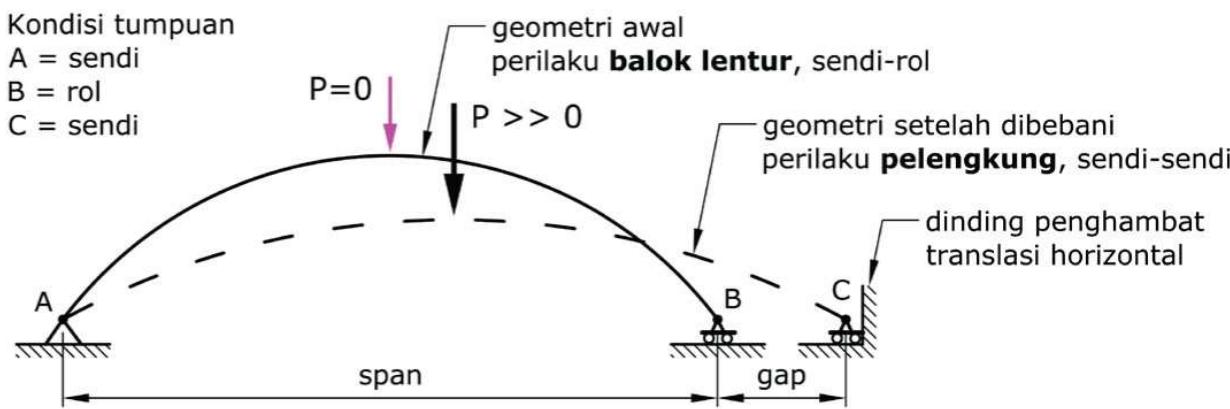
Permasalahan Struktur Non-linier



(a). Material



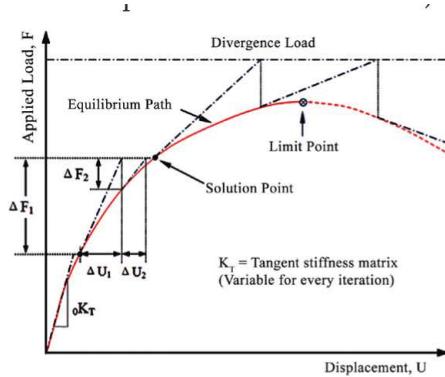
(b). Geometri



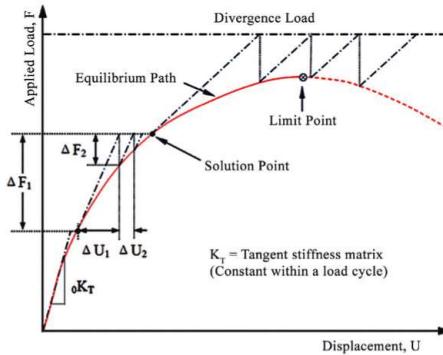
(c). Problem Kontak

**masalah
stabilitas**
**2nd order effect,
buckling**

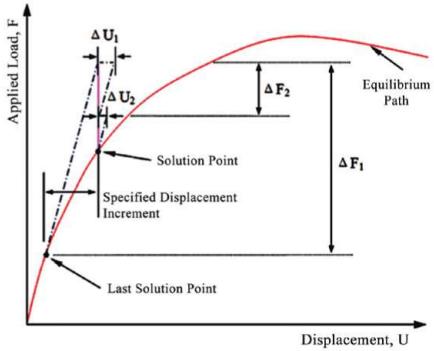
Berbagai metode **iterasi numerik** solusi non-linier



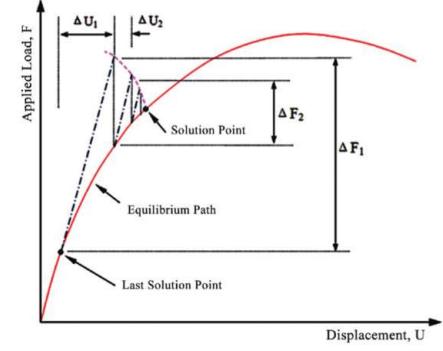
(a). Metode Newton Raphson



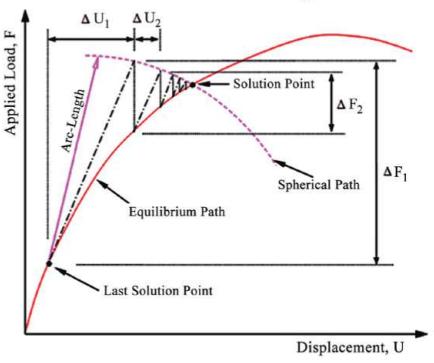
(b). Metode Modifikasi Newton Raphson



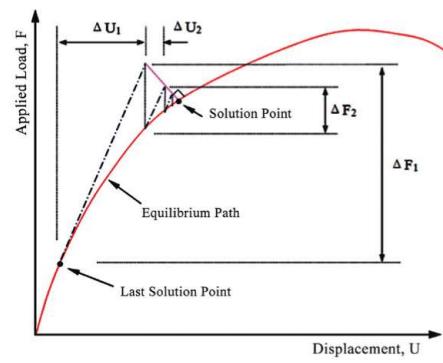
(c). Metode ‘Control Displacement’



(d). Metode ‘Constant Work’



(e). Metode ‘Arc-Length’

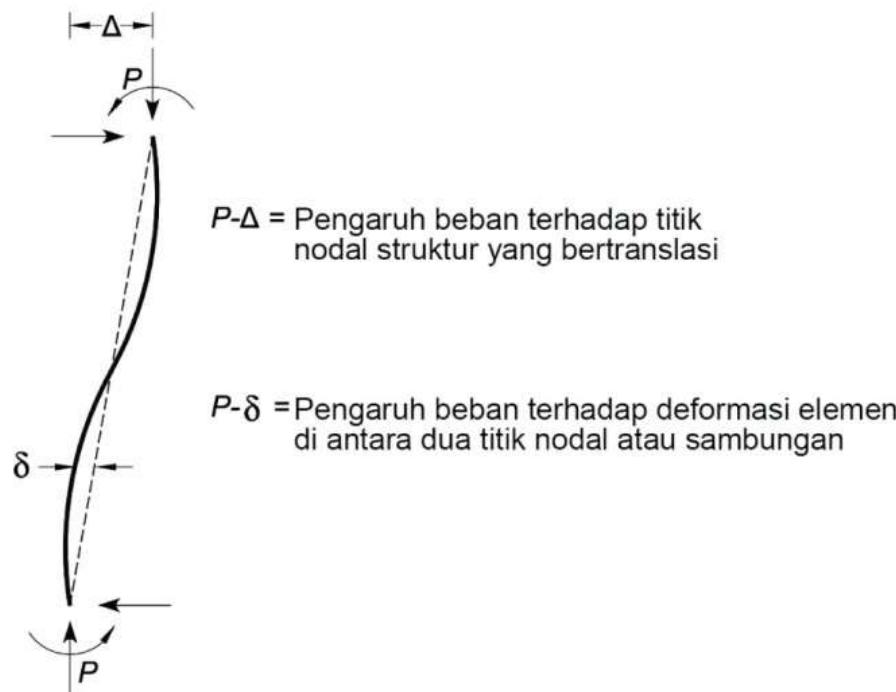


(f). Metode ‘Min Residual Displacement’



Solusi numerik
berbasis komputer

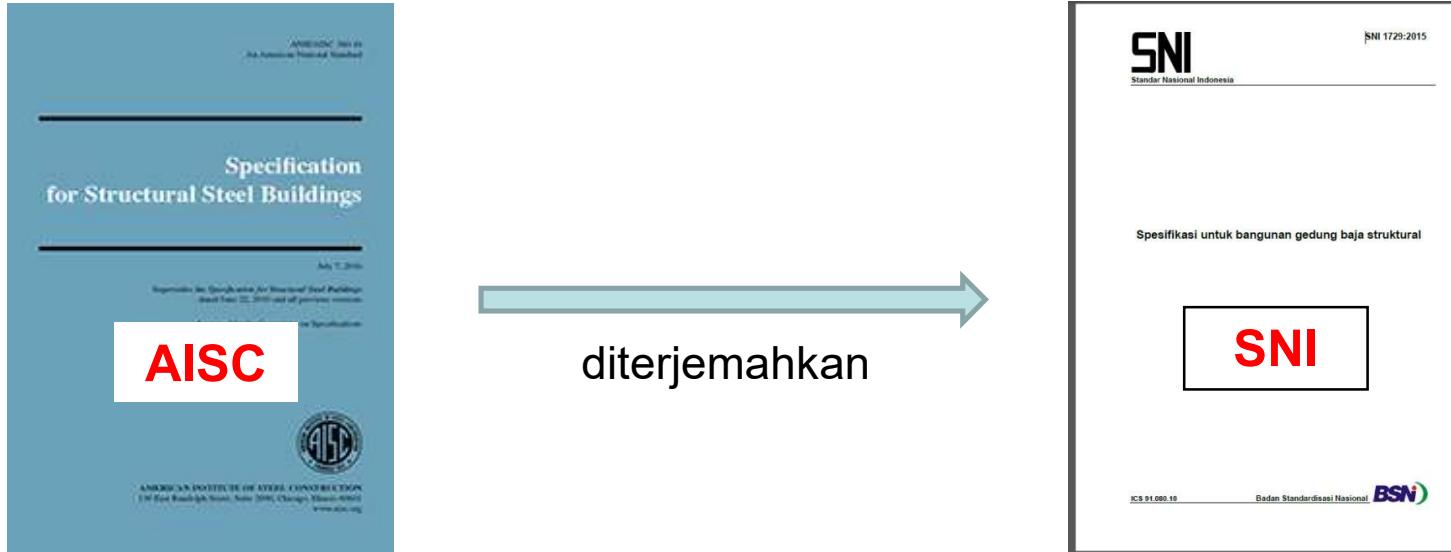
Masalah stabilitas (problem non-linier) ditangani secara pendekatan (manual)



Akibat 2nd order effect (efek $P-\Delta$) **dihitung secara pendekatan** → misalnya **cara pembesaran momen** (faktor **B1** dan **B2**).

$$\mathbf{M}_r = \mathbf{B}_1 \mathbf{M}_{nt} + \mathbf{B}_2 \mathbf{M}_{lt} \dots \dots \dots \quad (A-8-1)$$

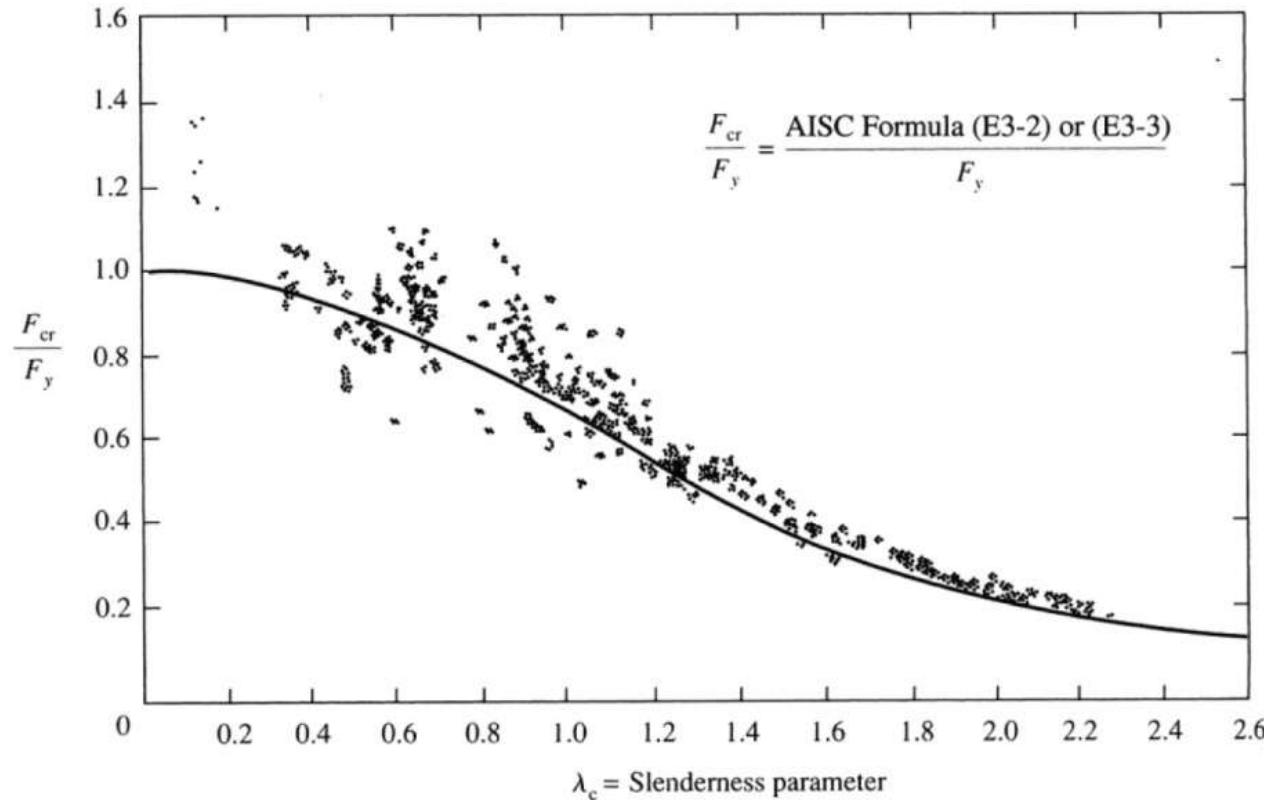
Masalah stabilitas (problem non-linier) ditangani secara rasional (komputer)



Code **AISC 2005** adalah yang pertama kali memberi peluang boleh memakai **metode analisis struktur secara rasional** untuk solusi masalah stabilitas (2nd order effect).

- Cara **lama** → **Effective Length Method (ELM)**, cara **manual**
- Cara **baru** → **Direct Analysis Method (DAM)**, cara **komputer**

Rumus tekan elemen tunggal (DAM dan ELM)



Gambar 10. Kurva kapasitas tekan terhadap uji kolom empiris (Salmon et.al 2009)

Formula AISC (E3-2 dan E3-3) untuk kapasitas tekan telah memperhitungkan *imperfection* dan *residual stress* secara otomatis, karena **ada proses kalibrasi** dengan data empiris.

Pengaruh struktur keseluruhan terhadap batang tunggal dan Faktor K

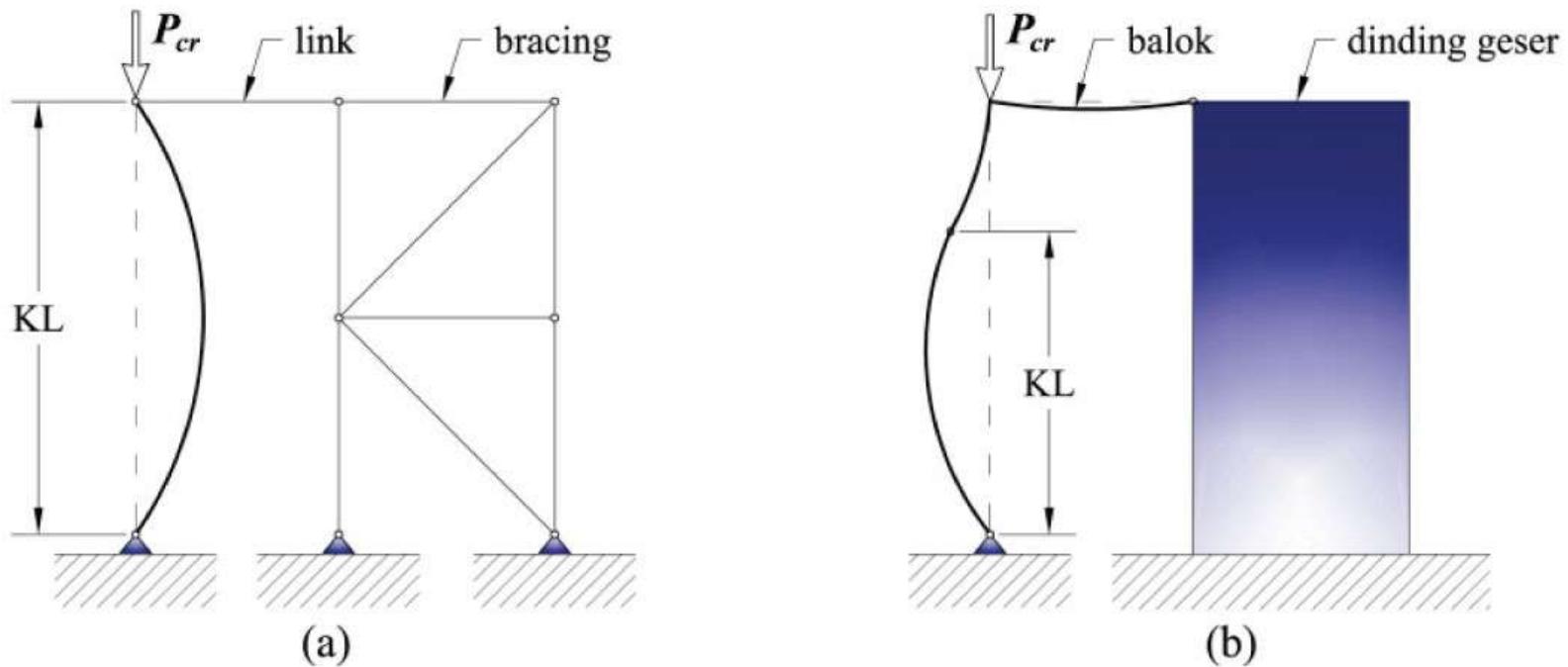
Pengaruh **struktur secara keseluruhan** terhadap batang tunggal ditunjukkan dengan **Faktor K**. Itu **esensi desain struktur baja cara lama** (*Effective Length Method*).

Untuk menentukan faktor K yang tepat, maka langkah awal adalah bisa mengklasifikasi sistem struktur sbg :

- [1] **rangka tidak bergoyang** atau
- [2] **rangka bergoyang**

Pada klasifikasi tersebut, **keberadaan bracing** atau **batang nol** pada sistem **sangat signifikan dampaknya**.

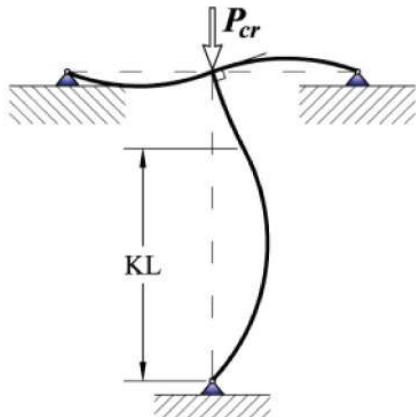
Rangka Tidak Bergoyang



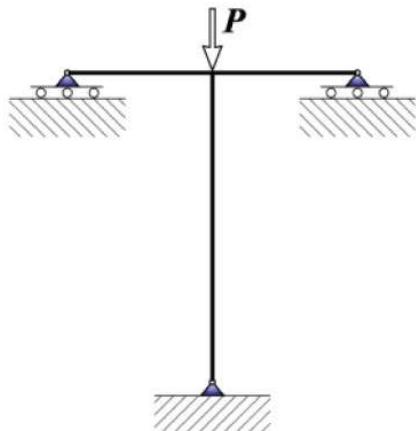
Gambar 11. Rangka tidak-bergoyang ($0.5 \leq K \leq 1.0$) (Dewobroto 2015, 2016)

Rangka tidak-bergoyang, jika titik ujung kolom tidak berpindah saat dibebani. Ini biasanya terdapat bila pada rangka ada **bracing** atau **batang nol** atau ada **sistem pertambatan lateral** khusus.

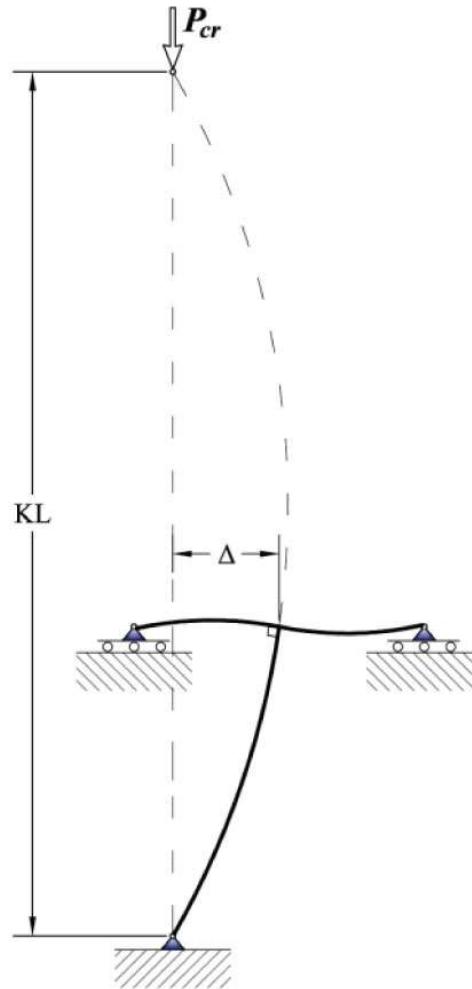
Rangka Bergoyang



(a) Rangka tidak-bergoyang



(b) Rangka tanpa tambatan lateral

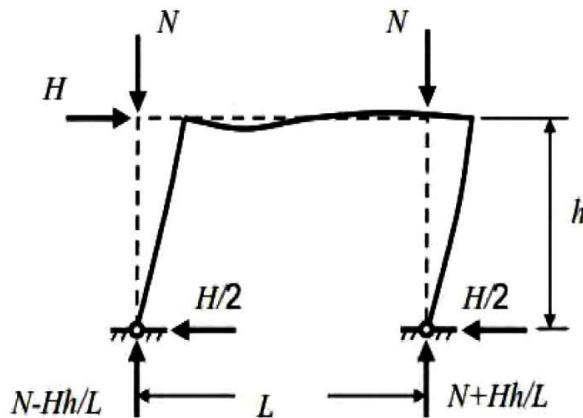


(c) Rangka bergoyang

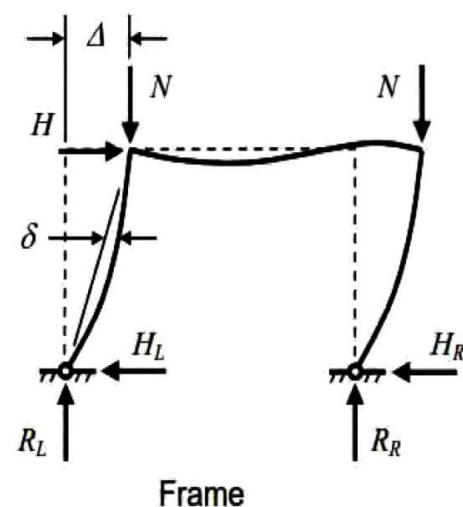
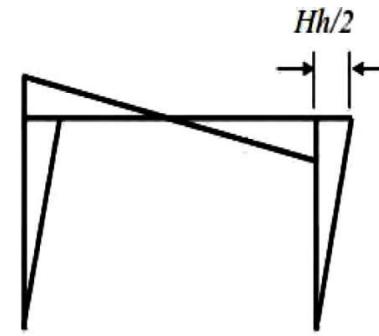
Rangka bergoyang,
jika titik nodal ujung
kolom berpindah
saat dibebani.

Biasanya **tidak**
tersedia bracing.

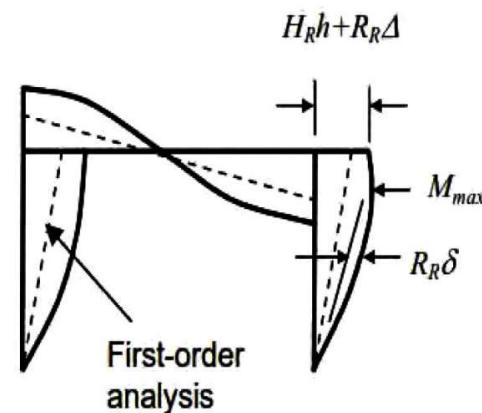
Analisis struktur secara keseluruhan sekaligus memperhitungkan *2nd order effect*



(a) First-order analysis

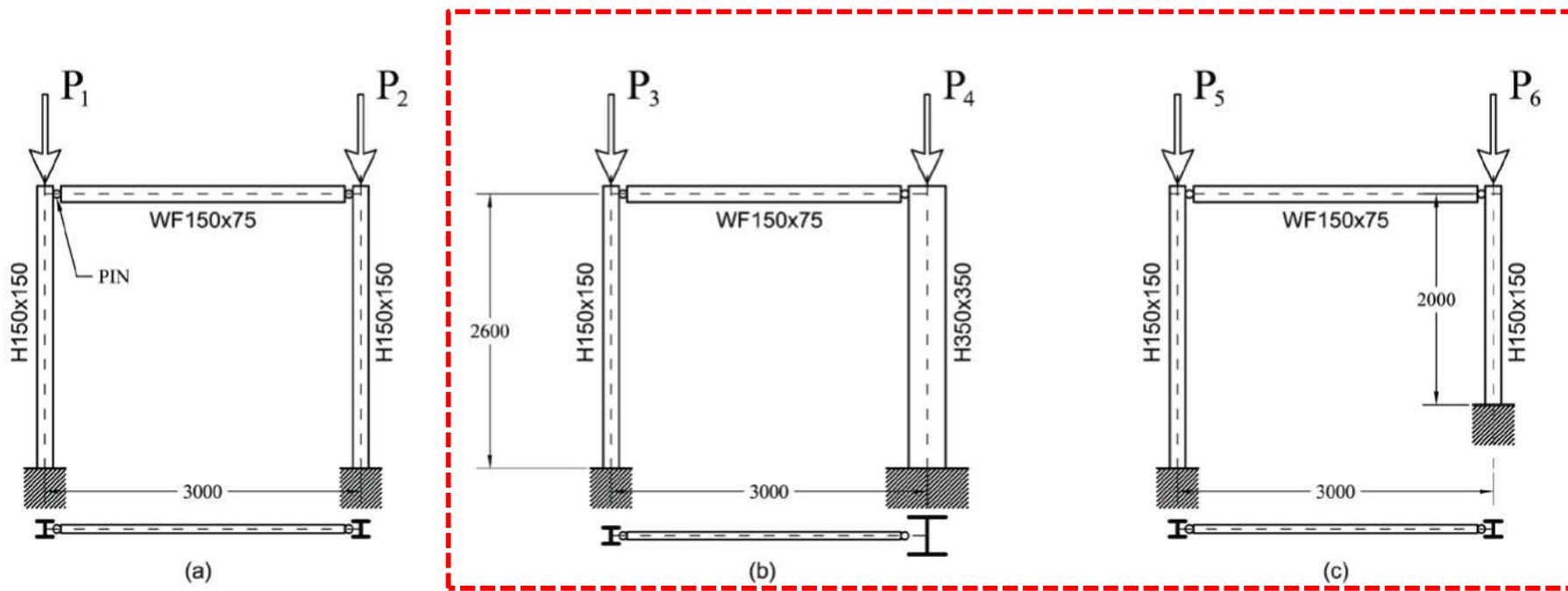


(b) Second-order behaviour



Bending moments

Keunggulan **DAM** (baru) dibanding **ELM** (lama)

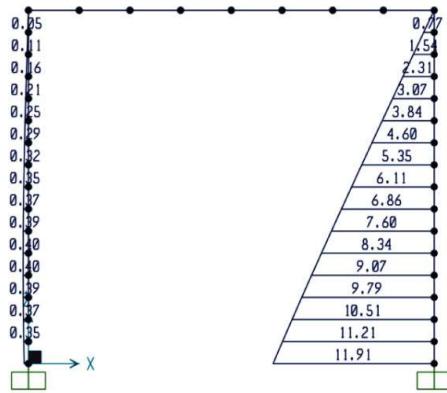
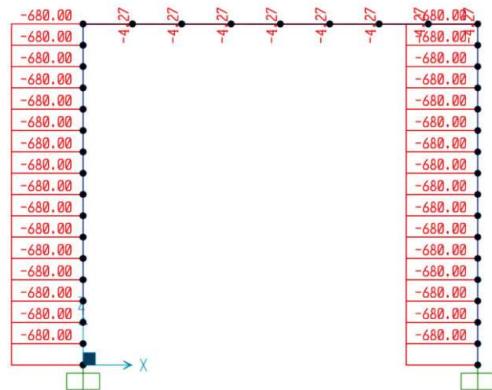
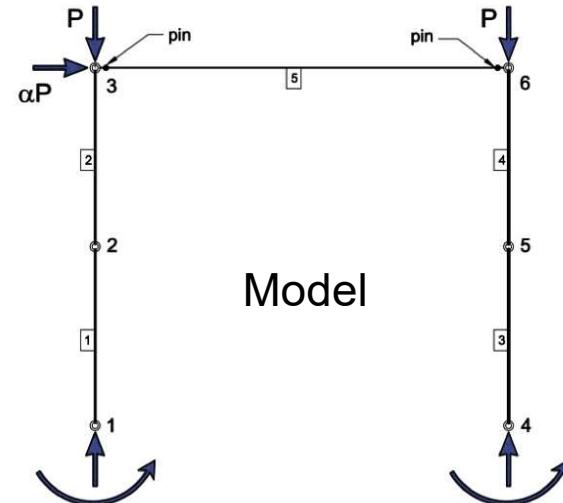
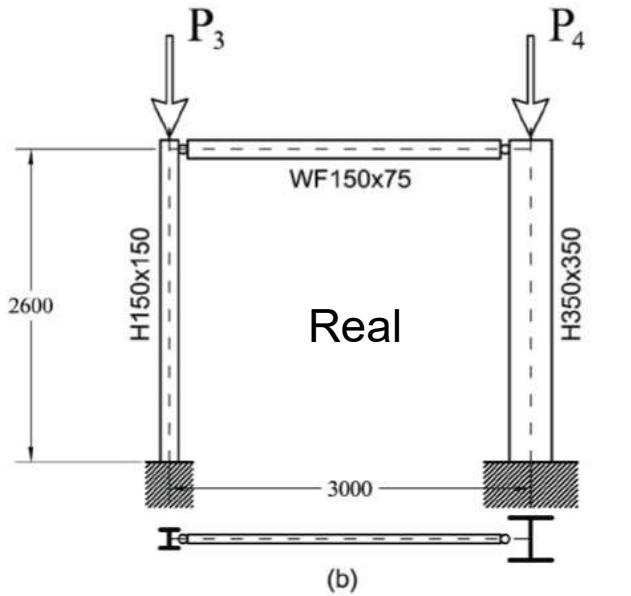


Gambar 13. Dua Kolom Kantilever Terkoneksi Pin-Pin

Kasus (a) evaluasi dengan ELM atau DAM **hasilnya sama saja**.

Kasus (b) dan kasus (c) **jika kondisi beban belum maksimum**, maka **cara (DAM) unggul** karena **bisa menghitung sumbangan kolom kaku ke kolom lemah**.

Solusi DAM untuk kasus (b)



Sudah
menghitung
2nd order
effect

Gambar 16. Hasil analisis struktur dengan opsi P- Δ pada STEP-34

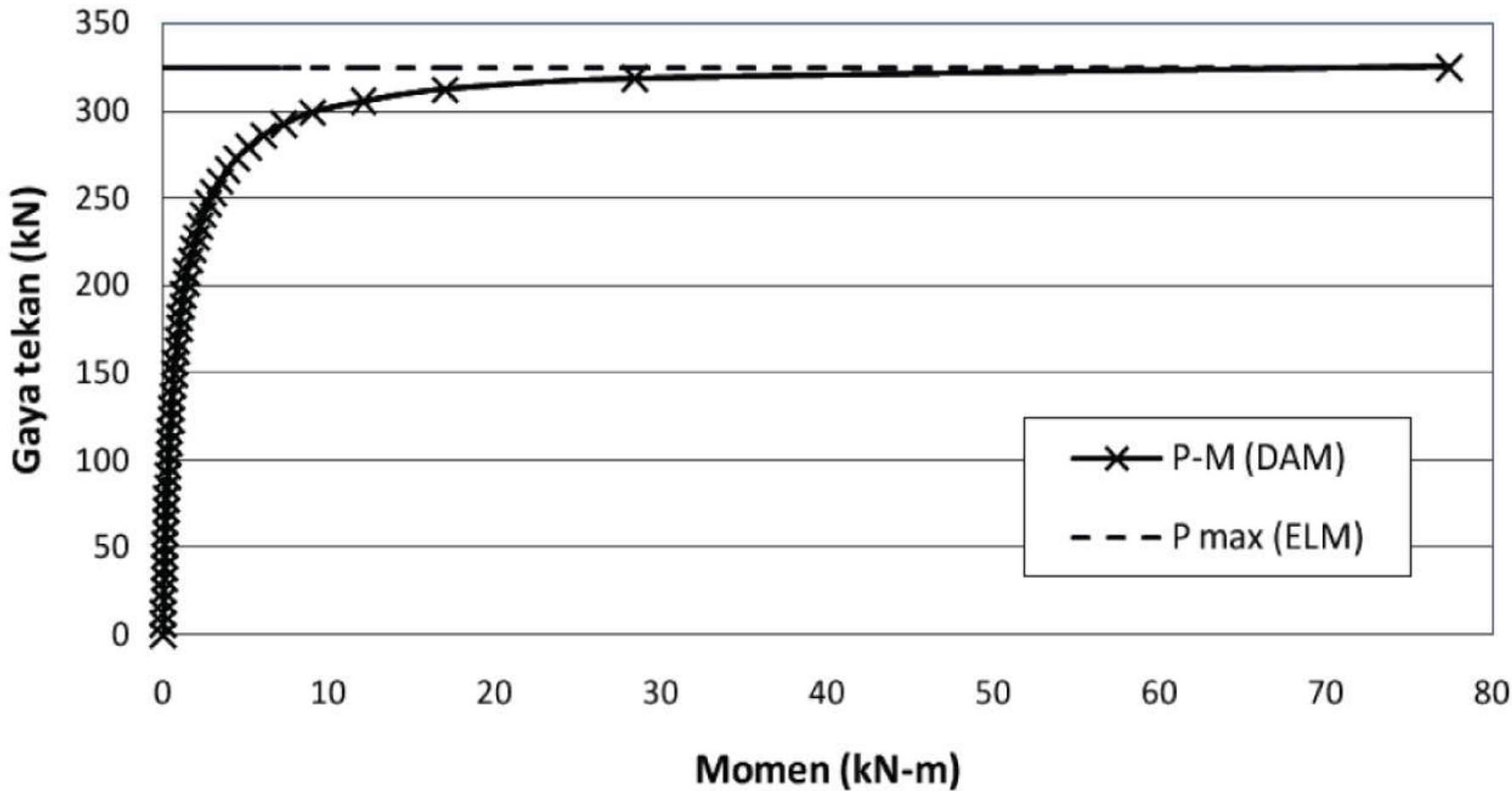
Daya Dukung Maksimum (kN) berdasarkan Cara ELM (lama) vs cara DAM (baru)

Tabel 1. Daya Dukung Maksimum (kN) berdasarkan Cara ELM dan DAM

Metode	(a) – Profil sama			(b) – Profil berbeda			(c) – Panjang berbeda		
	P_1	P_2	P_1+P_2	P_3	P_4	P_3+P_4	P_5	P_6	P_5+P_6
ELM	325	325	650	325	3257	3582	325	491	816
DAM	300	300	600	680	680	1360	360	360	720
	92%			209%			111%		

Jika memakai cara ELM, maka kapasitas struktur ditentukan oleh daya dukung kolom yang terkecil, yaitu kolom kiri.

Cara baru (DAM) lebih konservatif (aman) dibandingkan cara lama (ELM).



Gambar 17. Perilaku nonlinier gaya aksial tekan dan momen pada kolom

Batang NOL, DAM dan Struktur Baja

- Struktur baja umumnya **langsing**, **masalah stabilitas** (problem nonlinier) mempengaruhi kinerjanya.
- Bracing atau **batang diagonal** atau **elemen yang tidak memikul gaya** (analisis elastis linier) sehingga disebut juga **batang NOL**.
- Adanya batang NOL bisa merubah sistem struktur dari **bergoyang** menjadi **tidak-bergoyang**. Itu akan meningkatkan kapasitas daya dukung tekan.
- **Kinerja batang NOL** dapat dievaluasi dengan **DAM**, cara baru perencanaan struktur baja mengacu SNI 1729:2015 atau AISC (2010)

DAM untuk Analisis Kuat Ultimate Struktur Baja

Melacak Perilaku Keruntuhan
Scaffolding Baja Hasil Uji Beban di
Laboratorium Puskim-Bandung

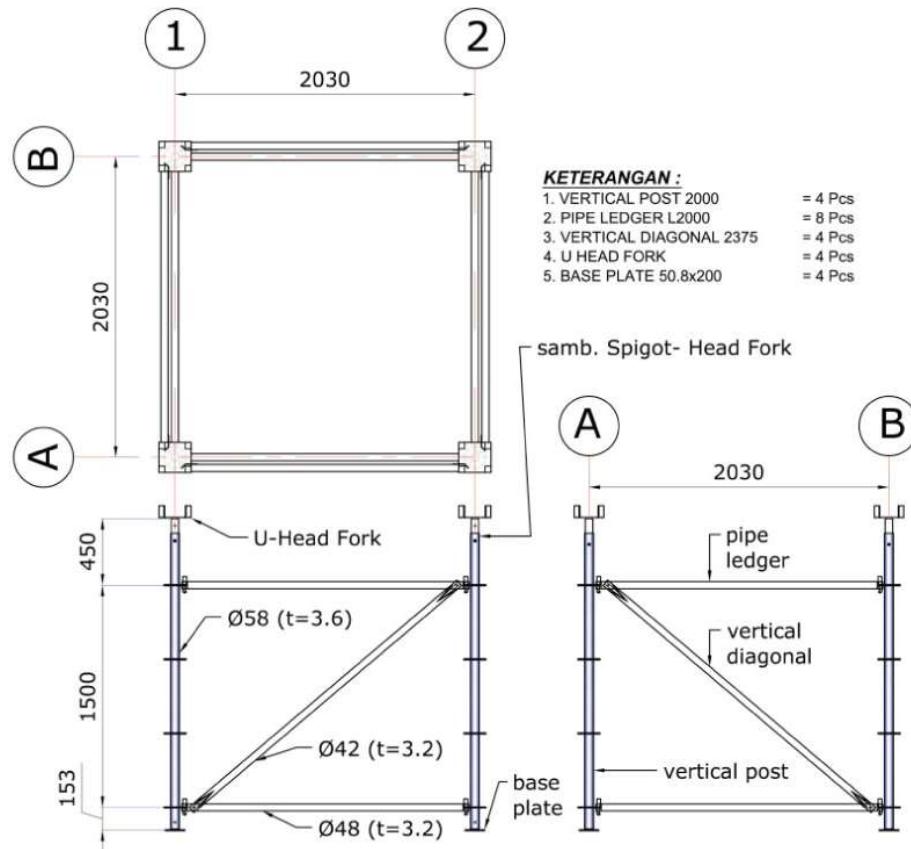
Struktur baja yang akan diuji beban



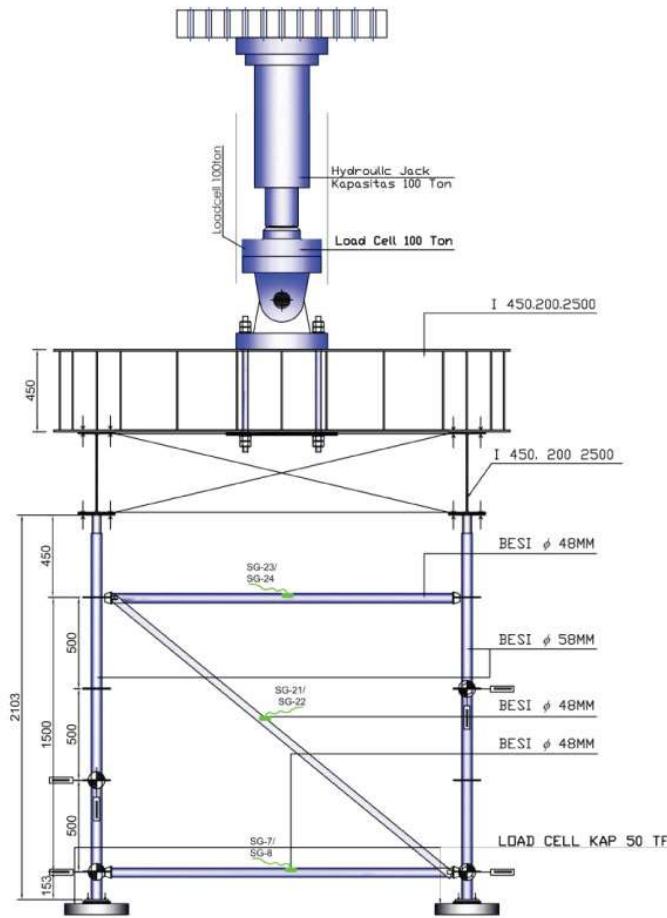
Gambar 18. Tipe *scaffolding* baja yang ditinjau (Dewobroto 2016)

Struktur baja scaffolding produk dalam negeri, telah teruji di proyek-proyek konstruksi. Akan diuji beban sampai maksimum.

Konfigurasi Uji Beban di Laboratorium



Gambar 19. *Scaffolding* Tipe-I: H 2000 L 2000 W2000



Gambar 20. Konfigurasi pengujian beban yang akan dilaksanakan

Modul penyusun scaffolding baja mandiri yang terkecil.

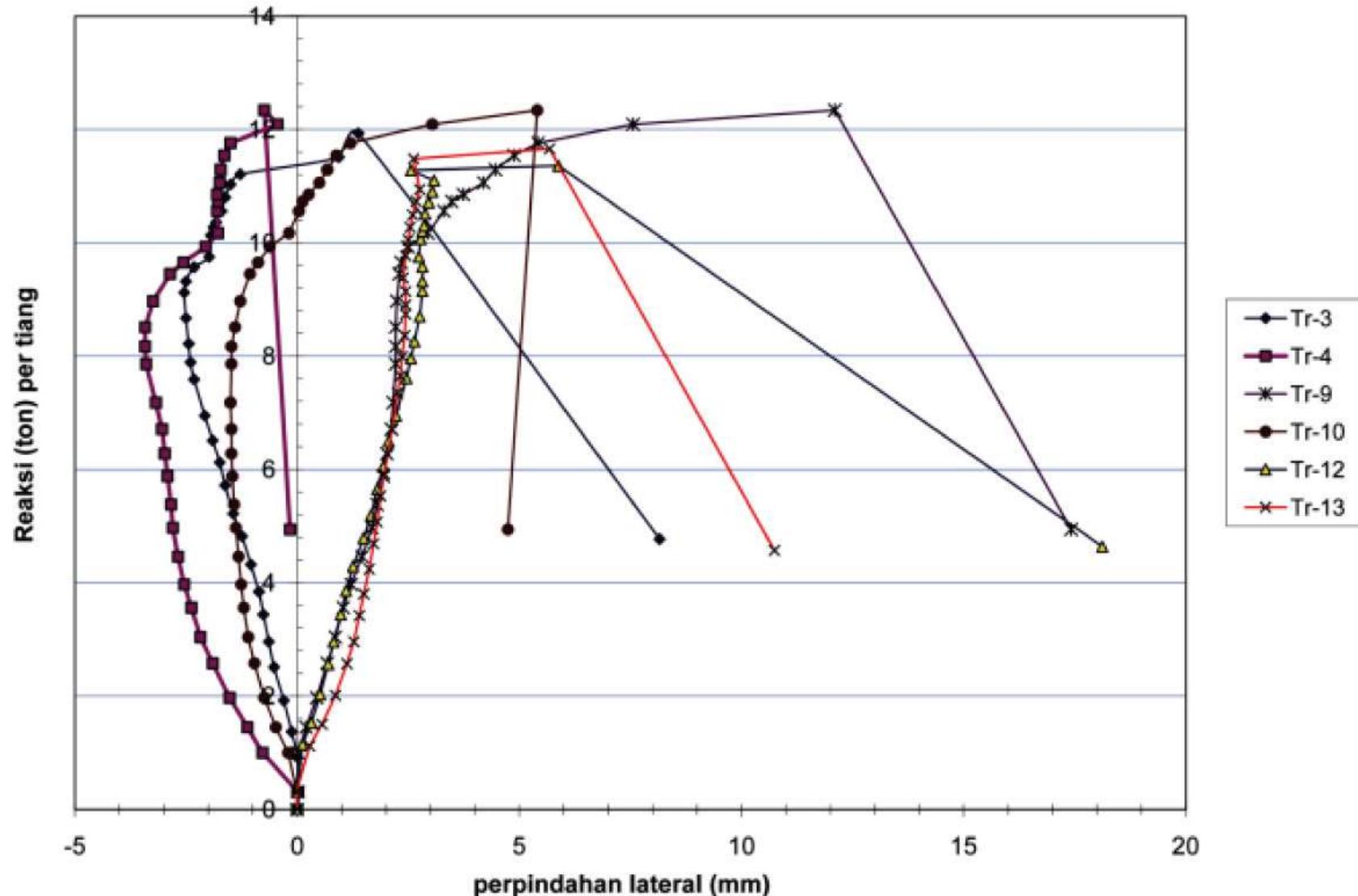


Gambar 21. Situasi pengujian *scaffolding* (Dewobroto 2013a)



Gambar 22. Bentuk kerusakan pada *scaffolding* uji (Dewobroto 2013a)

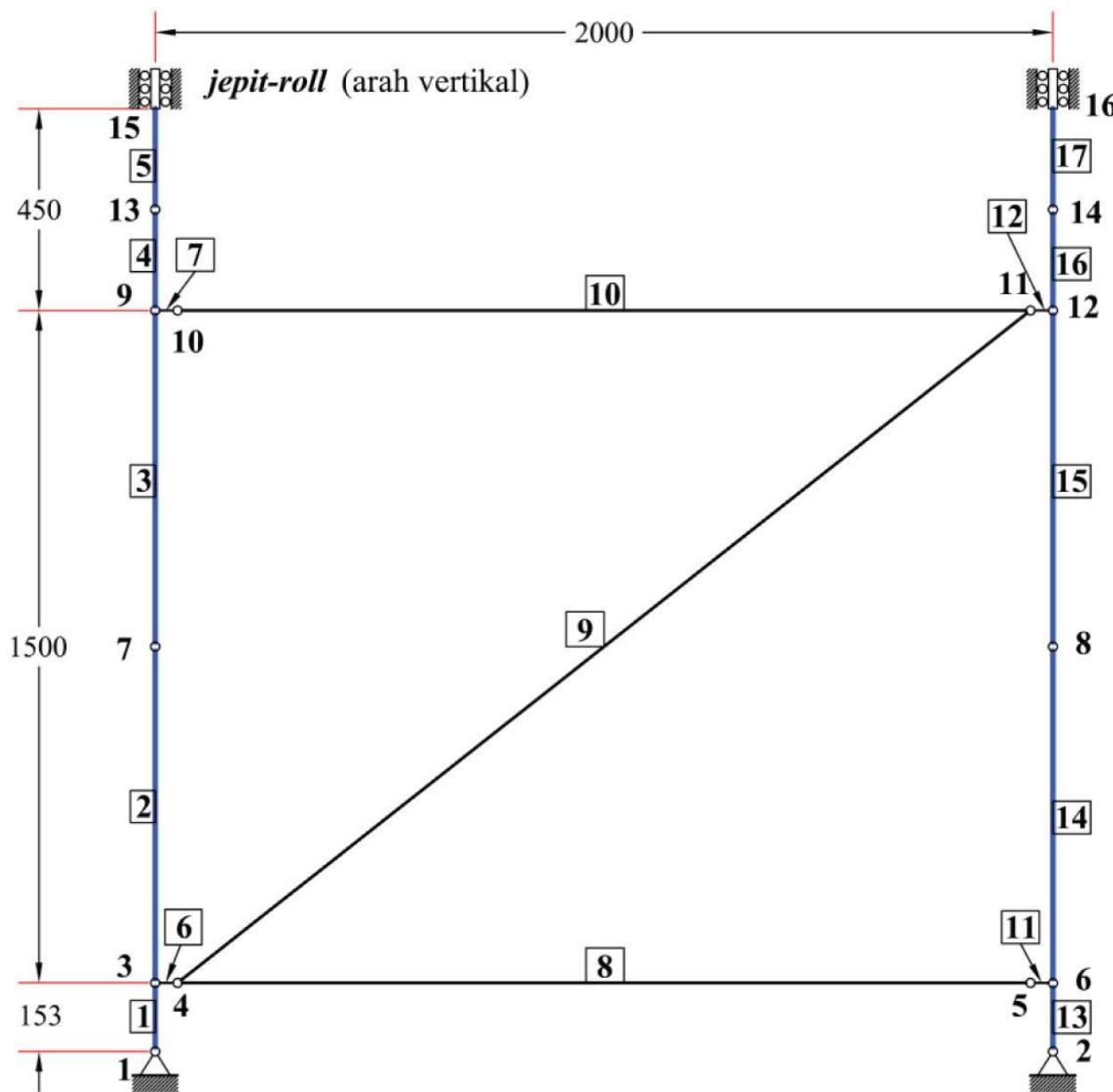
Rekaman Uji Beban sampai Runtuh di Lab.



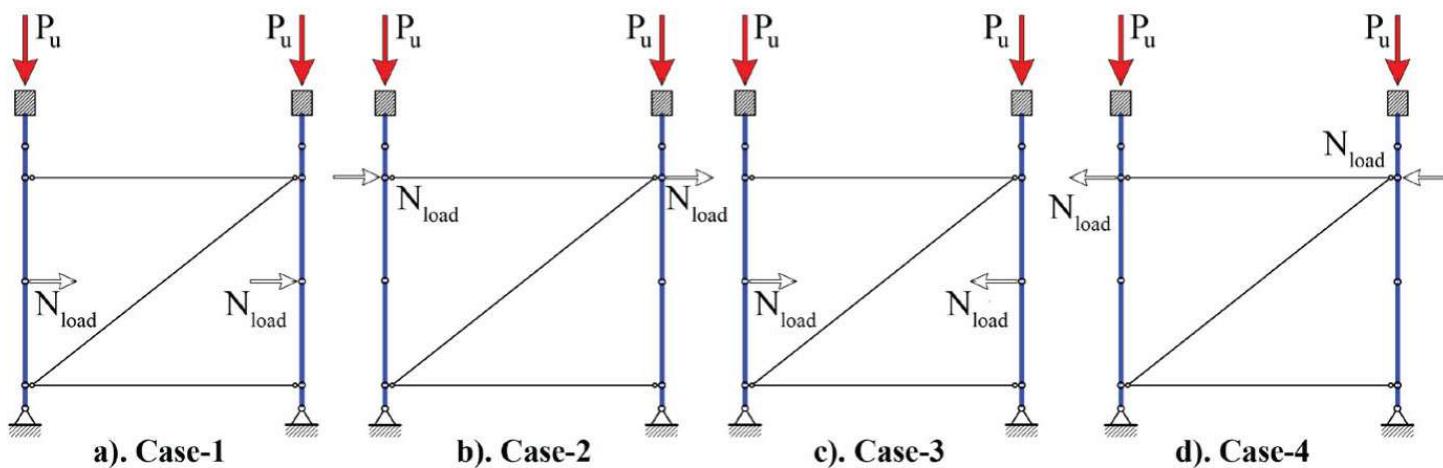
Gambar 23. Hasil uji eksperimental *Scaffolding* PT. Putra Jayasentosa

Pemodelan Numerik yang Terkalibrasi dengan Hasil Uji Empiris di Laboratorium

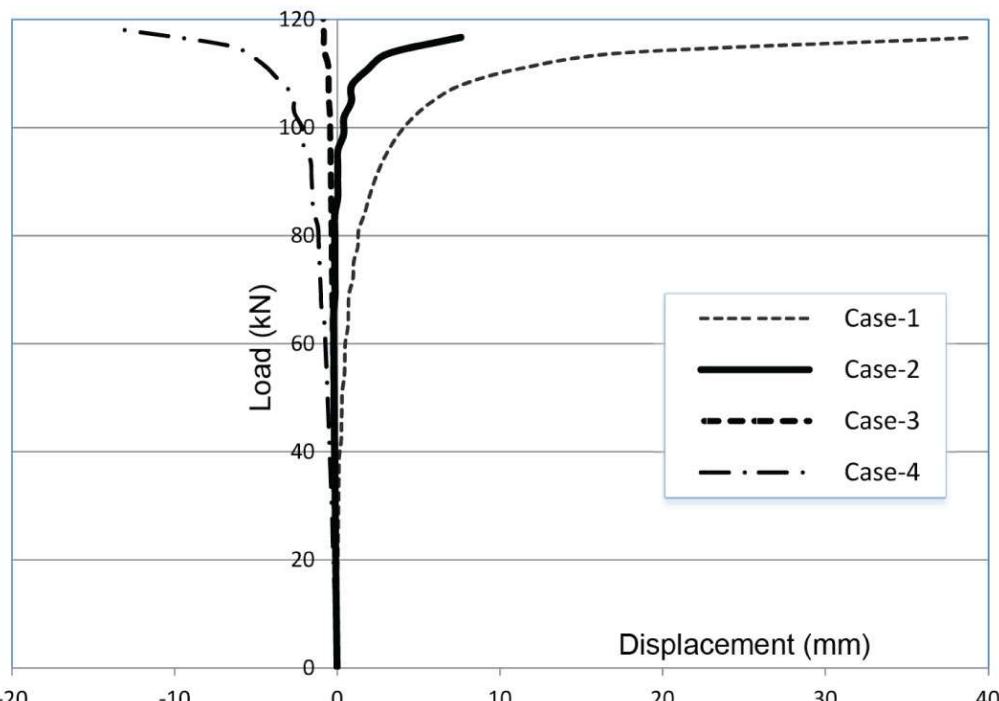
Model yang terkalibrasi dapat dikembangkan untuk simulasi numerik sistem struktur yang lebih kompleks



Gambar 25. Sistem Penomoran Model Struktur *Scaffolding* – 1 tingkat

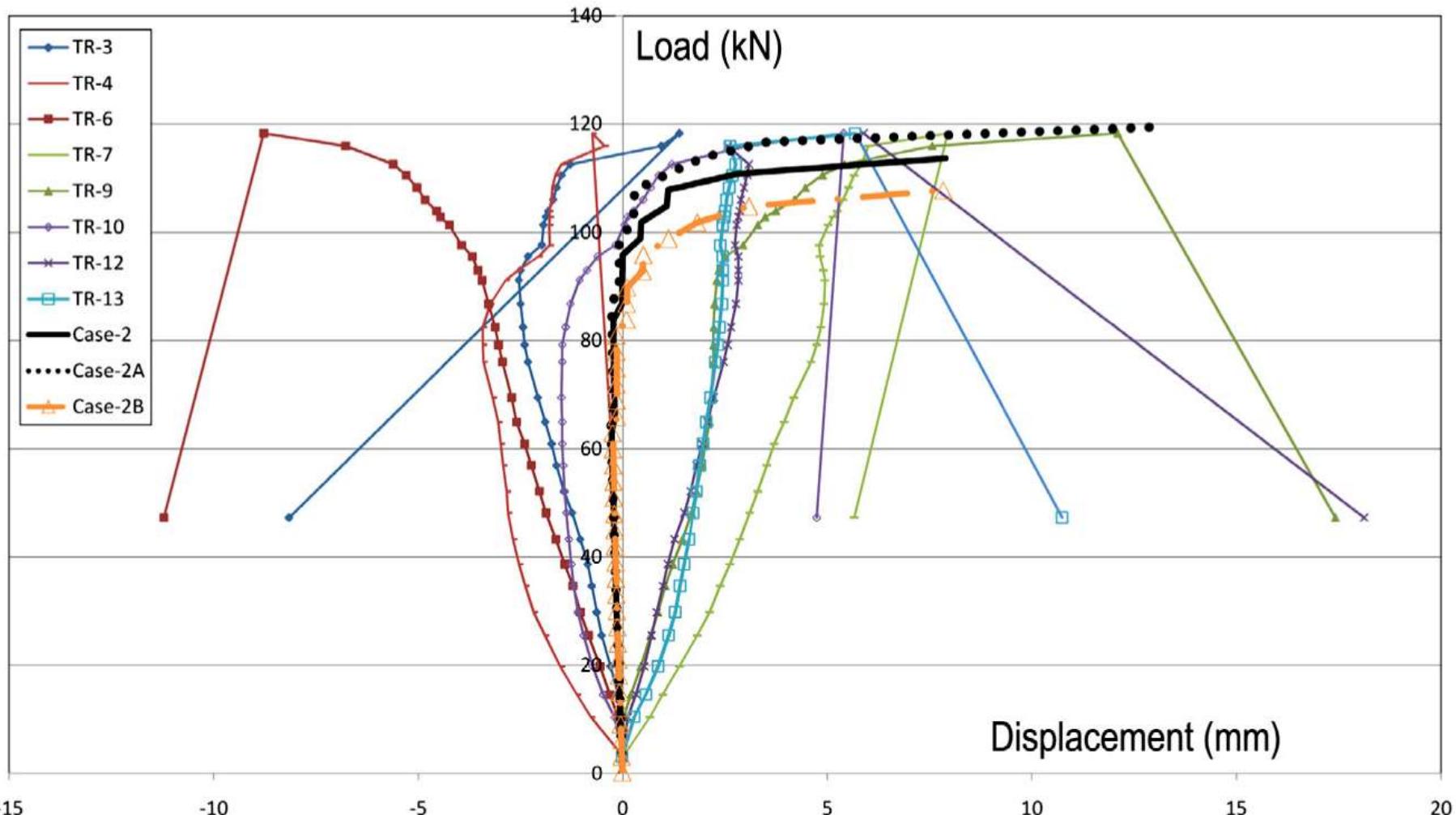


Gambar 30. Variasi Penempatan Notional (N_{load}) – Perancah Baja Tidak Bertingkat



Gambar 31. Kurva $P-\Delta$ (kN-mm) dari berbagai variasi pemasangan beban notional

Simulasi Numerik yang Terkalibrasi

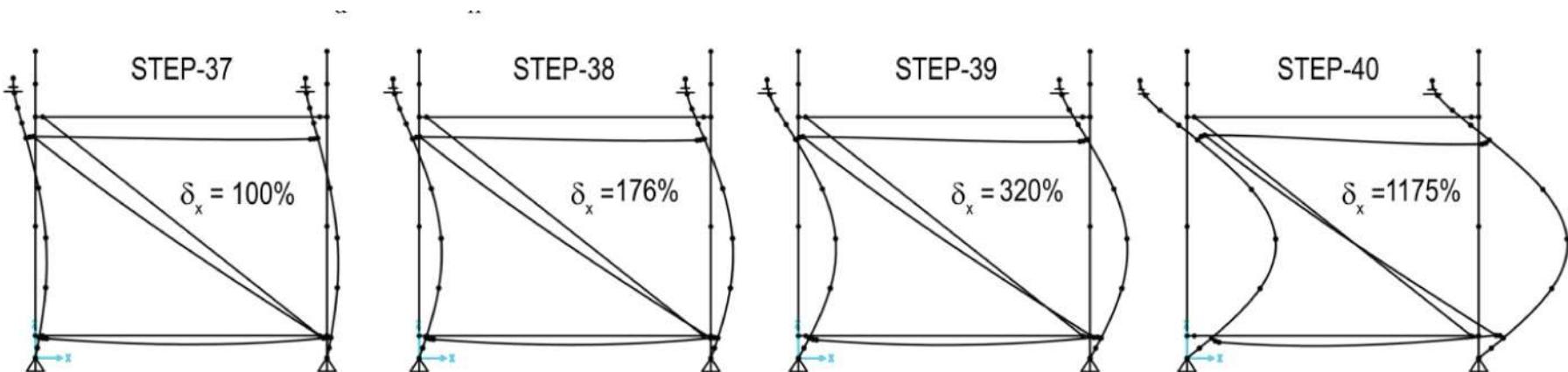


Gambar 32. Kurva P- Δ Uji Empiris vs Simulasi DAM (Puskim 2011)

Tabel 5. Hasil analisis stabilitas perancah tidak-bertingkat (Case-2A)

STEP	UX#7(mm)	RZ#1(kN)	P-#14(kN)	M33-#14(kNm)	Note
37	1.10080	110.74471	-111.07195	-0.18151	Check-3
38	1.94281	113.71173	-114.06932	-0.26949	Check-2
39	3.52047	116.65575	-117.06472	-0.43269	Check-1
40	12.93401	119.35227	-120.03893	-1.39921	Buckle

Catatan : beberapa STEP, ada yang sengaja dihapus



Gambar 33. Perubahan deformasi pada tiap STEP menjelang instabilitas (Case-2A)

Kapasitas Dukung Model Terkalibrasi

Tabel 6. Check kolom interaksi – Model Terkalibrasi

Check	STEP	P_u (kN)	M_u (kNm)	$R=P_u/\phi P_n$	$R+ 8/9M_u/\phi M_n$	Note
1	39	-117.065	-0.43269	1.004	Not check	Not-OK
2	38	-114.069	-0.26949	0.979	1.053	Not-OK
3	37	-111.072	-0.18151	0.953	1.002	OK

Hasil analisis untuk tiap tahapan beban dievaluasi terhadap persyaratan tegangan gabungan mengacu AISC Chapter H1.

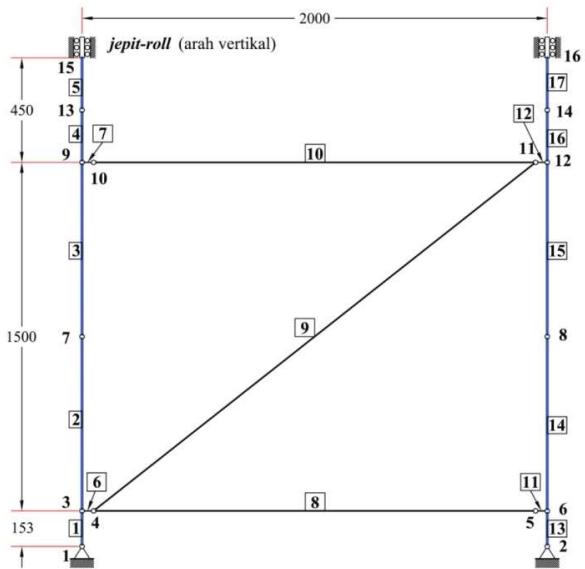
Hasil evaluasi tiap tahapan beban dan ditampilkan dalam tabel di atas. Pada step ke-37 persyaratan $R_u / \phi R_n \approx 1$, berarti **kapasitas dukung ultimate perancah baja** tercapai sebesar **$P_u = 111$ kN**.

Dibandingkan **uji beban empiris** adalah **11.82 ton** atau **116 kN**.

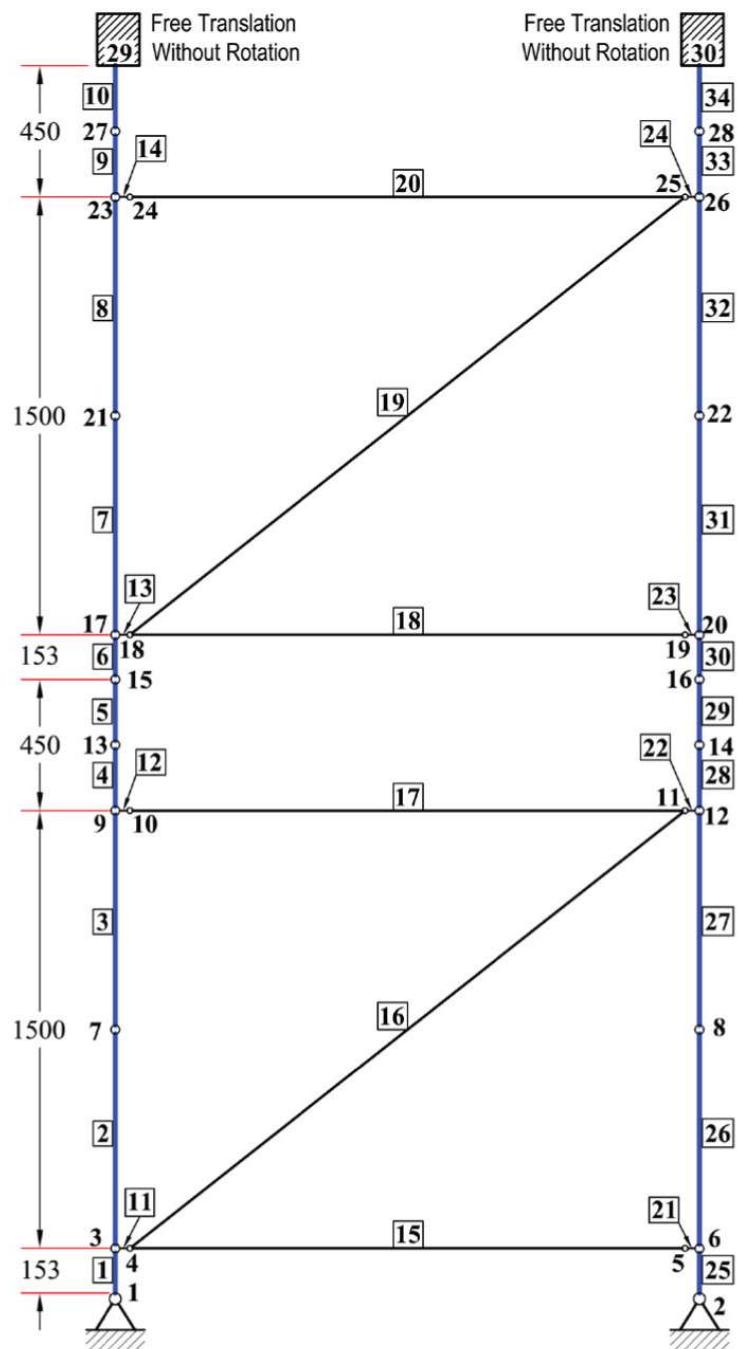
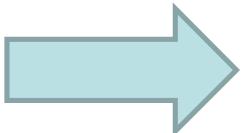
Model Terkalibrasi yang dikembangkan dengan cara parametrik

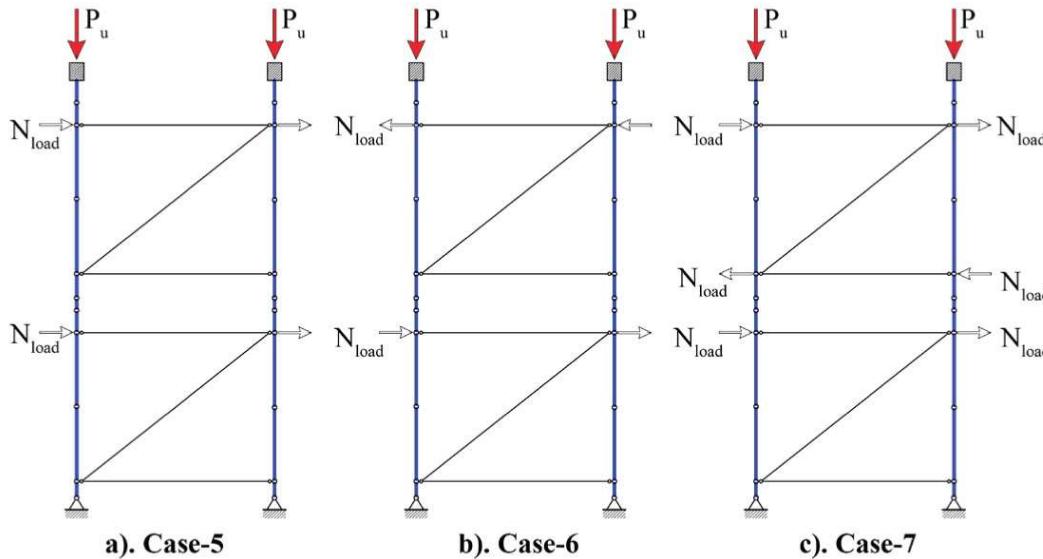
simulasi numerik terkalibrasi dapat dikembangkan untuk solusi problem besar tanpa kendala ruang & tempat

Calibrated Modeling

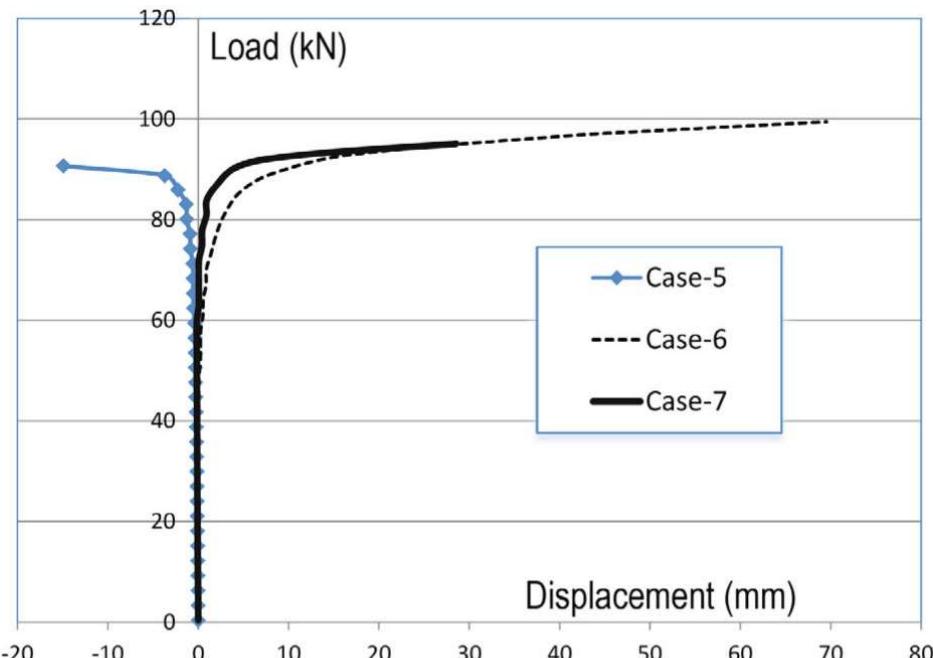


Parametric
Modeling





Gambar 35. Variasi Penempatan Notional (N_{load}) – Model Parametrik

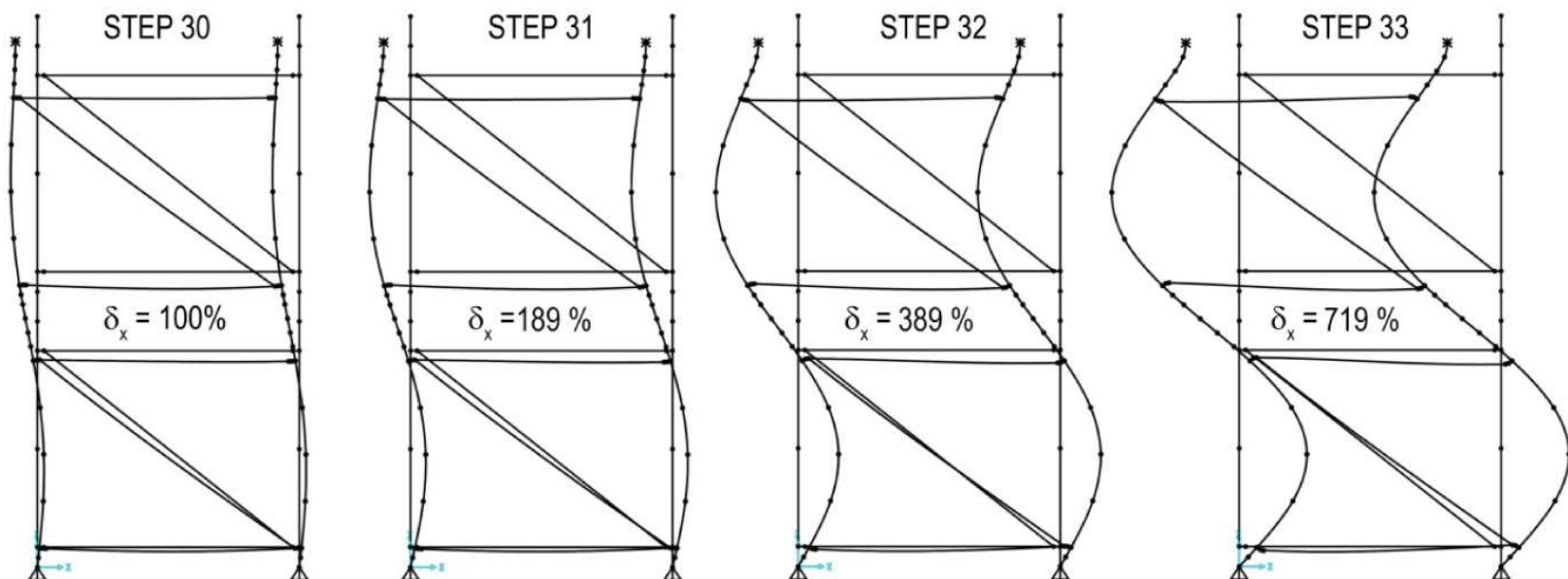


Gambar 36. Kurva P- Δ titik nodal #7 terhadap variasi penempatan beban notional

Tabel 7. Hasil analisis stabilitas perancah bertingkat – Case-7

STEP	UX#7(mm)	RZ#1(kN)	P-#2(kN)	M33-#2(kNm)	Note
30	3.960	90.18136	-90.14139	-0.458	Check-3
31	7.465	91.99879	-91.96898	-0.815	Check-2
32	15.416	93.47612	-93.46949	-1.623	Check-1
33	28.467	95.04253	-95.07358	-2.956	Buckle

Catatan : beberapa STEP, ada yang sengaja dihapus



Gambar 37. Perubahan deformasi pada tiap STEP menjelang instabilitas Case-7

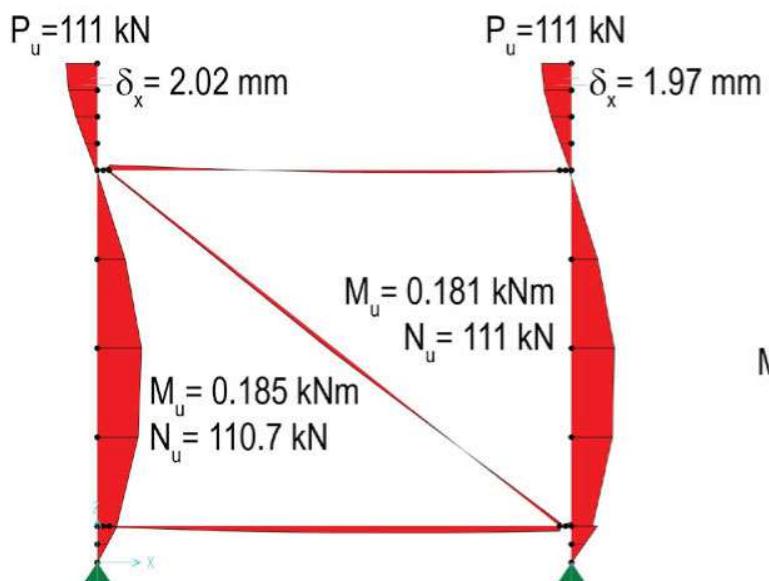
Kapasitas Dukung Model Struktur Bertingkat

Tabel 8. Check kolom interaksi – Model Parametrik

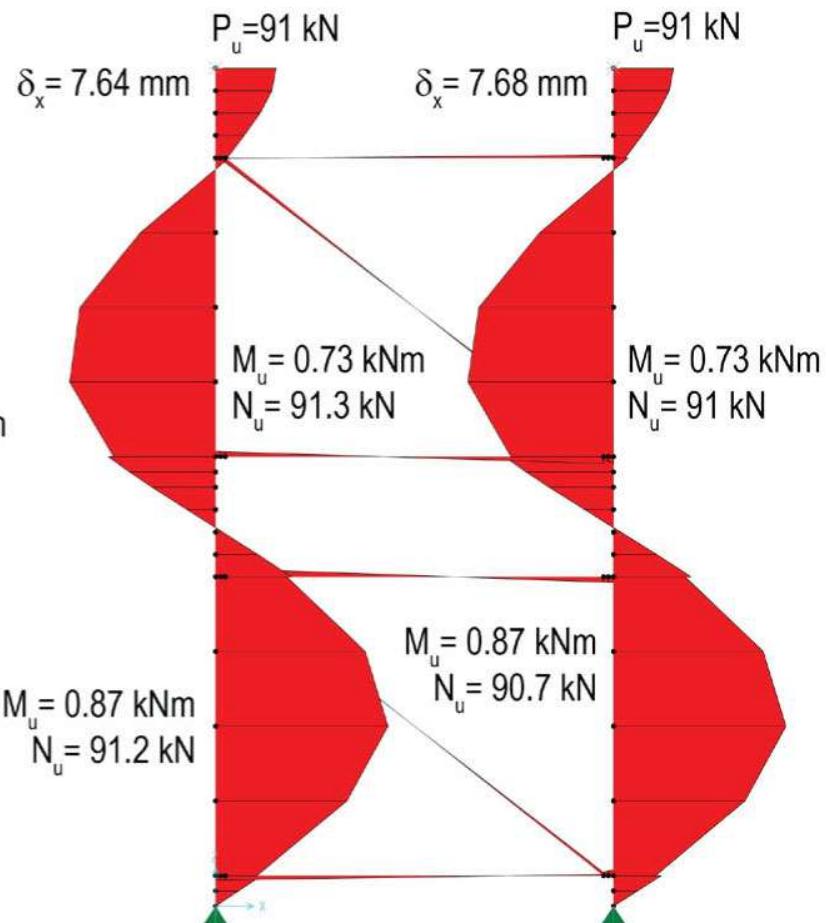
Check	STEP	P_u (kN)	M_u (kNm)	$R=P_u/\phi P_n$	$R+ 8/9M_u/\phi M_n$	Note
1	32	-93.4695	-1.623	0.802	1.245	Not Ok
2	31	-91.9690	-0.815	0.789	1.011	Not Ok
3	30	-90.1414	-0.458	0.773	0.898	Ok

Diperkirakan beban maksimum antara STEP 30 dan 31, diambil nilai rata-rata maka $P_u = (91.97+90.14)/2 \approx 91$.

Itu berarti dibanding model awal maka model parametrik dengan menggabungkan vertikal dua model awal **terjadi penurunan kapasitas**, dan tinggal **82%**.

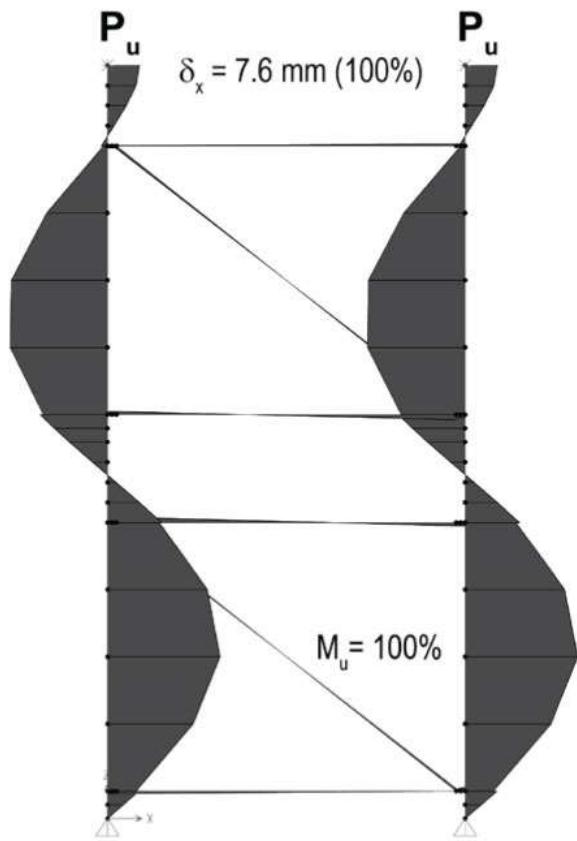


a). Case-2A

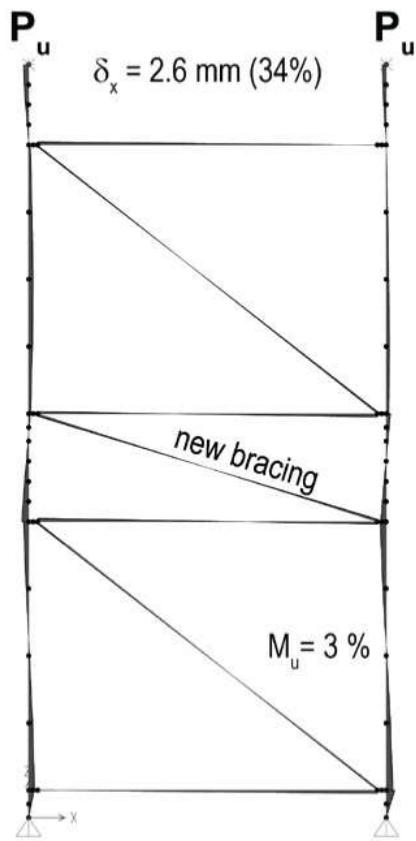


b). Case-7

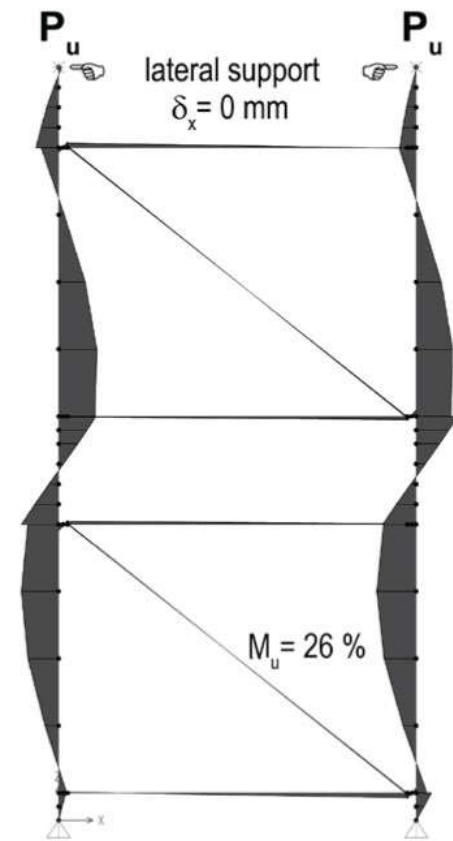
Gambar 38. Perbandingan perilaku perancah tingkat vs non-tingkat pada kondisi *ultimate*



a). Case-7

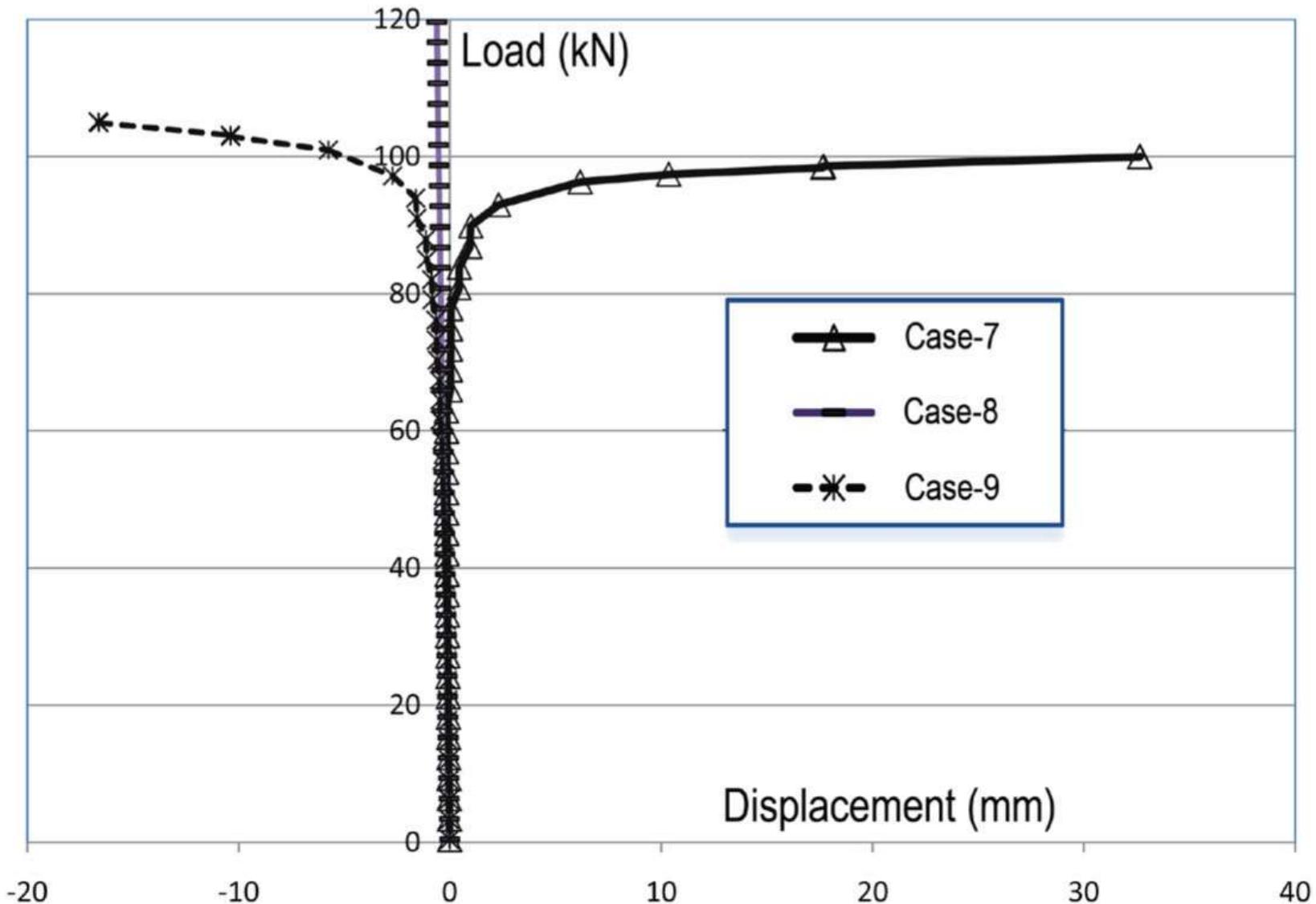


b). Case-8



b). Case-9

Gambar 39. Pengaruh “batang NOL” dan “tumpuan lateral” pada $P_u = 91 \text{ kN}$



Gambar 40. Pengaruh modifikasi terhadap perilaku struktur

DAM untuk Analisis Keruntuhan Jembatan Gantung di Pacitan 2019

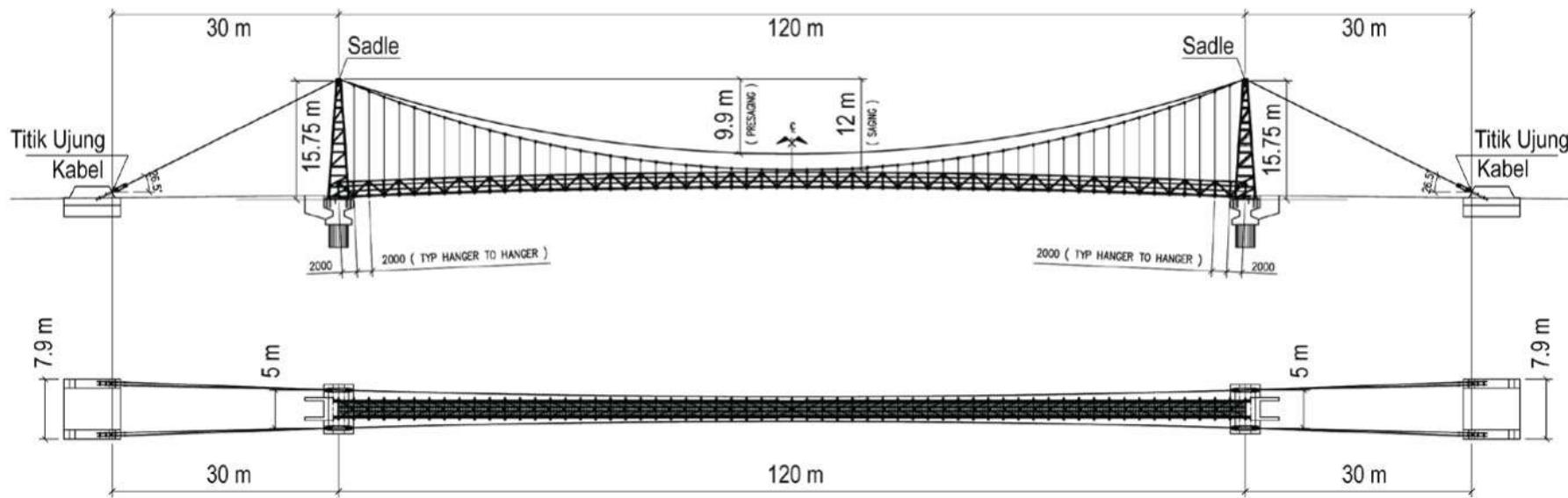
simulasi numerik untuk evaluasi
penyebab keruntuhan struktur real
secara cepat dan sederhana



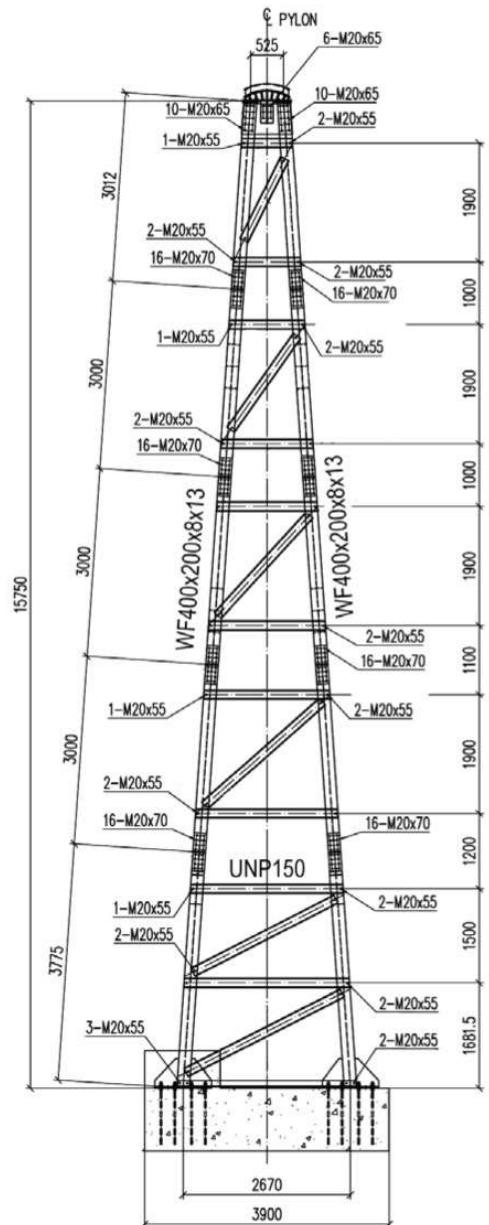
Gambar 41. Kondisi Jembatan Gantung Banjarsari II (Ref. Balai Besar VIII - PUPR)



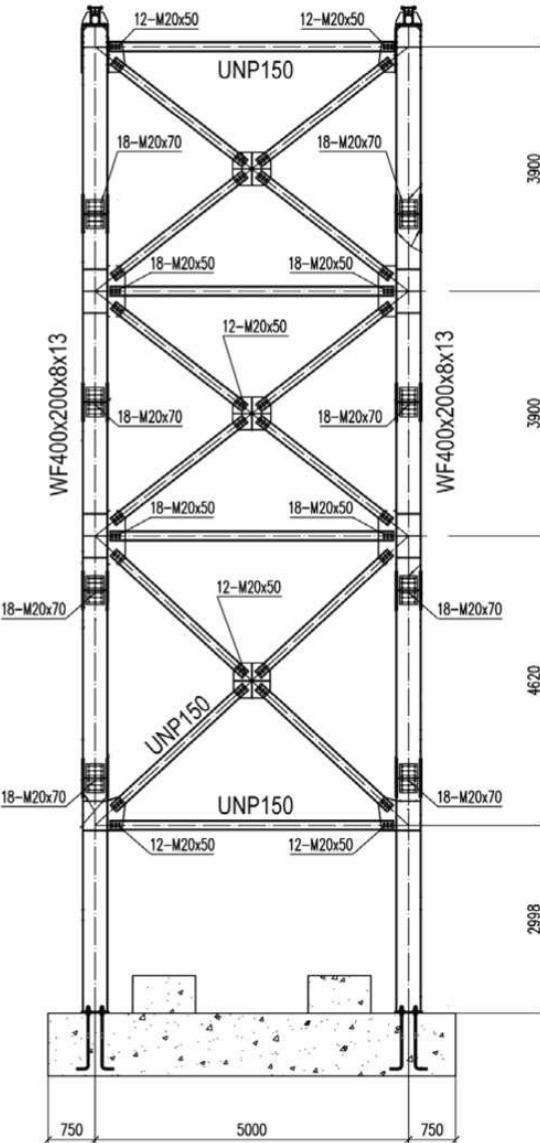
Gambar 42. Kondisi kerusakan sambungan *bracing* (Ref. Balai Besar VIII - PUPR)



Gambar 43. Jembatan Gantung tipe Rigid Kelas I (120 m)



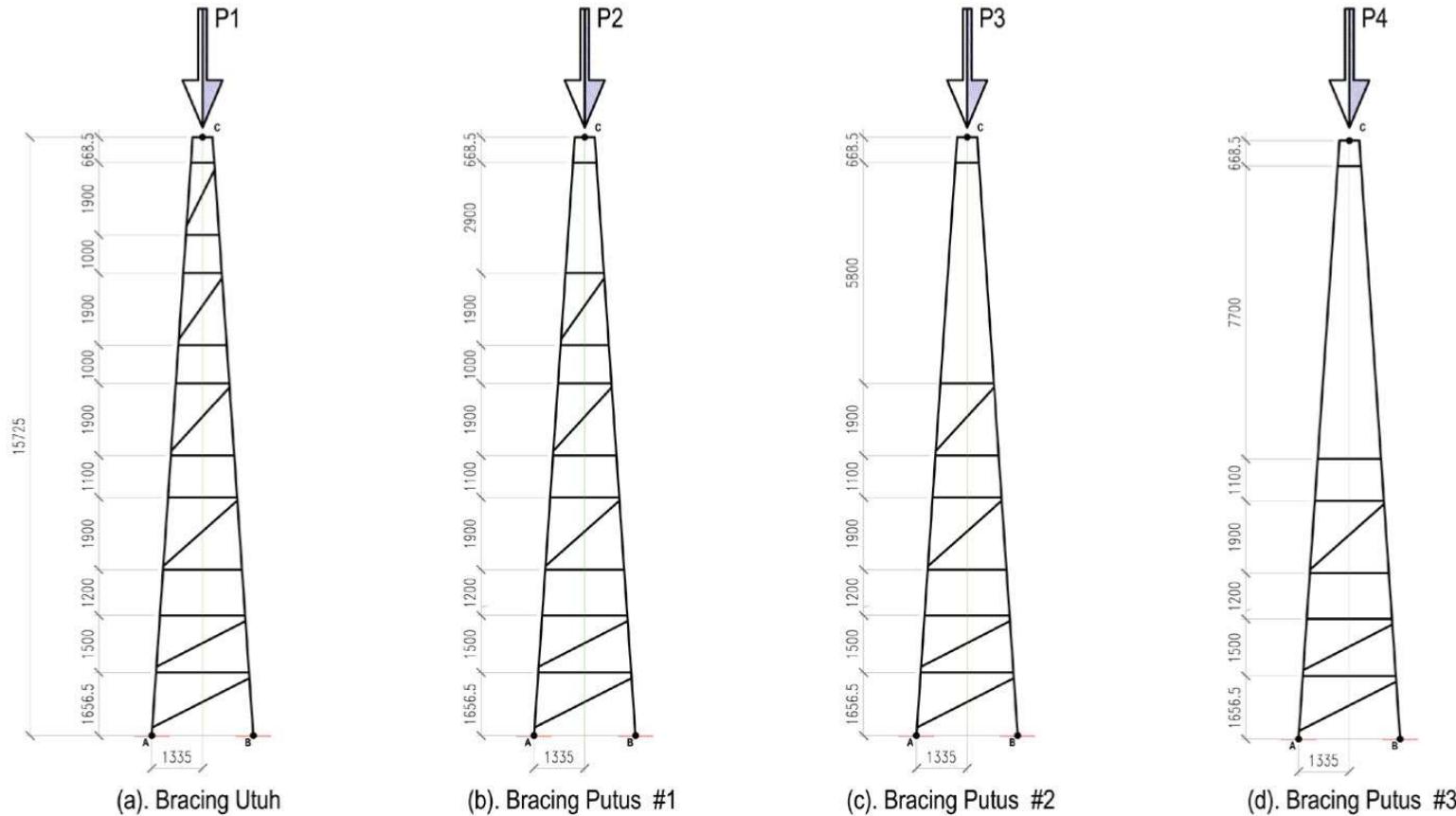
(a). Searah Bentang Jembatan



(b). Tegak Lurus Bentang Jembatan

Gambar 44. Detail Pilon Jembatan yang Runtuh

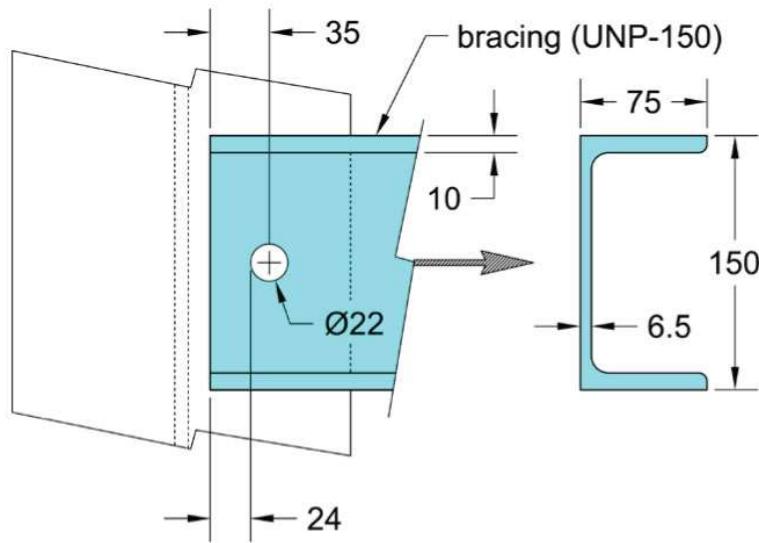
Pengaruh Bracing Terhadap Kapasitas Pier



Gambar 45. Simulasi pilon dengan *bracing* yang dihilangkan

Konfigurasi Pilon	KL	KL/r _{min}	Perilaku Kolom	ϕP _n	% relatif
Bracing Utuh	1900	41.9	tekuk inelastis	1694 kN	100%
Bracing Putus #1	2900	63.9	tekuk inelastis	1500 kN	89%
Bracing Putus #2	5800	134.6	tekuk elastis	787 kN	46%
Bracing Putus #3	7700	170.0	tekuk elastis	454 kN	27%

Sambungan Bracing Tidak Memadai ?!?



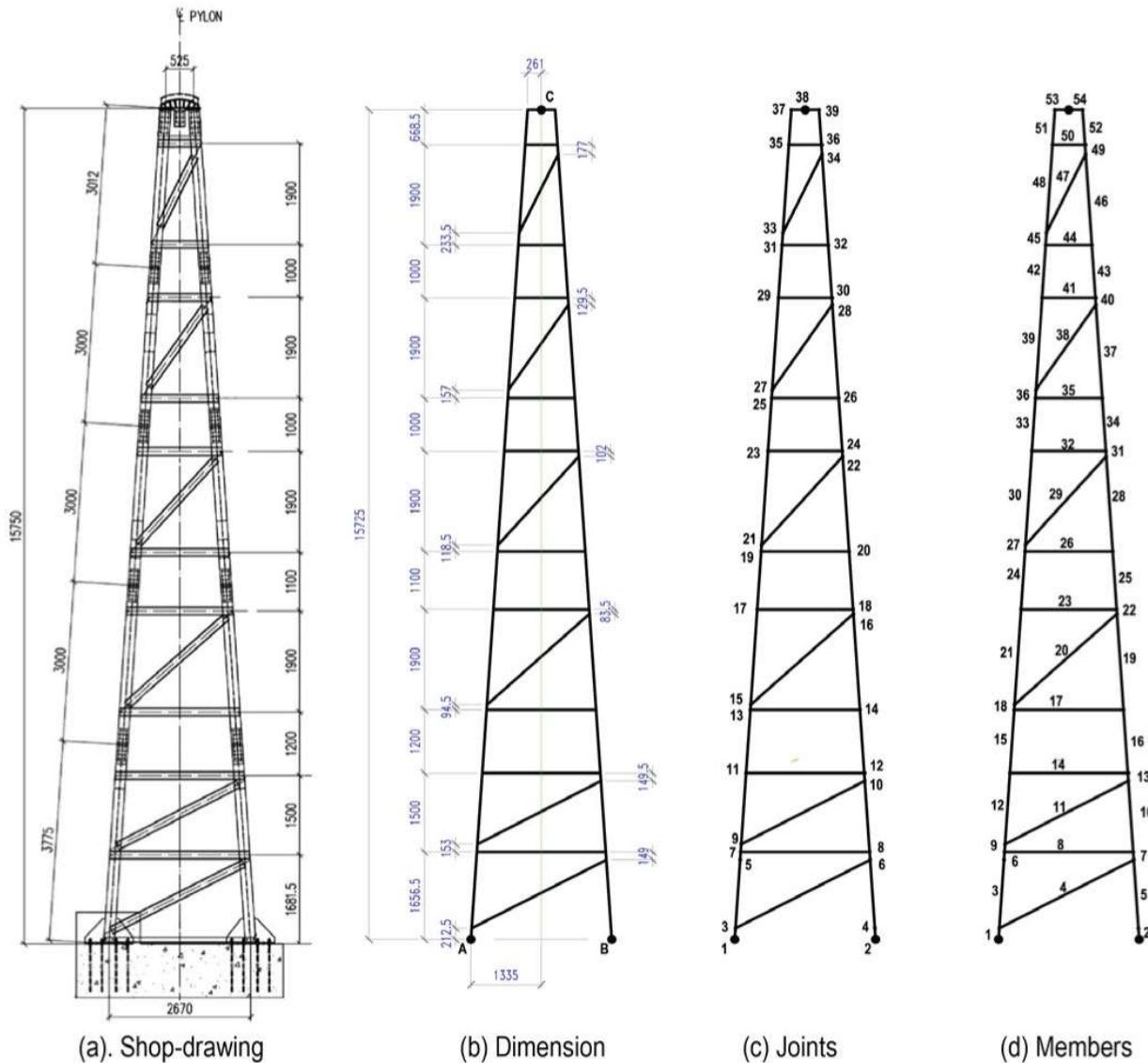
Gambar 53. Detail sambungan *bracing* (pilon arah tekuk)

Sambungan satu (1) baut pada bracing karena **dianggap batang NOL**. Jika ada gaya di bracing tentu akan dipertanyakan kapasitasnya.

Batang tarik $\phi P_n = 401 \text{ kN} \gg$ sambungan $\phi R_n = 93.6 \text{ kN}$

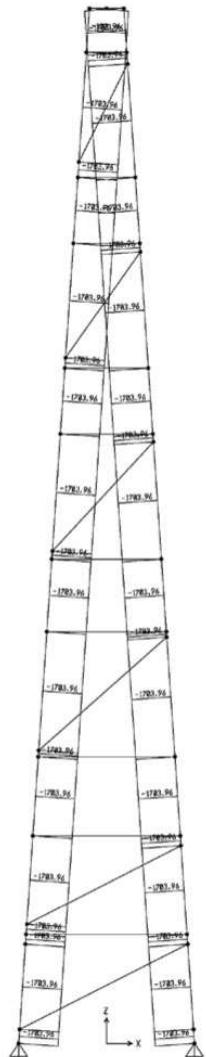
Jadi **hanya ±23%** dari kekuatan bracing itu sendiri.

Analisis Struktur – Pemodelan Numerik

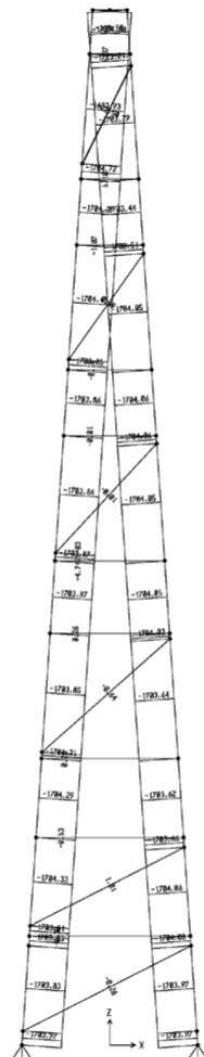


Gambar 46. Pemodelan Struktur Pilon Searah Bidang Jembatan (arah tekuk)

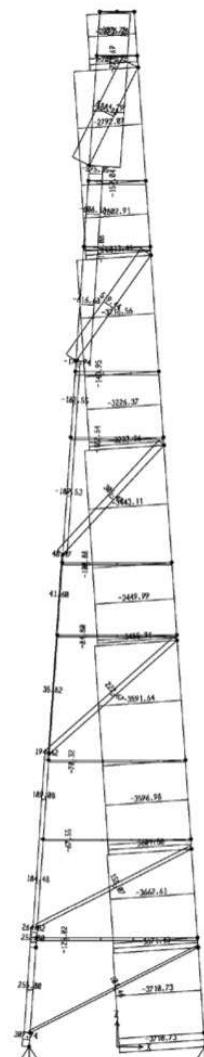
Batang Nol Jika Bebannya Sentris



(a)



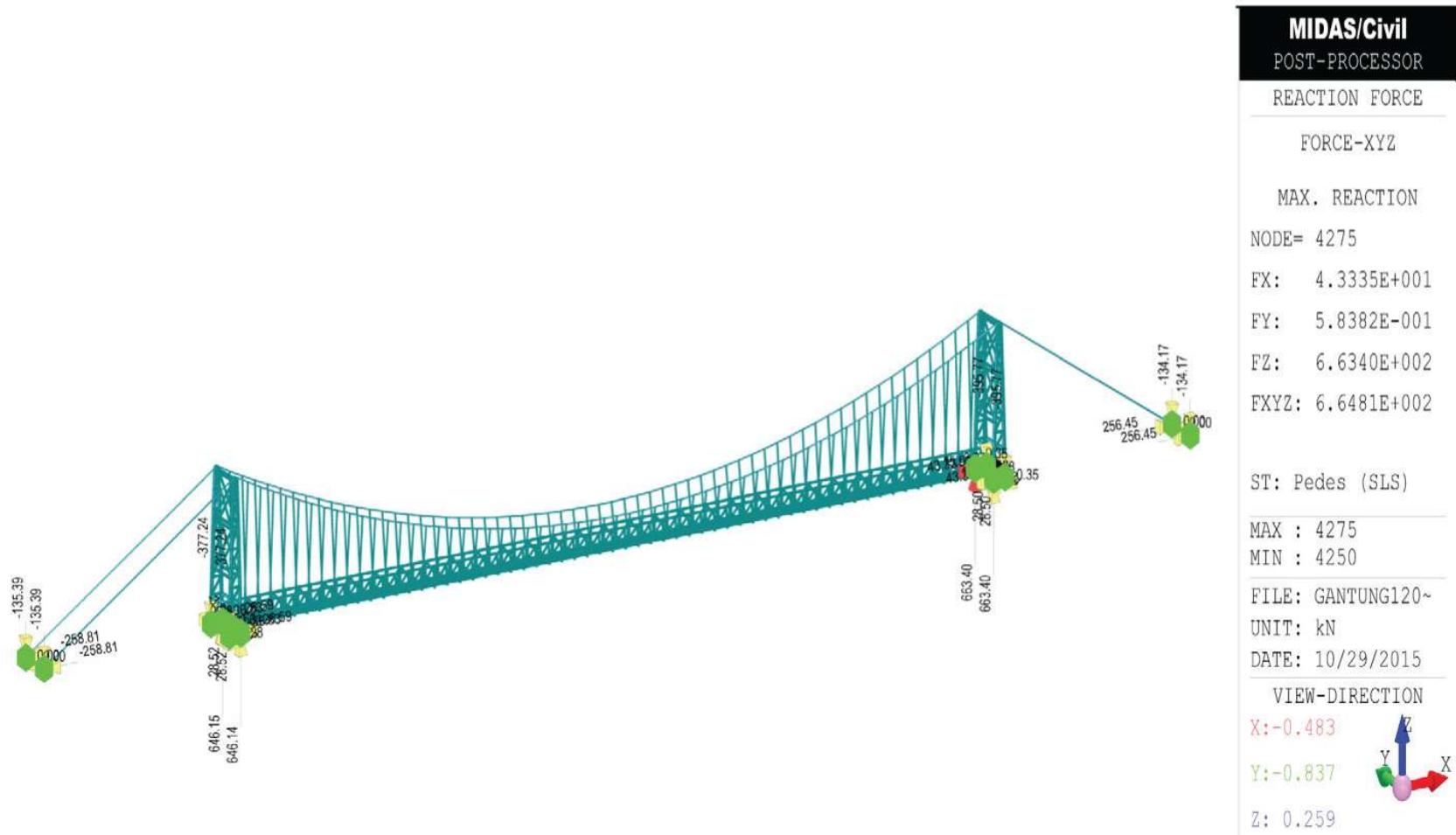
(b)



(c)

Gambar 47. Diagram Gaya Aksial Pilon dengan Beban Titik di Puncak

Desain sudah *STATE OF THE ART*, tetapi masih saja terjadi kegagalan struktural



Gambar 48. Program Komputer Perencanaan Jembatan Gantung (AMKA 2015)

Untuk evaluasi penyebab keruntuhan, dipelajari jembatan gantung lain yg serupa.

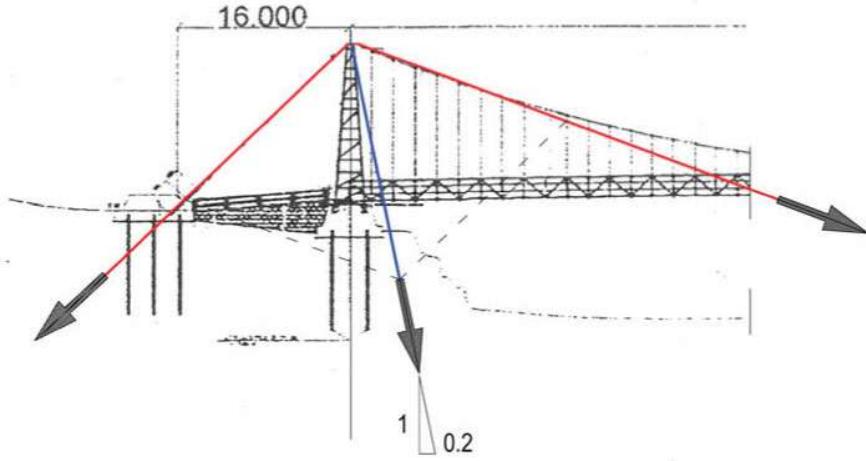


Gambar 49. Kunjungan ke proyek jembatan gantung Ciledug Wetan, Cirebon

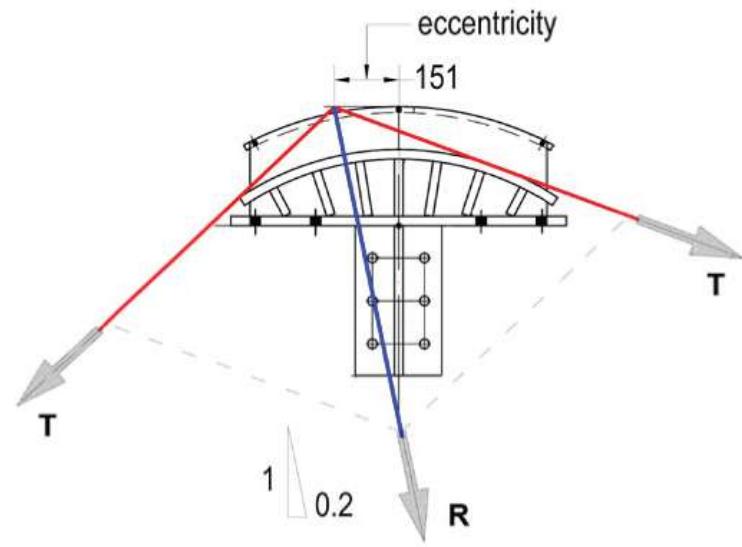
Hipotesis Pemicu Keruntuhan



Gambar 50. Orientasi kabel terhadap tumpuan *saddle*, kasus Cirebon

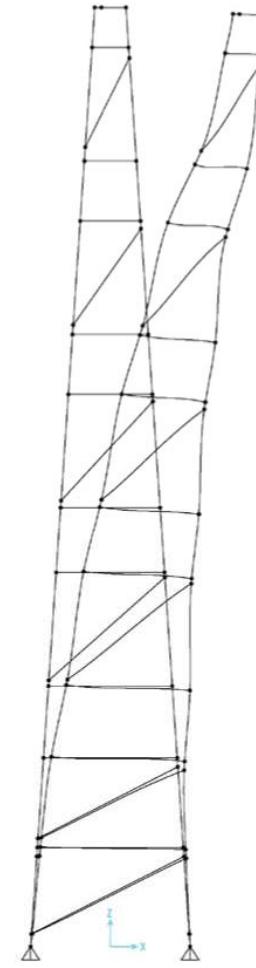
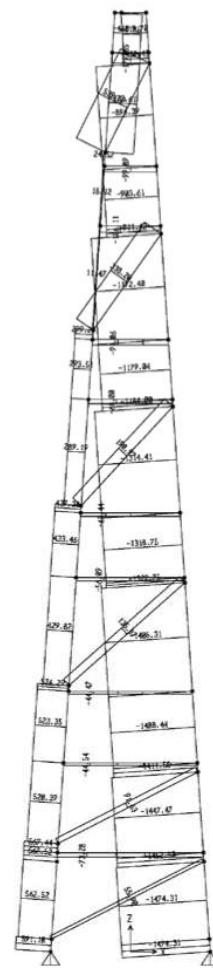
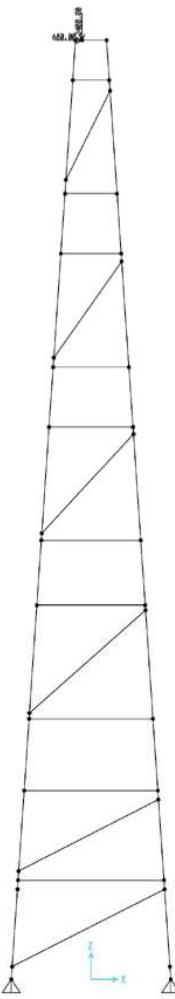
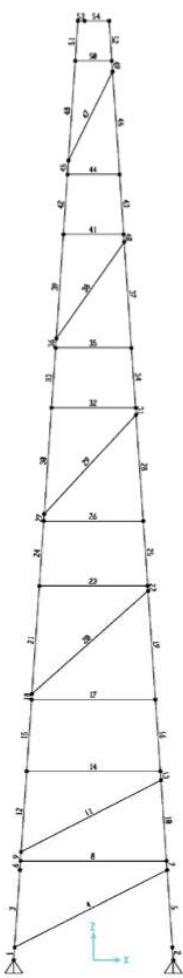
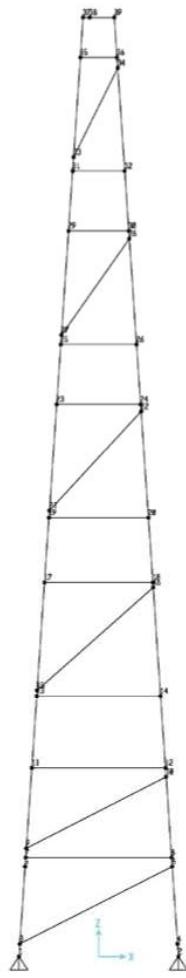


Gambar 51. Gaya lateral akibat orientasi sudut kabel

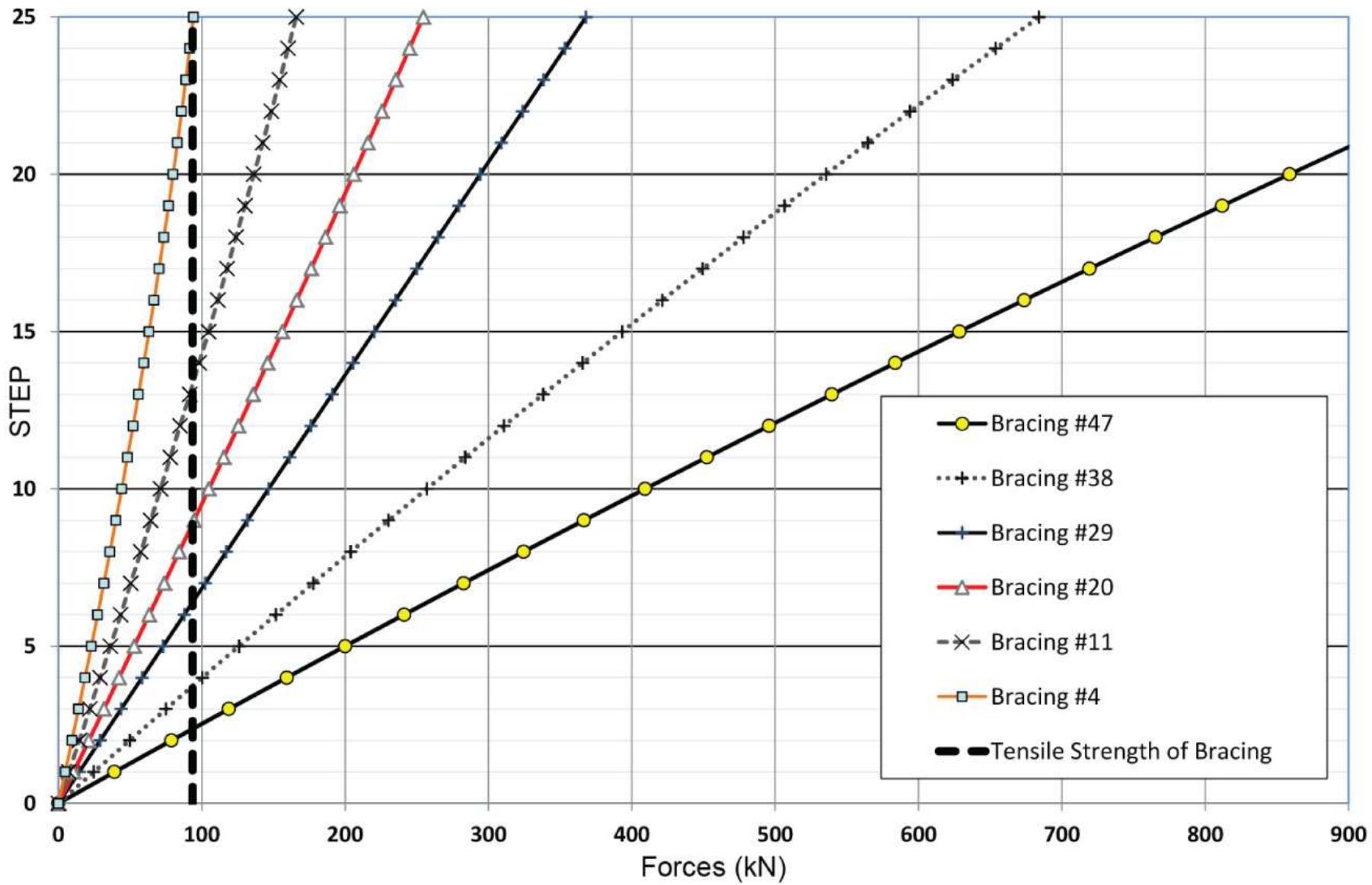


Gambar 52. Eksentrisitas akibat orientasi sudut kabel

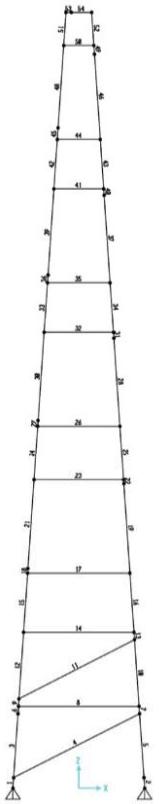
Pengaruh Beban Lateral dan Eksentris



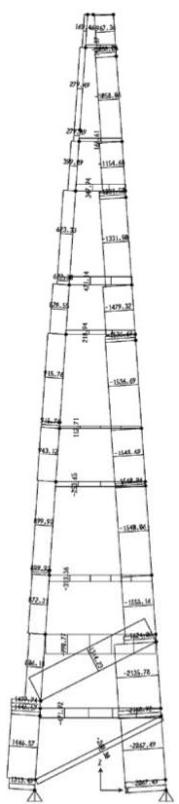
Gambar 54. Perilaku pilon dengan *bracing* (output STEP 13 dari 50)



Gambar 55. Gaya Tarik Batang Bracing Diagonal terhadap tahapan beban (STEP)



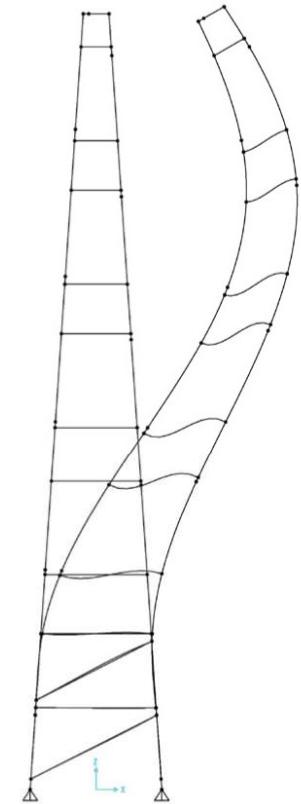
(a) No batang



(b). Gaya Aksial



(c). Momen



(d). Deformasi



Gambar 57. Perilaku pilon tanpa *bracing* (output STEP 12 dari 50)

Tabel 11. Beam-Column interaction check for Element #43

Check	STEP	P_u (kN)	M_u (kNm)	$R=P_u/\phi P_n$	$R + 8/9M_u/\phi M_n$	Note
1	12	-1154.679	-646.724	0.6386	9.933	Not-OK
2	6	-637.373	-158.348	0.3525	2.628	Not-OK
3	5	-518.422	-110.907	0.2867	1.881	Not-OK
4	4	-405.884	-75.758	0.2245	1.313	Not-OK
5	3	-298.658	-49.275	0.1652	0.873	OK

Daya dukung *ultimate* pilon pada STEP 3~4 adalah $3.5/50*P_v = 7\%P_v = 238$ kN.

NOTE: w (*Dead Load per Cable including Cable*) = 7.21 KN/m (AMKA 2015) untuk $L=120$ m maka beban pilon dari kabel adalah $7.21 \times 120/2 = 432$ kN \gg daya dukung.

Bisa dipahami mengapa pada kondisi beban minimum, jembatan gantung Banjarsari II di Kabupaten Pacitan tersebut bisa mengalami KERUNTUHAN.

Penutup

- Orasi **“Pengaruh Batang Nol pada Struktur Baja”** adalah implementasi ilmu **Struktur Baja**, **Analisa Struktur** dan **Komputer Rekayasa Struktur**, nama mata kuliah di Universitas Pelita Harapan.
- **Batang Nol** penting untuk **stabilitas struktur**. Analisis **secara rasional** tidak bisa pakai **cara lama** (*Effective Length Method*) **harus cara baru** (*Direct Analysis Method*) atau **DAM** yang berbasis komputer.
- **Cara DAM berhasil dikembangkan**, tidak sekedar **desain**, tetapi juga untuk **analisis kapasitas struktur**. Papernya berhasil terbit di **jurnal bereputasi ASCE** di Amerika (**Dewobroto and Chendrawan 2018**).
- Cara DAM yang dikembangkan **bisa untuk melacak penyebab keruntuhan struktur** jembatan gantung di Pacitan, Jatim.
- Semoga **anugrah Profesor di Bidang Ilmu Teknik Sipil** ini **memberi manfaat**, tidak sekedar **dunia akademik** tetapi juga **dunia konstruksi**, khususnya **konstruksi baja** di Indonesia dan juga dunia internasional.

**Semoga kasih karunia Allah,
tidak menjadi sia-sia.**

