

## STUDI DESAIN STRUKTUR BIDANG LIPAT YANG MEMIKUL BEBAN DENGAN EFEKTIF DAN EFISIEN *A DESIGN STUDY ON FOLDED PLATE STRUCTURE WHICH CARRIES LOAD IN SUCH AN EFFECTIVE AND EFFICIENT WAY*

Albertus Sidharta Muljadinata<sup>1\*</sup>, AMS. Darmawan<sup>2</sup>

<sup>\*12</sup>Fakultas Arsitektur dan Desain, ProgdI Arsitektur

Unika Soegijapranata, Jalan Pawiyatan Luhur IV/1 Semarang-50234

\*E-mail: [sidharta@unika.ac.id](mailto:sidharta@unika.ac.id)

### ABSTRAK

Analisis struktur bidang lipat menggunakan program komputer SAP 2000 telah dilaksanakan dalam penelitian struktur bidang lipat, setelah penelitian sebelumnya meneguhkan bahwa bahan struktur bidang lipat yang paling sesuai untuk bangunan gedung adalah beton bertulang. Hasilnya menunjukkan efektifitas struktur dalam memikul beban dibandingkan pelat datar tanpa lipatan. Dalam studi awal komparasi sudut pelat lipat, empat kemiringan dari 15° hingga 60° dengan besaran volume yang sama, telah disimulasikan dengan hasil kemampuan yang berbeda-beda.

Pemodelan struktur bidang lipat menggunakan bentuk dan ukuran struktur bidang lipat gedung Pusat Pembinaan Sumberdaya Manusia (PPSM) milik Yayasan Tenaga Kerja Indonesia (YTKI) di Jalan Gatot Subroto 44, Jakarta, yang bentangan atapnya 25 m'. Pemodelan dilakukan dalam dua tahap. Tahap pertama adalah struktur bidang lipat atapnya saja, yaitu struktur bidang lipat memanjang ('longitudinal'). Pada tahap ke dua, struktur bidang lipatnya dibuat berbentuk portal dua sendi ('two-hinged folded plate frame'). Analisis tahap ke dua menggunakan *software* LS Dyna dengan metoda elemen hingga ('finite element') dengan keadaan struktur bidang lipat sepenuhnya terjepit di ujungnya dan terjepit parsial di kedua tepinya. Pengaturan ini dapat memberi kekuatan maksimum dari penampang bidang lipat.

Analisis struktur ini menunjukkan bahwa struktur bidang lipat patut dipertimbangkan sebagai alternatif rancangan struktur atap berbentuk lebih dari 15 m'.

**Kata kunci:** Analisis struktur, struktur bidang lipat, gedung PPSM – YTKI.

### ABSTRACT

*An analysis of folded plate structure using SAP 2000 has been conducted in a folded plate structure research. The results show the effectiveness of the structure in carrying load in comparison to a flat slab. In the first comparative study, four folded plate sections with different angles from 15° to 60° with equal section areas, were calculated in the simulation with different performance outcomes.*

*The modeling of the folded plate structure was based on the building form and dimensions of the folded plate structure applied in the main building of Pusat Pembinaan Sumberdaya Manusia (PPSM) owned by Yayasan Tenaga Kerja Indonesia (YTKI), located in Jalan Gatot Subroto 44, Jakarta, which the roof span is 25 m'. The modeling was done in two stages. First, the longitudinal folded plate roof was analyzed, as described above. In the second stage, the complete model of the two-hinged folded plate frame, fully restrained at ends and laterally restrained on both sides, was calculated using LS Dyna finite element software. These arrangements could bring out the ultimate strength of the folded plate.*

*This analysis shows that folded plate structure may become other alternatives when designing long span structure of more than 15 m'.*

**Keywords:** Structure analysis, folded plate structure, PPSM – YTKI Building.



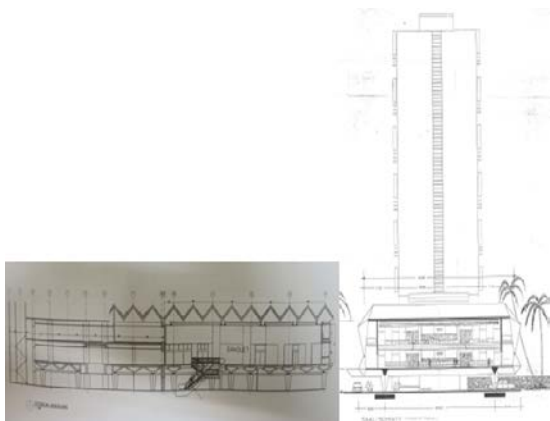
Gambar 1.

Gedung Pusat Pembinaan Sumberdaya Manusia (PPSM) – Yayasan Tenaga Kerja Indonesia (YTKI) di Jl. Gatot Subroto 44, Jakarta, Indonesia, selesai dibangun tahun 1977.  
(foto dokumentasi PPSM-YTKI)

## 1. PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Suatu penelitian *Struktur Bidang Lipat* telah dilaksanakan dalam dua tahun terakhir. Salah satu struktur bidang lipatan yang diteliti adalah struktur bidang lipatan pada gedung utama Pusat Pembinaan Sumberdaya Manusia (PPSM) – Yayasan Tenaga Kerja Indonesia (YTKI) di Jakarta (Gbr. 1).



Gambar 2.

Potongan Gedung PPSM – YTKI

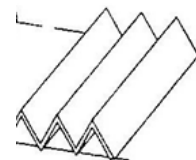
- (kiri) Foto Gambar Potongan Membujur sebagian Gedung Utama PPSM - YTKI (tanpa menara), dan
- (kanan) Gambar Potongsn Melintang Gedung Utama PPSM – YTKI (Sumber: Dokumentasi PPSM – YTKI)

Makalah ini memaparkan hasil penelitian simulasi - simulasi perhitungan struktur berdasarkan data yang diperoleh dari pendataan gedung tersebut.

### 1.2. Gedung PPSM - YTKI

Struktur bidang lipatan paralel diaplikasikan sebagai atap pada gedung utama Gedung PPSM – YTKI, yang selesai dibangun pada tahun 1977. Gambar 2 menunjukkan potongan membujur dan melintang gedung.

Potongan membujur gedung memperlihatkan potongan plat lipatan yang paralel. Gambaran perspektipnya dapat dilihat di gambar 3, sbb.:

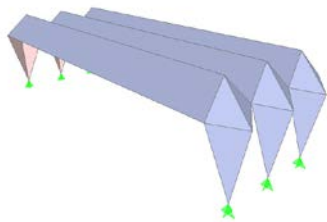


Gambar 3.

Perspektip Bentuk Struktur Bidang Lipat Longitudinal Paralel (model Tim Peneliti)

Selain mempunyai bentuk lipatan atap yang paralel di atas denah empat persegi panjang, atap gedung utama ini menyatu dengan tiang-tiang penyangga atapnya di sisi luar gedung, sehingga berbentuk portal atau

dalam klasifikasi struktur bidang lipat disebut dengan *frame*. Dalam hal ini, keseluruhan atap dan penyangga atapnya digolongkan ke dalam *Two Hinge Folded Plate Frame*, atau Portal Bidang Lipat Dua Sendi (Gbr. 4).



Gambar 4.

Bentuk Portal Bidang Lipat Dua Sendi pada atap dan penyangga atap gedung utsms PPSM-YTKI. (model Tim Peneliti)

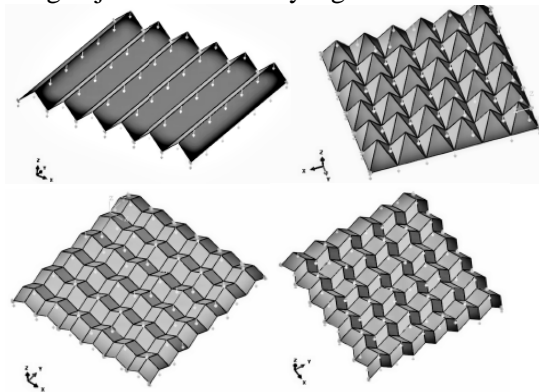
Karena bentuknya yang unik maka analisis dilakukan bertahap. Pada tahap pertama ditelaah pelat lipat atapnya yang *longitudinal* paralel. Setelah itu dianalisis pula bentuk keseluruhan portal, yaitu atap beserta penyangga - penyangga atapnya. Untuk melaksanakan analisis struktur, peneliti bekerjasama dengan Tim Analisis Struktur, yaitu para ahli struktur yang berkompeten dari disiplin ilmu Teknik Sipil.

## 2. ANALISIS STRUKTUR

### 2.1. Pemodelan Penampang Struktur Bidang Lipat

Studi tentang pelat lipat telah banyak dilakukan oleh peneliti dengan membandingkan performa dengan pelat datar yang biasa. Drusa et al. (2014) menganalisis empat bentuk pelat lipat yang terinspirasi dengan teknik origami atau seni lipat kertas. Empat bentuk tersebut dapat dilihat pada Gambar 5. Di dalam studi komparasi ini, digunakan pelat lipat seluas 6x6 m dengan volume konstan 0.81 m<sup>3</sup>. Hasilnya dibandingkan dengan deformasi pelat datar setebal 0.0225 m. Seluruh model pelat lipat dijepit di kedua tepi dan bebas di kedua

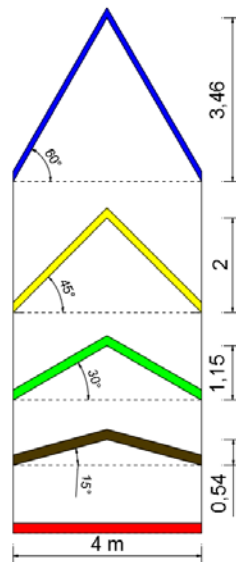
ujungnya. Defleksi maksimum dan tegangan *von-mises* dibandingkan dari hasil simulasi *software* Abaqus dan disimpulkan bahwa pelat lipat *longitudinal* (seperti yang diteliti dalam studi ini) mendapatkan hasil yang paling baik. Terlihat bahwa defleksi berkurang signifikan dari 0.143 m ke 0.00005 m dengan mengubah pelat datar ke pelat lipat *longitudinal*. Tegangan *von-mises* juga berkurang jauh dari 85.9 MPa ke hanya 1.53 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa pelat lipat *longitudinal*/paralel adalah bentuk terbaik untuk mencapai efisiensi struktur tertinggi dengan jumlah material yang sama.



Gambar 5.

Kiri atas: Pola Longitudinal/paralel; Kanan atas: Pola Facet; Kiri bawah: Pola Kotak Telur; Kanan bawah: Pola Miura-ori.

Sudut penampang pelat lipat bervariasi antara 0° sampai 60°. Model penampang dirancang dengan ketebalan pelat yang berbeda yang menghasilkan total area yang sama seluas 0,85 m<sup>2</sup>. Berdasarkan total luas penampang yang sama ini, ketebalan pelat menjadi bervariasi mulai dari 105 mm untuk FP60 (pelat dengan sudut 60°) sampai 212 mm untuk FP0 (pelat datar). Gambar 6 menunjukkan penampang pelat lipat dengan berbagai sudut. Kemampuan pelat lipat ini akan diuji kapasitasnya dengan program SAP2000 untuk perhitungan analitis dan LS Dyna Implisit untuk simulasi numerik.



Gambar 6.

Potongan Bidang Pelat Lipat dengan berbagai sudut

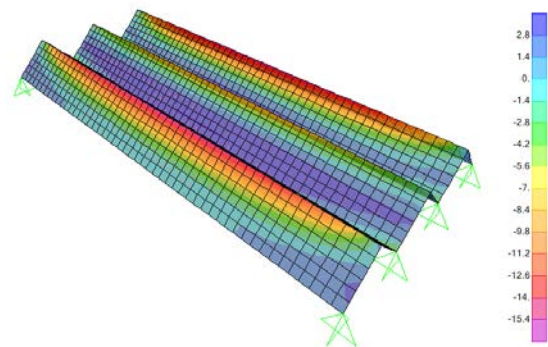
Tabel 1. Rincian Potongan Bidang Pelat Lipat

Nama Folded Plate Roof	Sudut	Panjang Pelat (m)	Ketebalan Pelat (mm)	Luas Penampang (m <sup>2</sup> )
FP60	60°	8	105	0.85
FP45	45°	5.66	150	0.85
FP30	30°	4.62	184	0.85
FP15	15°	4.14	205	0.85
FP0	0°	4	212	0.85

## 2.2. Distribusi momen di SAP2000

Dalam *software* SAP2000, elemen pelat digunakan untuk model struktur pelat lipat. Tiga segmen seluas 4 m lebar x 25 m panjang bentang ditempatkan menyambung satu dengan yang lain. Kekuatan beton 20.75 MPa (K250) dan tulangan baja dengan kekuatan leleh 460 MPa digunakan untuk semua simulasi. Tumpuan sendi ditambahkan sebagai representasi kolom. Beban mati berdasarkan berat jenis beton 2400 kg/m<sup>3</sup>

dan beban hidup berdasarkan SNI 1727:2013 untuk struktur atap, minimum 96 kg/m<sup>2</sup> diterapkan di permukaan struktur pelat lipat. Kombinasi pembebanan 1DL + 1LL digunakan untuk menghitung lendutan maksimum struktur dan distribusi momen. Contoh distribusi momen struktur pelat lipat FP45 di sumbu longitudinal dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7.

Distribusi momen FP45 pada sumbu longitudinal

Lendutan maksimum struktur penampang pelat lipat dengan bentang 25 m dan lebar 12 m (3 lipatan x 4 m lebar) dapat dilihat di Table 2. Sedang Momen arah longitudinal positif dan negatif maksimum dapat ditemukan pada Tabel 3.

Tabel 2. Penurunan maksimum di tengah bentangan folded plate

Potongan Pelat	Penurunan (mm)
FP0	1960
FP15	104
FP30	23
FP45	11
FP60	24

Tabel 3. Momen maksimum folded plate

Potongan Pelat	Momen maximum Positip (kNm)	Momen maximum Negatip (kNm)
FP0	595	0
FP15	28	17.5
FP30	3.3	11
FP45	2.8	15.4
FP60	2.2	12.1

Seperti dapat dilihat dari Tabel 2 dan 3, ada pengurangan yang signifikan dalam defleksi (1960 mm menjadi 104 mm) ketika mengubah pelat datar (FP0) ke sudut 15° pelat lipat (FP15). Selain itu, momen maksimum juga berkurang secara signifikan dari 595 kNm ke 28 kNm. Melihat hasil perhitungan, tidak mungkin untuk menggunakan ketebalan 200 mm pelat datar tanpa menggunakan balok struktural untuk bentang sejauh 25m. Namun, struktur pelat lipat, meskipun hanya dengan sudut 15° dapat mengatasi bentang besar dengan mengurangi defleksi secara signifikan, sehingga terbukti bahwa pelipatan pelat dapat meningkatkan kekakuan pelat.

Melihat defleksi struktur maksimum struktur pelat lipat, model FP45 mencapai defleksi tengah bentang terendah sebesar 11 mm. Inilah sudut yang digunakan pada atap gedung utama PPSM-YTKI.

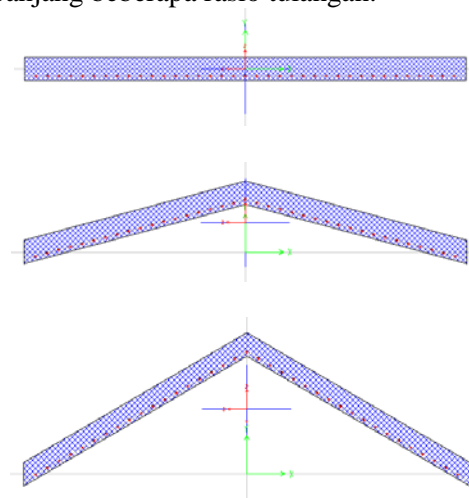
### 2.3. Analisis kapasitas momen struktur pelat lipat

SAP *Section Designer* adalah sebuah utilitas terpadu yang memungkinkan pemodelan dan analisis penampang yang beragam. Program ini berguna untuk evaluasi kapasitas penampang dan respon nonlinier. Penampang tidak standar atau penampang

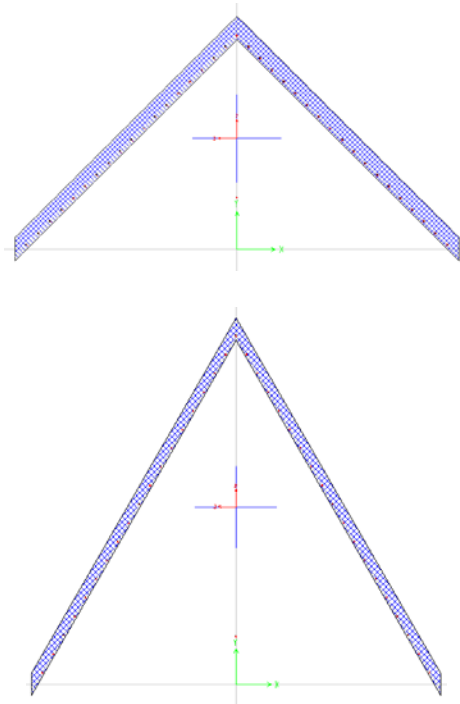
komposit dapat dibuat secara bebas di dalam area gambar dan kemudian dimasukkan ke dalam model struktural. Penampang dapat menggunakan satu atau lebih bahan material berbeda dan tata letak tulangan yang ditetapkan pengguna. Faktor modifikasi dapat dimasukkan untuk mensimulasikan perilaku penampang retak. Semua bagian diasumsikan sebagai penampang non kompak.

SAP *Section Designer* otomatis menghasilkan kurva tegangan-regangan beton dari penampang yang dibuat. Secara *default*, kurva ini tidak memberikan kekuatan tarik. Kurva tegangan-regangan dapat ditinjau dalam SAP *Section Designer* dalam kontrol penampilan penampang beton. Untuk model kekuatan tarik beton, kurva tegangan-regangan bahan dapat diubah menjadi model konstitutif yang ditetapkan pengguna dalam pengaturan material.

Pada bagian ini, SAP *Section Designer* digunakan untuk menghasilkan grafik momen vs. perpindahan sudut dari masing-masing penampang model struktur pelat lipat dan jumlah total penulangan yang diberikan. Kapasitas momen lentur maksimum kemudian dikompilasi untuk studi perbandingan kinerja dari variasi struktur pelat lipat. Rasio penulangan 0.36%, 0.92% dan 1.44% digunakan dalam perhitungan untuk mendapatkan peningkatan kinerja rata-rata sepanjang beberapa rasio tulangan.







Gambar 8.

Potongan Folded Plate dalam SAP2000 *Section Designer*

Tabel 2. Resistensi momen lentur maximum (kNm) untuk penampang folded plate

Penampang Pelat	Penulangan		
	0.36%	0.92%	1.44%
FP0	246.7	507.6	725.3
FP15	458.6	945.5	1327.3
FP30	864.1	1809.9	2551.3
FP45	1465.6	3041.0	4308.2
FP60	2525.5	5186.4	7286.1

Tabel 3. Peningkatan kapasitas momen (dibandingkan FP0)

Penampang Pelat	Reinforcement			Peningkatan kapasitas momen rata-rata
	0.36%	0.92%	1.44%	
FP0	1.0	1.0	1.0	1.0
FP15	1.9	1.9	1.8	1.9
FP30	3.5	3.6	3.5	3.5
FP45	5.9	6.0	5.9	6.0
FP60	10.2	10.2	10.0	10.2

Warna di lajur oranye menunjukkan peningkatan kapasitas momen maksimum struktur pelat lipat sepanjang beberapa rasio penulangan saat dibandingkan dengan nilai pelat datar (FP0). Seperti dapat dilihat pada Tabel 5, kapasitas momen meningkat dengan rasio 1.9, 3.5, 6 dan 10.2 untuk sudut 15°, 30°, 45°, dan 60° masing-masing. Ini membuktikan bahwa penampang pelat lipat sangat efisien dalam menahan beban lentur. Penampang FP60 menunjukkan 10 kali peningkatan kapasitas lentur saat dibandingkan dengan jumlah material beton yang sama namun berpelat datar (FP0).

Dengan meningkatkan rasio tulangan dari 0.36% menjadi 0.92%, rasio peningkatan rata-ratanya sebesar 2.1 diamati dari hasil analisa penampang. Lebih lanjut, peningkatan penulangan hingga 1.44% dapat meningkatkan kapasitas momen maksimum sebesar 2.9.

Tabel 4. Rasio kapasitas momen untuk penulangan 0.92% dan 1.44% dibandingkan dengan penulangan 0.36%

Pelat	Reinforcement		
	Base	0.92%/0.36%	1.44%/0.36%
FP0	1.0	2.1	2.9
FP15	1.0	2.1	2.9
FP30	1.0	2.1	3.0
FP45	1.0	2.1	2.9
FP60	1.0	2.1	2.9
Rata-rata	1.0	2.1	2.9

#### 2.4. Kemampuan kapasitas penampang struktur pelat lipat dengan tumpuan jepit

Telah diketahui bahwa kekuatan maksimum struktur pelat lipat akan dicapai dengan menjepit atau membuat kaku sisi tumpuan dan mencegah sisi sampingnya dari pergerakan lateral. Untuk melihat seberapa efektif kapasitas penampang pelat lipat dengan tumpuan jepit, analisis elemen hingga menggunakan software LS Dyna digunakan untuk menentukan kinerja maksimum dari struktur pelat lipat.

Solusi numerik untuk struktur pelat lipat dengan beban statis diperoleh dengan menggunakan software LS-Dyna yang

dikembangkan oleh LSTC Livermore. Studi elemen hingga menggunakan LS-DYNA versi 971 R4.2.1 dengan presisi ganda (double precision) untuk sistem operasi 64 bit. Studi numerik menggunakan formulasi Lagrangian dengan skema integrasi waktu implisit untuk simulasi statis. Kriteria utama untuk memilih antara formulasi implisit atau eksplisit adalah skala waktu dari simulasi.

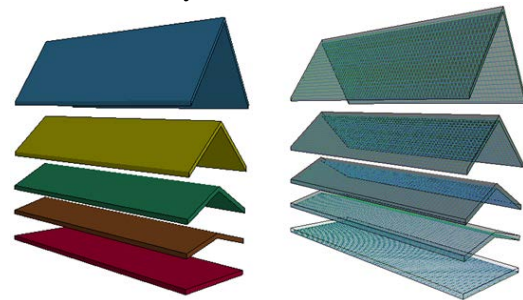
Formulasi implisit menggunakan aturan trapesium yang terbatas dalam metode integrasi waktu  $\beta$  Newmark. Ketika  $\beta = \frac{1}{4}$  dan  $\gamma = \frac{1}{2}$  diterapkan pada persamaan integrasi, dua variabel yang tidak diketahui harus diselesaikan. matriks kekakuan global harus dibentuk dan dibalik untuk mendapatkan percepatan rata-rata nodal antara waktu  $n$  dan waktu  $n-1$ .

Dalam perhitungan numerik implisit ini, memori besar diperlukan untuk menyimpan data matriks kekakuan. Persamaan membutuhkan solusi iteratif untuk meminimalkan gaya sisa dari perkalian percepatan rata-rata dengan matriks massa. Metode ini biasanya membutuhkan jumlah langkah yang relatif kecil namun mahal. Tingkat regangan yang kecil diterapkan pada struktur adalah untuk memastikan tidak ada gaya inersia yang terlibat, yang dapat meningkatkan perilaku kekakuan global struktur.

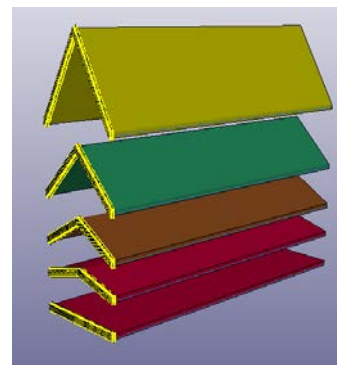
Dalam perhitungan kapasitas momen menggunakan LS Dyna implisit, tes lentur tiga titik disimulasikan dengan kontrol perpindahan. Elemen tegangan konstan dengan panjang elemen rata-rata 50 mm digunakan untuk beton dan elemen balok rangka untuk penulangan baja. Penulangan dimodelkan sebagai elemen rangka balok dengan input data berupa jenis penampang (lingkaran, kotak, atau segitiga) dan luas area dari tulangan tersebut. Elemen balok-truss adalah elemen garis dua dimensi yang hanya mampu menahan gaya aksial tarik atau kompresi tanpa resistansi lentur. Penulangan baja ditempatkan di dalam elemen beton dengan 40 mm penutup beton (diukur dari sisi bawah pelat). Kemudian, perintah Constrained Lagrange in Solid (CLIS) digunakan untuk mengikat rebar (diasumsikan bahwa tulangan menyatu sempurna di dalam beton). Struktur setengah simetri digunakan untuk mengurangi waktu komputasi. Beton dengan kekuatan 20.75 MPa dan baja dengan kekuatan leleh 460MPa diinput dalam properti material (identik dengan analisis SAP2000

sebelumnya). Tumpuan jepit dimasukkan sebagai pengekang di kedua sisi struktur pelat lipat dan sisi samping tertahan dari pergerakan lateral dengan menggunakan pembatasan sliding. Perpindahan diukur dari garis tengah simetri. Perintah database cross section diaktifkan untuk mendapatkan pembacaan momen di tengah bentang dari struktur pelat lipat.

Dimensi konsisten gram (g) untuk berat, milimeter (mm) untuk panjang, milidetik (ms) untuk waktu, Newton (N) untuk gaya dan Mega Pascal (MPa) untuk tekanan digunakan di seluruh seluruh proses simulasi elemen hingga. Ini sangat penting karena dimensi tidak dapat secara eksplisit dinyatakan dalam software LS-Dyna.



Gambar 9  
Model folded plate finite element dengan penyebaran penulangan



Gambar 10  
Tumpuan Jepit pada ujung model FE pelat lipat

Material 72 release III (MAT 72R3) di LS Dyna digunakan untuk model material beton. Schwer and Malvar (2005) telah membuktikan bahwa Mat 72R3 memberikan jalan yang sangat baik untuk memodelkan perilaku kompleks dari "beton standar" yang dikalibrasi oleh Pusat Penelitian dan Riset Teknik, Laboratorium Geoteknik & Struktur Angkatan

Darat AS (Malvar, Crawford, Wesevich, & Simons, 1997).

MAT72R3 dapat digunakan baik dengan input seluruhnya dari pengguna atau generasi parameter internal otomatis yang dihasilkan berdasarkan kuat tekan uniaxial beton. Input penting untuk MAT72R3 adalah kuat tekan dan berat jenis beton. Generasi parameter internal dilakukan dengan menggunakan persamaan berdasarkan dimensi metrik. Dengan demikian, perlu memasukan factor konversi SI ke unit konversi metrik untuk tekanan dan panjang.

Tabel 5 Momen Lentur Resistensi Maximum dari aneka potongan sudut folded plate (LS Dyna)

Plate section	Reinforcement		
	0.36%	0.92%	1.44%
FP0	196.0	419.0	659.1
FP15	1320.0	1700.0	2030.0
FP30	3410.0	4090.0	4670.0
FP45	5840.0	6790.0	7507.4
FP60	10100.0	11200.0	11608.0

Tabel 7 Perbandingan kapasitas Momen antra LS Dyna and SAP2000

Plate section	SAP2000			LS Dyna			LS Dyna/SAP200 ratio			Average
	0.36%	0.92%	1.44%	0.36%	0.92%	1.44%	0.36%	0.92%	1.44%	
FP0	246.7	507.6	725.3	196.0	419.0	659.1	0.8	0.8	0.9	1.0
FP15	458.6	945.5	1327.3	1320.0	1700.0	2030.0	2.9	1.8	1.5	2.1
FP30	864.1	1809.9	2551.3	3410.0	4090.0	4670.0	3.9	2.3	1.8	2.7
FP45	1465.6	3041.0	4308.2	5840.0	6790.0	7507.4	4.0	2.2	1.7	2.7
FP60	2525.5	5186.4	7286.1	10100.0	11200.0	11608.0	4.0	2.2	1.6	2.6

Kapasitas momen maksimum meningkat secara signifikan apabila tumpuan jepit dan kekangan sisi samping diberikan pada struktur untuk semua kasus, kecuali pelat datar FP0. Ditemukan bahwa dengan rasio tulangan terendah 0.36%, peningkatan kinerja pelat lipat adalah yang tertinggi dan menjadi lebih rendah saat mengubah rasio tulangan menjadi lebih tinggi. Ini menunjukkan bahwa ada rasio tulangan yang optimal untuk luas area penampang tertentu dalam struktur pelat lipat.

Secara keseluruhan, ada peningkatan 2.1, 2.7, 2.7, dan 2.6 untuk sudut 15°, 30°, 45°, dan 60° pelat lipat masing-masing ketika tumpuan jepit dan kekangan samping

Tabel 6 Rasio pertambahan kapasitas momen disbanding dengan FP0

Plate section	Reinforcement			Average
	0.36%	0.92%	1.44%	
FP0	1.0	1.0	1.0	1.0
FP15	6.7	4.1	3.1	4.6
FP30	17.4	9.8	7.1	11.4
FP45	29.8	16.2	11.4	19.1
FP60	51.5	26.7	17.6	32.0

Model penampang FP60 dengan rasio tulangan 0.36% terlihat mencapai rasio 51.5 kali kapasitas momen dari penampang pelat datar FP0. Nilai penguatan ini jauh lebih tinggi dari hasil analisis penampang SAP2000. Hasil ini menunjukkan bahwa dukungan tumpuan jepit (memperkaku tumpuan) dan mengendalikan perpindahan lateral sisi samping dapat meningkatkan kekuatan struktur pelat lipat.

Melihat Tabel 9, kapasitas momen numerik untuk FP0 lebih rendah daripada hasil hitungan analitis.

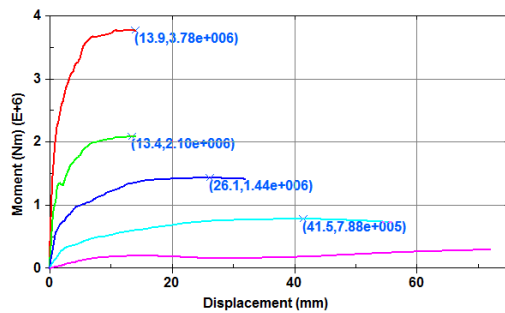
diberikan dalam model struktur.

## 2.5. Tumpuan sendi dengan pengekan lateral sisi samping (pengaruh dari pengekan lateral)

Studi lebih lanjut dari struktur pelat lipat adalah efek dari pengekan lateral sisi samping struktur, yang dilakukan dengan mengubah tumpuan dari jepit ke tumpuan sendi. Dukungan sisi samping tetap diberikan dengan mencegah gerakan lateral sisi samping dari pelat. Grafik momen vs. perpindahan dengan mengganti tumpuan jepit dengan tumpuan sendi dan mempertahankan kekangan



samping dan rasio penulangan sebesar 0.36% dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Moment-displacement graphs for 0.36% reinforcement ratio (pin restraint)

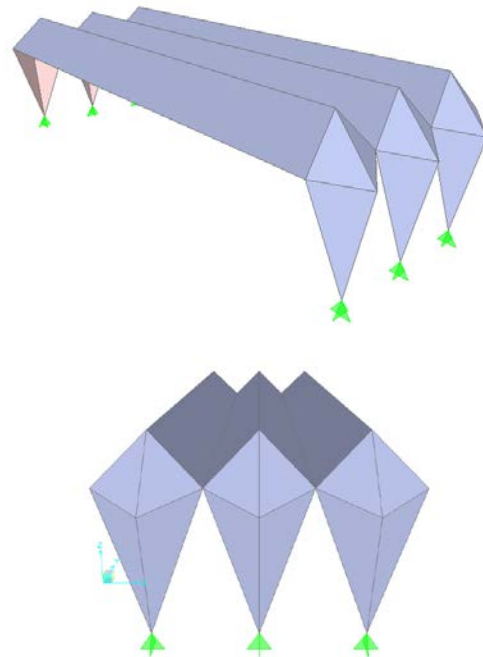
Table 8. Perbandingan kapasitas momen dari LS Dyna tumpuan sendi vs SAP2000 dan LS Dyna tumpuan jepit vs SAP2000

Plate section	SAP2000	LS Dyna sendi	LS Dyna jepit	LS Dyna sendi /SAP2000	LS Dyna jepit /SAP2000
FP0	246.7	300.0	196.0	1.2	0.8
FP15	458.6	788.0	1320.0	1.7	2.9
FP30	864.1	1440.0	3410.0	1.7	3.9
FP45	1465.6	2100.0	5840.0	1.4	4.0
FP60	2525.5	3780.0	10100.0	1.5	4.0

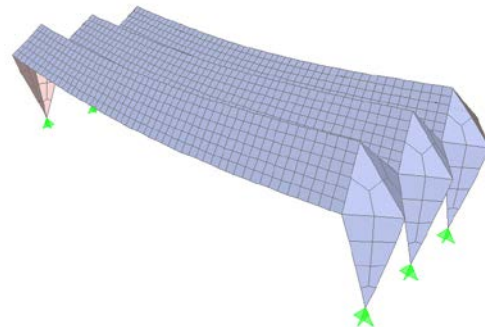
Melihat Table 10, ada efek positif dari kekangan sisi samping terhadap kapasitas momen. Rasio maksimum didapat setinggi 1.7 dalam penampang sudut 15° dan 30° pelat lipat.

### 2.6. Analisis portal pelat lipat vs. Portal Beton Bertulang

Dalam analisis portal pelat lipat, panjang atap pelat lipat adalah 25 m dan tinggi kolom pelat dilipat adalah 5.5 m. Berat sendiri material beton sebagai beban mati dan beban hidup 96 kg/m<sup>2</sup> dimasukkan dalam model portal. Kombinasi pembebanan 1.2DL dan 1.6LL digunakan untuk mendapatkan deformasi maksimum struktur dan distribusi momen. Tebal plat 15 cm digunakan untuk semua elemen shell. Luas total shell adalah 553.2 m<sup>2</sup> yang menghasilkan volume beton 83 m<sup>3</sup>.

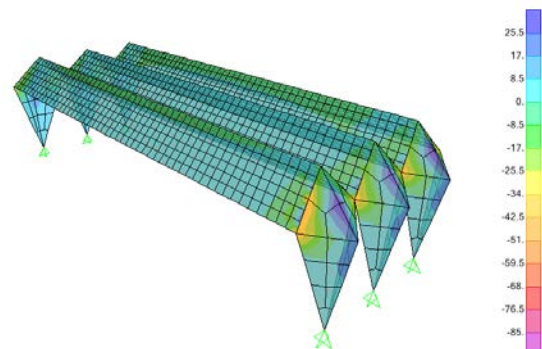


Gambar 12. Model Shell dari Struktur Folded Plate Frame/Portal



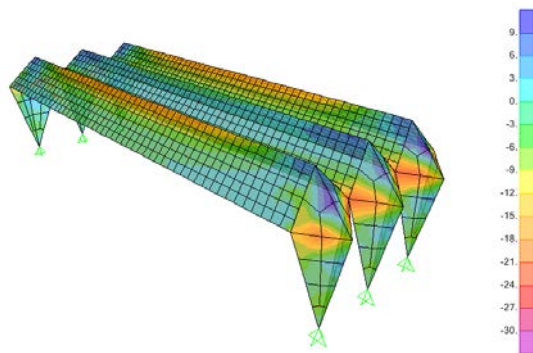
Gambar 13. Folded plate portal structure deformation for load combination 1.2DL+1.6LL

Lendutan maksimum sebesar 40.5 mm terjadi di bagian tengah atap pelat lipat diamati dari model FP45 (Gambar 13).



Gambar 14.

Distribusi momen X-X di dalam struktur folded plate frame/portal (kNm/m)

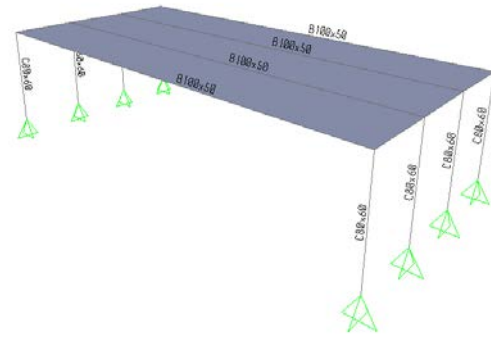


Gambar 15.

Distribusi momen Y-Y di dalam struktur folded plate frame/portal (kNm/m)

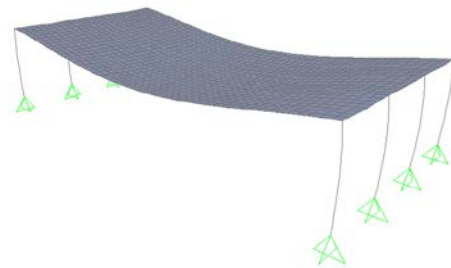
Distribusi momen struktur portal pelat lipat menunjukkan bahwa nilai momen tinggi terkonsentrasi hanya di beberapa lokasi, terutama di pertemuan antara kolom dan pelat atap. Hal ini biasanya diperhitungkan dalam proses detail penulangan yang dapat menyebabkan penggunaan baja tulangan menjadi lebih efisien. Nilai-nilai momen positif di bagian atap pelat lipat ditemukan sekitar  $\pm 4.5$  kNm/m, yang hanya membutuhkan jala tulangan  $\text{Ø}8\text{-}200$ . Namun, perlu dicatat bahwa semakin tebal pelat, perbedaan gaya tarik atau tekan antara bagian atas dan bawah akan lebih besar, maka analisis elemen hingga secara 3 dimensi menawarkan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan elemen shell sederhana dalam perangkat lunak SAP2000.

Meskipun sulit untuk membandingkan *apple to apple*, portal beton bertulang juga disimulasikan untuk melihat bagaimana struktur beton bertulang biasa dapat bersaing dengan struktur pelat lipat. Dalam model portal beton bertulang, balok  $100 \times 50$  cm dan kolom  $80 \times 60$  cm digunakan dengan 10 cm pelat atap. Pemilihan dimensi balok dan kolom dilakukan dengan cara *trial and error* sampai mencapai kombinasi yang menghasilkan daerah tulangan minimum dan deformasi struktur minimum tetapi menggunakan volume beton yang sama seperti struktur pelat lipat. Dengan perhitungan volume secara sederhana, material beton total yang digunakan adalah  $83.34 \text{ m}^3$ .



Gambar 16.

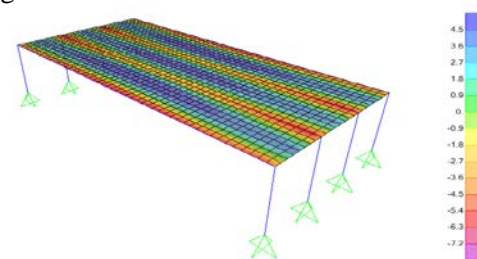
Model portal beton bertulang



Gambar 17.

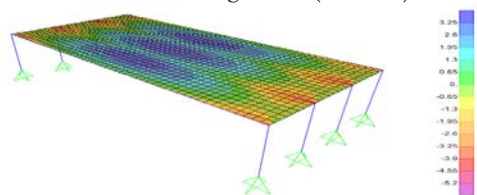
Model struktur portal beton bertulang (deformasi)

Deformasi maksimum untuk portal beton bertulang adalah 55.3 mm, 37% lebih besar dibandingkan dengan struktur portal pelat lipat. Oleh karena itu, struktur portal pelat lipat lebih efisien secara struktural dalam memanfaatkan jumlah material beton dan baja yang sama.



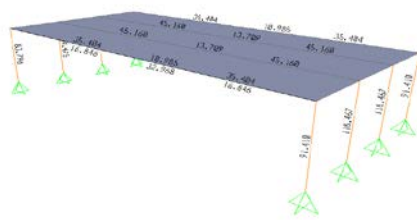
Gambar 18.

Distribusi momen arah X-X di struktur portal beton bertulang biasa (kNm/m)



Gambar 19.

Distribusi momen arah Y-Y di struktur portal beton bertulang biasa (kNm/m)



Gambar 20.

Luas area tulangan utama untuk balok dan kolom hasil perhitungan SAP2000 dengan desain ACI 2005

Biaya material beton dan baja dapat dibandingkan antara struktur beton bertulang dan struktur pelat lipat dengan menggunakan tulangan desain pada Gambar 20 di atas dengan menghitung volume baja dan beton yang dibutuhkan.

### 3. KESIMPULAN DAN SARAN

Analisis struktur pelat lipat dengan SAP2000 mengungkapkan bahwa dengan meningkatkan sudut, kapasitas momen maksimum dapat ditingkatkan hingga 10.2 kali dibandingkan dengan pelat datar biasa dengan luas penampang yang sama dan rasio tulangan yang sama (kasus sudut  $60^\circ$ ). Kapasitas momen meningkat sebesar 1.9, 3.5, 6, dan 10.2 untuk sudut  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ , dan  $60^\circ$ . Dengan demikian, saat ini peningkatan kapasitas dapat digunakan sebagai faktor multiplikasi kinerja ketika beralih desain dari pelat datar ke pelat lipat.

Analisis lebih lanjut menggunakan *software* LS Dyna dengan metoda elemen hingga, struktur pelat lipat sepenuhnya tertahan di ujung dan tertahan parsial di ke dua sisi samping. Pengaturan ini bisa membawa keluar kekuatan maksimum dari penampang pelat lipat. Secara keseluruhan, ada peningkatan 2.1, 2.7, 2.7, dan 2.6 untuk sudut pelat lipat  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ , dan  $60^\circ$  masing-masing ketika pelat itu diperkaku di sisi-sisinya.

Menurut SNI 1729-2015, untuk 25 m span,  $l/16$  adalah ketinggian balok minimum yang disarankan. Ini akan menghasilkan tinggi balok 1.56 m, yang sulit atau tidak praktis untuk digunakan dalam struktur. Praktek yang biasa adalah untuk mengubah desain untuk balok prategang setelah rentang melebihi 15 m. Oleh karena itu, struktur pelat lipat dapat menjadi alternatif lain saat merancang struktur bentang panjang lebih dari 15 m.

Harus dicatat bahwa model pelat lipat saat ini masih perlu dikalibrasi oleh percobaan yang sebenarnya untuk mendapatkan multiplikasi kinerja aktual. Hasil simulasi sejauh ini hanya dapat berfungsi sebagai pendekatan dari respon struktur yang sebenarnya.

### KEPUSTAKAAN

- Drusa, M., Nikolic, R. R., Marschalko, M., Gilewski, W., Pelczyński, J., & Stawarz, P. (2014). A Comparative Study of Origami Inspired Folded Plates. *Procedia Engineering*, 91, 220-225. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.050>
- Engel, H., (1981), *Structure Systems*, Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- Listriadi, A., Darmawan, A.M.S., (2011), *Kumpulan Bahan Kuliah Perencanaan Teknologi dan Sistem Bangunan 6*, Penerbitan Universitas Katolik Soegijapranata, Semarang.
- Malvar, L. J., Crawford, J. E., Wesevich, J. W., & Simons, D. (1997). A plasticity concrete material model for DYNA3D. *International Journal of Impact Engineering*, 19(9-10), 847-873.
- Salvadori, M., and Heller, R., (1963), *Structure in Architecture*, Prentice Hall International, Inc., London.
- Schodeck, D.L., (1999), *Struktur, Edisi Kedua*, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Schueller, W., (1983), *Horizontal-Span Building Structures*, John Wiley & Sons, New York.
- Schwer, L. E., & Malvar, L. J. (2005). Simplified Concrete Modeling with \*MAT\_CONCRETE\_DAMAGE\_RE L3.
- Siegel, C., (1961), *Structure and Form in Modern Architecture*, Crosby Lockwood & Son Ltd., London.