

ANALISIS PERENCANAAN STRUKTUR BAJA MODULAR 4 LANTAI UNTUK HUNIAN PEKERJA DI IBU KOTA NEGARA

Martinus Nifotuhu Fau¹, Hari Nugraha Nurjaman², Sudarno P Tampubolon³ dan Riyanto Rivky⁴

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Indonesia, Jl. Mayjen Sutoyo No.2, Jakarta
e-mail: martinus.nifotuhofau@uki.ac.id

²Program Studi Teknik Sipil, Universitas Persada Indonesia YAI, Jl. Pangeran Diponegoro No.74, Jakarta
e-mail: hari_nurjaman37@yahoo.com

³Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Indonesia, Jl. Mayjen Sutoyo No.2, Jakarta
e-mail: sudarno.tampubolon@uki.ac.id

⁴Ikatan Ahli Pracetak dan Prategang Indonesia, Jakarta
e-mail: riyanrivky2730@gmail.com

ABSTRAK

Pembangunan Ibu Kota Negara (IKN) di Kalimantan merupakan Proyek Strategis Nasional dengan target pengerjaan konstruksi diharapkan dapat dilakukan dengan cepat dan tepat. Dengan menggunakan sistem struktur baja modular khususnya pada studi kasus yang akan dibahas yakni untuk bangunan hunian pekerja dengan jumlah tingkat 4 lantai, tentu dapat mempercepat proses konstruksi karena semua komponen struktur telah di produksi lebih awal kemudian tinggal diangkut dan dirakit di lokasi proyek. Selain proses konstruksi yang dapat dilakukan dengan lebih cepat, juga perlu diperhatikan terkait kinerja struktur baja modular tersebut dalam memikul kombinasi beban yang bekerja, baik beban gravitasi maupun beban lateral dari gempa dan angin, sehingga pada penelitian ini akan membahas terkait perencanaan struktur bangunan tersebut. Metode analisis yang digunakan adalah analisis linier yang berbasis preskriptif, pembebanan gravitasi dan beban angin direncanakan sesuai SNI 1727-2020, pembebanan gempa sesuai SNI 1726-2019, dan untuk desain struktur baja modular sesuai SNI 1729-2020. Pada penelitian ini diperoleh perbandingan gaya geser dan simpangan lantai dengan beban gempa dan beban angin, dimana yang dominan menentukan adalah beban lateral angin karena pada lokasi IKN beban gempa relatif kecil dan massa bangunan yang cukup ringan. Desain struktur baja modular dari seluruh kombinasi beban yang bekerja diperoleh bahwa syarat kekakuan yakni batasan simpangan lateral yang terjadi masih terpenuhi dan juga untuk syarat kekuatan yakni DCR (*Demand Capacity Ratio*) masih terpenuhi dimana DCR terbesar adalah 0.763 untuk *bresing*, 0.861 untuk balok anak, 0.725 untuk balok utama, dan 0.624 untuk kolom.

Kata kunci: modular, baja, gaya geser, simpangan lantai, DCR.

PENDAHULUAN

Struktur yang dibangun dengan sistem modular tentunya efektif untuk digunakan karena dapat mempercepat proses konstruksi dengan signifikan karena semua komponen telah di fabrikasi lebih awal dan di lapangan tinggal melakukan proses perakitan komponen tersebut. Proyek hunian pekerja IKN ini merupakan salah satu yang sangat diharapkan cepat selesai sehingga diputuskan menggunakan sistem modular. Selain dapat mempercepat proses konstruksi, sistem modular ini juga dapat mempermudah untuk melakukan pembongkaran kembali jika bangunan hunian sementara untuk pekerja ini tidak digunakan lagi. Adapun sistem struktur modular baja yang digunakan dan akan dibahas adalah Sistem Mobox (Modular Box) yang dikembangkan oleh PT Adhi Karya. Pada penelitian ini akan dilakukan kajian struktur untuk meninjau perilaku dan kinerja dari sistem Mobox ini dalam menahan kombinasi beban yang bekerja, dengan menggunakan parameter gaya geser dasar, simpangan antar lantai, efek P-delta, dan DCR (*Demand Capacity Ratio*).

TINJAUAN PUSTAKA

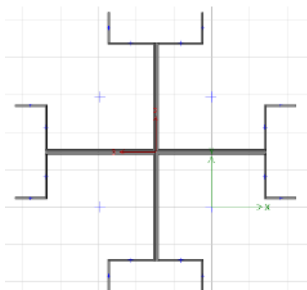
Sistem Struktur Baja Modular Box (Mobox)

Sistem Mobox yang dikembangkan oleh PT Adhi Karya ini, selain memiliki keunggulan pada kecepatan konstruksi, juga memiliki keunggulan karena dapat dikerjakan tanpa menggunakan alat berat, dan telah memperoleh rekor muri atas rekor pembangunan kantor sistem modular box tercepat tanpa alat berat. Ilustrasi sistem Mobox ini dapat dilihat seperti pada Gambar 1, dimana kolom dan balok disambung dengan komponen *corner fitting*.

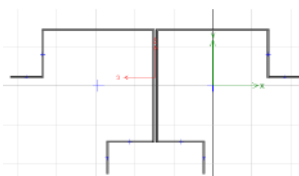


Gambar 1. Ilustrasi sistem modular baja Mobox

Mutu baja yang digunakan pada sistem ini adalah setara dengan SS400 atau A36 yakni dengan tegangan leleh 240 MPa dan tegangan ultimit 400 MPa. Penampang komponen struktur modular yang digunakan untuk lebih jelas seperti terlihat pada Gambar 2, dimana untuk komponen balok dan kolom terbuat dari profil C dan L tebal 2.3 mm yang dimodifikasi menjadi penampang tersusun, balok anak menggunakan besi hollow 40x80x1.5 mm, dan tambahan elemen bresing pipa 88.9x5.5 mm.



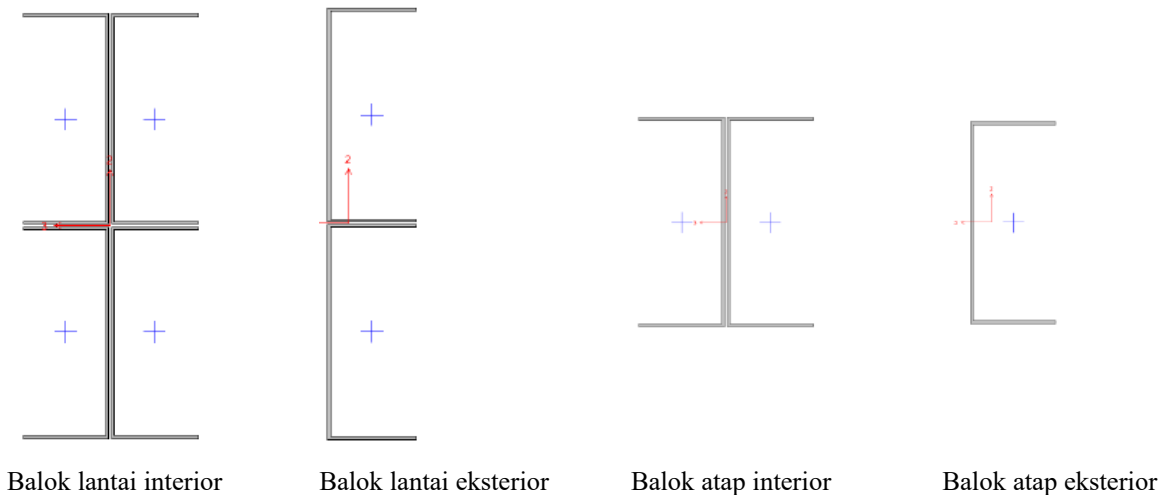
Kolom 4L



Kolom 2L



Kolom 1L



Gambar 2. Pemodelan penampang kolom dan balok sistem Mobox

Salah satu ciri khas dari sistem modular ini adalah sambungan komponen yang menggunakan *corner fitting* sehingga memberikan perilaku cukup fleksibel dan dilakukan penyesuaian pada panel zona saat analisis berdasarkan pengujian siklik skala penuh yang telah dilakukan di laboratorium.

Pembebanan Gravitasi

Pembebanan gravitasi terdiri dari beban mati (berat sendiri dan beban mati tambahan) dan beban hidup. Beban mati berat sendiri adalah merupakan berat komponen struktur dimana karena dimodelkan maka beban akan diperhitungkan otomatis oleh program. Sementara untuk beban mati tambahan atau *superimpose dead load* terdiri dari penutup lantai GRC, plafond, penggantung dan ME dan dinding *sandwich* adalah 60 kg/m².

Untuk beban hidup rencana digunakan sesuai pada SNI 1727-2020, dimana untuk hunian digunakan 1.92 kN/m² pada lantai tipikal dan 0.96 kN/m² untuk atap seperti terlihat pada Tabel 1 berikut ini.

Tabel 1. Beban hidup merata minimum sesuai SNI 1727-2020 (Tabel 4.3-1)

Hunian atau penggunaan	Merata, Lo psf (kN/m ²)	Reduksi beban hidup diizinkan? (No. Pasal)	Reduksi beban Hidup berlantai banyak diizinkan? (No. Pasal)	Terpusat lb (kN)	Juga lihat pasal
Rumah tinggal					
Hunian satu dan dua keluarga					
Loteng yang tidak dapat dihuni tanpa gudang	10 (0,48)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)		4.12.1
Loteng yang tidak dapat dihuni dengan gudang	20 (0,96)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)		4.12.1
Loteng yang dapat dihuni dan ruang tidur	30 (1,44)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)		
Semua ruang kecuali tangga	40 (1,92)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)		
Semua hunian rumah tinggal lainnya					
Ruang pribadi dan koridornya	40 (1,92)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)		

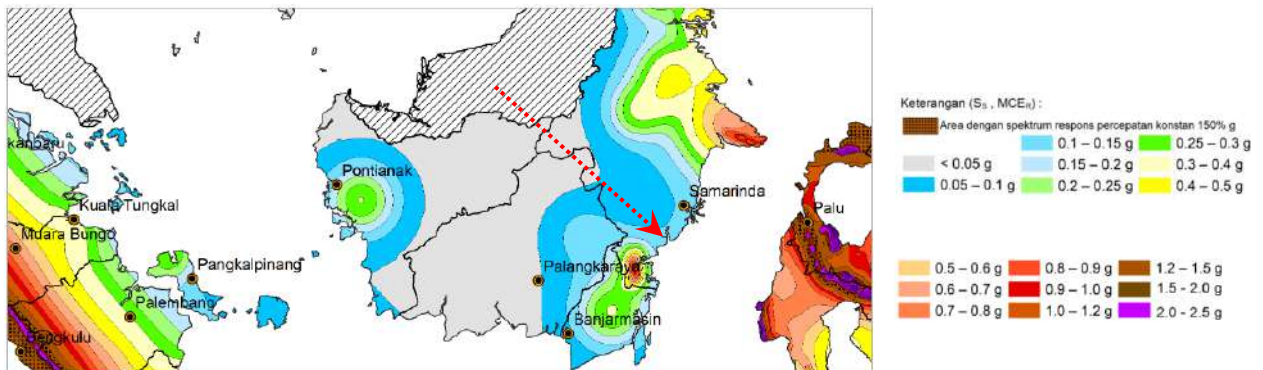
Ruang publik	100 (4,79)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)		
Koridor ruang publik	100 (4,79)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)		

Sistem Struktur Penahan Lateral

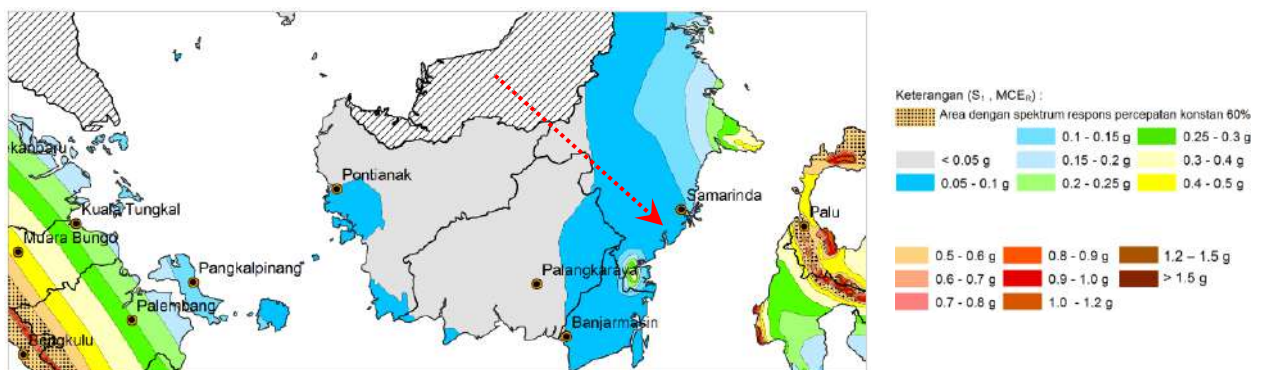
Bangunan ini berada di daerah Ibu Kota Negara (IKN), Kecamatan Sepaku, Kabupaten Penajam Paser Utara, Kalimantan Timur. Studi kasus ini termasuk dalam daerah dengan kategori desain seismik (KDS) B dengan kelas situs tanah sedang (SD) berdasarkan nilai NSPT yang ada. Sehingga sistem struktur penahan lateral yang digunakan dengan perkuatan bresing ini berdasarkan tabel 12 SNI 1726:2019 adalah Sistem Rangka Terbreis Konsentris Biasa (RBKB) dengan nilai faktor modifikasi respons (R) = 3.25; faktor kuat lebih sistem (Ω_0) = 2; dan faktor pembesaran simpangan (C_d) = 3.25. Adapun penggunaan sistem bresing ini pada sistem modular ini adalah karena terdapat modifikasi panel zone pada struktur setelah di evaluasi dengan hasil pengujian siklik skala penuh di laboratorium.

Pembebanan Gempa

Beban gempa didefinisikan berdasarkan SNI 1726-2019, dan peta gempa berdasarkan Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia menggunakan percepatan spektrum respons MCER dengan kemungkinan terlampaui 2% dalam 50 tahun, dari peta ini akan diperoleh percepatan batuan dasar pada periode pendek (S_s) dan percepatan batuan dasar periode 1 detik (S_1) seperti terlihat pada Gambar 3 dan Gambar 4 berikut ini.



Gambar 3. Peta percepatan batuan dasar pada periode pendek (S_s) pada area IKN



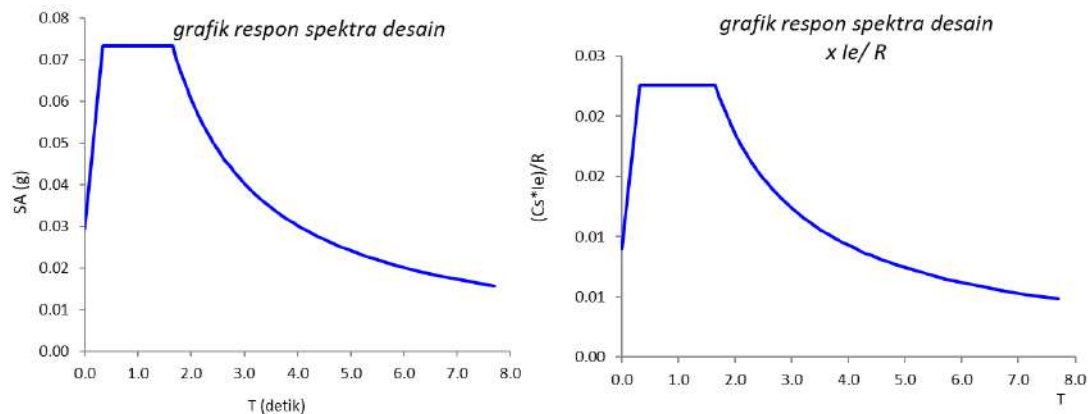
Gambar 4. Peta percepatan batuan dasar pada periode 1 detik (S_1) pada area IKN

Lokasi bangunan berada pada kategori tanah sedang (SD) dan karena fungsi bangunan adalah hunian maka termasuk kategori risiko II dengan faktor keutamaan adalah 1.0 sehingga dapat diperoleh parameter beban

gempa desain seperti pada Tabel 2 dan gambar kurva respons spektra untuk beban gempa dinamika seperti pada Gambar 5 berikut ini.

Tabel 2. Parameter beban gempa desain sesuai SNI 1726-2019

Parameter Seismik		Nilai
Kategori Resiko		I
Faktor Keutamaan	I_e	1.00
Spektral Percepatan Terpetakan	S_s	0.069
	S_1	0.076
Kelas Situs		SD
Koefisien kelas Situs	F_a	1.600
	F_v	2.400
Spektral Respon Percepatan	$S_{DS} = 2/3 \times S_s \times F_a$	0.073
	$S_{D1} = 2/3 \times S_1 \times F_v$	0.121
Kategori Desain Seismik	KDS	B

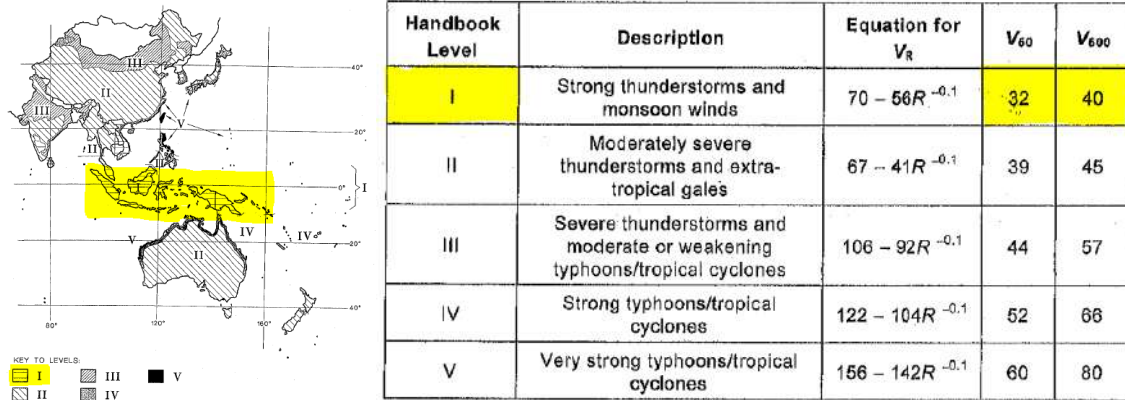


Gambar 5. Grafik respon spektrum percepatan gempa daerah IKN, Kalimantan Timur

Pembebanan Angin

Beban angin pada perencanaan ini akan di analisis sesuai dengan SNI 1727-2020 yang saat ini berlaku. Sebagai acuan normatif, pada analisis ini dapat mengambil nilai kecepatan angin dasar, V (m/s), berdasarkan standar dari Australia, HB 212-2002 – *Design Wind Speeds for the Asia-Pacific Region*. Standar ini merupakan publikasi yang dikeluarkan oleh Australia Standard untuk nilai kecepatan angin pada area Asia Pasifik. Menurut HB 212-2002, wilayah Indonesia sebagai daerah di sekitar garis ekuator masuk ke dalam level I, yang ditunjukkan pada Gambar berikut. Dimana dari publikasi ini dapat kita lihat bahwa nilai *wind speed* adalah 32 m/s untuk periode 50 tahunan dan 40 m/s untuk periode 500 tahunan. Berdasarkan standar tersebut, kita dapat mengambil nilai $V = 32$ m/s untuk desain beban angin pada kondisi layan (*serviceability design*) dan $V = 40$ m/s pada kondisi batas (*strength design*), sehingga dalam hal ini digunakan 32 m/s atau 72 mph dengan periode 50 tahunan, seperti pada Gambar 6 berikut.

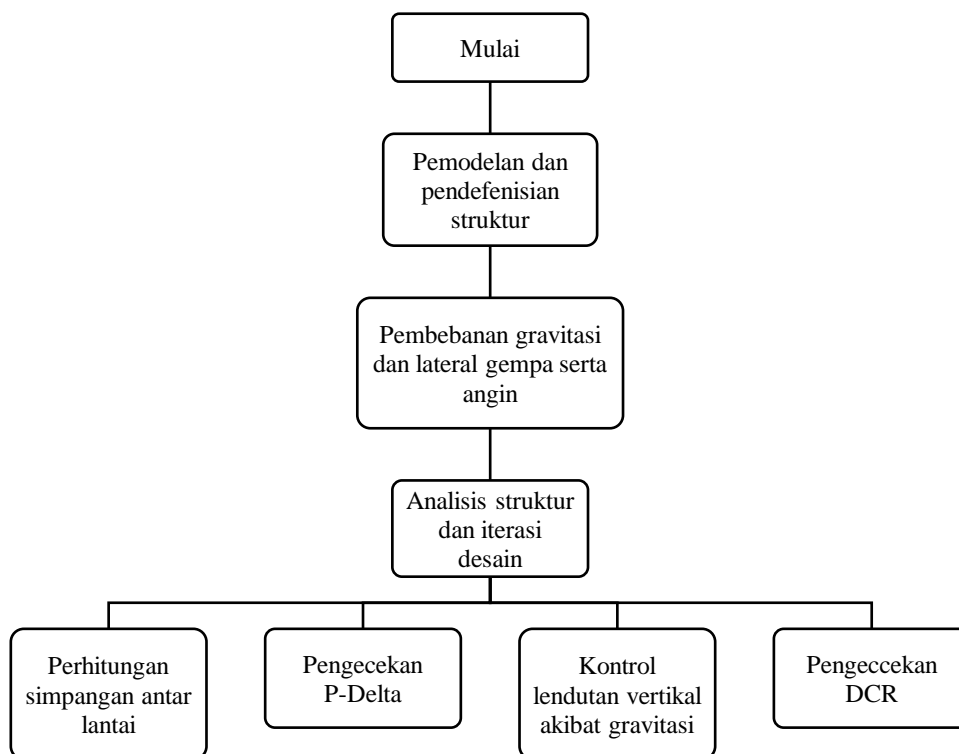
HB 212-2002



Gambar 6. Kecepatan angin dasar sesuai HB 212-2002

METODE PENELITIAN

Alur perencanaan struktur ini seperti terlihat pada bagan alir pada Gambar 7 berikut ini.



Gambar 7. Bagan alir perencanaan struktur

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Dinamik Struktur

Hasil analisis dinamik pada bagian ini akan menggambarkan karakteristik dinamik struktur yang dikenali dengan beberapa parameter seperti periode natural struktur, ragam getar (*mode shape*), dan faktor partisipasi masa. Periode dan ragam getar struktur dapat dilihat seperti pada Gambar 8, dan besaran partisipasi massa setiap modenya diperlihatkan pada Tabel 3.

Mode 1 – Translasi X

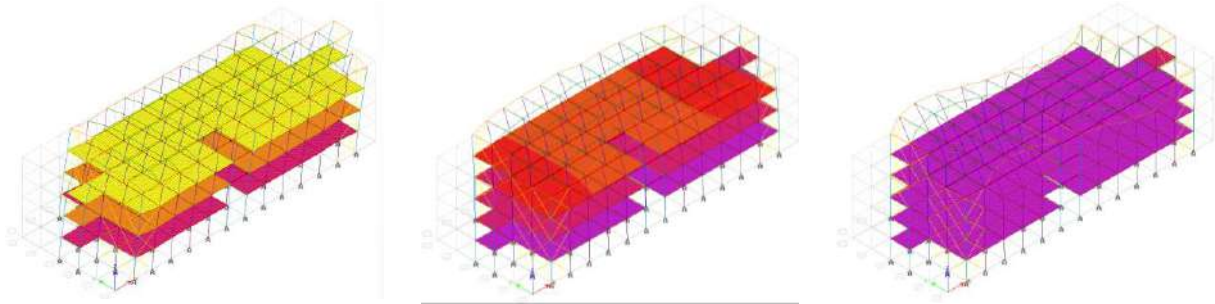
Perida: 0.584 detik

Mode 2 – Translasi Y

Perida: 0.428 detik

Mode 3 – Rotasi Z

Perida: 0.318 detik



Gambar 8. Ragam getar dan periode natural struktur

Pada gambar diatas, diperoleh bahwa ragam getar dominan awal struktur sudah cukup ideal yakni dengan mode translasi di awal pada mode pertama dan kedua, dan setelahnya baru terdapat mode rotasi.

Tabel 3. Faktor partisipasi massa struktur

Mode	Period, sec.	Translasi X	Translasi Y	Rotasi Z
1	0.584	69.84	0.00	0.00
2	0.428	0.01	43.03	0.01
3	0.318	0.01	0.08	10.96
4	0.304	0.00	1.35	0.01
5	0.281	0.00	0.23	1.86
6	0.279	0.05	0.09	0.11
7	0.276	0.00	0.51	0.13
8	0.272	0.02	0.00	0.03
9	0.262	15.27	0.00	0.00
10	0.256	0.07	2.27	0.36
11	0.251	0.01	11.10	0.26
12	0.246	0.00	0.04	0.04
13	0.238	0.00	20.69	0.10
14	0.237	0.00	3.00	0.06
15	0.228	0.26	0.12	0.04
16	0.227	0.00	3.26	0.01
17	0.172	0.00	0.01	71.47
18	0.134	10.54	1.16	0.01
19	0.129	1.83	7.13	0.02
20	0.115	0.11	0.32	0.07
21	0.097	0.24	0.77	0.05
22	0.090	0.00	0.02	0.00
23	0.086	0.09	1.25	0.00
24	0.084	0.00	0.00	0.00
25	0.083	1.00	0.23	0.01
26	0.078	0.10	0.01	0.02
27	0.070	0.47	0.01	0.30
28	0.068	0.00	0.03	10.44
Jumlah > 90%		99.94	96.72	96.38

Pada tabel diatas, diperoleh bahwa partisipasi massa untuk jumlah mode 28 sudah melebihi dari 90% sehingga sudah memenuhi persyaratan desain sesuai SNI 1726-2019.

Perbandingan Gaya Geser

Gaya geser dari analisis beban gempa diperoleh seperti pada tabulasi desain analisis gempa statik berikut ini pada Tabel 4 sesuai SNI 1726-2019.



Tabel 4. Parameter desain dan gaya geser seismik sesuai SNI 1726-2019

Kategori Resiko			II
Faktor Keutamaan	I_e	=	1.00
Spektral Percepatan Terpetakan	S_s	=	0.069
	S_1	=	0.076
Kelas Situs		=	SD
Koefisien kelas Situs	F_a	=	1.600
	F_v	=	2.400
Spektral Respon Percepatan	$S_{DS} = 2/3 \times S_s \times F_a$	=	0.073 g
	$S_{D1} = 2/3 \times S_s \times F_a$	=	0.121 g
Kategori Desain Seismik	K_{Ds}	=	B
Sistem Struktur	BAJA BRESING KOSENTRIS BIASA		
Koefisien Modifikasi Respon	R	=	3.25
Fsktor kuat Lebih Sistem	Ω_0	=	2.00
Faktor Pembesaran Defleksi	C_d	=	3.25
Periode Getar Struktur	T_x	=	0.5780 detik
	T_v	=	0.4200 detik
	T_a	=	0.2988 detik
	$T_{max} = C_u \times T_a$	=	0.4183 detik
	T_x terpakai	=	0.5780 detik
	T_v terpakai	=	0.4475 detik
Koefisien Respon Seismik			
C_s (persamaan 31)	$S_{DS}/(R I_e)$	=	0.0225
C_s (persamaan 32), arah x	$S_{D1}/(T.R I_e)$	=	0.0225
arah y	$S_{D1}/(T.R I_e)$	=	0.0225
$C_{s min}$ (persamaan 34)	$0.044 * S_{DS} * I_e \geq 0.01$	=	0.01
C_s terpakai, arah x		=	0.0225
arah y		=	0.0225
Berat Seismik		=	329.71 tonf
Gaya Geser Dasar Desain Minimum, $V=1.0 * C_s * W$			
	arah x	=	72.77 kN
	arah y	=	72.77 kN

Selanjutnya karena analisis gempa yang akan digunakan adalah analisis dinamik, maka perlu dilakukan faktor skala terhadap beban gempa dinamik seperti pada Tabel 5 berikut ini.

Tabel 5. Beban gempa dinamik statik-dinamik untuk faktor skala

Arah X								Arah Y							
Faktor Skala = $\frac{1.0 \times V_1}{VCQC} = \frac{72.77}{52.38} = 1.389$								Faktor Skala = $\frac{1.0 \times V_1}{VCQC} = \frac{72.77}{40.07} = 1.816$							
Tabel perbandingan gaya geser lantai (arah x)								Tabel perbandingan gaya geser lantai (arah y)							
Lantai	Tinggi	$F_{xstatik}$, kN	$F_{xdinamik}$, kN	Cumulatif $F_{xstatik}$, kN	Cumulatif $F_{xdinamik}$, kN	Cumulatif desain, kN	Desain, kN	Lantai	Tinggi	$F_{ystatik}$, kN	$F_{ydinamik}$, kN	Cumulatif $F_{ystatik}$, kN	Cumulatif $F_{ydinamik}$, kN	Cumulatif desain, kN	Desain, kN
4	11.20	16.96	15.97	16.96	15.97	22.19	22.19	4	11.20	16.66	13.91	16.66	13.91	25.26	25.26
3	8.40	28.26	19.45	45.22	35.42	49.21	27.02	3	8.40	28.07	12.02	44.73	25.93	47.09	21.82
2	5.60	18.53	11.60	63.75	47.02	65.33	16.12	2	5.60	18.70	9.10	63.42	35.03	63.61	16.53
1	2.80	9.02	5.36	72.77	52.38	72.77	7.44	1	2.80	9.35	5.04	72.77	40.07	72.77	9.16

Untuk beban angin sesuai kecepatan angin dasar yang dibahas diawal dan dengan prosedur perhitungan pada SNI 1727-2020, diperoleh gaya geser untuk beban angin seperti pada Tabel 6 berikut ini.

Tabel 6. Gaya geser akibat beban angin desain

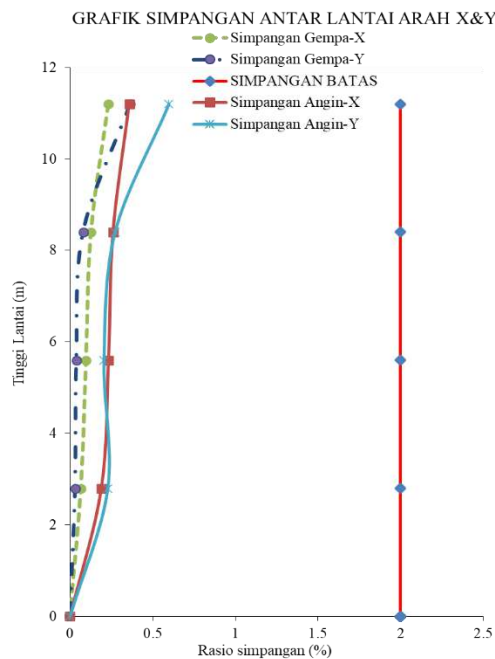
Story	Output Case	Location	P kN	VX kN	VY kN
LT DAK	Wind X	Bottom	0	-64.68	0
LT 4	Wind X	Bottom	0	-129.36	0
LT 3	Wind X	Bottom	0	-194.04	0
LT 2	Wind X	Bottom	0	-258.72	0

Story	Output Case	Location	P kN	VX kN	VY kN
LT DAK	Wind Y	Bottom	0	0	-161.7
LT 4	Wind Y	Bottom	0	0	-323.4
LT 3	Wind Y	Bottom	0	0	-485.1
LT 2	Wind Y	Bottom	0	0	-646.8

Dari hasil perhitungan gaya geser lateral akibat beban gempa maupun beban angin, diperoleh bahwa yang menentukan untuk desain adalah akibat beban angin dimana gaya geser dasar akibat beban angin jauh lebih besar dari beban gempa. Hal ini terjadi karena struktur berada pada zona gempa yang cukup rendah dan massa struktur bangunan yang cukup ringan, sehingga beban lateral yang akan dominan adalah beban angin.

Perbandingan Simpangan Lantai

Sebagai persyaratan desain, dimana pada SNI 1726-2019 disebutkan bahwa simpangan antar lantai untuk studi kasus bangunan ini tidak boleh melebihi drift 2%, berikut ini ditampilkan hasil simpangan antar lantai struktur, baik akibat beban gempa maupun akibat beban angin, agar dapat dilihat perbedaan respons dari kedua beban lateral tersebut, seperti terlihat pada Gambar 9 berikut ini.



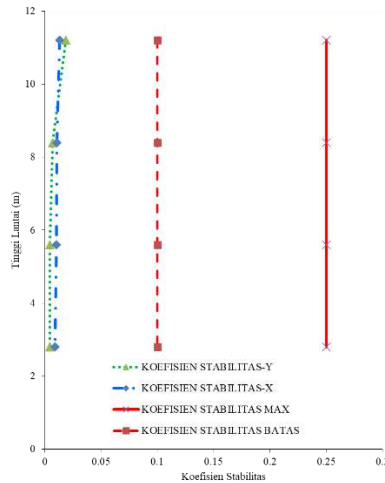
Gambar 9. Simpangan antar lantai akibat beban gempa dan beban angin

Seperti halnya gaya geser sebelumnya, pada gambar diatas diperoleh bahwa simpangan antar lantai yang terjadi juga dominan yang menentukan adalah akibat beban lateral angin.

Pengecekan Efek P-Delta

Berdasarkan SNI 1726-2019 dilakukan pengecekan stabilitas efek P-delta, dan hasilnya seperti terlihat pada grafik Gambar 10 berikut ini.

GRAFIK KOEFISIEN STABILITAS, ARAH-X & Y (P-delta EFEK)



Gambar 10. Simpangan antar lantai akibat beban gempa dan beban angin

Pada pengecekan stabilitas P-delta diatas, diperoleh bahwa stabilitas masih jauh memenuhi syarat batas yang ditentukan pada SNI 1726-2019.

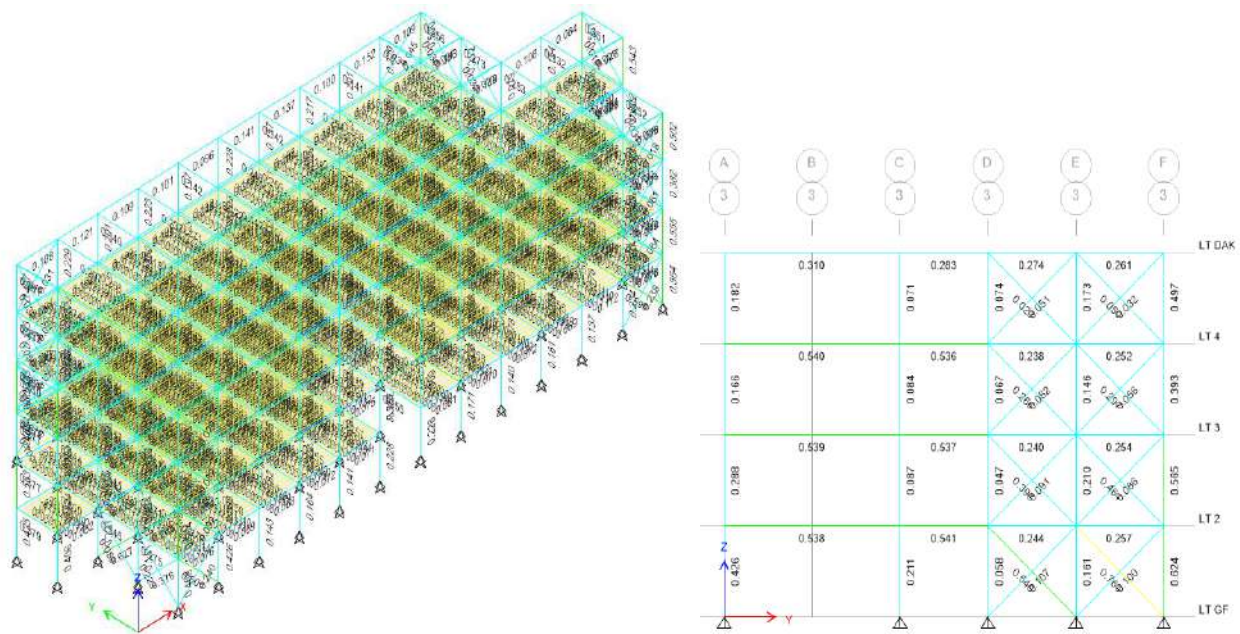
Pengecekan DCR Elemen Struktur

Parameter yang cukup menentukan dalam pengecekan desain struktur adalah dengan nilai DCR (*Demand Capacity Ratio*) setiap elemen struktur. Dimana DCR yang diperoleh adalah dari semua kombinasi beban yang telah di definisikan mulai dari gravitasi, beban gempa dan beban angin, seperti terlihat pada Tabel 7 berikut ini.

Tabel 7. Kombinasi beban untuk desain dalam memperoleh DCR

COMBO 1	1.4 D							
COMBO 2	1.2 D + 1.6 L							
COMBO 3	1.21 D	+	1 L	+	1.00	Eqx	+	0.30 Eqy
COMBO 4	1.21 D	+	1 L	+	1.00	Eqx	-	0.30 Eqy
COMBO 5	1.21 D	+	1 L	-	1.00	Eqx	-	0.30 Eqy
COMBO 6	1.21 D	+	1 L	-	1.00	Eqx	+	0.30 Eqy
COMBO 7	1.21 D	+	1 L	+	0.30	Eqx	+	1.00 Eqy
COMBO 8	1.21 D	+	1 L	+	0.30	Eqx	-	1.00 Eqy
COMBO 9	1.21 D	+	1 L	-	0.30	Eqx	-	1.00 Eqy
COMBO 10	1.21 D	+	1 L	-	0.30	Eqx	+	1.00 Eqy
COMBO 11	0.89 D	+			1.00	Eqx	+	0.3 Eqy
COMBO 12	0.89 D	+			1.00	Eqx	-	0.3 Eqy
COMBO 13	0.89 D	-			1.00	Eqx	-	0.3 Eqy
COMBO 14	0.89 D	-			1.00	Eqx	+	0.3 Eqy
COMBO 15	0.89 D	+		0.30	Eqx	+	1.00 Eqy	
COMBO 16	0.89 D	+		0.30	Eqx	-	1.00 Eqy	
COMBO 17	0.89 D	-		0.30	Eqx	-	1.00 Eqy	
COMBO 18	0.89 D	-		0.30	Eqx	+	1.00 Eqy	
COMBO 19	1.2 D + 1 L	+		1.00	Wx			
COMBO 20	1.2 D + 1 L	+		1.00	Wy			
COMBO 21	0.9 D	+		1.00	Wx			
COMBO 22	0.9 D	+		1.00	Wy			

Hasil analisis DCR struktur baja modular 4 lantai ini seperti terlihat pada Gambar 11 berikut ini.



Gambar 11. DCR elemen struktur baja modular 4 lantai untuk hunian pekerja di IKN

Pada gambar diatas, diperoleh bahwa DCR komponen struktur sudah terpenuhi semua dimana tidak ada DCR elemen yang melebihi nilai 1. Untuk komponen bresing DCR terbesar adalah 0.763, untuk balok anak adalah 0.861, untuk balok utama adalah 0.725, dan untuk kolom adalah 0.624.

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis dan pembahasan yang telah disampaikan sebelumnya terkait perencanaan struktur baja modular 4 lantai untuk hunian pekerja di IKN ini, diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

- Pembebanan lateral yang menentukan pada studi kasus ini adalah akibat beban lateral angin yang ditunjukkan dengan nilai gaya geser dasar dan simpangan antar lantai yang terjadi, karena merupakan daerah dengan zona gempa rendah, serta ketinggian 11.2 m dengan massa bangunan yang cukup ringan.
- Persyaratan kinerja berbasis preskriptif berdasarkan SNI 1726-2019 dengan parameter simpangan antar lantai dan P-delta sudah terpenuhi.
- DCR elemen struktur baja modular pada studi kasus ini sudah terpenuhi semua.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standarisasi Nasional. 2019. Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung. SNI 1726:2019. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. 2020. Beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain. SNI 1727:2020. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. 2020. Spesifikasi untuk bangunan gedung baja struktural. SNI 1729:2020. Jakarta.
- PT Adhi Karya. 2022. Technical Proposal. Jakarta.

Upaya perbaikan sambungan link ke kolom telah dilakukan oleh Okazaki dkk (2004,2005) dengan perubahan metode sambungan end plate tidak hanya metode pengelasan juga tipe perkuatan sambungan. Moestopo dan Panjaitan (2012) juga telah melakukan perbaikan kinerja dari link pendek dengan melakukan perkuatan dengan menambah wing plate serta peningkatan mutu flange dengan menggunakan link built up. Moestopo dan panjaitan memberikan catatan bahwa *failure* yang terjadi di ujung *end plate* disebabkan oleh *residual stress* tarik yang besar pada permukaan atas *flange* di area *weld toe* dan HAZ. Meski indikasi awal *failure* pada pelat disebabkan oleh *residual stress* namun fenomena ini tidak di bahas detail dalam penelitian Moestopo dan Panjaitan. Penelitian mengenai *residual stress* cukup detail dilakukan oleh Dong dkk (1996) untuk sambungan balok dengan kolom pada struktur MRF namun kajian yang dilakukan masih kajian numerik.

Selanjutnya, dari sejumlah pengujian pada penelitian terdahulu (Arce, 2004; Okazaki dkk, 2005; Yurisman dkk, 2010; Moestopo dan Panjaitan, 2012;) telah dilakukan upaya perkuatan ujung end plate dalam rangka peningkatan kinerja dari elemen link. Namun saat ini penelitian terkait residual stress pada ujung end plate dari link belum diteliti secara mendalam.

Dalam aplikasi teknik sipil, efek dari tegangan sisa (*residual stress*) saat ini tidak secara tegas (*eksplisit*) diperhitungkan dalam sambungan antara satu pelat dengan pelat lain khususnya untuk baja dengan mutu tinggi. Oleh karena itu, perkiraan yang baik dari efek tegangan sisa akibat pengelasan sangat diperlukan ketika digunakan pada sambungan seperti pada kasus sambungan pelat ujung link dengan end plate.

Selanjutnya, penelitian ini dilakukan untuk memahami lebih detail besaran dan distribusi tegangan sisa di area sambungan ujung antara pelat sayap dengan end plate terutama untuk kasus link yang dapat digantikan sehingga perbaikan kinerja dari elemen *link* SRBE dapat ditingkatkan. Pada penelitian ini pengukuran tegangan sisa dilakukan secara eksperimental menggunakan metode neutron diffraction. Link yang sudah diukur residual stress selanjutnya di uji dengan beban siklik sesuai pola pembebanan AISC 341-10.

Pengujian Secara Eksperimental

Pada penelitian ini, pengujian secara eksperimental dilakukan dengan dua tahap. Pengujian tahap pertama bertujuan mendapatkan besaran dan distribusi tegangan sisa sedangkan pengujian tahap kedua bertujuan mempelajari perilaku dan kinerja dari elemen link SRBE. Selanjutnya, detail dari kedua pengujian dijelaskan sebagai berikut :

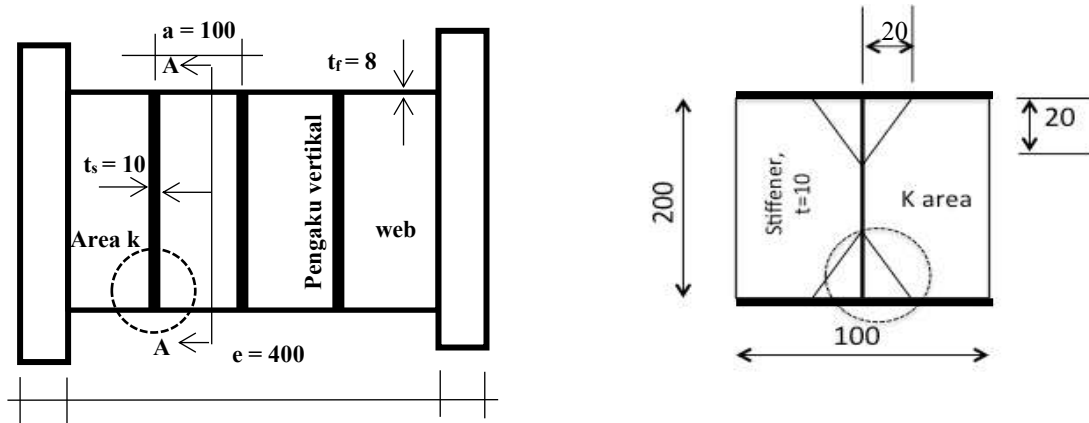


Pengukuran Tegangan Sisa

Pengukuran residual stress pada area k dari elemen link telah dilakukan peneliti (2016). Selanjutnya dalam penelitian ini pengukuran akan dilakukan pada ujung end plate dari elemen link. Pengukuran tegangan sisa dilakukan menggunakan alat *Diffractometer Neutron* DN1-M PTBIN Batan yang terpasang pada tabung berkas nomor 6 (S-6) di RSG GAS Batan Serpong sebagaimana gambar 1. Detail ukuran dari Gambar dan sampel ditunjukkan dalam Tabel 1.

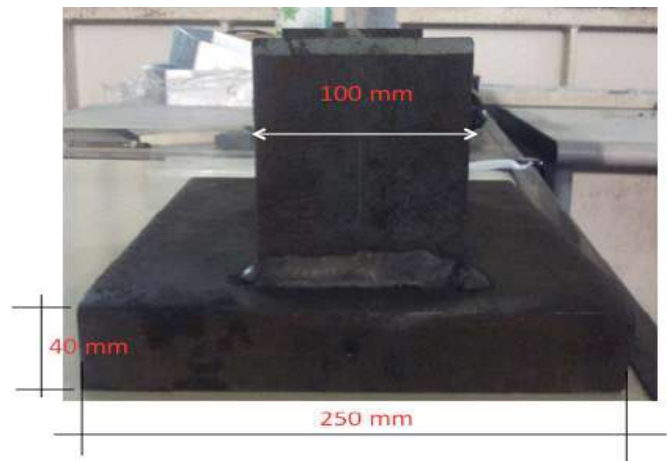
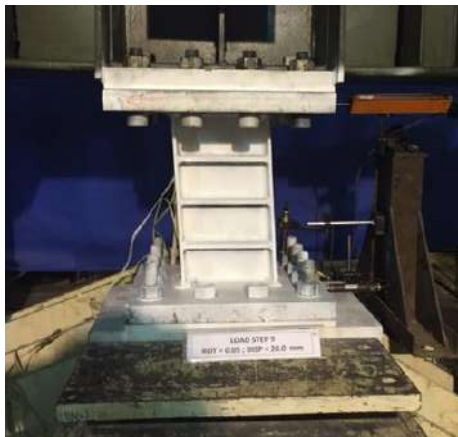
Tabel 1 Dimensi dari sampel K10x10 dan K20x10

Profil	Tebal end plate (mm)	Tebal Pelat Badan (mm)	Tebal Pelat Sayap (mm)	Panjang Link (mm)
WF200.100	40	5,5	8	400



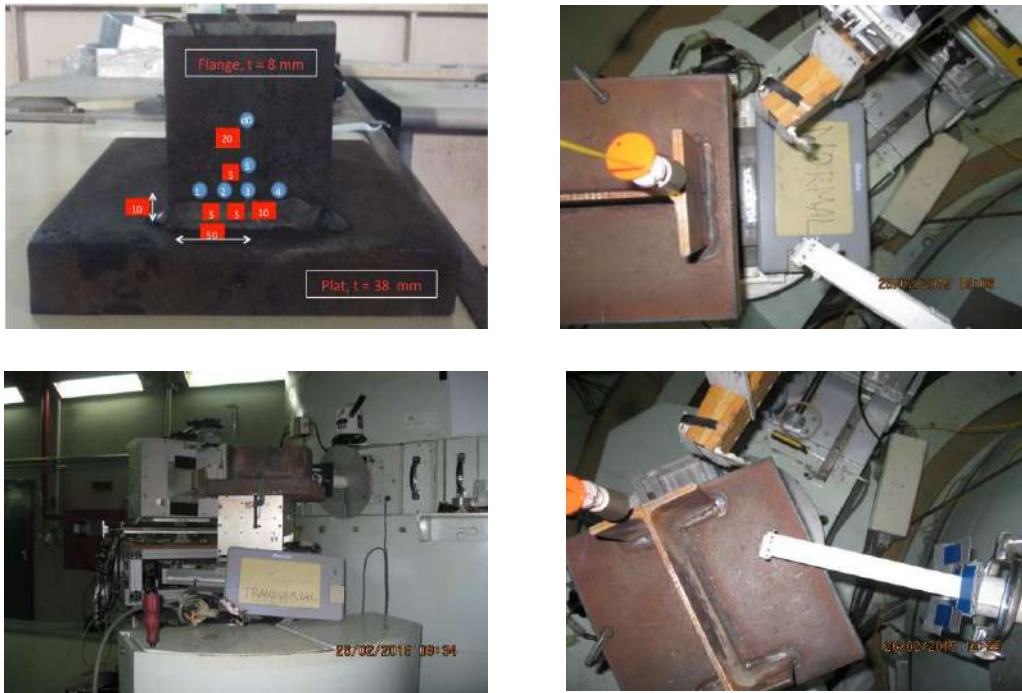
Detail elemen link

Potongan A- A



Gambar 2 Detail sampel yang diukur

Selanjutnya, arah dan titik pengukuran sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3



Gambar 3 Arah dan titik pengukuran tegangan sisa

Pengukuran dilakukan dengan sudut hamburan sebesar 103° untuk bidang 211 dari indeks miller dengan panjang gelombang $1,836863 \text{ \AA}$. *Slit incident beam* yang digunakan $3 \times 3 \text{ mm}$ dan *detector beam* menggunakan radial kolimator 7 mm . Masing-masing titik pengukuran dilakukan selama 60 menit untuk arah normal dan 90 menit untuk arah transversal maupun longitudinal. . Detail jarak masing-masing titik pengukuran dapat dilihat dari Gambar 4.

Adapun parameter pengukuran yang digunakan sebagaimana tabel 2.

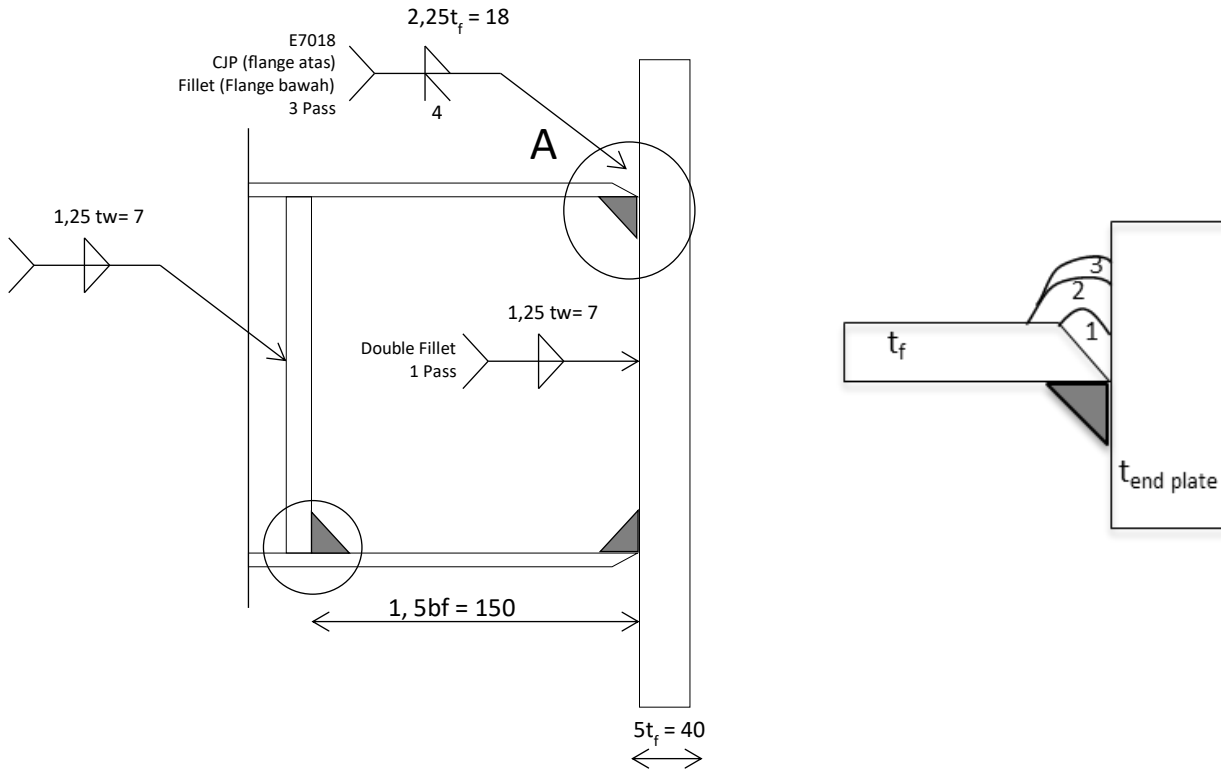
Tabel 2 Nilai parameter eksperimen

$\lambda(\text{\AA})$	$2\theta (^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	$A(\text{\AA})$	d	Indeks miller (hkl)	Waktu satu titik	<i>Slit Incident Beam</i>	<i>Slit Detector</i>
1,836863	103	51,5	2,87	1,15	211	90 menit	$3 \times 3 \text{ mm}$	Radial kolimator 7

Metode difraksi neutron dapat digunakan secara langsung untuk mengukur regangan (strain) dengan mengukur jarak kisi kristal. Nilai tegangan dapat dihitung dalam 3 arah menggunakan Persamaan (1).

$$\sigma_i = \frac{E_{211}}{(1+\nu_{211})} \left\{ \frac{\epsilon_i + \nu_{211}}{(1-2\nu_{211})(\epsilon_z + \epsilon_y + \epsilon_x)} \right\} \quad \text{dimana } (i = X, Y, Z) \quad (1)$$

Adapun detail sambungan sebagai berikut :

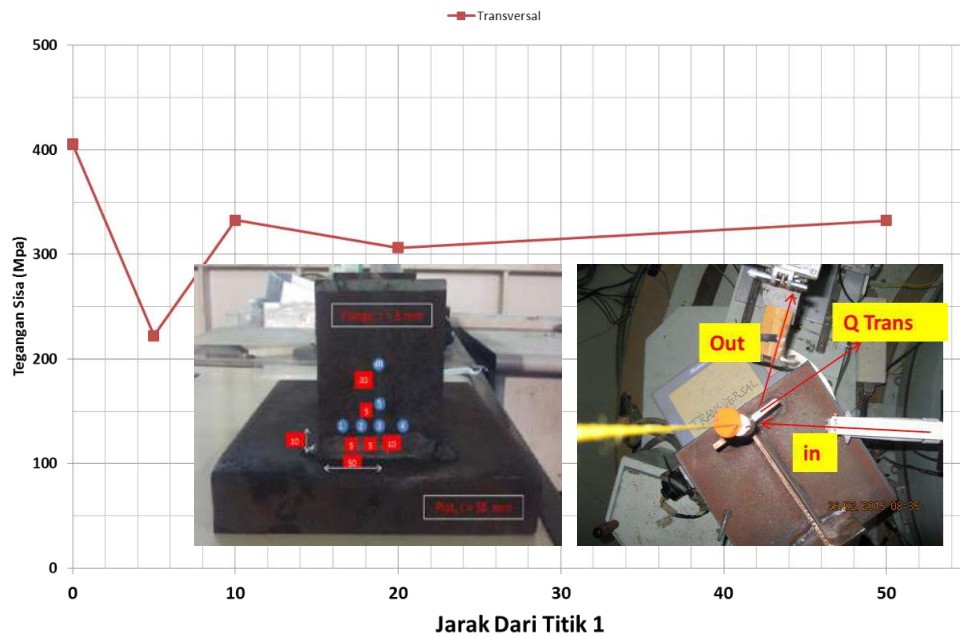


Menggunakan Persamaan 1 serta nilai E211 diambil sebesar 2.106 Mpa dan ν_{211} sebesar 0,3 maka diperoleh tegangan sisa sebagaimana Tabel 3 dan diperlihatkan pada Gambar 5.

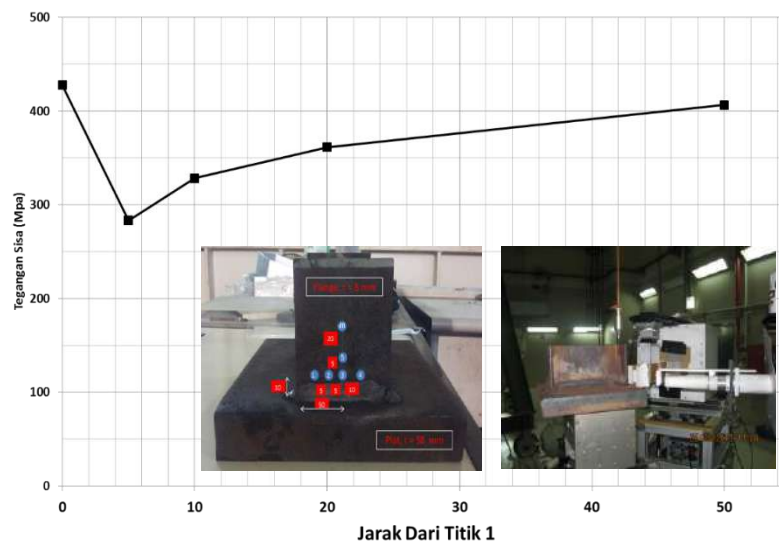
Tabel 3 Nilai *residual stress* dalam transversal dan longitudinal

Titik Pengukuran	Posisi (mm)	Stress Arah Transversal (Mpa)	Stress Arah Longitudinal (Mpa)
X1	0	405.66	427.59
X2	5	222.38	283.16
X3	10	332.86	328.46
X4	20	306.28	361.38
X4a	50	332.57	406.63

Pengukuran dalam arah transversal



Gambar 5 Hasil pengukuran kedua sampel

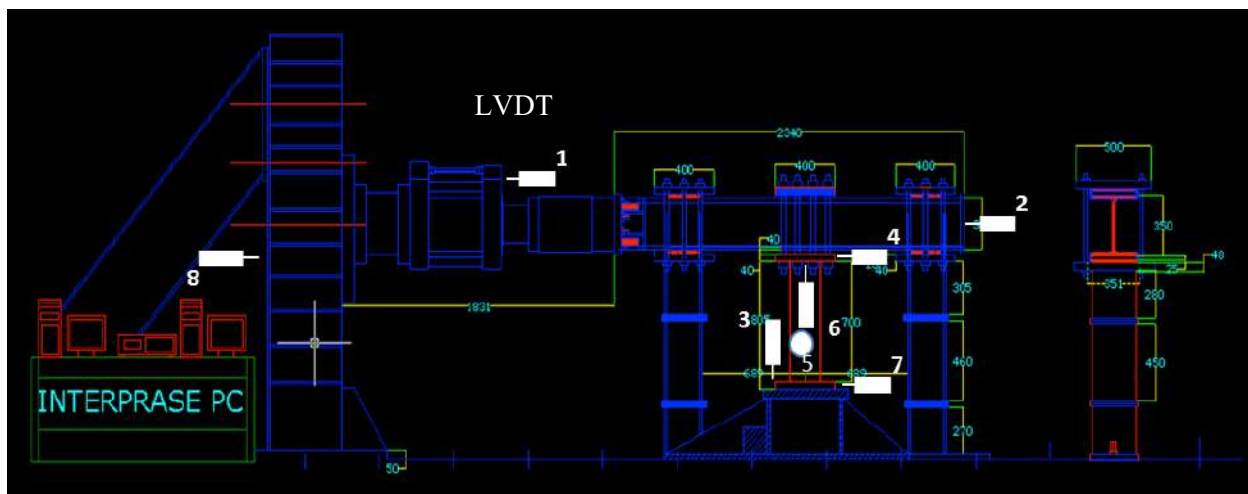


Gambar 5 Hasil pengukuran kedua sampel

Dari grafik pada gambar 5 terlihat pola distribusi tegangan sisa area pengelasan menunjukkan distribusi yang sama baik dalam arah transversal maupun longitudinal untuk kedua sampel yaitu K10x10 dan K20x10. Selanjutnya di daerah sekitar weld toe besarnya bernilai positif (tegangan sisa tarik) terus cenderung menurun pada area HAZ dan menjadi negatif dengan semakin jauh dari titik weld toe. Hal ini disebabkan oleh panas yang lebih tinggi diterima oleh bagian elemen link di dekat titik *pengelasan (weld pool)* saat proses pengelasan di dibandingkan dengan daerah HAZ dan ujung dari pelat badan.

Dari gambar 5 juga terlihat perbedaan yang cukup signifikan di area weld toe pada daerah k antara sampel K10x10 dan sampel K20x10 dalam arah transversal maupun longitudinal. Tingginya nilai tegangan sisa di area weld toe di dan sekitar area k dari link dapat menyebabkan inisiasi *crack* dari area k saat beban luar bekerja.

Penempatan dari masing-masing *Strain gauge* dan LVDT dapat dilihat pada Gambar 9.

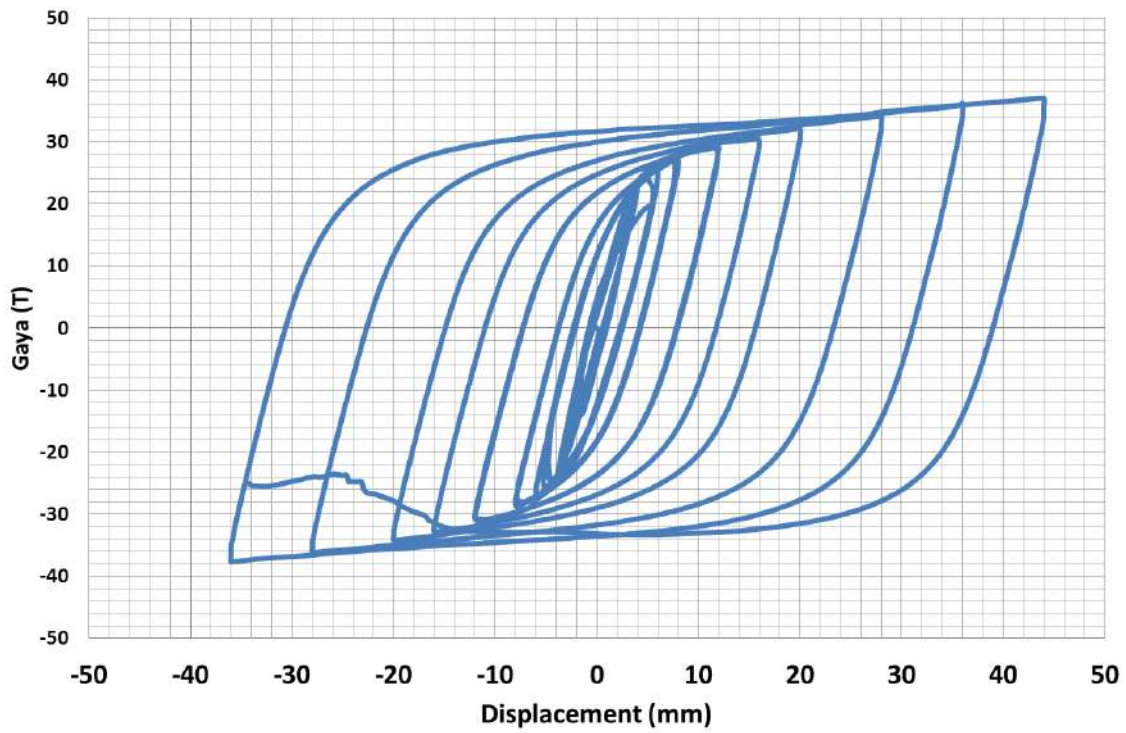


Gambar 9 Posisi peletakan *Strain gauge* dan LVDT

Dari hasil pengujian diperoleh perbandingan kurva histeristik dari link standar (sampel 1) dengan link modifikasi (sampel 2) sebagaimana Gambar 10 berikut .

Dari gambar terlihat pada saat perpindahan mencapai 28 mm, link standar mengalami *failure* di ujung sayap dari elemen link namun link modifikasi masih dalam kondisi normal tanpa mengalami *failure* atau kegagalan bahkan perpindahan dapat dicapai 36 mm. Modifikasi dengan menghindari pengelasan di area k yang mempunyai tegangan sisa tarik yang tinggi pada link ternyata dapat memperlambat terjadinya *crack* dan mempertinggi nilai daktilitas yang di peroleh sebagaimana ditunjukkan oleh sampel 2 dari gambar 10. Beberapa kegagalan dari link standard an perilaku link menengah ditunjukkan pada Gambar 11 berikut.

Profil	Lebar (b)	Tinggi (d)	Panjang Link (e)	$(e.V_p)/M_p$	V_p (KN)	M_p (KNm)	V_u (T)	Rotasi (rad)
WF200	100	200	400	2,16	230,7	74,7	38,5	0,11



Gambar 10 Perbandingan kurva histeristik link standar dengan modifikasi

Kesimpulan

Dari hasil analisis di atas maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

- Pola distribusi tegangan sisa pada area lasan secara eksperimental mempunyai kecenderungan yang sama baik dalam arah transversal maupun longitudinal . Selanjutnya tegangan sisa di daerah sekitar *weld toe* besarnya bernilai positif (tegangan sisa tarik) terus cenderung menurun pada area HAZ

dan menjadi negatif dengan semakin jauh dari titik *weld toe*. Hal ini disebabkan panas yang diterima di area *weld toe* jauh lebih besar disbanding dengan area diluarnya.

- Nilai tegangan sisa tarik yang diperoleh dari hasil pengukuran dengan metode difraksi neutron di daerah *weld toe* berada dalam interval 75 s.d 85 % dari tegangan leleh material dan cenderung turun dalam are HAZ yang berkisar antar 50 sampai dengan 60 % dari tegangan leleh baik dalam arah transversal maupun longitudinal.
- Perilaku elemen link modifikasi dengan menambah pengaku horizontal untuk menghindari daerah k yang dapat menyebabkan tegangan sisa tarik yang tinggi ternyata mampu meningkatkan daktilitas dari elemen link . Selanjutnya perkuatan pelat ujung sayap juga terbukti mampu memperlambat proses *buckling*. Gambar 10 menunjukkan kinerja link modifikasi lebih baik dibandingkan dengan link standar. Menghindari area k yang memiliki nilai tegangan sisa tarik yang tinggi dapat meningkatkan kinerja dari elemen link karena daktilitas dari elemen link dapat ditingkatkan.
- Sebagai catatan benang merah dari gambar 10 bahwa saat desain link memperhitungkan nilai tegangan sisa maka kapasitas link (V_u) perlu dikalikan dengan konstanta yang lebih kecil dari 1. Nilai konstanta ini merupakan koefisien yang mempertimbangkan pengaruh dari *residual stres*. Penentuan besarnya nilai konstanta ini menjadi topik penelitian yang perlu kajian lebih lanjut.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih yang sebesar-besarnya penulis sampaikan kepada Bapak Drs. Gunawan, M.Sc selaku kepala Pusat Sains dan Teknologi Bahan Maju (PSTBM) BATAN yang telah mengizinkan dilakukan pengukuran di PSTBM, selanjutnya Bapak Drs. Sutiarmo, M.Sc selaku Kepala Bidang Teknologi Berkas Neutron yang telah banyak memberikan bantuan, saran dan izinnya dalam penggunaan alat DN1-M .

Daftar Pustaka

- American Institute of Steel Construction, 2010, Seismic Provision for Structural Steel Buildings, AISC, Inc.
- Arce, G., 2002, Impact of Higher Strength Steels on Local Buckling and Over Strength of Links in Eccentrically Braced Frames, MS Thesis, USA: Univ. of Texas at Austin.
- Engelhardt, M.D., dan Popov, E.P., 1992, Experimental Performance of Long Links in Eccentrically Braced Frames, Journal of Structural Engineering, Vol.118, No.11:3067-3088, November, ASCE.
- Hjelmstad, K.D., dan Popov, E.P., 1984, Characteristics of Eccentrically Braced Frame, Journal of Structural Engineering, Vol. 110 No. 2:340-353.
- Kasai, K., dan Popov, E.P., 1986, General Behavior of WF Steel Shear Link Beams, Journal of the Structural Division, Vol.112, No.2:362-382, February, ASCE.
- Kurdi, Budiono, B., Moestopo, M, Kusumastuti, D., dan Muslih, M., R., 2014, Kajian Eksperimental Besaran dan Distribusi Tegangan Sisa Elemen Link Pada Struktur Rangka Baja Berpengaku Eksentrik (SRBE) dengan Metode Difraksi Neutron (Neutron Diffraction Method), Konferensi Nasional Pascasarjana Teknik Sipil, Bandung, 6 November.
- Kurdi, Budiono, B., Moestopo, M, Kusumastuti, D., dan Muslih, M., R.,, 2016, Kuantifikasi Besaran dan Distribusi Tegangan Sisa Daerah Pertemuan Pengaku-Badan-Sayap pada Elemen Link Struktur Rangka Baja Berpengaku Eksentrik (SRBE) dengan Metode Difraksi Neutron, Jurnal Teknik Sipil ITB, Vol.23 No.1 April. (Dalam proses cetakan).
- Budiono, B., Kurdi., Moestopo, M, Kusumastuti, D., dan Muslih, M., R., 2016, Residual Stress on K-Area of Link Element Using Neutron Diffraction Method, Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials, SCESCM 2016, Bali, Indonesia (Paper dalam tahap review)
- Malley, J.O., dan Popov, E.P., 1983, Shear Links in Eccentrically Braced Frames, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 109, No. 10.



- Moestopo, M., dan Panjaitan, M.,A.,R., 2012, Kajian Eksperimental Peningkatan Kinerja Link Geser pada Sistem Rangka Baja Berpengaku Eksentrik, Jurnal Teknik Sipil ITB , Vol.19 No.2 Agustus 2012, Program Studi Teknik Sipil ITB.
- Okazaki, T., Arce, G., Ryu, H.C., and Engelhardt, M.D. 2005, Experimental Study of Local Buckling, Over strength, and Fracture of Links in Eccentrically Braced Frames, Journal of Structural Engineering, 1526-1535, October, ASCE.
- Okazaki, T., Engelhardt, M.D., Drolias, A., Schell, E., Hong, J.K., and Uang, C.M.,2009, Experimental Investigation of Link-to-column Connections in Eccentrically Braced Frames, Journal of Constructional Steel Research, 65 (7), pp. 1401-1412.
- Yurisman, Budiono, B., Moestopo, M., dan Made, S., 2010, Behaviour of Shear Link of WF Section with Diagonal Web Stiffener Eccentrically Braced Frame (EBF) of Steel Structure, ITB Journal of Engineering Science (international journal), Vol.42 No.2.