

# Orasi Ilmiah Guru Besar

Senin, 4 November 2019

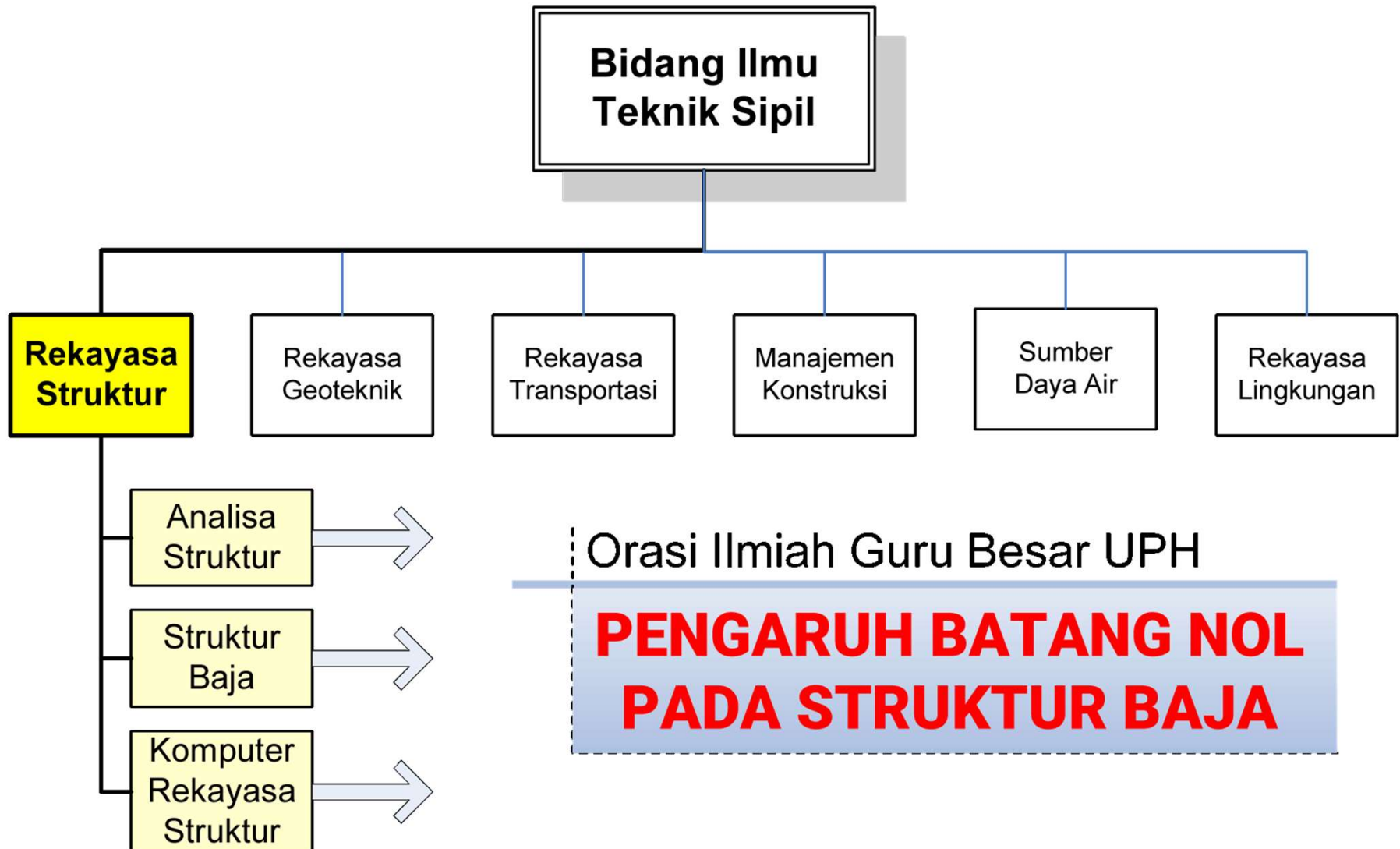
Karawaci, Tangerang

# PENGARUH BATANG NOL PADA STRUKTUR BAJA

**Profesor Wiryanto Dewobroto**

Guru Besar Bidang Ilmu Teknik Sipil





Orasi Ilmiah Guru Besar UPH

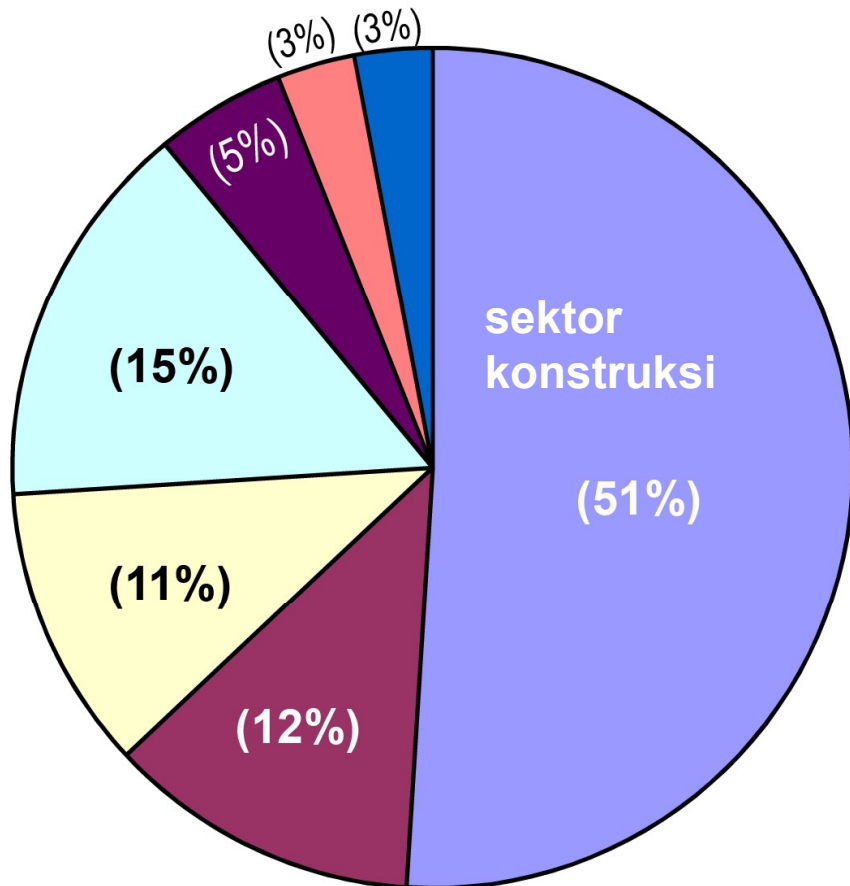
## **PENGARUH BATANG NOL PADA STRUKTUR BAJA**



# Material baja dan aplikasinya



# Prosentasi pemakaian material baja dunia



- konstruksi bangunan & infrastruktur (51%)
- otomotif (12%)
- produk logam (11%)
- mesin (15%)
- alat transport lain (5%)
- alat rumah tangga (3%)
- perlistrikan (3%)





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 Menyukkseskan Pelaksanaan Pembangunan Infrastruktur Nasional”

**PENGUKUHAN MASYARAKAT KONSTRUKSI BAJA INDONESIA**  
(*Indonesian Society Of Steel Construction - ISSC*)



**I**ndonesian **S**ociety of **S**teel **C**onstruction





**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

## Penguatan

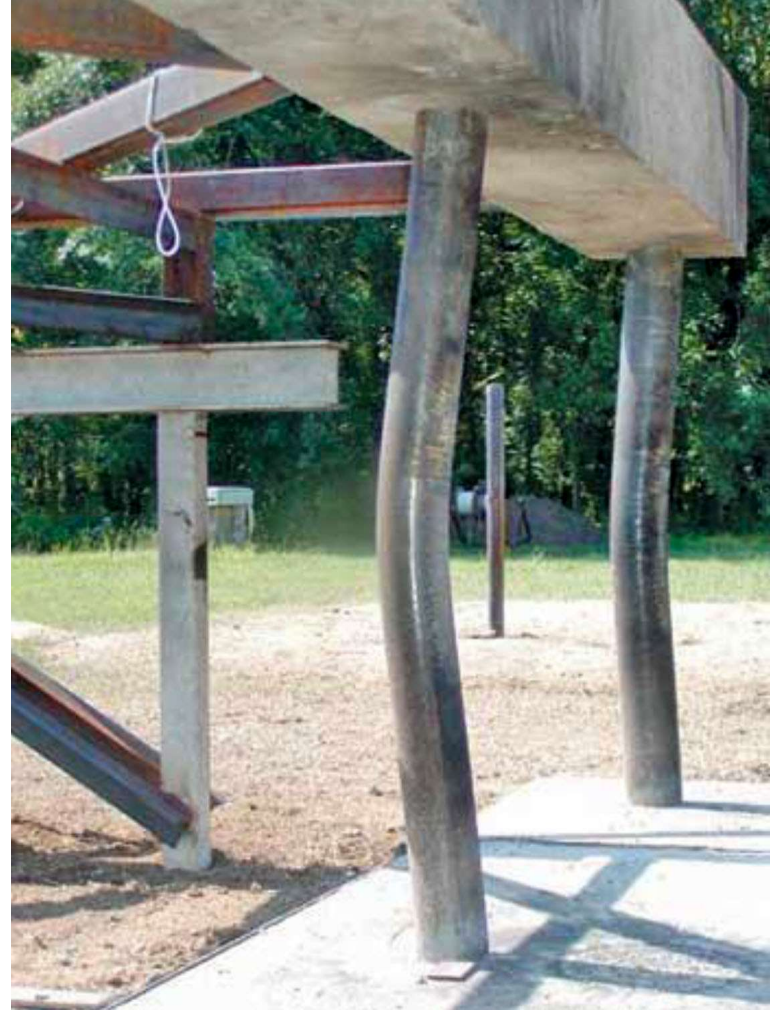


# Komite Riset & Publikasi **ISSC**

## Slide #9



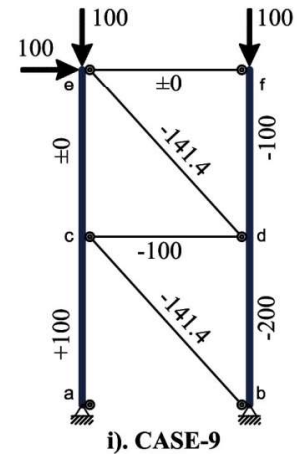
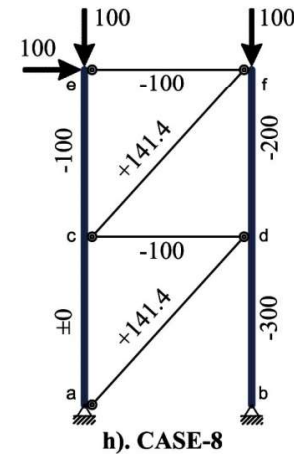
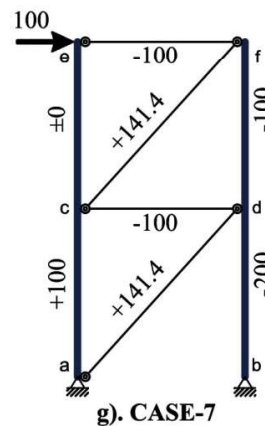
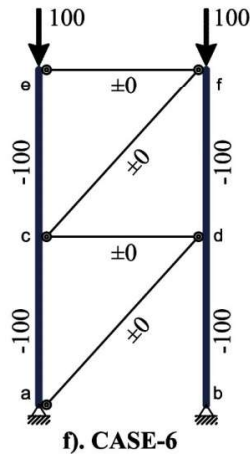
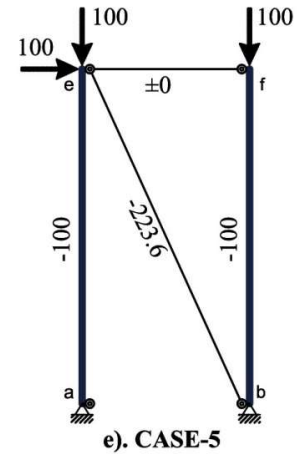
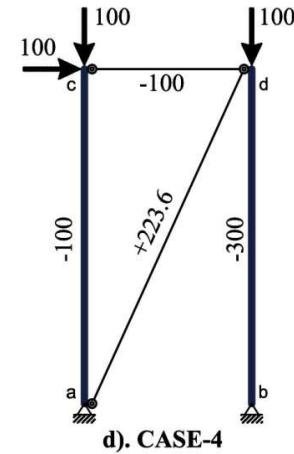
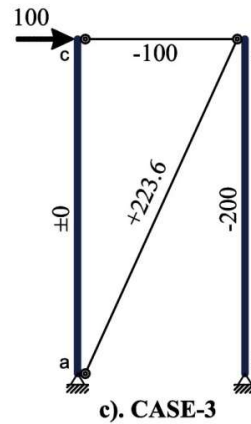
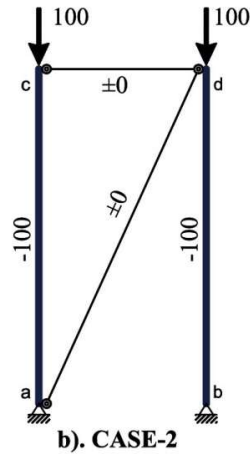
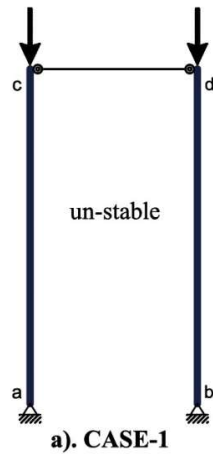
Ref. Dr.P.Venkateswara Rao



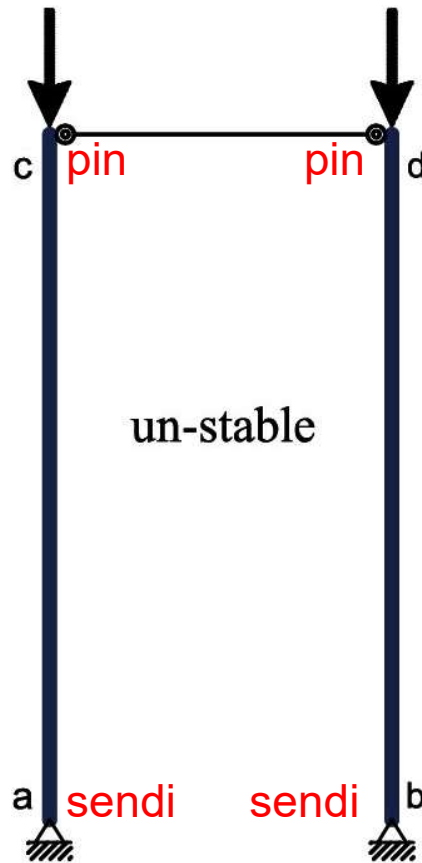
Ref. Dr.P.Venkateswara Rao

# Permasalahan stabilitas (*buckling*)

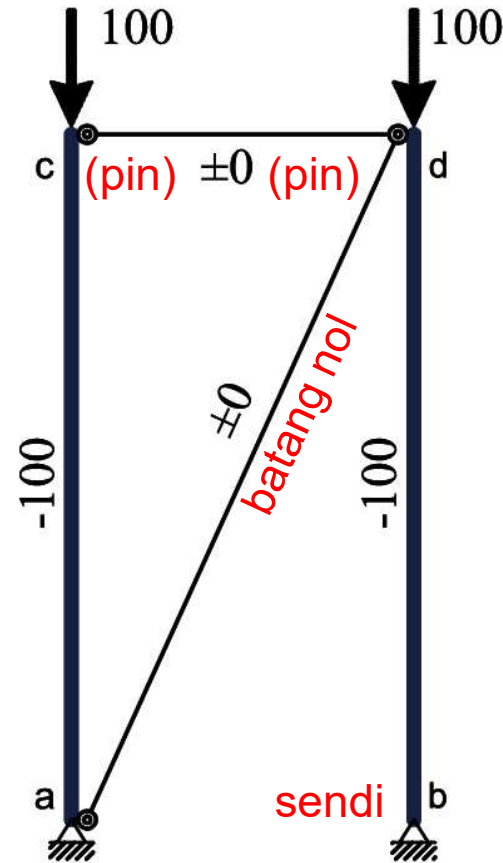




Respon konfigurasi rangka untuk memahami apa itu bracing, ikatan angin atau batang NOL

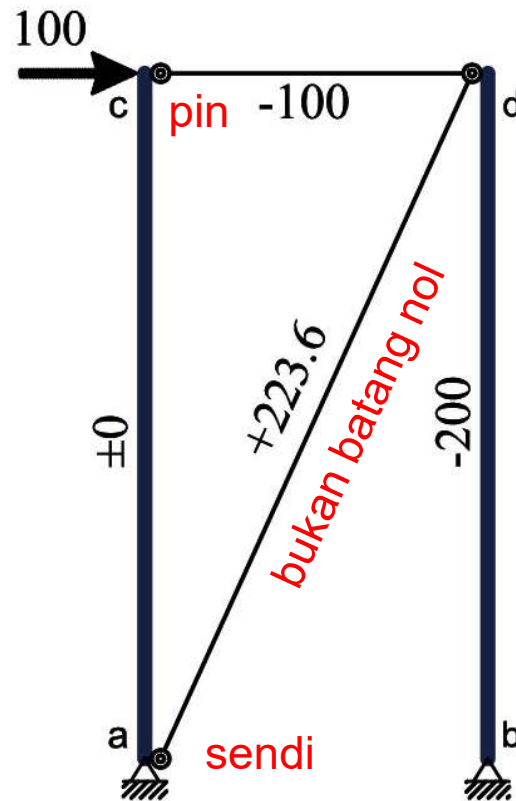


a). CASE-1



b). CASE-2

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



**c). CASE-3**

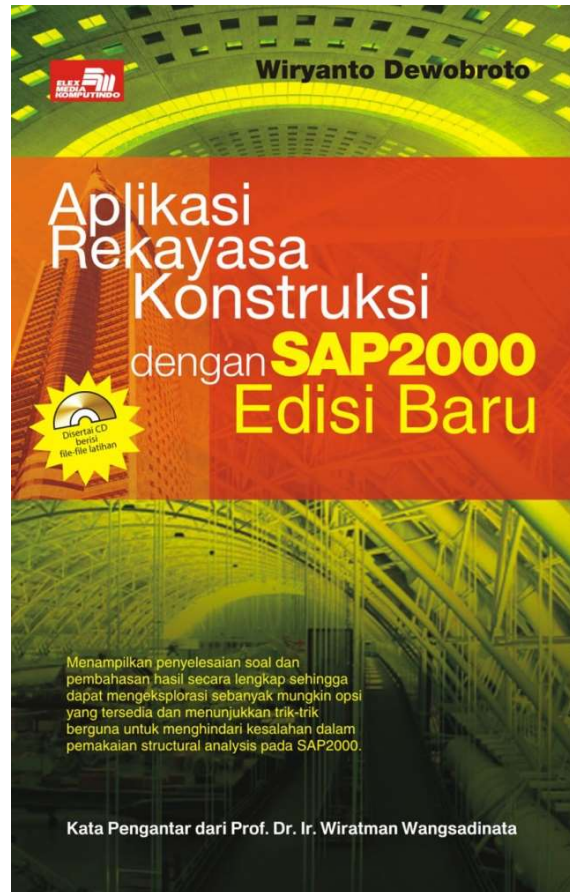
Case 3 (bracing menyalurkan beban)



# Komputer Rekayasa Struktur



2003



2007



2013

Slide #14

# Perencanaan Struktur Baja

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

$$R_u \leq \phi R_n$$

Gaya maksimum terjadi



Analisa struktur

<<<<

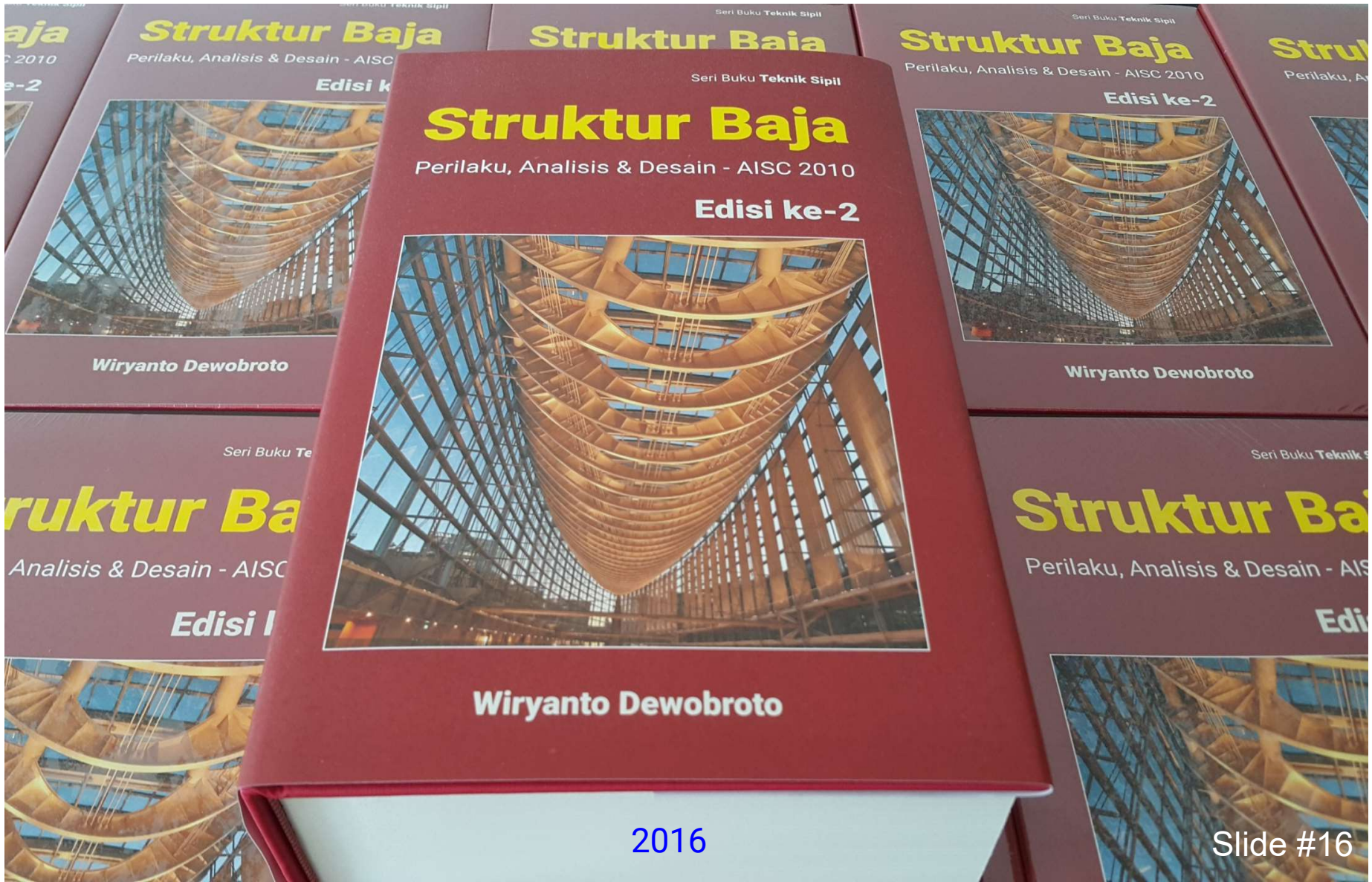
Kapasitas elemen



Desain penampang



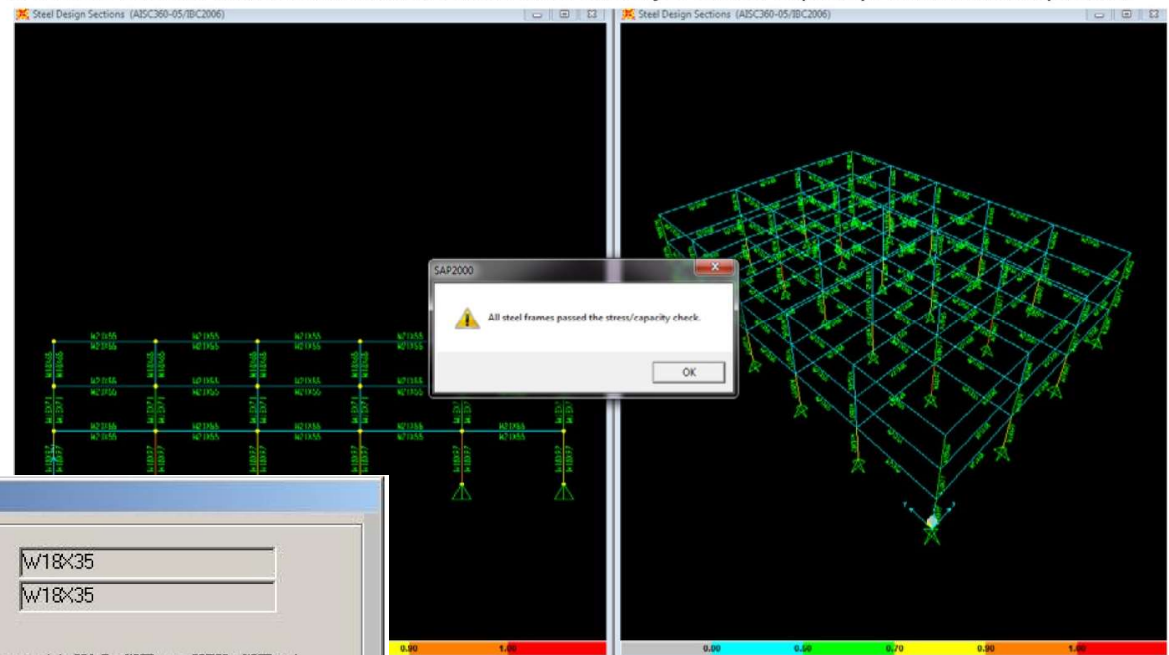
# Desain Elemen Struktur Baja





# Perencanaan Baja dengan Program Komputer

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



**Steel Stress Check Information (AISC360-05/IBC2006)**

Frame ID: 31 Analysis Section: W18X35  
 Design Code: AISC360-05/IBC2006 Design Section: W18X35

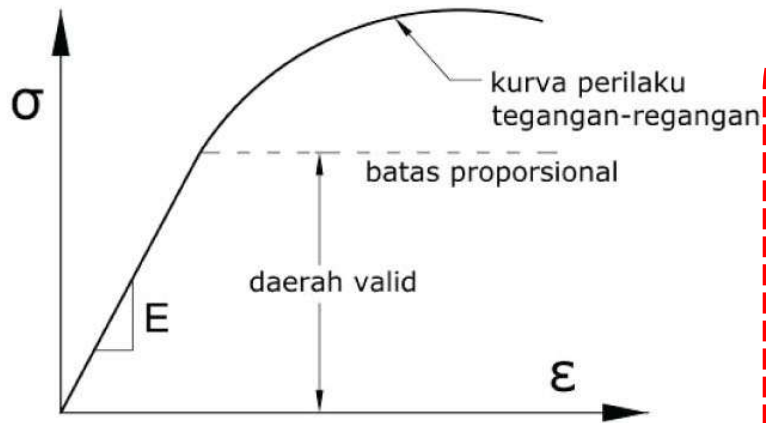
COMBO ID	STATION LOC	----MOMENT INTERACTION CHECK----	MAJ-SHR	MIN-SHR
ID	LOC	RATIO = AXL + B-MAJ + B-MIN	RATIO	RATIO
DSTL154	96.00	0.008 (T) = 0.000 + 0.008 + 0.000	0.000	0.000
DSTL154	120.00	0.008 (T) = 0.000 + 0.007 + 0.000	0.000	0.000
DSTL154	144.00	0.006 (T) = 0.000 + 0.006 + 0.000	0.001	0.000
DSTL154	168.00	0.003 (T) = 0.000 + 0.002 + 0.000	0.002	0.000
DSTL154	192.00	0.003 (T) = 0.000 + 0.002 + 0.001	0.002	0.000
DSTL154	216.00	0.009 (T) = 0.000 + 0.007 + 0.001	0.003	0.000
DSTL154	240.00	0.015 (T) = 0.000 + 0.014 + 0.002	0.003	0.000
DSTL155	0.00	0.057 (T) = 0.000 + 0.051 + 0.006	0.001	0.000

Modify/Show Overwrites: Overwrites  
 Display Details for Selected Item: Details  
 Display Complete Details: Tabular Data  
 Stylesheet: Default  
 Table Format File

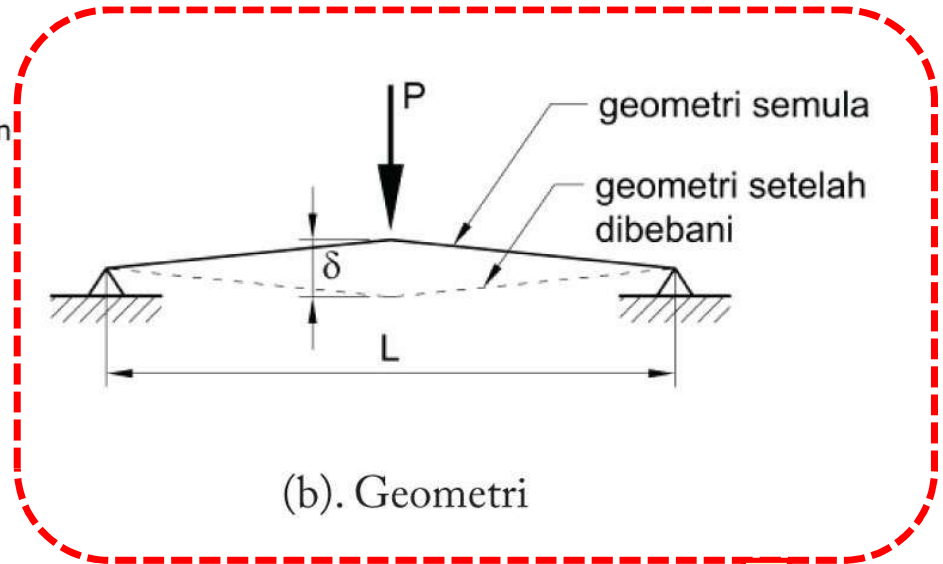
$$\text{Ratio} = \frac{R_u}{\phi R_n}$$

Figure 5-5 A typical member specific steel stress check information summary

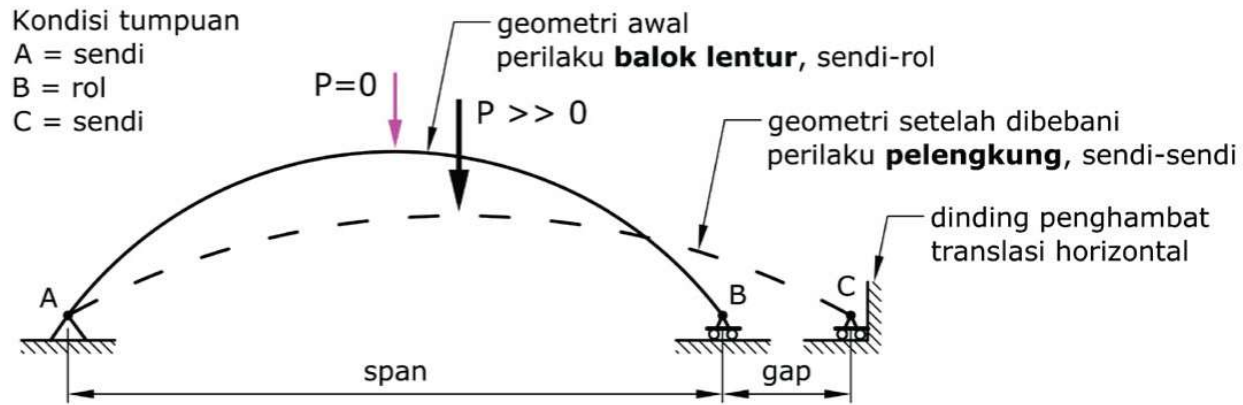
# Permasalahan Struktur Non-linier



(a). Material



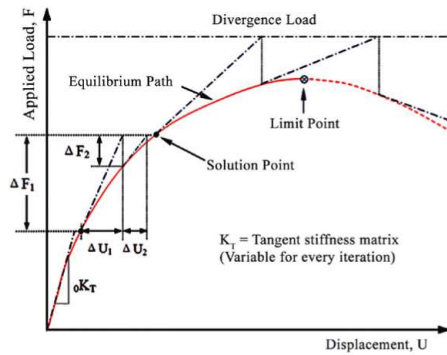
(b). Geometri



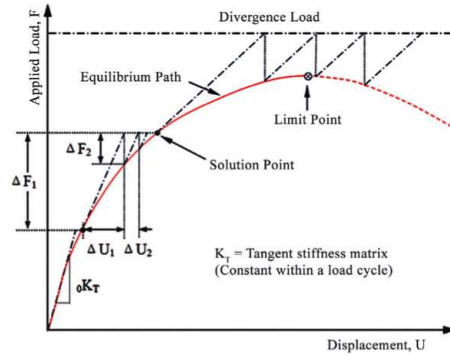
(c). Problem Kontak

**masalah stabilitas**  
**2<sup>nd</sup> order effect, buckling**

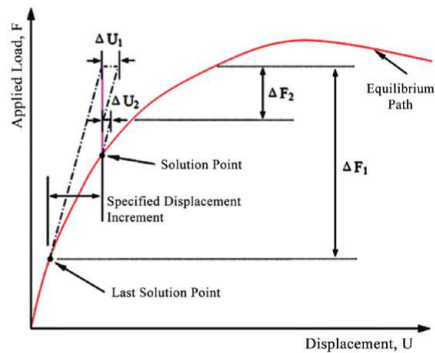
# Berbagai metode **iterasi numerik** solusi non-linier



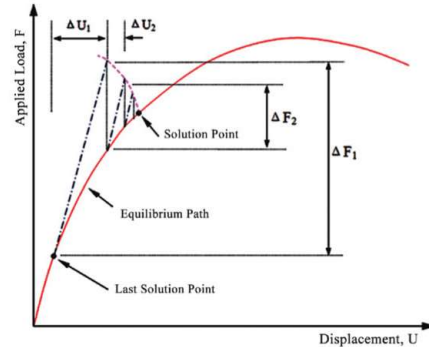
(a). Metode Newton Rhapson



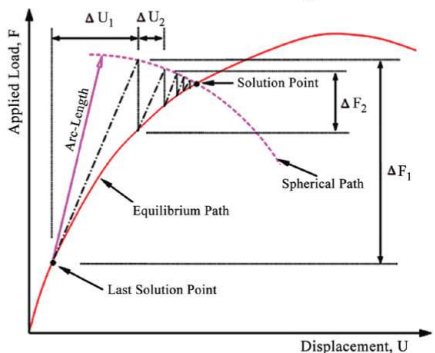
(b). Metode Modifikasi Newton Rhapson



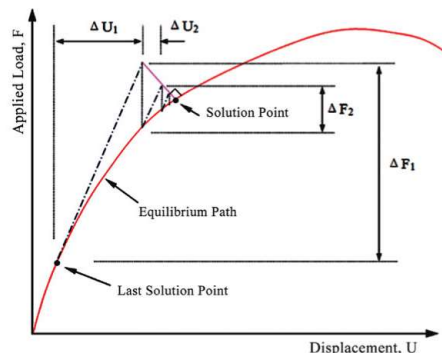
(c). Metode "Control Displacement"



(d). Metode "Constant Work"



(e). Metode "Arc-Length"

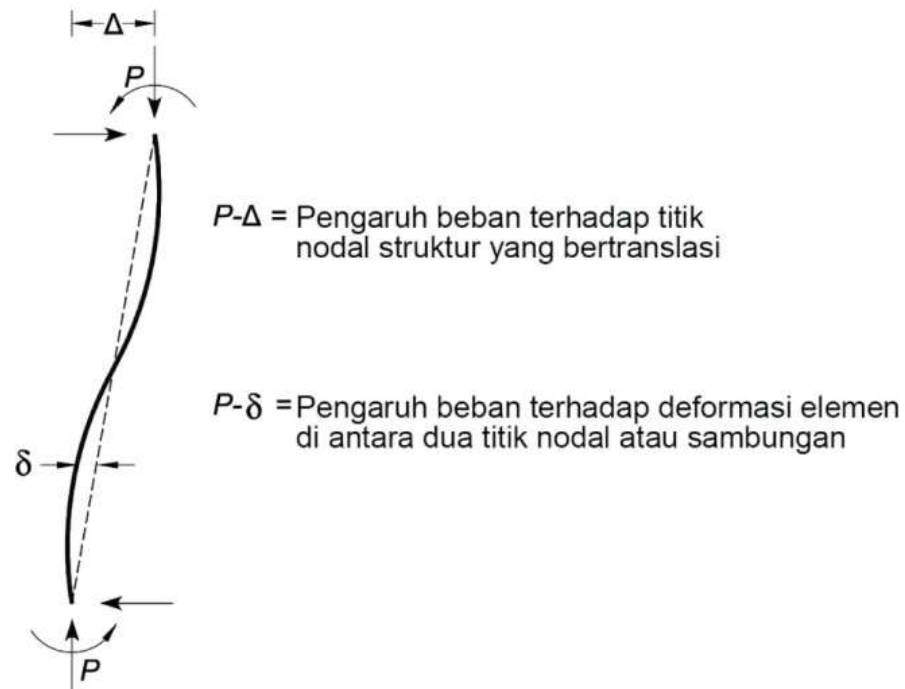


(f). Metode "Min Residual Displacement"



Solusi numerik  
berbasis komputer

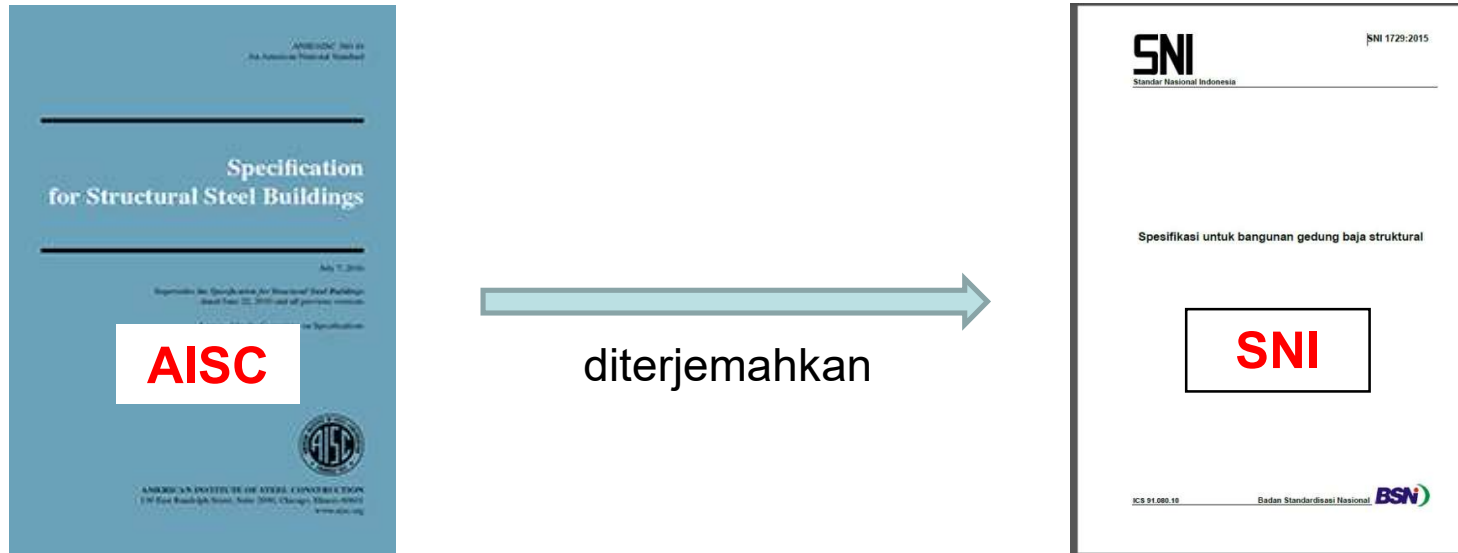
# Masalah stabilitas (problem non-linier) ditangani secara pendekatan (manual)



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

$$M_r = B_1 M_{nt} + B_2 M_{lt} \dots\dots\dots (A-8-1)$$

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

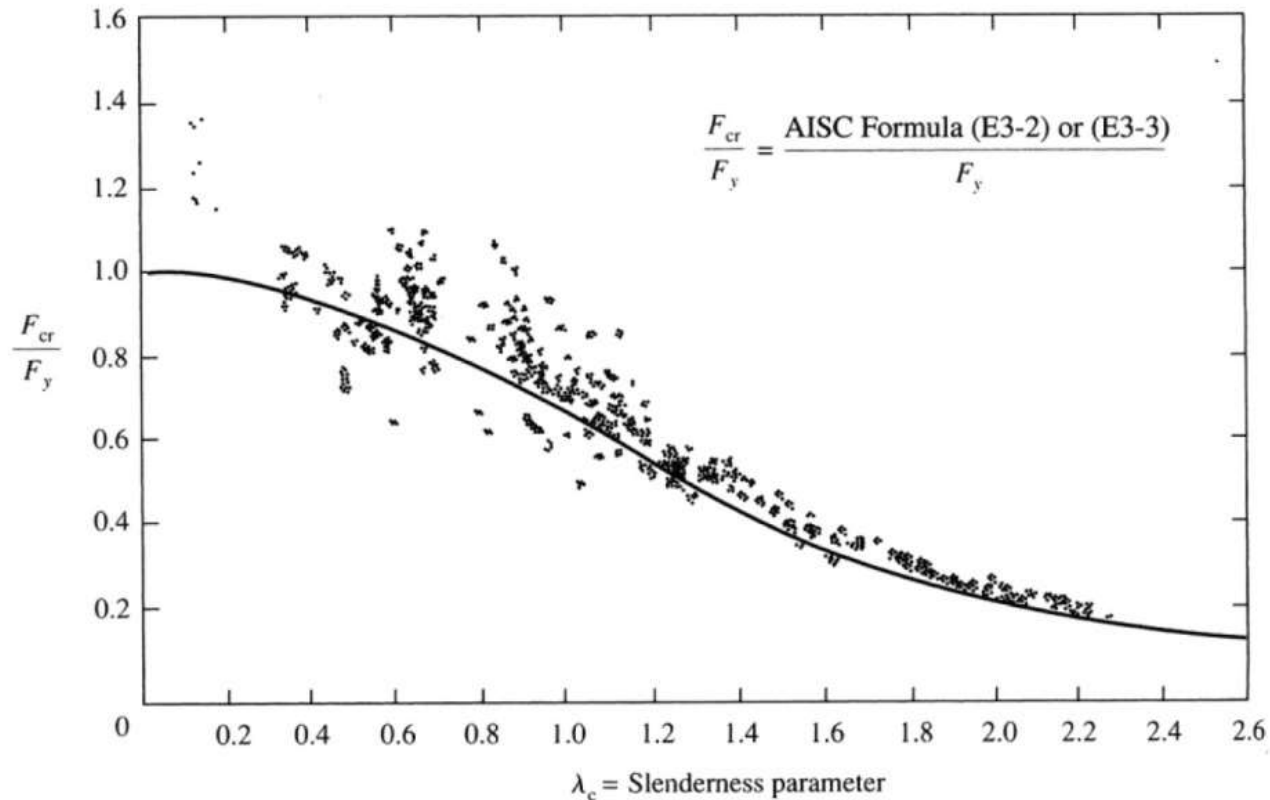


Code **AISC 2005** adalah yang pertama kali memberi peluang boleh memakai **metode analisis struktur secara rasional** untuk solusi masalah stabilitas (2<sup>nd</sup> order effect).

- 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*).

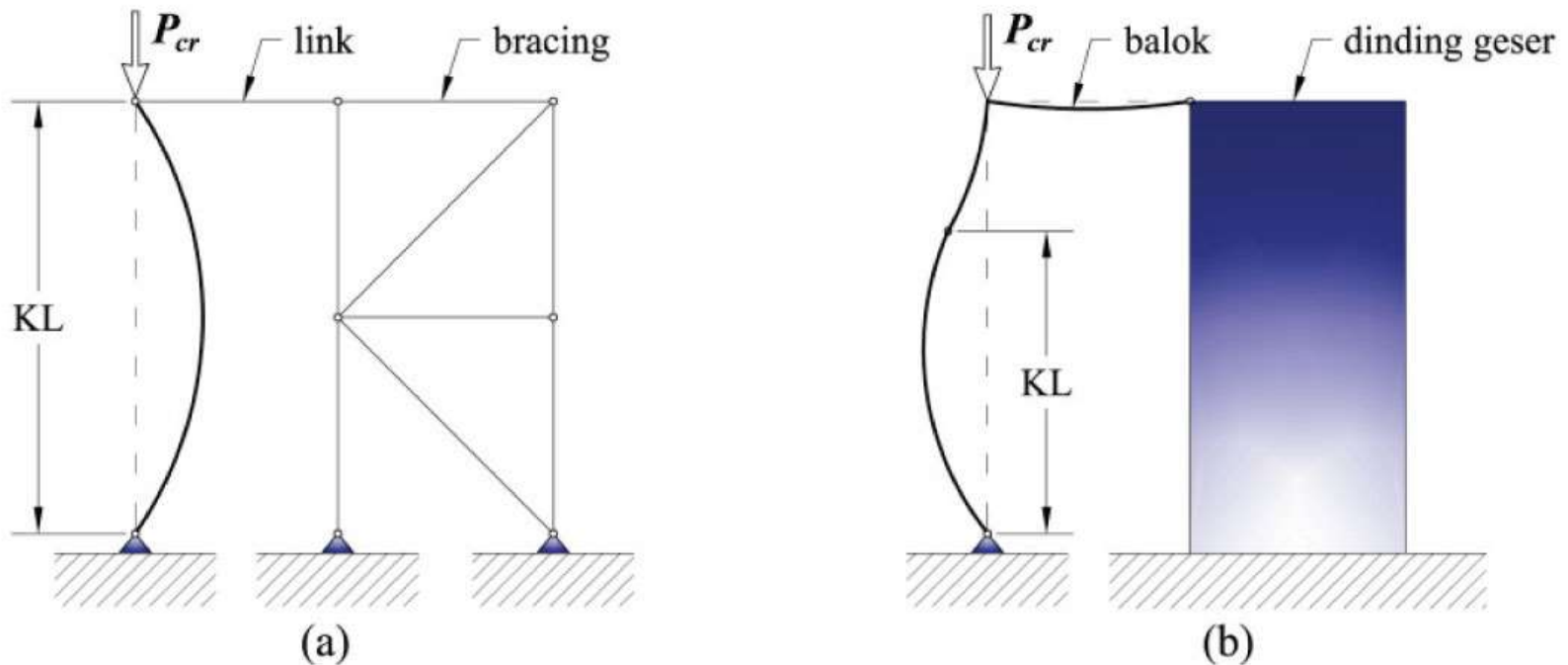
Untuk menentukan faktor K yang tepat, maka langkah awal adalah bisa mengklasifikasi sistem struktur sbg :

[1] **rangka tidak bergoyang** atau

[2] **rangka bergoyang**

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

# Rangka Tidak Bergoyang

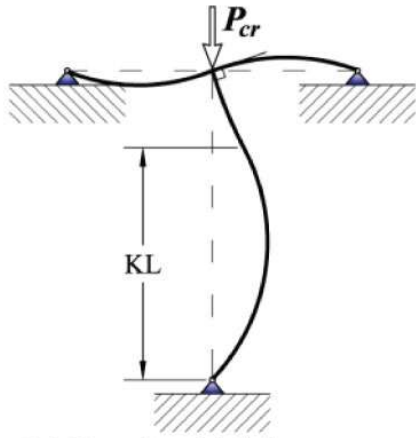


Gambar 11. Rangka tidak-bergoyang ( $0.5 \leq K \leq 1.0$ ) (Dewobroto 2015, 2016)

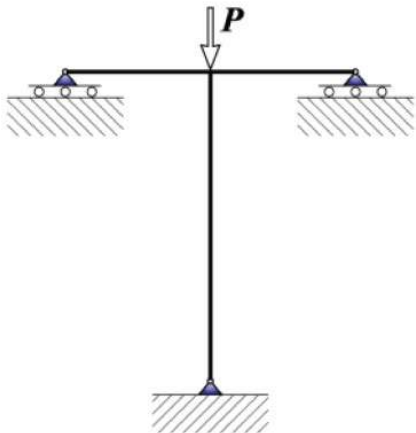
Rangka tidak-bergoyang, jika titik ujung kolom tidak berpindah saat dibebani. Ini biasanya terdapat bila pada rangka ada **bracing** atau **batang nol** atau ada **sistem pertambatan lateral** khusus.



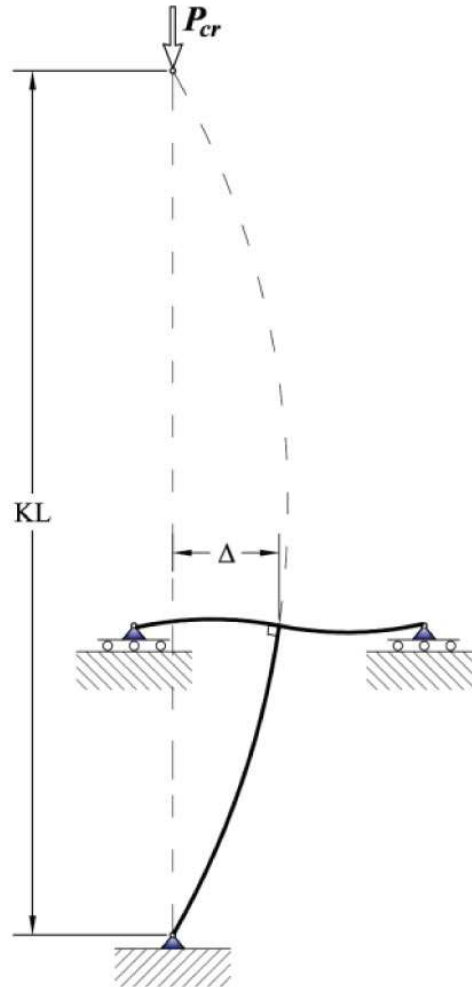
# Rangka Bergoyang



(a) Rangka tidak-bergoyang



(b) Rangka tanpa tambatan lateral

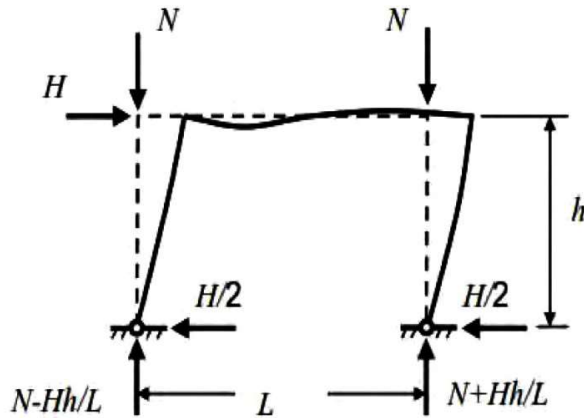


(c) Rangka bergoyang

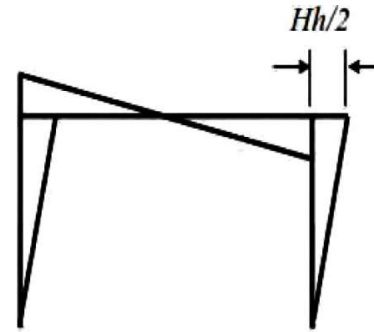
Rangka bergoyang, jika titik nodal ujung kolom berpindah saat dibebani.

Biasanya **tidak tersedia bracing**.

**Analisis struktur secara keseluruhan** sekaligus memperhitungkan *2<sup>nd</sup> order effect*

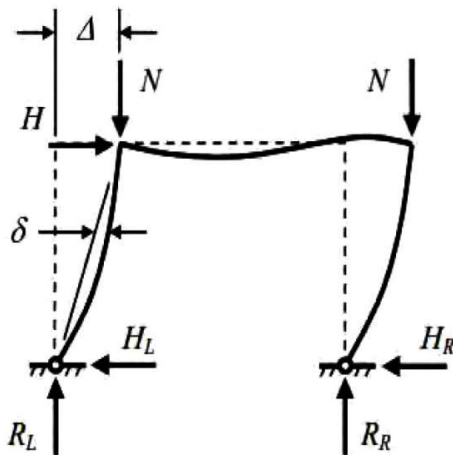


## Frame

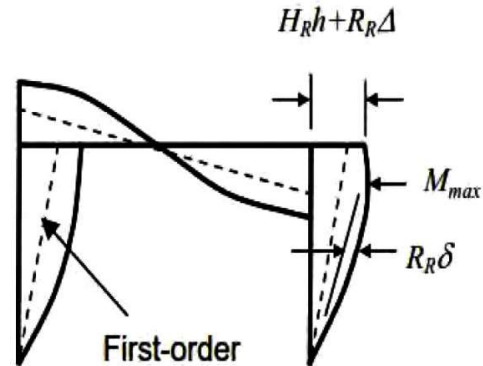


### Bending moments

### (a) First-order analysis



## Frame



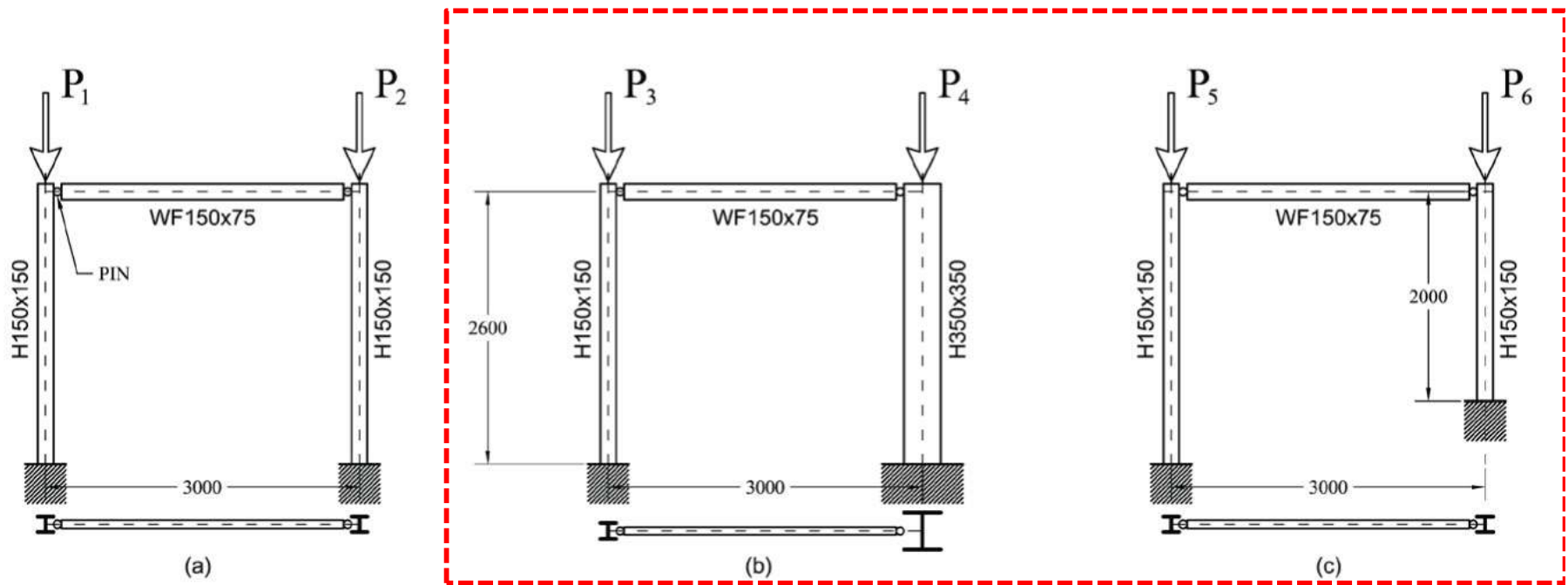
### First-order analysis

### Bending moments

### (b) Second-order behaviour



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

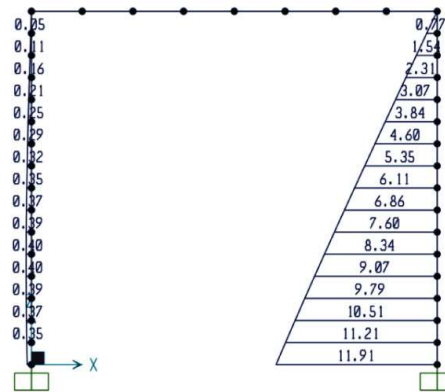
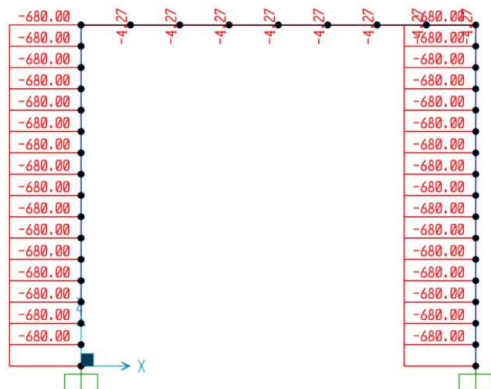
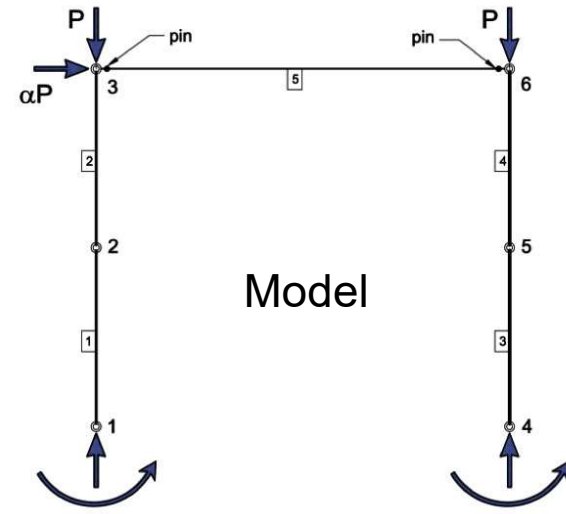
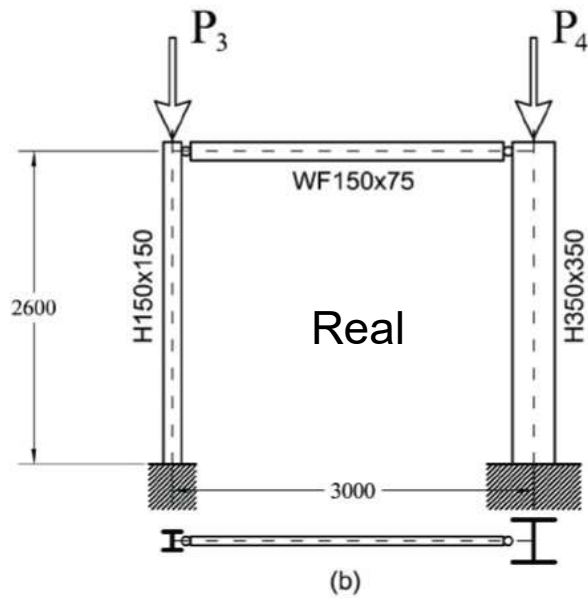


Gambar 13. Dua Kolom Kantilever Terkoneksi Pin-Pin

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  
2<sup>nd</sup> order  
effect

(a). Gaya Aksial (kN)

(b). Bending Momen (kN.m)



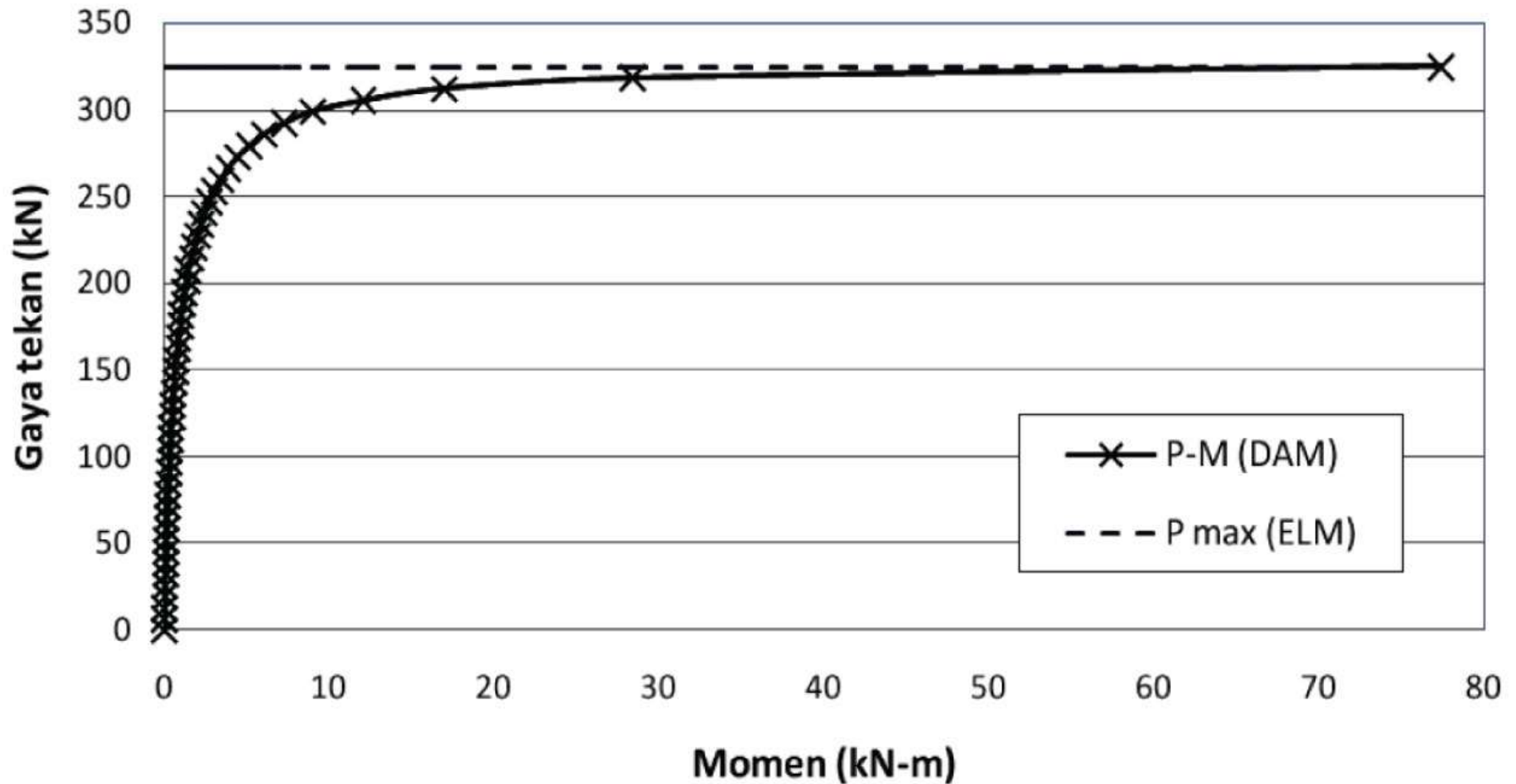
# Daya Dukung Maksimum (kN) berdasarkan Cara ELM (lama) vs cara DAM (baru)

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	<b>650</b>	325	3257	<b>3582</b>	325	491	<b>816</b>
DAM	300	300	<b>600</b>	680	680	<b>1360</b>	360	360	<b>720</b>
	<b>92%</b>			<b>209%</b>			<b>111%</b>		

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

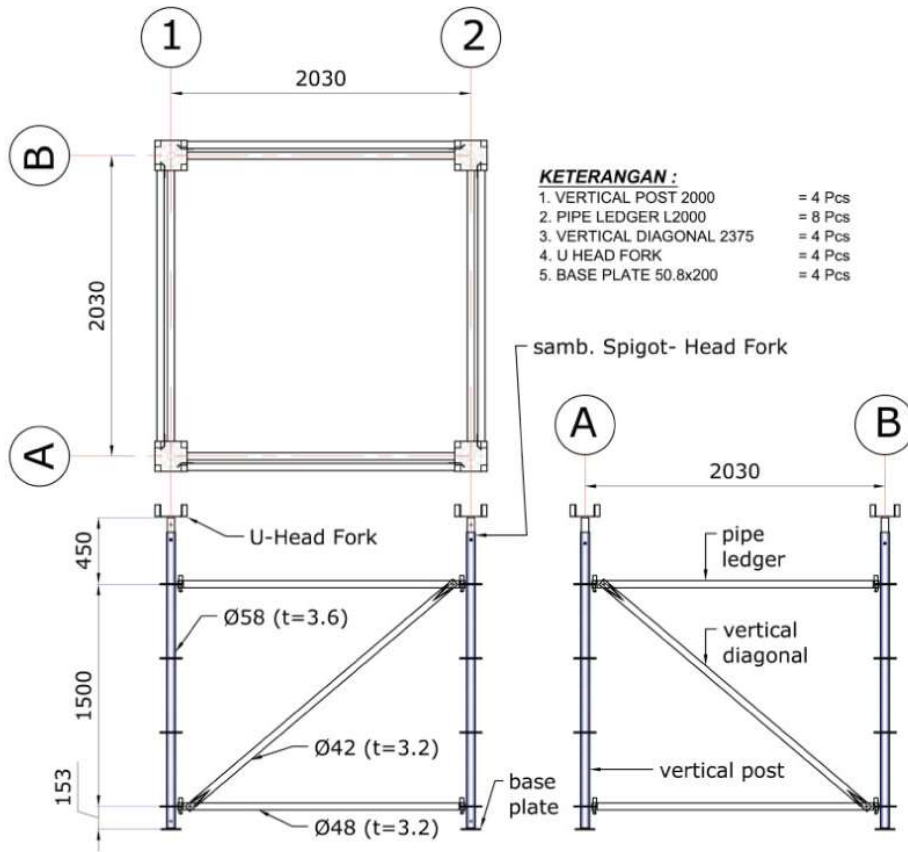
# Struktur baja yang akan diuji beban



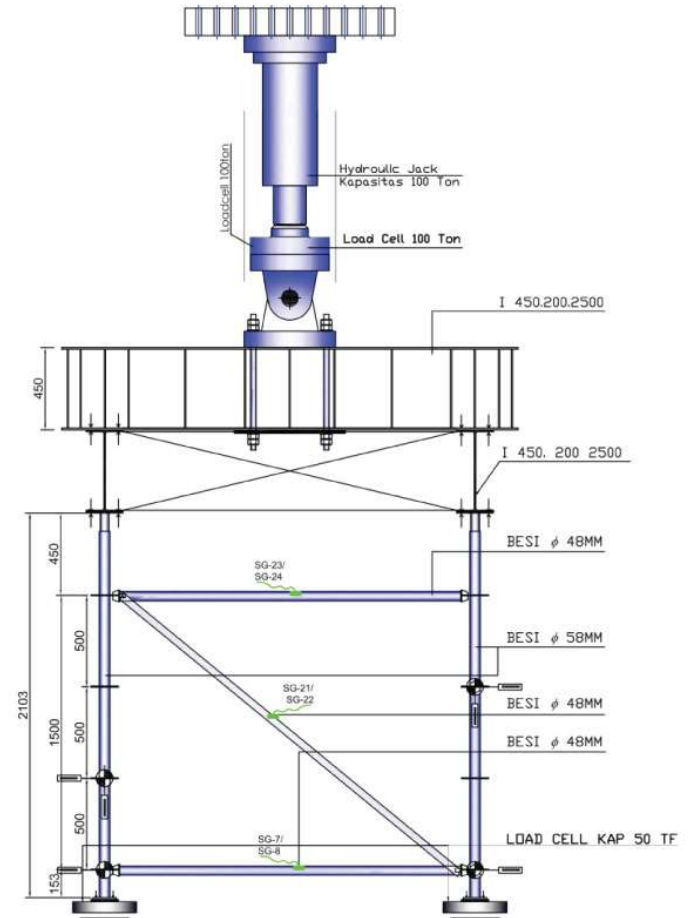
Gambar 18. Tipe *scaffolding* baja yang ditinjau (Dewobroto 2016)

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.





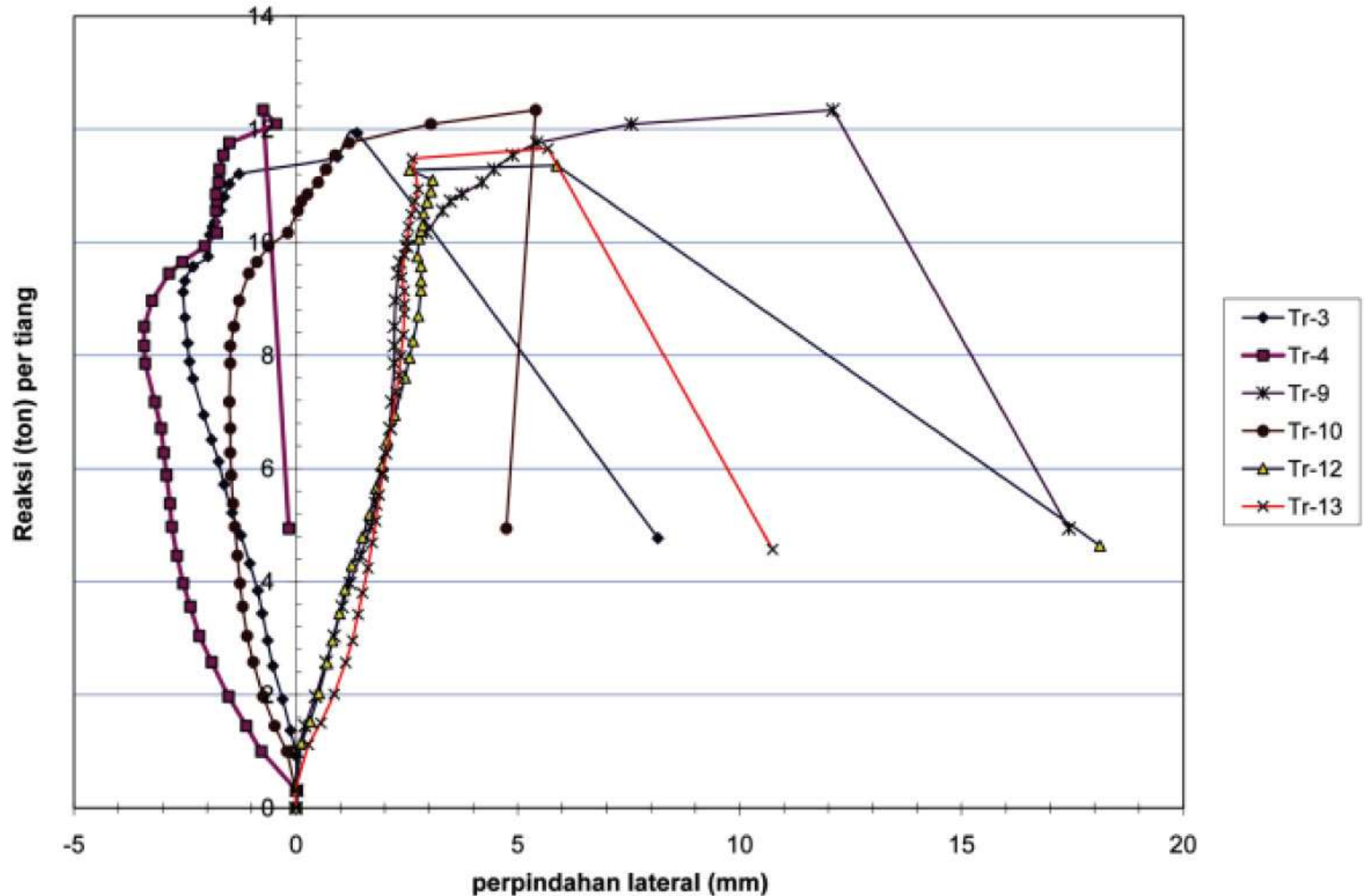
Gambar 21. Situasi pengujian *scaffolding* (Dewobroto 2013a)





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

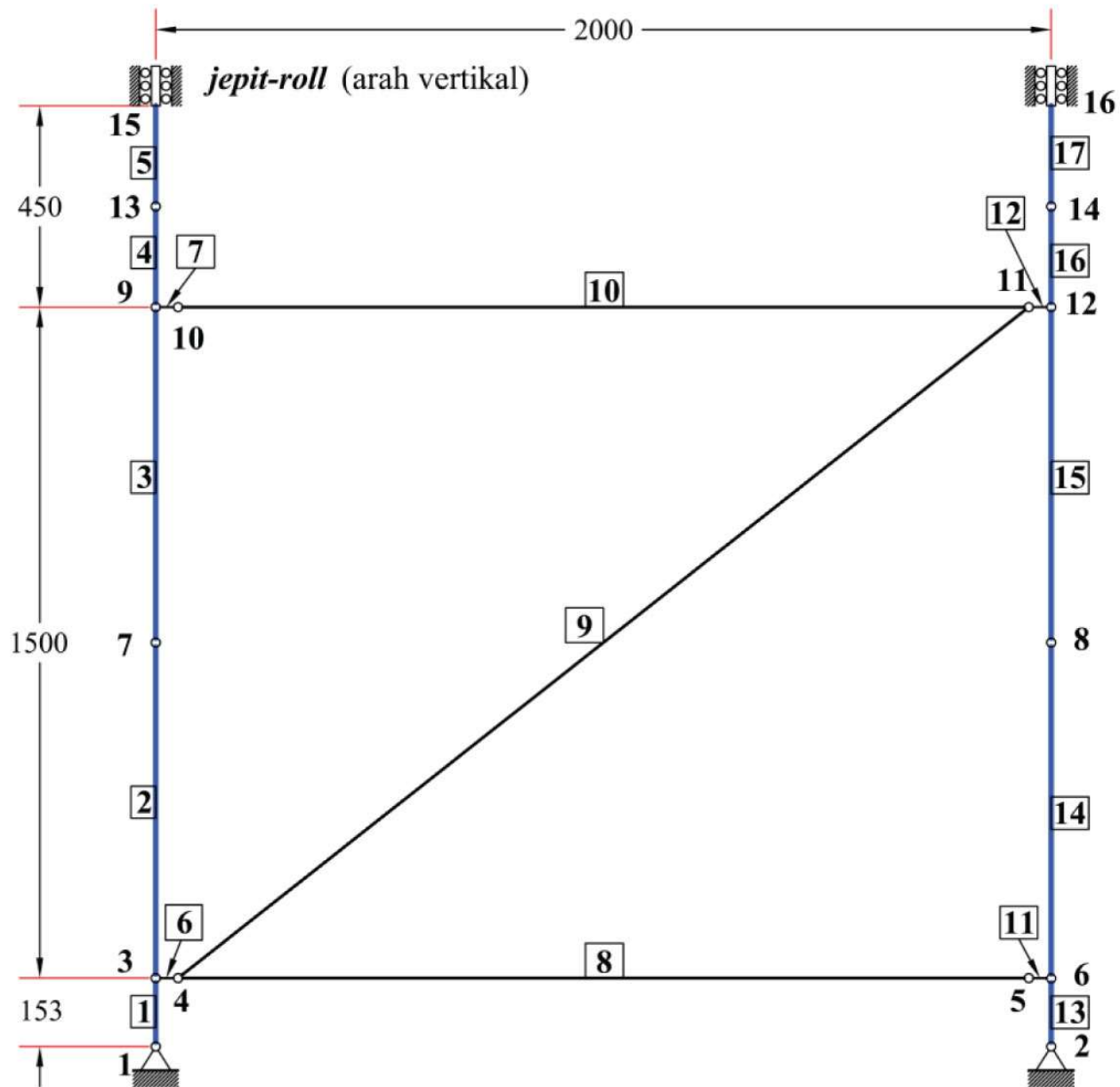
# Rekaman Uji Beban sampai Runtuh di Lab.



Gambar 23. Hasil uji eksperimental *Scaffolding* PT. Putra Jayasentosa Slide #37

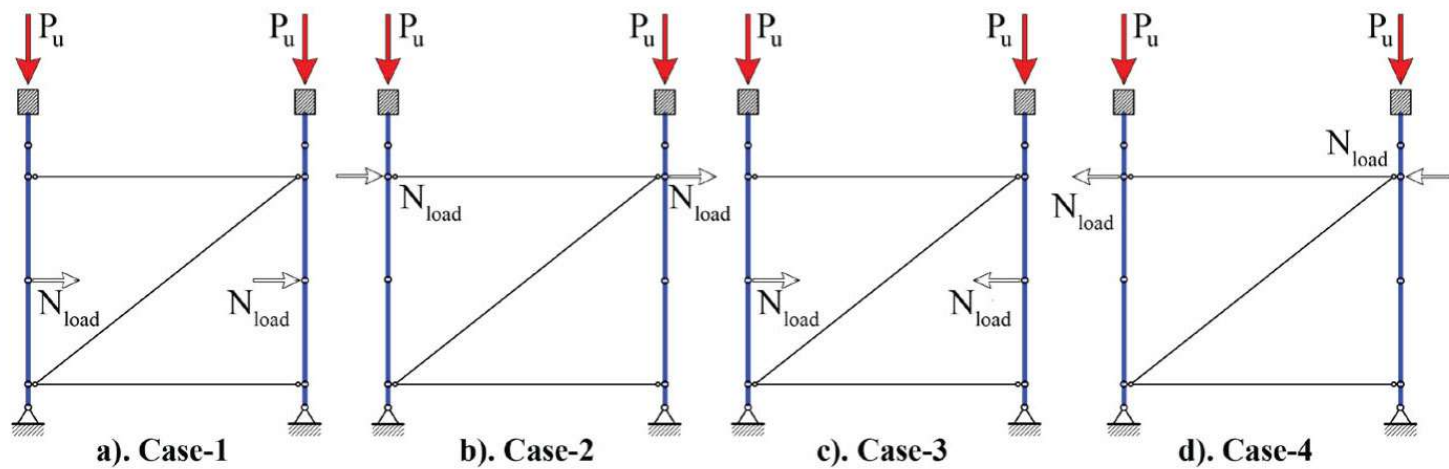
# **Pemodelan Numerik yang Terkalibrasi dengan Hasil Uji Empiris di Laboratorium**

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

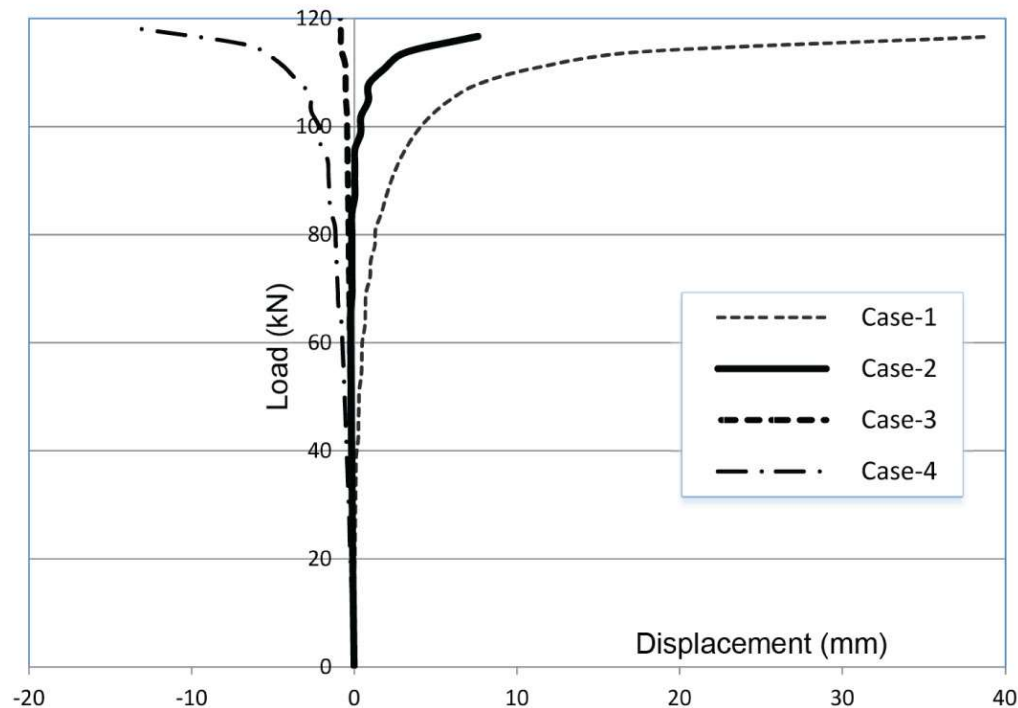


Gambar 25. Sistem Penomoran Model Struktur *Scaffolding* – 1 tingkat



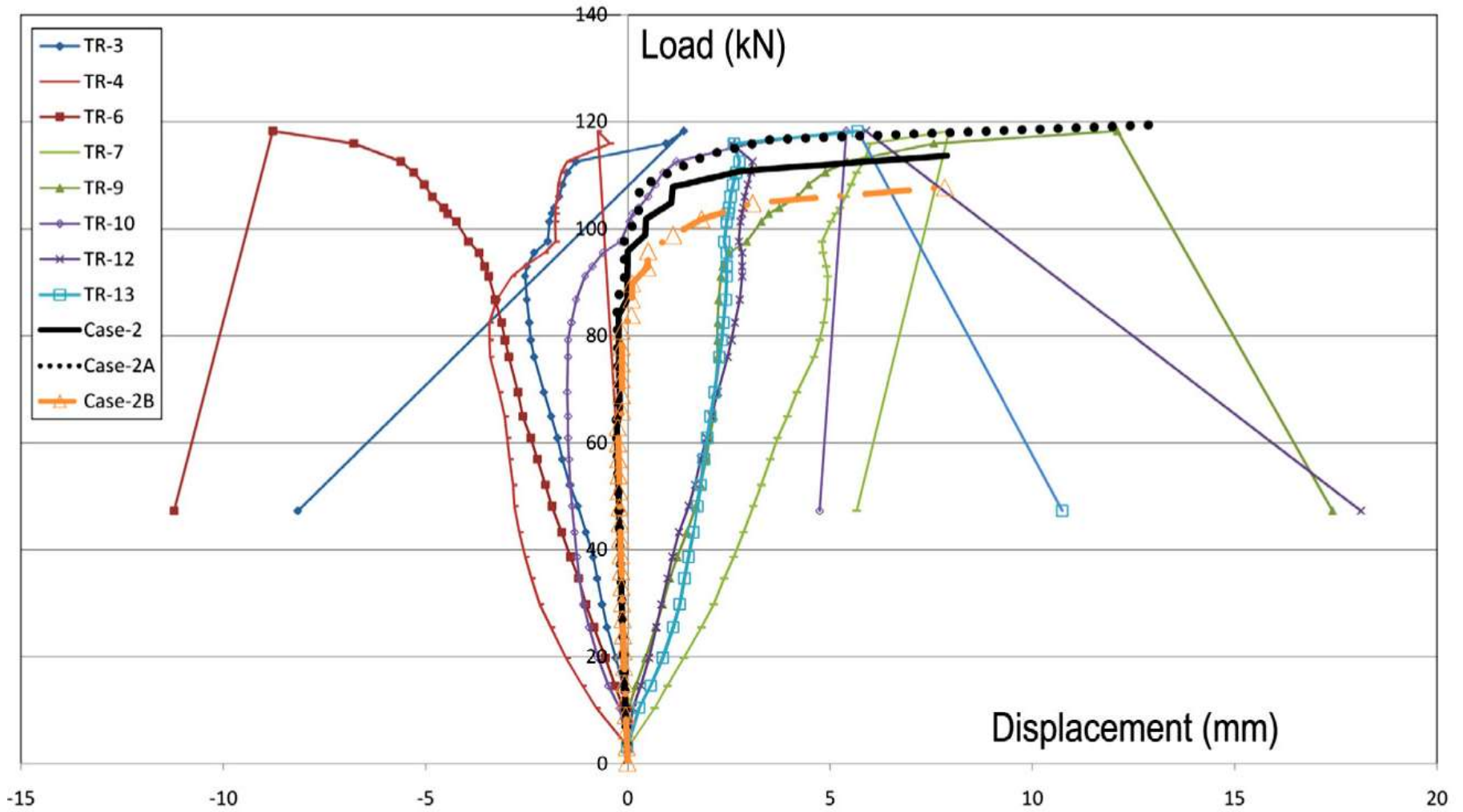


Gambar 30. Variasi Penempatan Notional ( $N_{load}$ ) – Perancah Baja Tidak Bertingkat



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

# Simulasi Numerik yang Terkalibrasi

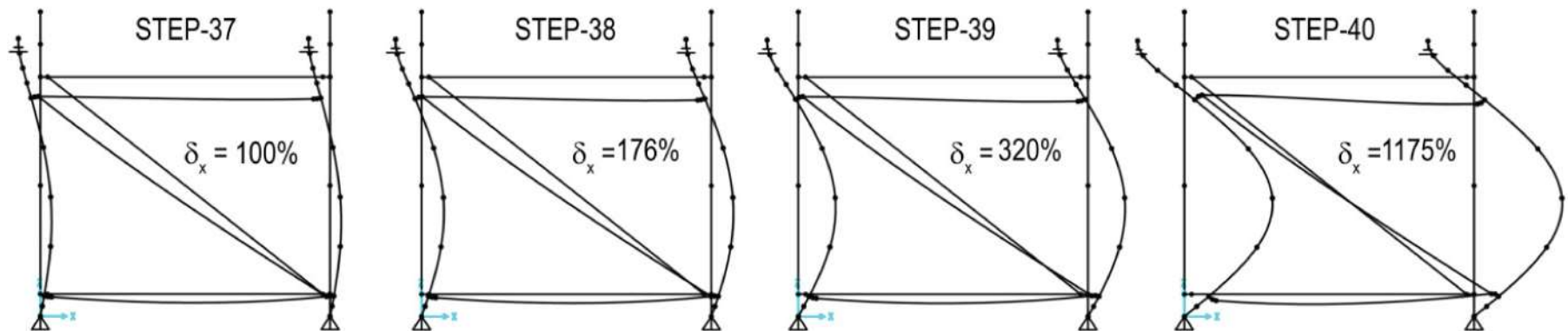


Gambar 32. Kurva P- $\Delta$  Uji Empiris vs Simulasi DAM (Puskim 2011)

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**.

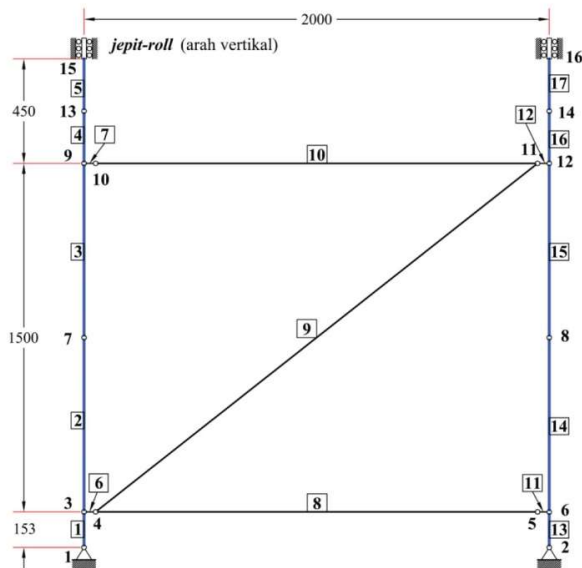
Dibandingkan **uji beban empiris** adalah **11.82 ton** atau **116 kN**.



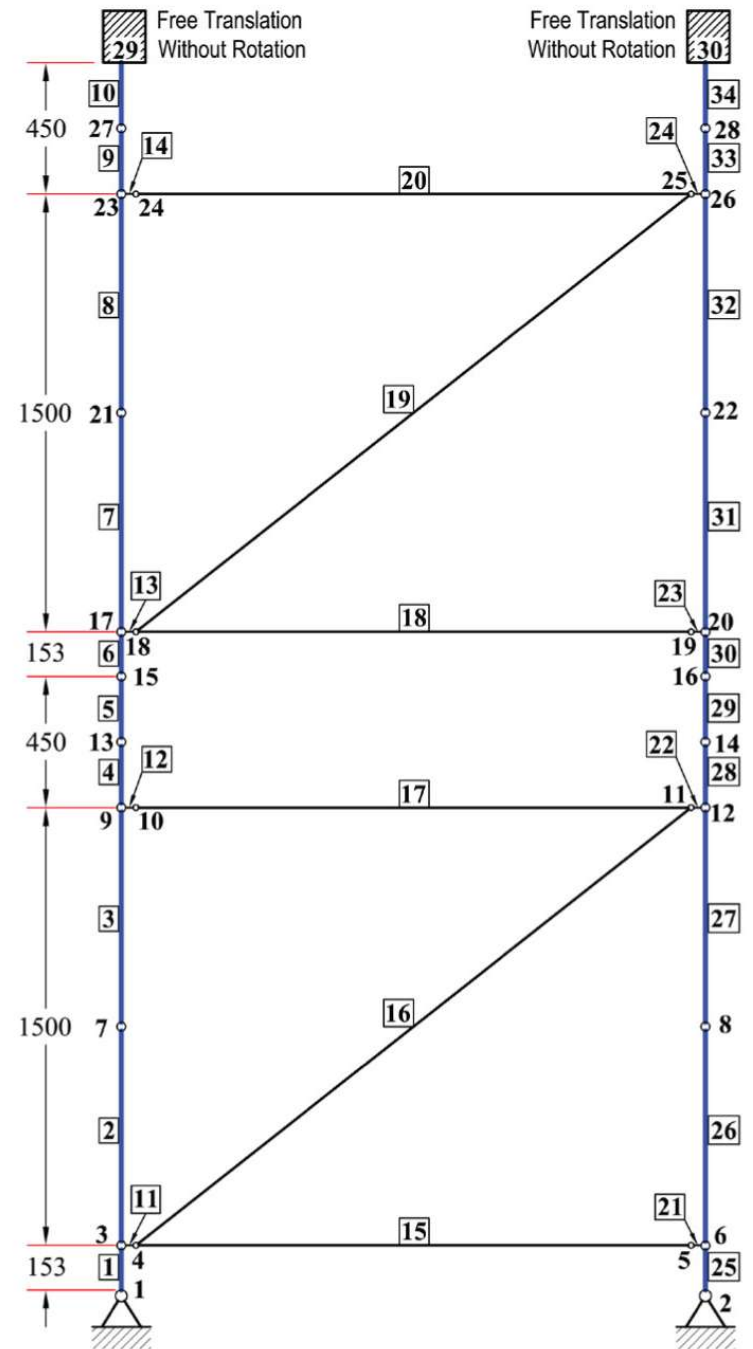
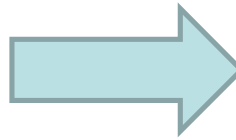
# **Model Terkalibrasi yang dikembangkan dengan cara parametrik**

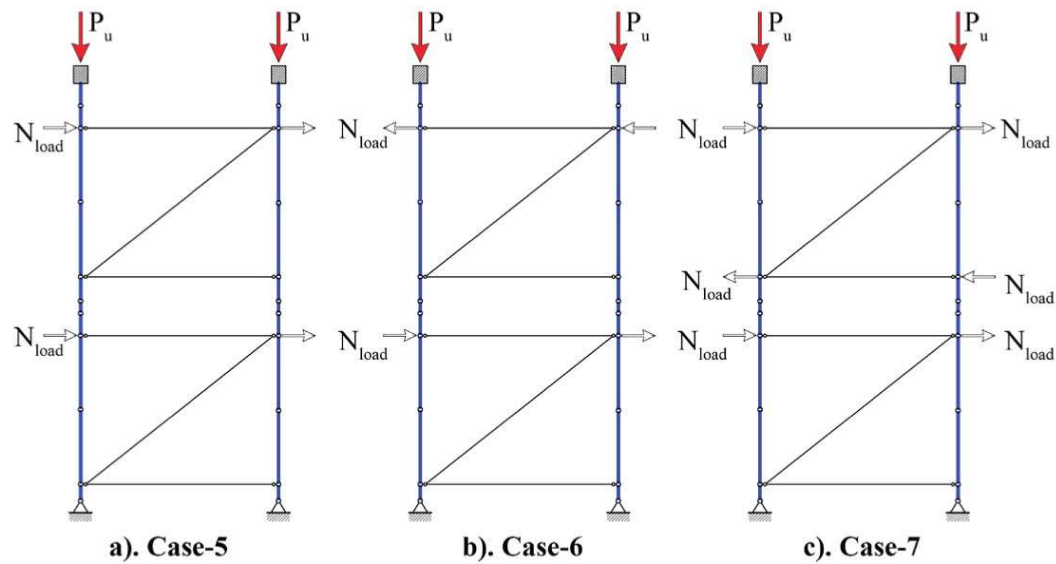
simulasi numerik terkalibrasi dapat dikembangkan untuk solusi problem besar tanpa kendala ruang & tempat

## Calibrated Modeling

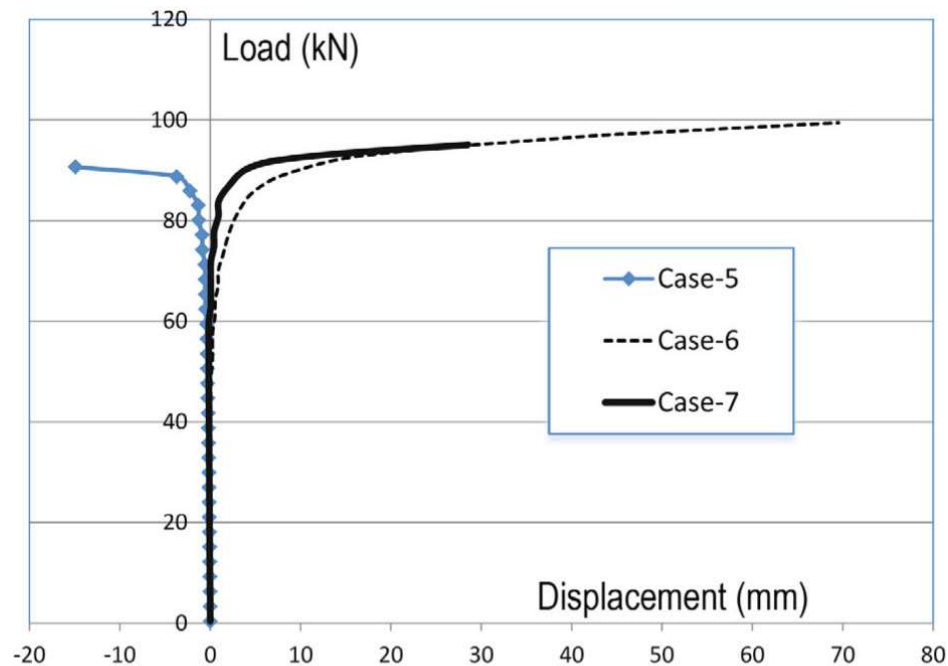


## Parametric Modeling





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

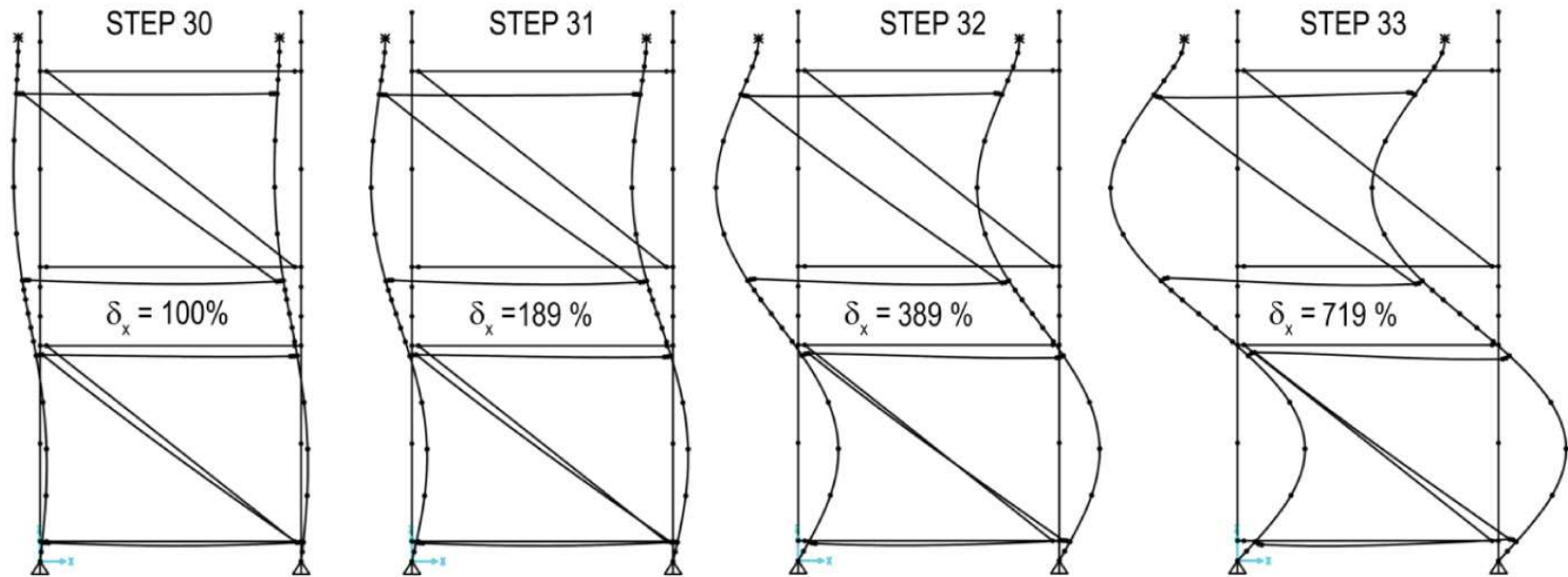


Gambar 36. Kurva P- $\Delta$  titik nodal #7 terhadap variasi penempatan beban notional

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



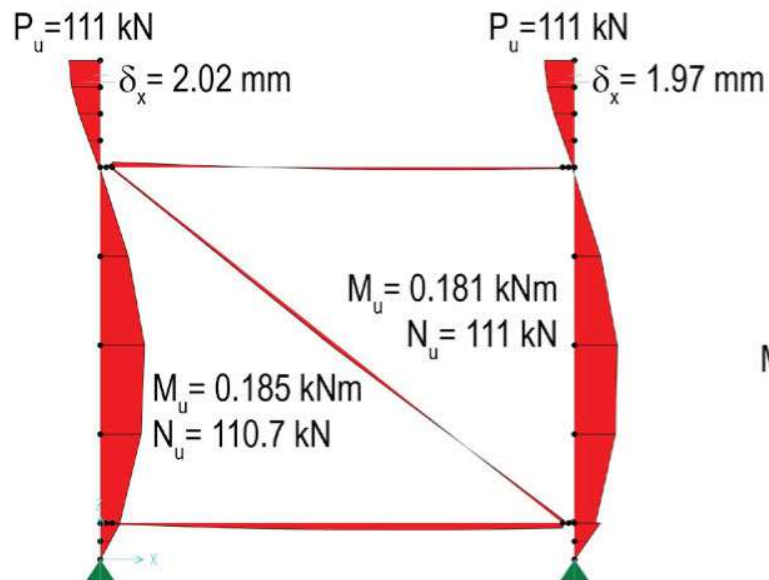
# Kapasitas Dukung Model Struktur Bertingkat

Tabel 8. Check kolom interaksi – Model Parametrik

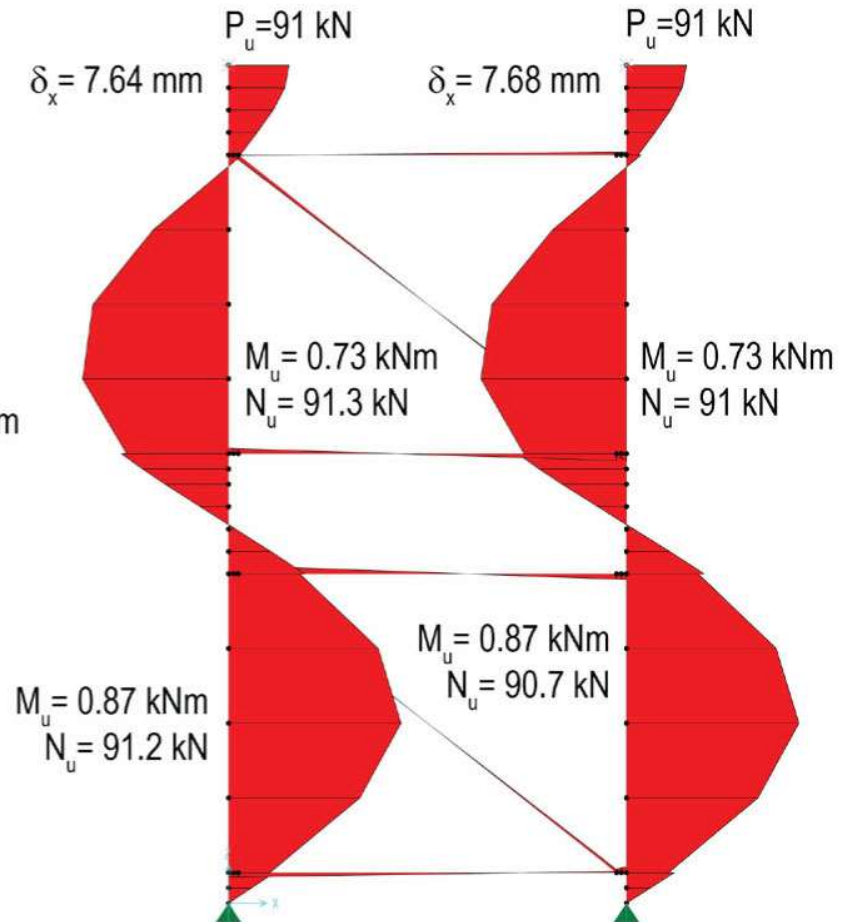
Check	STEP	$P_u$ (kN)	$M_u$ (kNm)	$R = P_u / \phi P_n$	$R + 8/9 M_u / \phi M_n$	Note
1	32	-93.4695	-1.623	0.802	1.245	Not Ok
2	31	-91.9690	-0.815	0.789	1.011	Not Ok
3	30	-90.1414	-0.458	0.773	0.898	Ok

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%**.

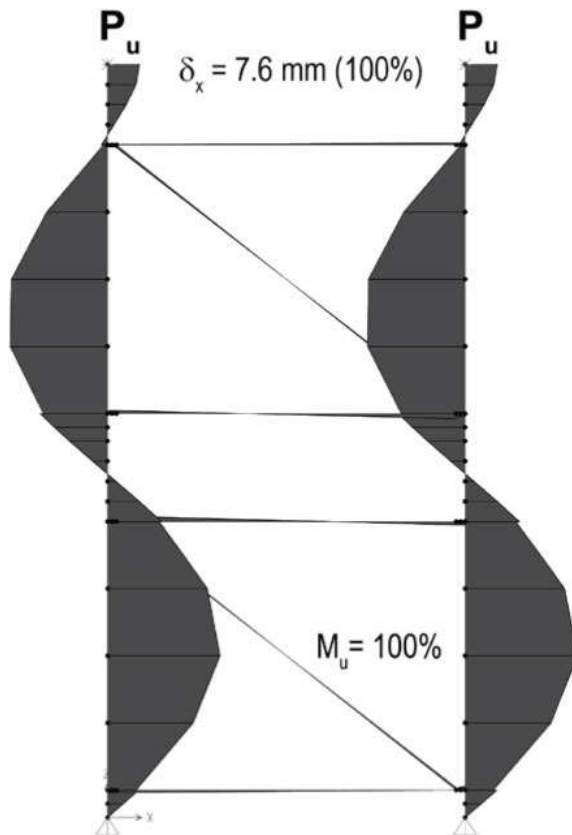


a). Case-2A

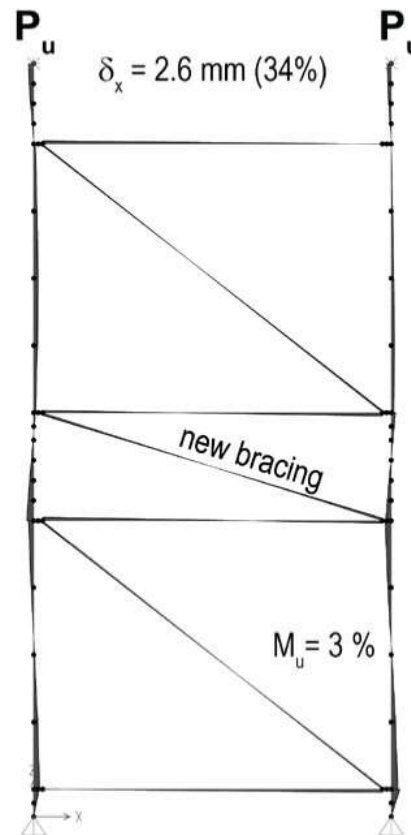


b). Case-7

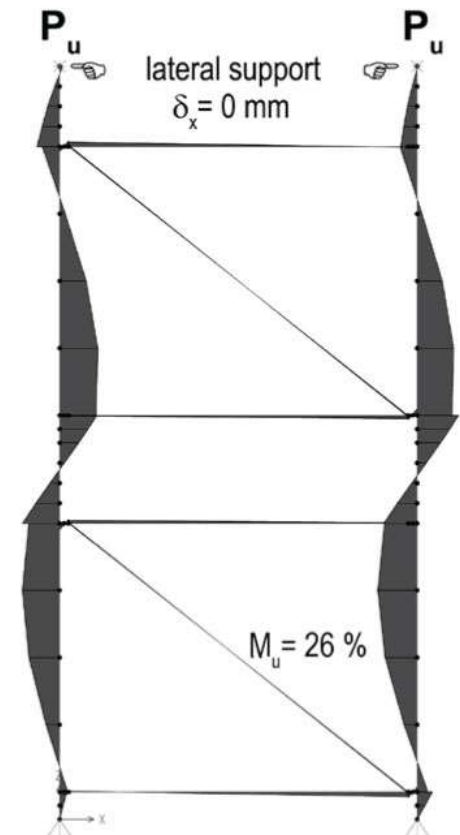
Gambar 38. Perbandingan perilaku perancah tingkat vs non-tingkat pada kondisi *ultimate*



a). Case-7

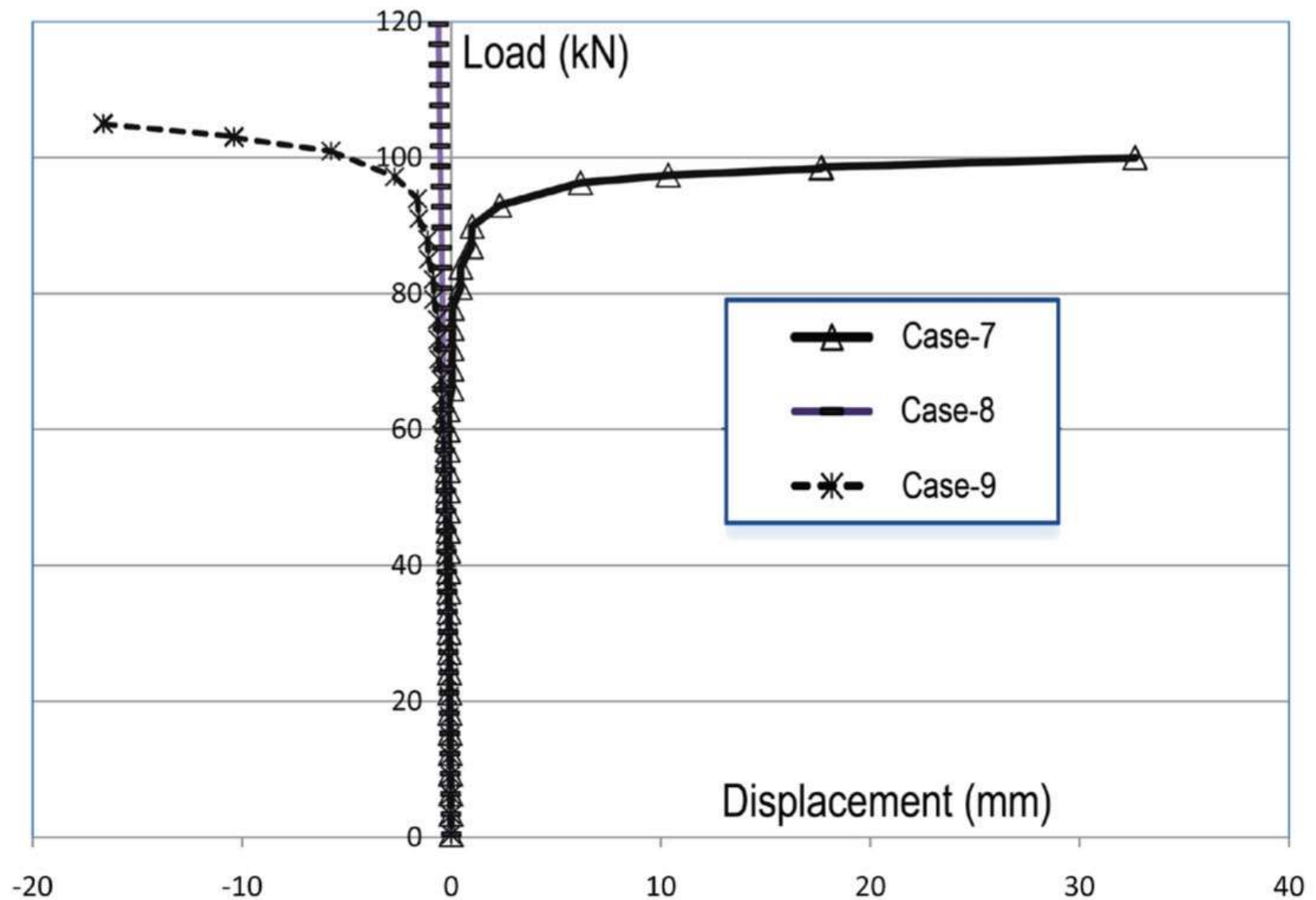


b). Case-8



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

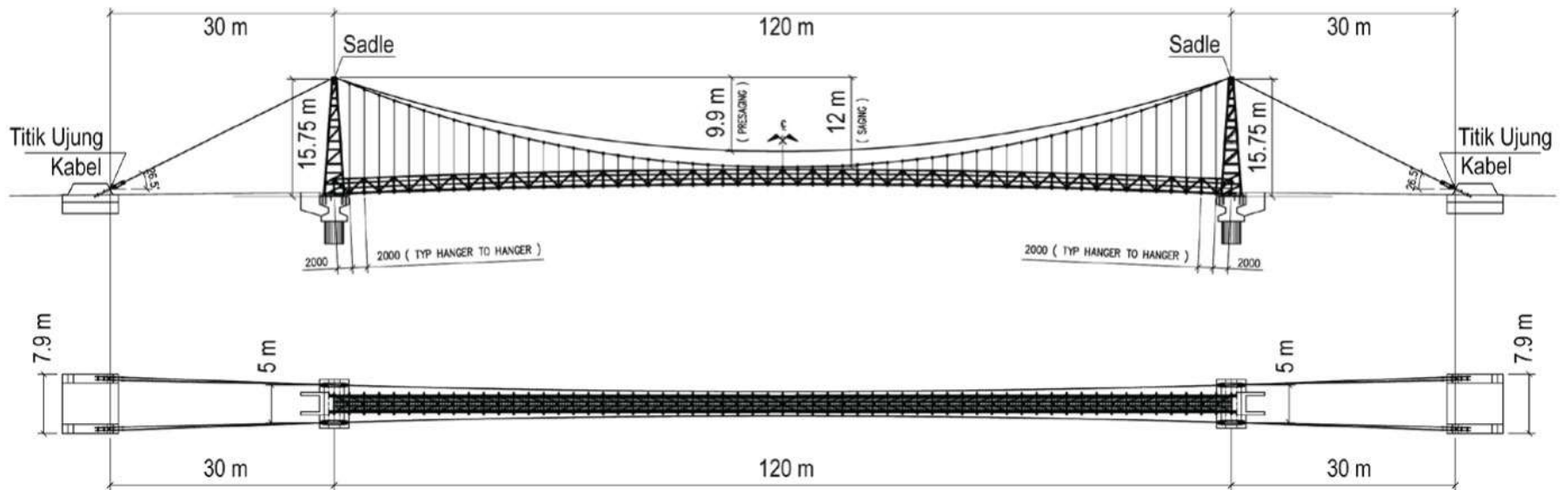


Gambar 41. Kondisi Jembatan Gantung Banjarsari II (Ref. Balai Besar VIII - PUPR)

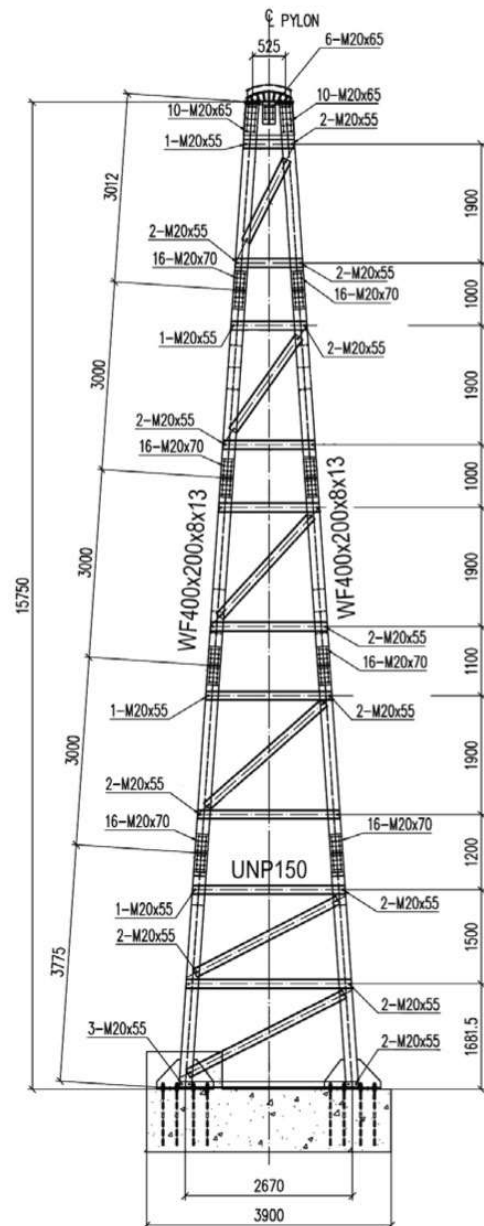




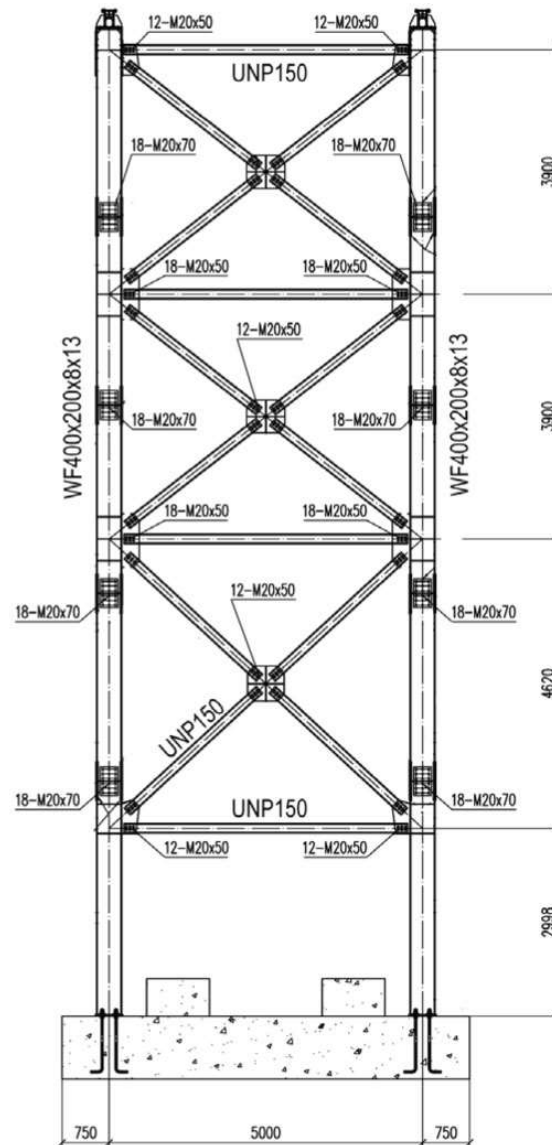
Gambar 42. Kondisi kerusakan sambungan *bracing* (Ref. Balai Besar VIII - PUPR)



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



(a). Searah Bentang Jembatan

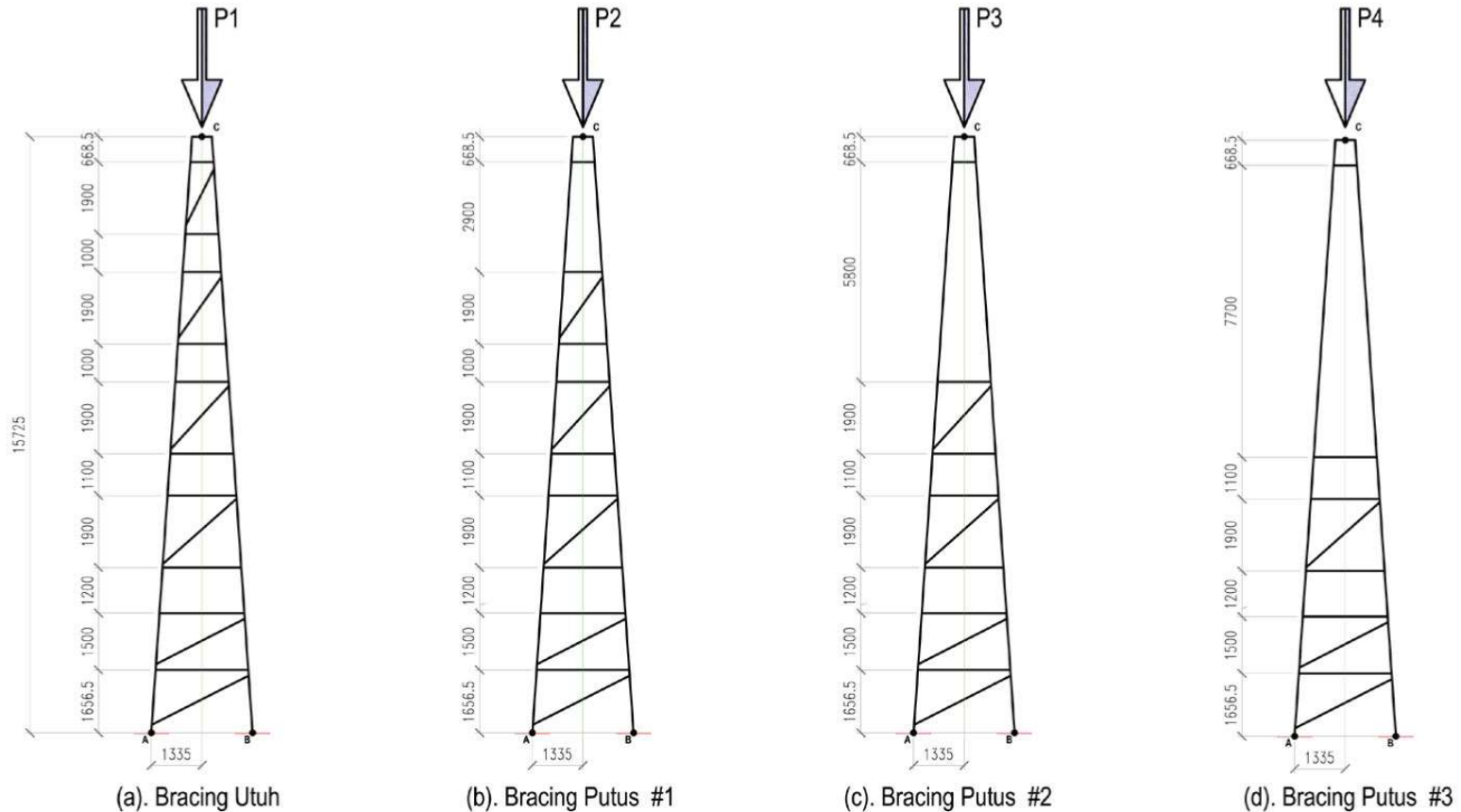


(b). Tegak Lurus Bentang Jembatan

Gambar 44. Detail Pilon Jembatan yang Runtuh



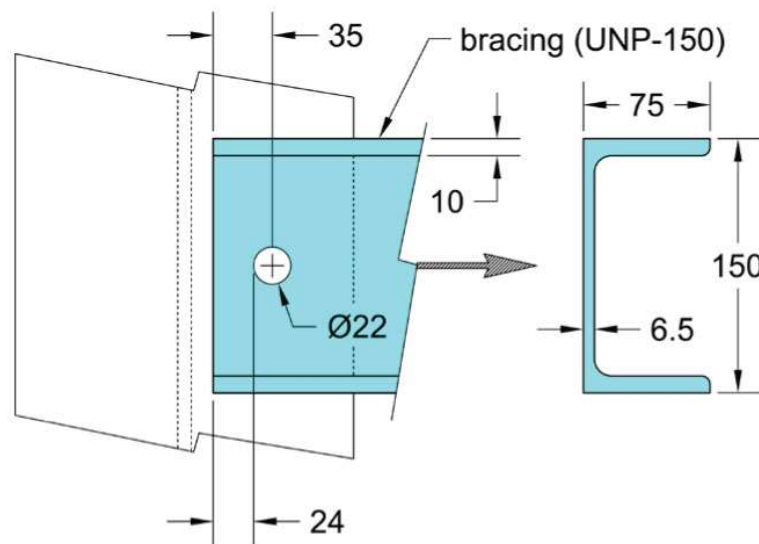
# Pengaruh Bracing Terhadap Kapasitas Pier



Gambar 45. Simulasi pilon dengan *bracing* yang dihilangkan

Konfigurasi Pilon	KL	$KL/r_{\min}$	Perilaku Kolom	$\phi P_n$	% relatif
<i>Bracing</i> Utuh	1900	41.9	tekuk inelastis	1694 kN	100%
<i>Bracing</i> Putus #1	2900	63.9	tekuk inelastis	1500 kN	89%
<i>Bracing</i> Putus #2	5800	134.6	tekuk elastis	787 kN	46%
<i>Bracing</i> Putus #3	7700	170.0	tekuk elastis	454 kN	27%

# Sambungan Bracing Tidak Memadai ?!?



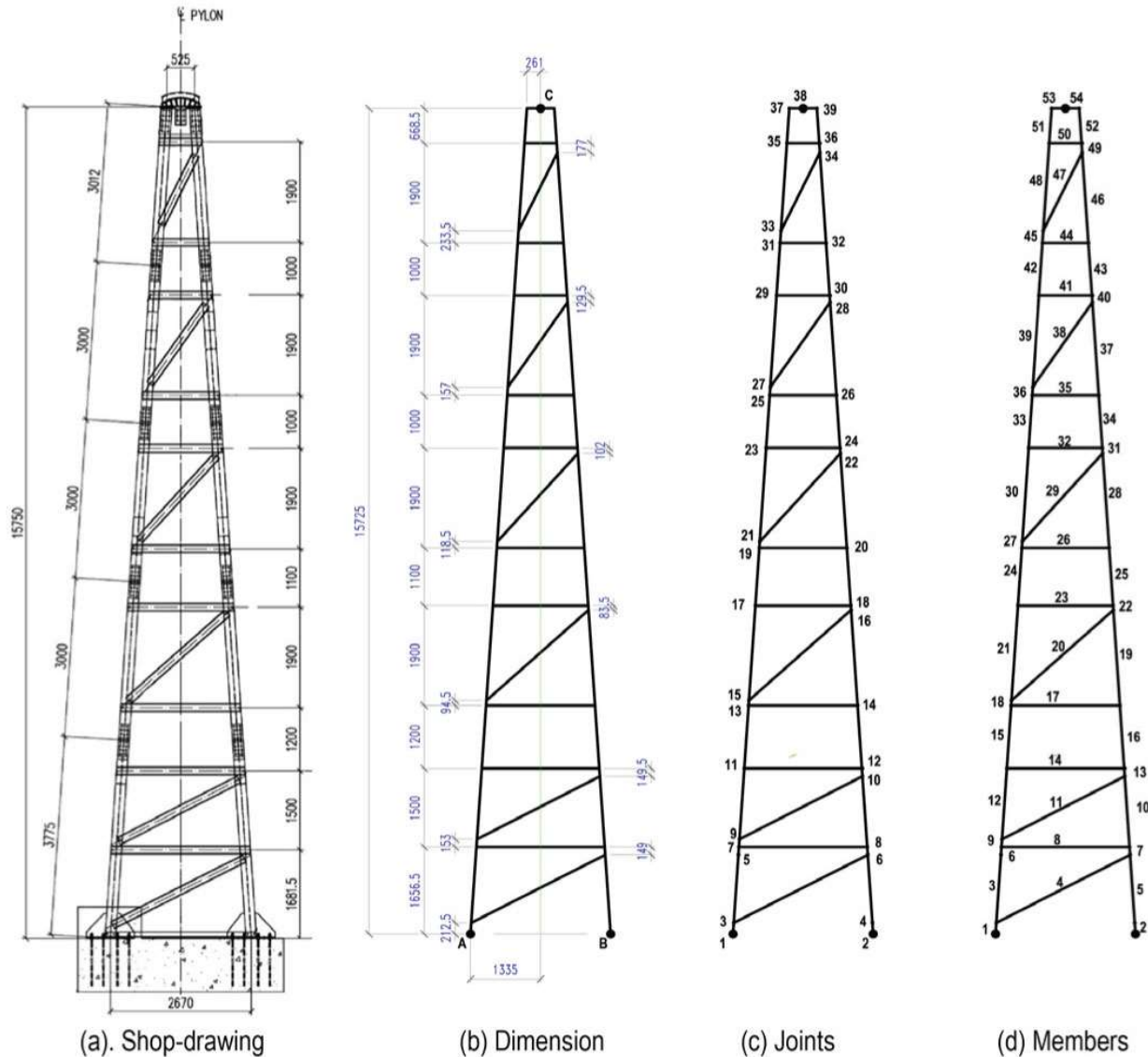
Gambar 53. Detail sambungan *bracing* (pilon arah tekuk)

**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  $\phi R_n = 93.6 \text{ kN}$

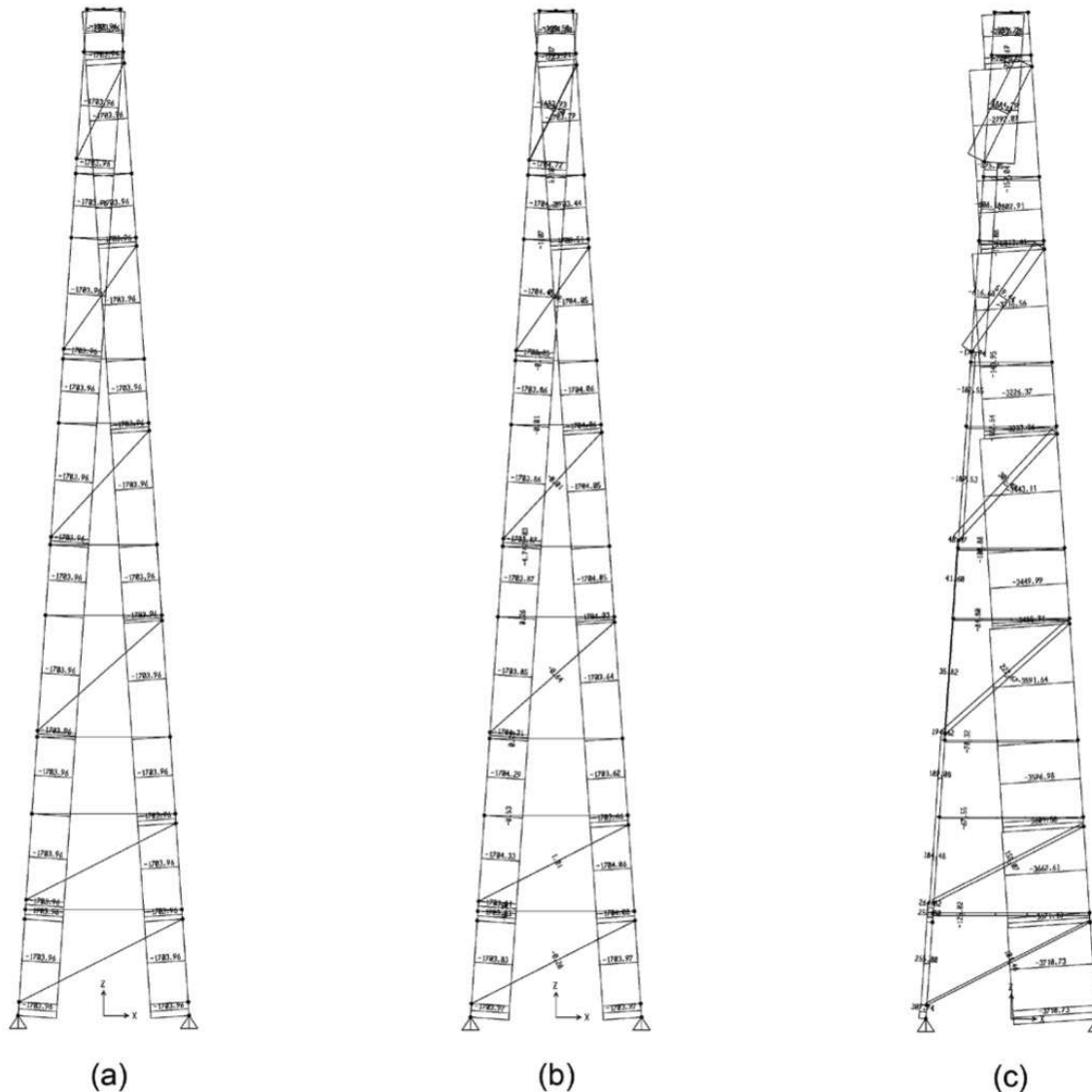
Jadi **hanya ±23%** dari kekuatan bracing itu sendiri.

# Analisis Struktur – Pemodelan Numerik



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

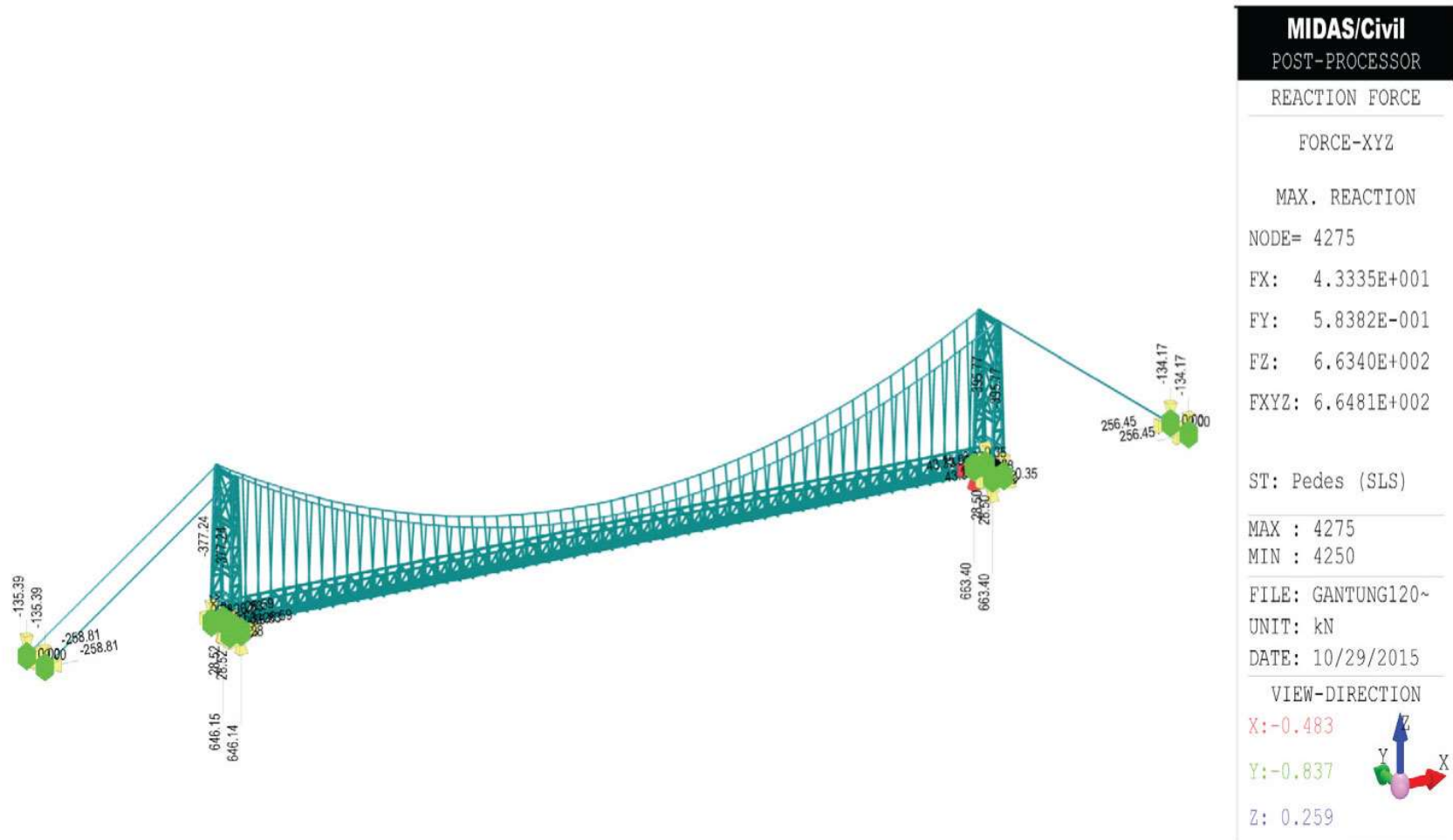
# Batang Nol Jika Beban Sentris



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



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



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

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

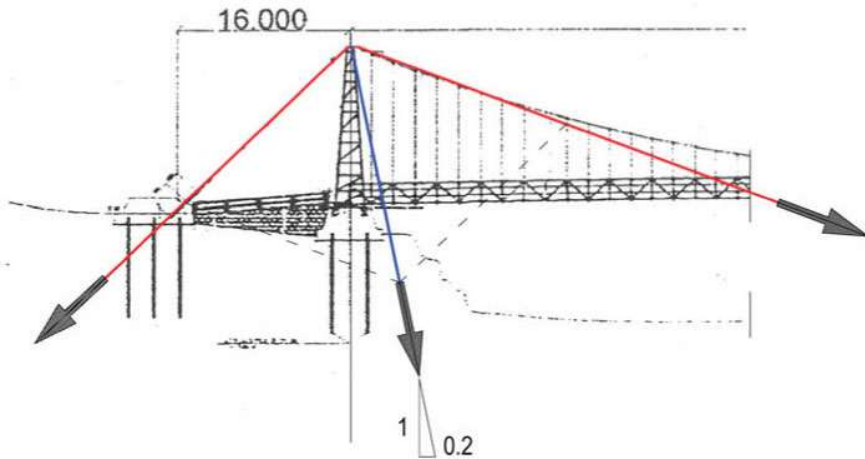


Gambar 49. Kunjungan ke proyek jembatan gantung Ciledug Wetan, Cirebon

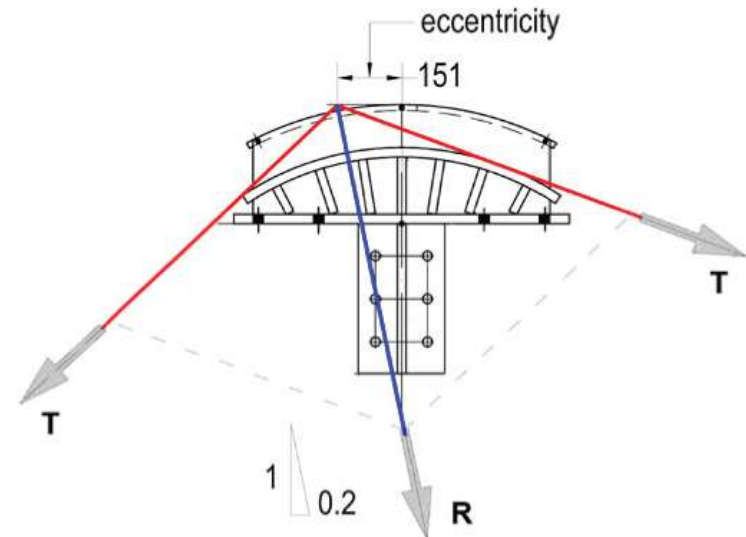
# Hipotesis Pemicu Keruntuhan



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

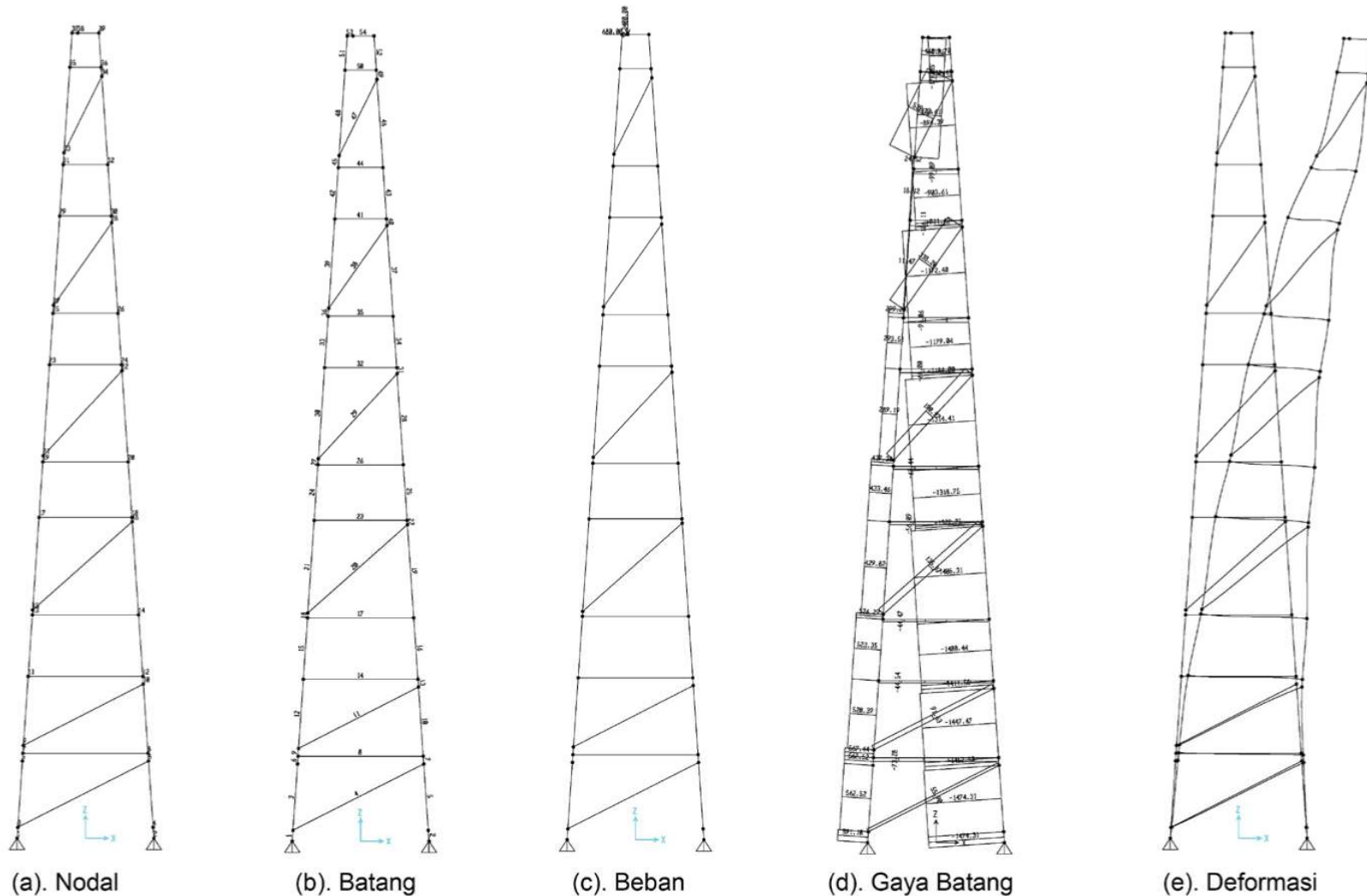


Gambar 51. Gaya lateral akibat orientasi sudut kabel



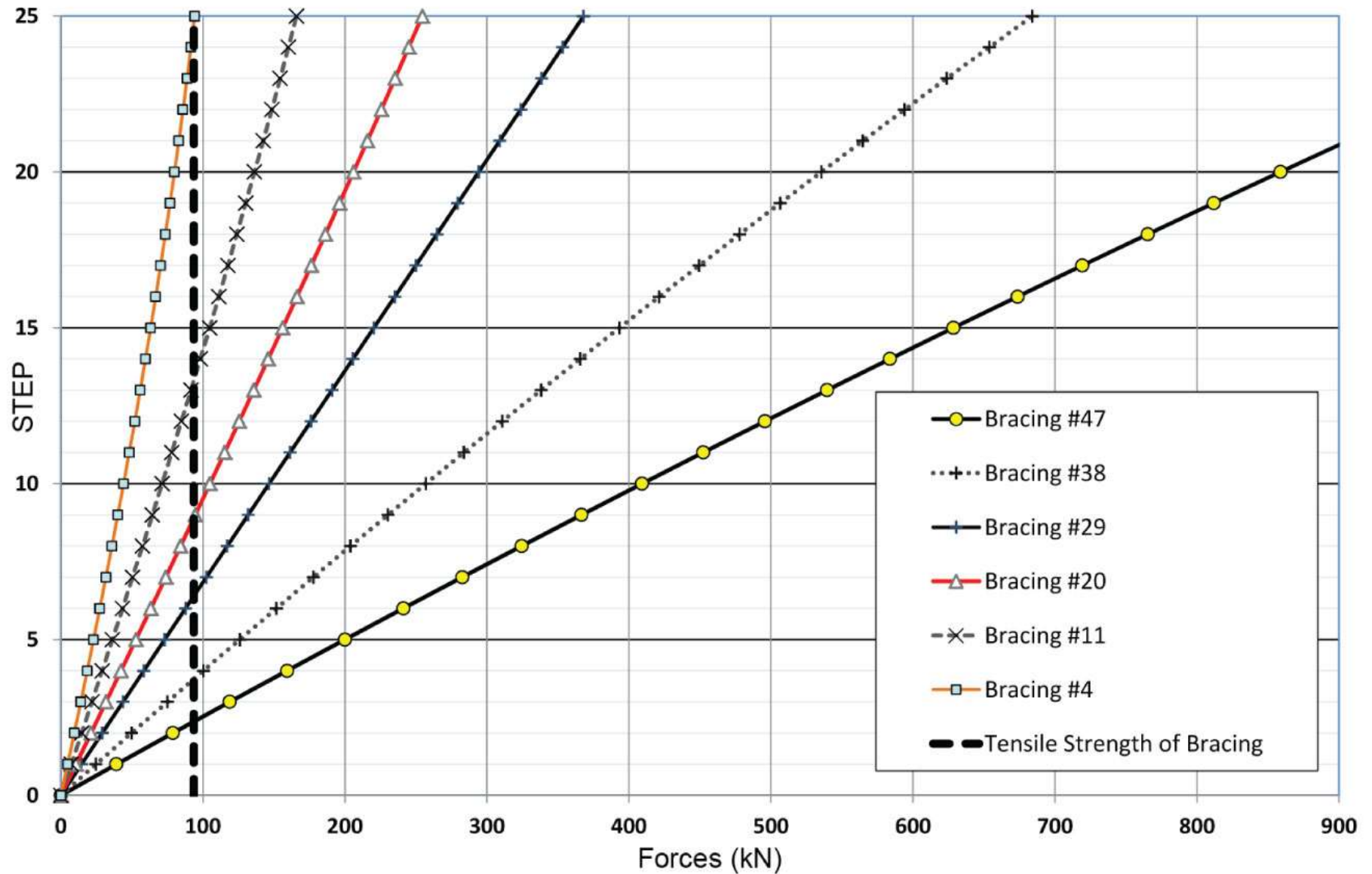
Gambar 52. Eksentrisitas akibat orientasi sudut kabel

# Pengaruh Beban Lateral dan Eksentris

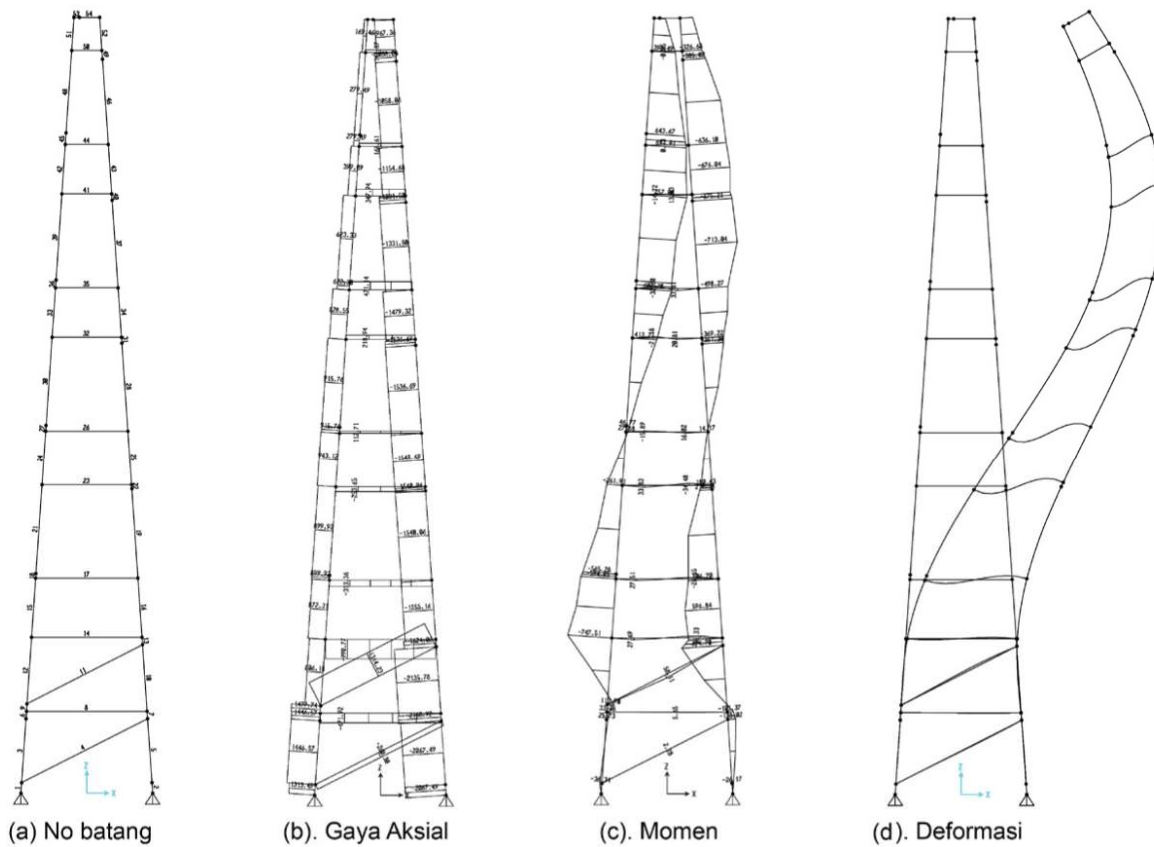


Gambar 54. Perilaku pilon dengan *bracing* (output STEP 13 dari 50)





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



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)	$R = P_u / \phi P_n$	$R + 8/9 M_u / \phi M_n$	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  $3.5/50 * P_v = 7\% P_v = 238 \text{ kN}$ .

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

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 international.



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

