

ANALISIS PENGARUH BENTUK BUKAAN PADA PELAT LENTUR DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

Prem Singh¹ dan Leo S. Tediato²

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1, Jakarta, Indonesia
prem.325180153@stu.untar.ac.id

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1, Jakarta, Indonesia
leotedi@ft.untar.ac.id

Masuk: 02-02-2022, revisi: 12-05-2022, diterima untuk diterbitkan: 17-05-2022

ABSTRACT

Openings in the slab are generally unavoidable. Openings need to be provided to meet the needs of services such as water pipes and electrical wiring. Area around the opening will experience an increase in deflection and stress. In this research, slab designed to receive a transverse uniform load. The shapes of the openings are square, rectangle, and circle. The area of the openings is kept 9,89% of the total area and flexed at the center of the slab with different boundary conditions i.e. simple support, fixed on 4 sides, fixed on 3 sides, fixed on 2 opposite sides, and fixed on 2 adjacent sides. Slab analysis with openings was carried out using the finite element method and the help of the MIDAS FEA software. The results of the analysis showed that among the three shapes of openings, area around rectangular openings tend to produce the highest increases in displacement and stress viz. 2,6 times and 4,7 times. Meanwhile, area around the circular opening experienced the lowest increase in deflection and stress viz. 1,3 times and 1,1 times. The boundary conditions that cause the highest increase in deflection and stress are simple supports.

Keywords: slab with opening; finite element method; MIDAS FEA

ABSTRAK

Bukaan pada pelat umumnya tidak dapat dihindarkan. Bukaan perlu dibuat untuk memenuhi kebutuhan pelayanan seperti pipa air dan kabel listrik. Daerah pada sekeliling bukaan akan mengalami peningkatan lendutan dan tegangan. Pada penelitian ini, akan dianalisis pelat dengan variasi bentuk bukaan dan kondisi batas. Pelat yang dianalisis berbentuk bujur sangkar dan menerima beban merata secara transversal. Bentuk bukaan yang dianalisis adalah bujur sangkar, persegi panjang, dan lingkaran. Luas ketiga bentuk bukaan dipertahankan tetap sama sebesar 9,89% dari keseluruhan luas total pelat. Bukaan diletakkan tepat pada pusat pelat dengan kondisi batas yang berbeda-beda yaitu tumpuan sederhana, jepit di 4 sisi, jepit di 3 sisi, jepit di 2 sisi berseberangan, dan jepit di 2 sisi bersebelahan. Analisis pelat dengan bukaan dilakukan menggunakan metode elemen hingga dan bantuan *software* MIDAS FEA. Hasil analisis menunjukkan diantara ketiga bentuk bukaan, bukaan berbentuk persegi panjang cenderung menghasilkan peningkatan lendutan dan tegangan yang paling tinggi yaitu sebesar 2,6 kali lipat dan 4,7 kali lipat. Sementara bukaan berbentuk lingkaran cenderung mengalami peningkatan lendutan dan tegangan yang paling rendah yaitu 1,3 kali lipat dan 1,1 kali lipat. Adapun kondisi batas yang menyebabkan terjadinya peningkatan lendutan dan tegangan yang paling tinggi adalah tumpuan sederhana.

Kata kunci: pelat dengan bukaan; metode elemen hingga; MIDAS FEA

1. PENDAHULUAN

Pelat merupakan struktur bidang yang tebalnya jauh lebih kecil dibandingkan dengan dimensinya yang lain. Dalam struktur bangunan, bukaan pada sebuah pelat tidak dapat dihindari. Bukaan diperlukan untuk instalasi pipa dan saluran kebutuhan esensial seperti listrik, telepon, suplai air, jaringan internet, pembuangan, mesin pendingin, dll (Kumar, 2014). Dalam hal seperti ini, biasanya bukaan dibuat setelah proses konstruksi selesai dengan cara memotong/membobok pelat yang sudah ada. Tetapi, permasalahan pelat dengan bukaan sangat sulit diselesaikan dengan metode analisis teori pelat klasik sebab penyelesaiannya cukup rumit (Mohan et al., 2006). Metode eksperimental di laboratorium memang sangat dapat diandalkan untuk memahami perilaku sebuah struktur seperti pelat dengan bukaan, tetapi dianggap tidak praktis dan efisien karena membutuhkan waktu yang cukup lama dan biaya yang cukup besar (Mohan et al., 2006). Dengan demikian, berkembanglah metode numerik sebagai metode alternatif pendekatan terhadap solusi eksak untuk menyederhanakan perhitungan pelat dengan bukaan. Salah satu

metode numerik yang umum digunakan saat ini adalah metode elemen hingga. Metode elemen hingga memiliki kemampuan untuk menghitung pelat dengan bentuk geometri apapun hingga yang tak beraturan dan memiliki bukaan dimana *direct design* dan *equivalent frame techniques* sudah tidak lagi valid (Bora et al., 2019).

Berdasarkan teori elastisitas, sebuah benda akan mengalami perubahan pada bentuknya (deformasi) bila dibebani gaya luar (Timoshenko, 1951). Deformasi juga akan menimbulkan tegangan dan regangan. Distribusi tegangannya sangat bergantung terhadap geometri benda tersebut. Tegangan akan terkonsentrasi pada daerah yang mengalami perubahan bentuk secara tiba-tiba seperti bukaan. Pada sebuah struktur pelat dengan bukaan, akan terjadi konsentrasi tegangan dan peningkatan deformasi di sekitar bukaan. Dalam penelitian ini, penulis ingin mengetahui sejauh mana pengaruh variasi bentuk bukaan terhadap tegangan dan deformasi pada pelat dengan beberapa variasi kondisi batas.

Metode elemen hingga telah dikenal luas sebagai metode numerik untuk penyelesaian sistem persamaan diferensial parsial, yang sangat bergantung pada kondisi batas yang tepat dan kondisi awal. Metode ini digunakan untuk memecahkan masalah mekanika kontinum dengan tingkat ketelitian yang cukup baik. Metode diskritisasi model matematika kontinum, sebagai contoh adalah dengan mengkonversi suatu model diskret dengan jumlah hingga (*finite number*) suatu derajat kebebasan (*degree of freedom*). Metode elemen hingga menggunakan teknik diskritisasi pada struktur dalam analisisnya. Proses diskritisasi dilakukan dengan membagi suatu struktur kontinu menjadi sekumpulan potongan kecil yang dinamakan elemen hingga. Potongan-potongan kecil tersebut saling berhubungan hanya di titik nodal. Dinamakan elemen hingga karena ukuran elemen kecil ini berhingga (bukannya kecil tidak berhingga) dan umumnya memiliki bentuk geometri yang lebih sederhana dibandingkan dengan bentuk kontinum-nya. Potongan-potongan kecil tadi secara matematis dihubungkan satu dengan yang lain dengan kondisi sedemikian sehingga kompatibel dan kontinu antara elemen.

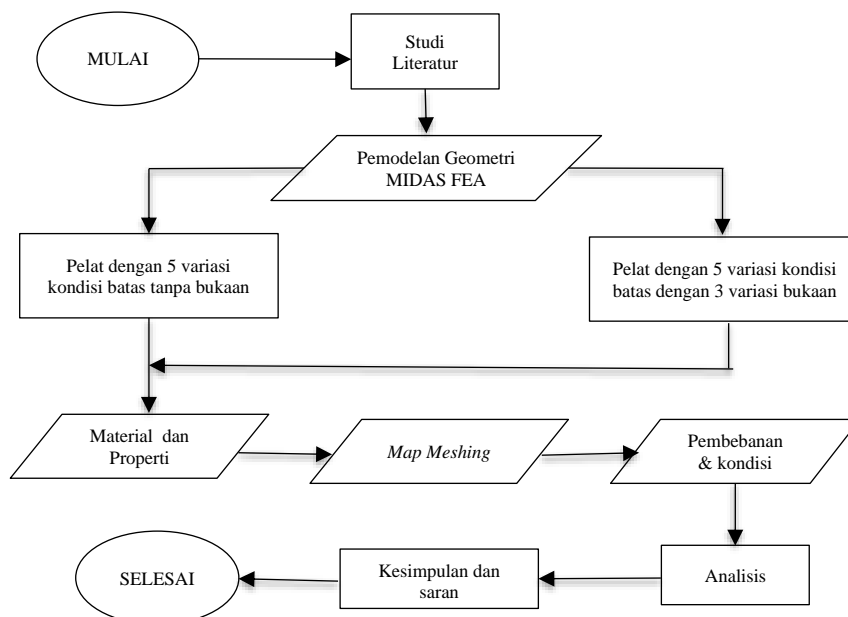
Rumusan Masalah

1. Bagaimana hasil deformasi dan tegangan yang terjadi pada struktur pelat dengan variasi bentuk bukaan dan tanpa bukaan menggunakan metode elemen hingga.
2. Bagaimana pengaruh bentuk bukaan dalam hal deformasi dan tegangan pada pelat dengan kondisi batas yang berbeda-beda.

Tujuan

1. Menghitung deformasi dan tegangan yang terjadi pada struktur pelat dengan variasi bentuk bukaan dan tanpa bukaan khususnya pada daerah di sekitar lubang menggunakan metode elemen hingga.
2. Mengetahui pengaruh bentuk bukaan dalam hal deformasi dan tegangan pada pelat dengan kondisi batas yang berbeda-beda.

2. METODE PENELITIAN



Gambar 1. Diagram alir

Dengan ilustrasi Gambar 1, pelat dengan dan tanpa bukaan dimodelkan pada MIDAS FEA untuk selanjutnya dianalisis secara linier. Setelah hasil analisis didapatkan, nilai deformasi dan tegangan pada titik-titik tertentu di sekitar bukaan dibandingkan dengan nilai deformasi dan tegangan pada titik yang sama pada pelat tanpa bukaan.

Studi Kasus

Berikut ini adalah spesifikasi pelat yang dimodelkan untuk studi kasus:

- Bentuk : bujur sangkar
- Dimensi : $3 \times 3 \text{ m}^2$
- Ketebalan : 120 mm
- Mutu beton (f_c') : 30 MPa
- Modulus elastisitas (E) : 25742.96 MPa
- Poisson rasion (ν) : 0.15
- Mutu baja tulangan (f_y) : 240 MPa
- Penulangan : $\phi 10 - 150$

Tiap-tiap bentuk bukaan akan diletakkan pada pelat dengan kondisi batas yang berbeda-beda (Gambar 2).

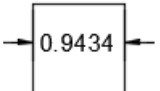
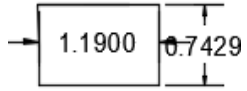

Untuk mempermudah pembahasan, maka dilakukan peng-kategorian pelat sesuai kondisi batasnya yaitu sebagai berikut:

- Kategori I : Kasus 1-4 adalah pelat dengan tumpuan sederhana
- Kategori II : Kasus 5-8 adalah pelat dengan perletakan jepit di 4 sisi
- Kategori III : Kasus 9-12 adalah pelat dengan perletakan jepit di 3 sisi
- Kategori IV : Kasus 13-16 adalah pelat dengan jepit di 2 sisi berseberangan
- Kategori V : Kasus 17-20 adalah pelat dengan jepit di 2 sisi bersebelahan

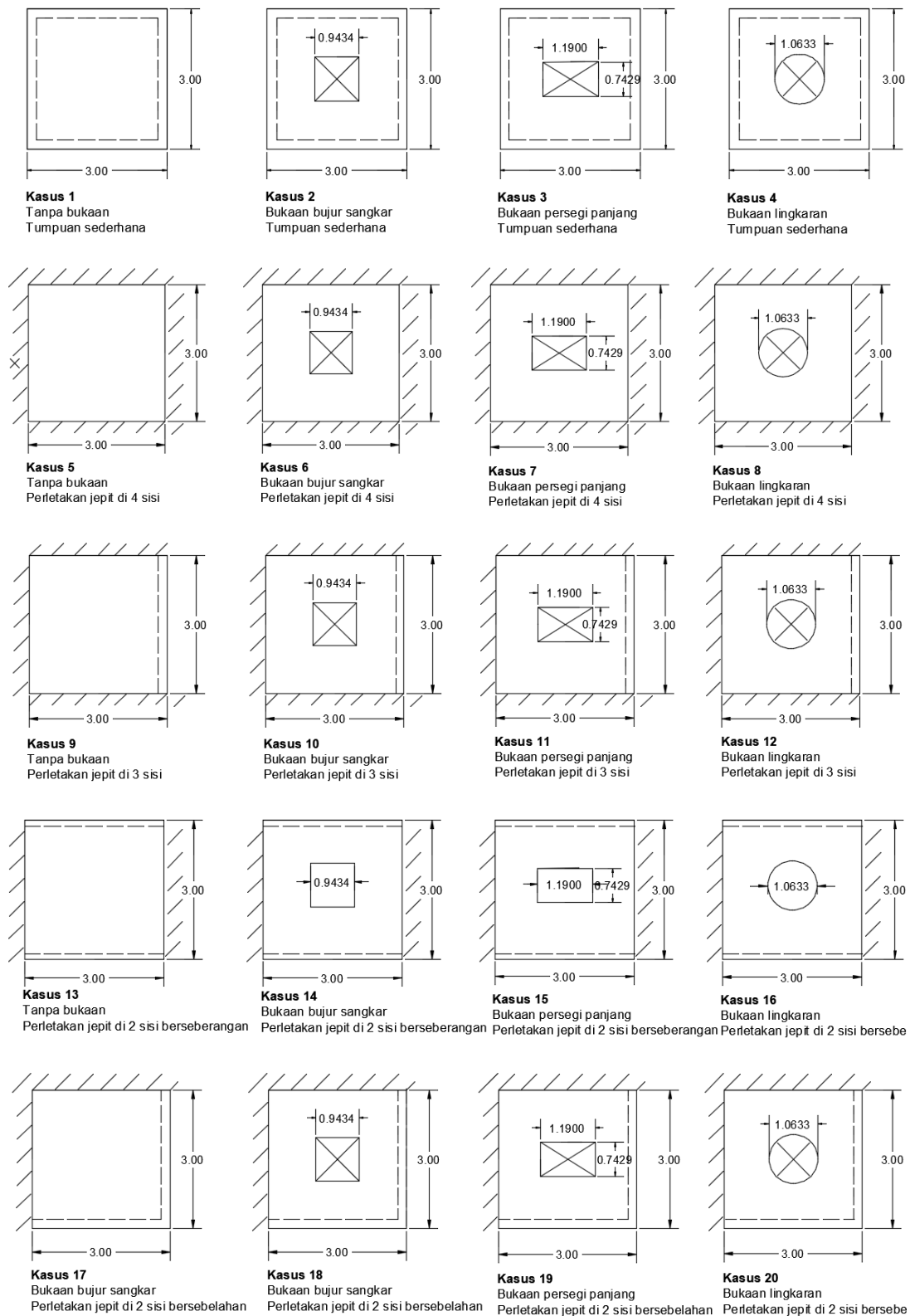
Sehingga secara total terdapat 20 kasus yang akan dianalisis. Dua puluh kasus tersebut terdiri dari 15 kasus dengan bukaan dan 5 kasus tanpa bukaan yaitu pelat 1,5,9,13 dan 17. Analisis yang dilakukan pada ke-20 kasus tersebut bertujuan untuk melihat perilaku pelat dan perubahan-perubahan yang terjadi yaitu deformasi dan tegangan, akibat adanya bukaan pada pelat dengan kondisi batas yang berbeda-beda. Dalam pemodelan pada MIDAS FEA, elemen yang digunakan adalah elemen solid 3D yang setiap elemennya memiliki 48 DOF.

Luas bukaan untuk ketiga bentuk bukaan dipertahankan tetap sama yaitu sebesar 0.89 m^2 atau sekitar 9.89% dari keseluruhan luas total pelat. Dimensi untuk ketiga bentuk bukaan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Dimensi Bukaan

No	Bentuk Bukaan	Dimensi Bukaan (m)
1	Bujur Sangkar	
2	Persegi Panjang	
3	Lingkaran	

Pelat dimodelkan menerima beban merata (*uniform*) gravitasi sebesar $q = 12.836 \text{ kN/m}^2$, termasuk berat sendiri. Ke-20 studi kasus akan dianalisis secara linier dengan beban yang telah ditentukan sama yaitu sebesar q .

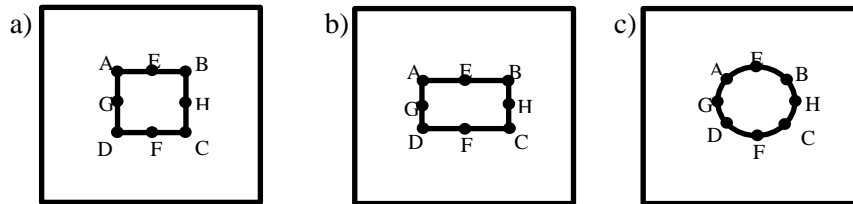


Gambar 2. Pemodelan studi kasus.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Deformasi

Titik-titik yang akan ditinjau beserta penamaannya dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Denah penamaan titik-titik di sekitar bukaan untuk bukaan berbentuk a) bujur sangkar b) persegi panjang dan c) lingkaran.

Berdasarkan hasil analisis yang disajikan dalam Tabel 2, peningkatan deformasi yang terjadi berkisar antara 1,9 sampai 2,6 kali lipat, bergantung kepada bentuk bukaan dan kondisi batasnya. Bukaan persegi panjang cenderung menghasilkan nilai dan peningkatan deformasi yang lebih besar jika dibandingkan dengan kedua bentuk bukaan lainnya. Jika dilakukan perbandingan peningkatan deformasi antara kategori kondisi batas, maka bukaan pada pelat dengan kondisi batas tumpuan sederhana (kategori I) mengalami peningkatan lendutan yang paling besar. Gambar 4 menunjukkan diagram peningkatan deformasi yang terjadi pada titik-titik disekitar bukaan pada semua kategori.

Tabel 2. Hasil Analisis Deformasi

Kategori Kondisi Batas	Titik	Bujur Sangkar			Persegi Panjang			Lingkaran		
		Lendutan (mm)		PL (x lipat)	Lendutan (mm)		PL (x lipat)	Lendutan (mm)		PL (x lipat)
		TB	DB		TB	DB		TB	DB	
I	A	0,394	0,972	2,5	0,384	0,957	2,5	0,430	1,041	2,4
	B	0,393	0,972	2,5	0,382	0,957	2,5	0,429	1,041	2,4
	C	0,392	0,972	2,5	0,382	0,957	2,5	0,430	1,040	2,4
	D	0,394	0,972	2,5	0,384	0,957	2,5	0,428	1,041	2,4
	E	0,444	1,124	2,5	0,465	1,204	2,6	0,431	1,046	2,4
	F	0,443	1,119	2,5	0,465	1,203	2,6	0,431	1,046	2,4
	G	0,444	1,127	2,5	0,413	1,052	2,6	0,432	1,045	2,4
	H	0,442	1,127	2,5	0,410	1,052	2,6	0,432	1,046	2,4
II	A	0,113	0,223	2,0	0,108	0,216	2,0	0,129	0,250	1,9
	B	0,113	0,223	2,0	0,108	0,216	2,0	0,129	0,250	1,9
	C	0,113	0,223	2,0	0,108	0,216	2,0	0,129	0,250	1,9
	D	0,113	0,223	2,0	0,108	0,216	2,0	0,129	0,250	1,9
	E	0,135	0,271	2,0	0,145	0,300	2,1	0,130	0,253	1,9
	F	0,135	0,271	2,0	0,145	0,300	2,1	0,130	0,253	1,9
	G	0,135	0,271	2,0	0,121	0,241	2,0	0,130	0,253	1,9
	H	0,135	0,271	2,0	0,121	0,241	2,0	0,130	0,253	1,9
III	A	0,128	0,255	2,0	0,122	0,248	2,0	0,158	0,318	2,0
	B	0,161	0,341	2,1	0,164	0,357	2,2	0,158	0,318	2,0
	C	0,161	0,341	2,1	0,164	0,357	2,2	0,190	0,407	2,1
	D	0,128	0,255	2,0	0,122	0,248	2,0	0,146	0,284	1,9
	E	0,166	0,346	2,1	0,180	0,388	2,2	0,179	0,375	2,1
	F	0,166	0,345	2,1	0,180	0,388	2,2	0,179	0,375	2,1
	G	0,155	0,306	2,0	0,136	0,274	2,0	0,150	0,294	2,0
	H	0,195	0,432	2,2	0,184	0,413	2,2	0,150	0,294	2,0

Tabel 2 (lanjutan). Hasil Analisis Deformasi

Kategori Kondisi Batas	Titik	Bujur Sangkar			Persegi Panjang			Lingkaran		
		Lendutan (mm)		PL (x lipat)	Lendutan (mm)		PL (x lipat)	Lendutan (mm)		PL (x lipat)
		TB	DB		TB	DB		TB	DB	
IV	A	0,1807	0,3819	2,1	0,1673	0,3489	2,1	0,2030	0,4276	2,1
	B	0,1807	0,3806	2,1	0,1673	0,3491	2,1	0,2030	0,4278	2,1
	C	0,1807	0,3815	2,1	0,1673	0,3491	2,1	0,2030	0,4276	2,1
	D	0,1807	0,3816	2,1	0,1673	0,3489	2,1	0,2030	0,4275	2,1
	E	0,2190	0,4777	2,2	0,2289	0,5000	2,2	0,2126	0,4544	2,1
	F	0,2190	0,4778	2,2	0,2289	0,5000	2,2	0,2126	0,4541	2,1
	G	0,2013	0,4288	2,1	0,1784	0,3705	2,1	0,1910	0,3956	2,1
	H	0,2013	0,4281	2,1	0,1784	0,3707	2,1	0,1910	0,3953	2,1
V	A	0,155	0,311	2,0	0,148	0,301	2,0	0,184	0,365	2,0
	B	0,198	0,427	2,2	0,204	0,450	2,2	0,222	0,476	2,1
	C	0,252	0,573	2,3	0,245	0,568	2,3	0,268	0,607	2,3
	D	0,198	0,426	2,2	0,179	0,389	2,2	0,222	0,476	2,1
	E	0,203	0,420	2,1	0,223	0,467	2,1	0,192	0,389	2,0
	F	0,260	0,605	2,3	0,268	0,648	2,4	0,254	0,567	2,2
	G	0,203	0,420	2,1	0,178	0,370	2,1	0,192	0,389	2,0
	H	0,260	0,606	2,3	0,245	0,574	2,3	0,254	0,567	2,2

Ket: TB = Tanpa Bukaannya DB = Dengan Bukaannya PL = Peningkatan Lendutan

Tegangan

Titik-titik yang akan ditinjau beserta penamaannya dapat dilihat pada Gambar 5.

Berdasarkan hasil analisis yang disajikan dalam Tabel 3, dapat diketahui jika peningkatan tegangan yang terjadi berkisar antara 1,1 sampai 4,7 kali lipat, bergantung kepada bentuk bukaan dan kondisi batas pelat. Bukaan persegi panjang cenderung menghasilkan nilai dan peningkatan tegangan yang lebih besar jika dibandingkan dengan kedua bentuk bukaan lainnya. Jika dilakukan perbandingan antara kategori kondisi batas, maka peningkatan tegangan terbesar terjadi di sekitar bukaan pada pelat dengan kondisi batas tumpuan sederhana (kategori I). Gambar 6 diagram peningkatan deformasi yang terjadi pada titik-titik disekitar bukaan pada semua kategori.

Tabel 3. Hasil Analisis Tegangan

Kategori Kondisi Batas	Titik	Bujur Sangkar			Persegi Panjang			Lingkaran		
		Tegangan (N/mm ²)		PL (x lipat)	Tegangan (N/mm ²)		PL (x lipat)	Tegangan (N/mm ²)		PL (x lipat)
		TB	DB		TB	DB		TB	DB	
I	A	0,685	2,957	4,3	0,678	3,158	4,7	0,745	2,190	2,9
	B	0,678	2,934	4,3	0,668	3,122	4,7	0,742	2,174	2,9
	C	0,678	2,967	4,4	0,670	3,150	4,7	0,749	2,175	2,9
	D	0,686	2,967	4,3	0,679	3,137	4,6	0,742	2,193	2,9
	E	0,742	1,803	2,4	0,778	1,881	2,4	0,734	1,271	1,7
	F	0,743	1,770	2,4	0,779	1,880	2,4	0,736	1,255	1,7
	G	0,740	1,811	2,4	0,688	1,775	2,6	0,740	1,265	1,7
	H	0,732	1,800	2,5	0,677	1,765	2,6	0,740	1,264	1,7
II	A	0,299	1,182	3,9	0,274	1,273	4,6	0,346	0,725	2,1
	B	0,299	1,172	3,9	0,274	1,253	4,6	0,346	0,719	2,1
	C	0,299	1,188	4,0	0,275	1,267	4,6	0,346	0,718	2,1
	D	0,299	1,187	4,0	0,274	1,267	4,6	0,346	0,726	2,1
	E	0,366	0,564	1,5	0,397	0,669	1,7	0,351	0,500	1,4
	F	0,366	0,562	1,5	0,397	0,669	1,7	0,352	0,496	1,4
	G	0,366	0,642	1,8	0,322	0,453	1,4	0,351	0,491	1,4
	H	0,366	0,563	1,5	0,322	0,453	1,4	0,351	0,496	1,4

Tabel 3 (lanjutan). Hasil Analisis Tegangan

Kategori Kondisi Batas	Titik	Bujur Sangkar			Persegi Panjang			Lingkaran		
		Tegangan (N/mm ²)		PL (x lipat)	Tegangan (N/mm ²)		PL (x lipat)	Tegangan (N/mm ²)		PL (x lipat)
		TB	DB		TB	DB		TB	DB	
III	A	0,2554	1,0131	4,0	0,320	1,516	4,3	0,400	0,619	1,5
	B	0,3600	1,6205	4,5	0,385	1,672	4,7	0,400	0,617	1,5
	C	0,3597	1,6375	4,6	0,386	1,673	4,7	0,395	0,787	2,0
	D	0,2555	1,0162	4,0	0,320	1,507	4,3	0,529	1,535	2,9
	E	0,3437	0,4926	1,4	0,375	0,608	1,6	0,482	0,651	1,4
	F	0,3438	0,4889	1,4	0,375	0,609	1,6	0,484	0,646	1,3
	G	0,4204	0,6041	1,4	0,365	0,500	1,4	0,400	0,590	1,5
	H	0,5417	1,2155	2,2	0,513	1,174	2,3	0,400	0,571	1,4
IV	A	0,466	1,595	3,4	0,393	1,369	3,5	0,592	1,669	2,8
	B	0,466	1,559	3,3	0,393	1,345	3,5	0,593	1,652	2,8
	C	0,466	1,591	3,4	0,393	1,361	3,5	0,471	0,499	1,1
	D	0,466	1,593	3,4	0,393	1,362	3,5	0,471	0,501	1,1
	E	0,611	1,300	2,1	0,638	1,359	2,1	0,543	0,679	1,3
	F	0,611	1,292	2,1	0,638	1,358	2,1	0,545	0,675	1,2
	G	0,320	0,413	1,3	0,273	0,273	1,0	0,543	0,668	1,2
	H	0,320	0,415	1,3	0,274	0,274	1,0	0,543	0,675	1,2
V	A	0,466	1,595	3,4	0,393	1,369	3,5	0,592	1,669	2,8
	B	0,466	1,559	3,3	0,393	1,345	3,5	0,593	1,652	2,8
	C	0,466	1,591	3,4	0,393	1,361	3,5	0,471	0,499	1,1
	D	0,466	1,593	3,4	0,393	1,362	3,5	0,471	0,501	1,1
	E	0,611	1,300	2,1	0,638	1,359	2,1	0,543	0,679	1,3
	F	0,611	1,292	2,1	0,638	1,358	2,1	0,545	0,675	1,2
	G	0,320	0,413	1,3	0,273	0,273	1,0	0,543	0,668	1,2
	H	0,320	0,415	1,3	0,274	0,274	1,0	0,543	0,675	1,2

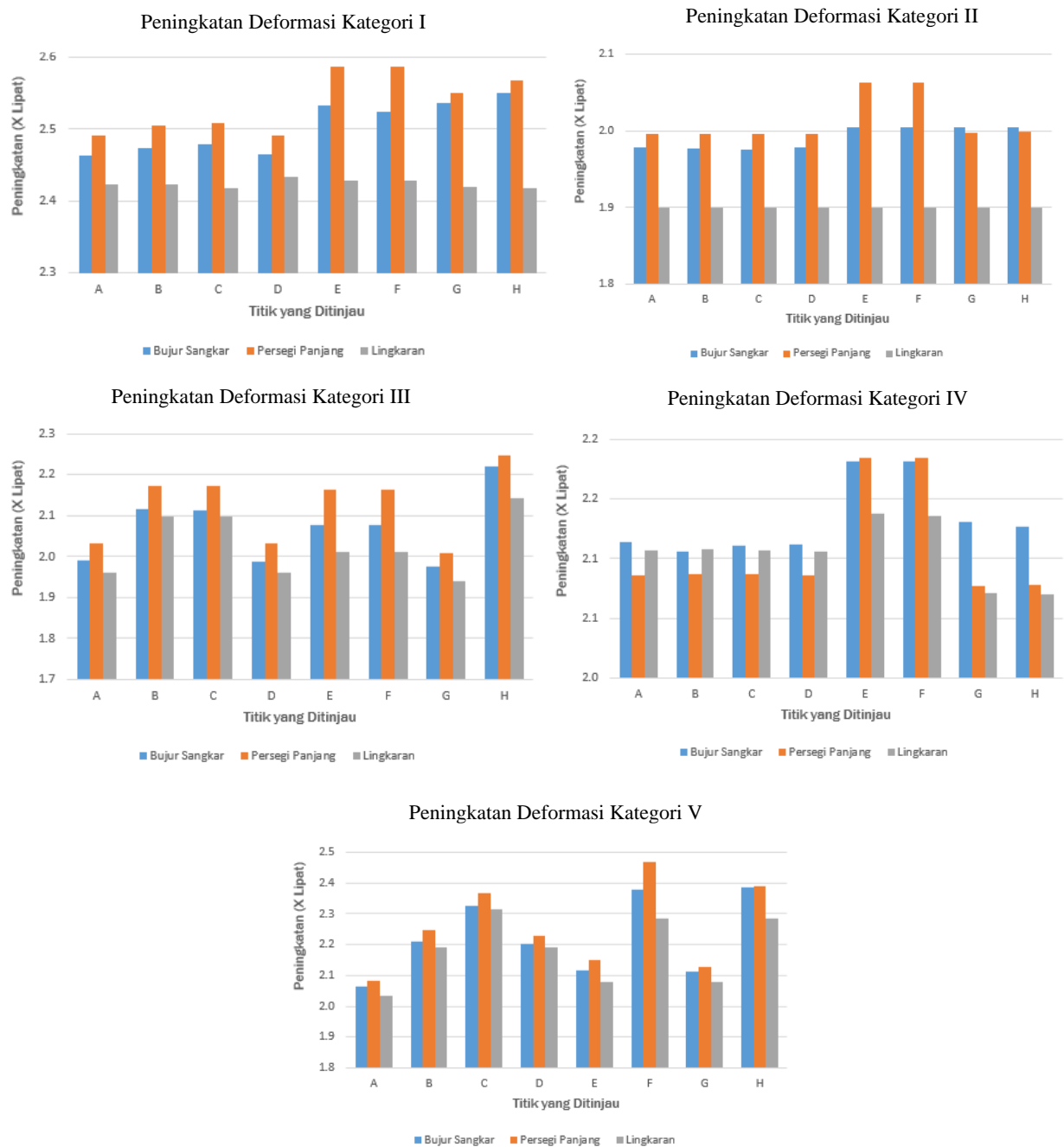
Ket: TB = Tanpa Bukaak DB = Dengan Bukaak PL = Peningkatan Lendutan

4. KESIMPULAN DAN SARAN

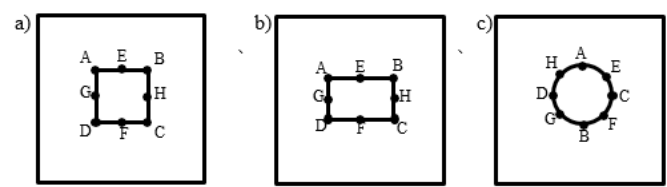
Kesimpulan

Berikut ini adalah kesimpulan yang diambil berdasarkan hasil analisis yang dilakukan:

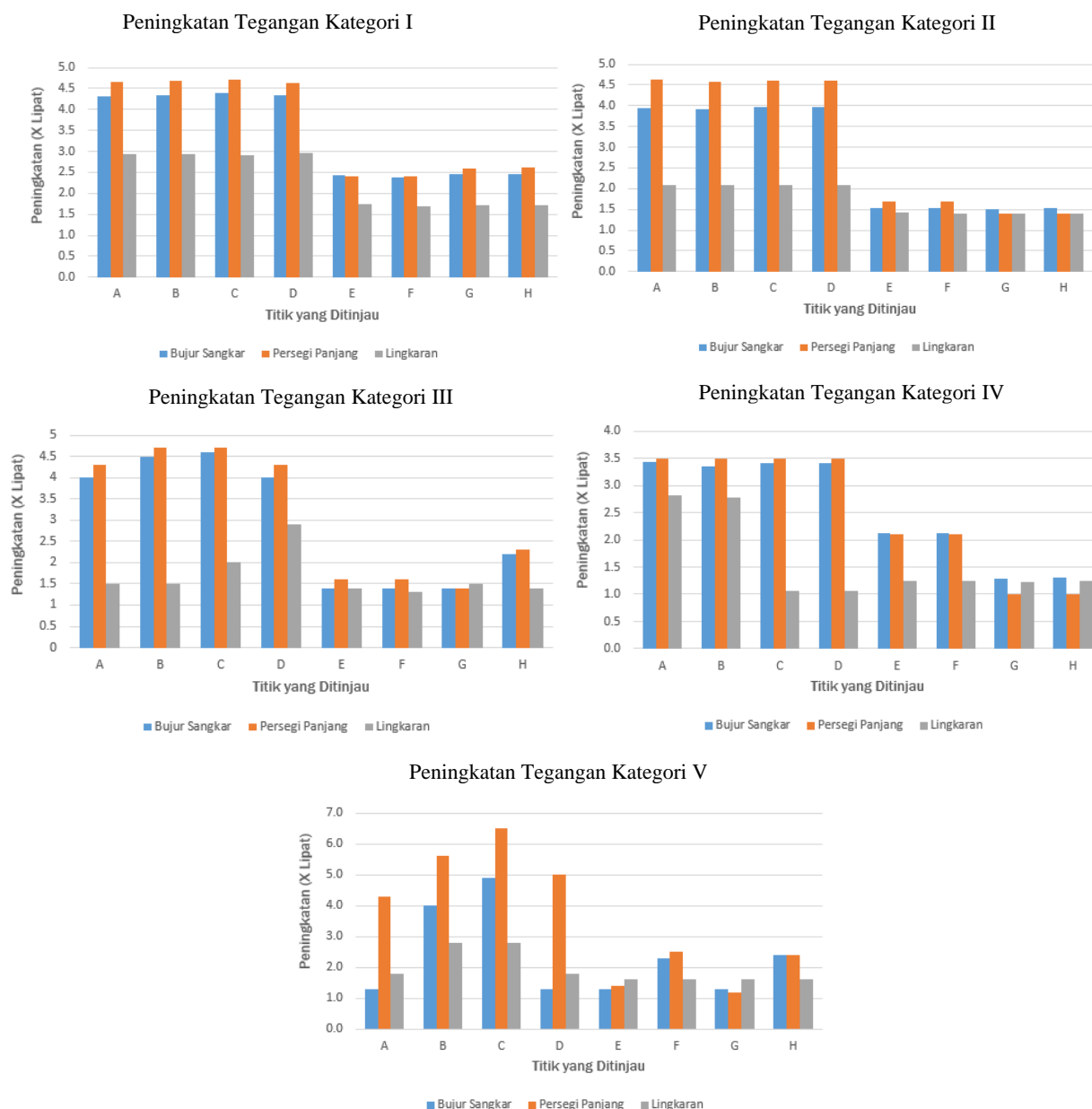
1. Titik di sekitar bukaan pada pelat dengan bukaan mengalami peningkatan lendutan jika dibandingkan dengan lendutan di titik yang sama pada pelat tanpa bukaan. Hal ini menunjukkan jika bukaan mengurangi kekakuan dan memperlemah struktur pelat di sekitar bukaan.
2. Jika lendutan maksimum akibat ketiga bentuk bukaan pada pelat dengan bukaan dibandingkan dengan lendutan maksimum yang terjadi pada pelat tanpa bukaan di titik yang sama, maka secara keseluruhan bukaan berbentuk persegi panjang menghasilkan peningkatan lendutan yang paling besar yaitu 2,6 kali lipat. Sementara bukaan berbentuk lingkaran menghasilkan peningkatan lendutan yang paling kecil yaitu 1,9 kali lipat.
3. Peningkatan tegangan di sekitar titik bukaan yang paling besar terjadi pada bukaan berbentuk persegi panjang. Konsentrasi tegangan terbesar terdapat pada titik-titik di daerah sudut yaitu titik A, B, C dan D sebesar 470%. Sementara peningkatan tegangan terkecil terjadi pada bukaan berbentuk lingkaran yaitu sebesar 1,1 kali lipat.
4. Dari ke-lima variasi kondisi batas pada studi kasus, peningkatan lendutan dan tegangan di sekitar bukaan yang paling besar terjadi pada pelat dengan kondisi batas berupa tumpuan sederhana.



Gambar 4. Diagram peningkatan deformasi pelat kategori I, II, III, IV dan V.



Gambar 5. Denah penamaan titik-titik di sekitar bukaan untuk bukaan berbentuk a) bujur sangkar b) persegi panjang dan c) lingkaran.



Gambar 6. Diagram peningkatan tegangan pelat kategori I, II, III, IV dan V.

Saran

Berikut ini adalah beberapa hal yang dapat dilakukan pada penelitian selanjutnya:

1. Melakukan uji eksperimental terhadap kasus-kasus yang ada.
2. Memvariasikan letak bukaan yaitu pada sisi dan sudut pelat.
3. Membandingkan hasil analisis *software* MIDAS FEA dengan hasil analisis *software* lain.
4. Memperhitungkan perkuatan tambahan di sisi-sisi sekitar bukaan
5. Melakukan analisis non-linier untuk mengetahui kapasitas beban dan pola keruntuhan pelat dengan bukaan seperti pada studi kasus

DAFTAR PUSTAKA

- Asroni, A. (2010). *Balok dan Pelat Bertulang* (1st ed.). Graha Ilmu
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *Persyaratan Beton Struktural* (SNI 2847)

- Bari, M. W., Rahman, M. M., Ali, M. M. Y., & Awall, M. R. (2004). Finite Element Analysis of Slab and a Comparative Study with Others Analytical Solution. *Proceedings of 7th International Conference on Concrete Technology in Developing Countries*, M24, 265-272
- Bora, A. S., Gaidhankar, D. G., & Kulkarni, M. S. (2019). Analysis of Flat Slab with and Without Opening. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 8(9), 1455-1459
- Brooker, O. (2006). *How to Design Reinforced Concrete Slabs Using Finite Element Analysis*. The Concrete Center
- Deaton, J. B. (2005). *A Finite Element Approach to Reinforced Concrete Slab Design* [Thesis, Georgia Institute of Technology]
- Durgadevagi, S. & Jabez, N. A. (2016). A Comparative Analysis of Slab with Different Shape of Cutout for Various End Condition Using ANSYS. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 8(12), 180-184
- Ganvir, A. A., & Singhade, V. S. (2016). Comparative Study of Reinforced Concrete Flat Slabs with and without Openings using Finite Element Analysis. *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 3(2), 245-252
- Hassan, D., Shoeib, A. E., Genidy, M. M., & Elnaby, S. F. M. A. (2017). The Effect of Introducing Openings of Different Shapes on the Behavior of Two Way Solid Loaded Slabs. *Proceedings of International Conference on Advances in Structural and Geotechnical Engineering (ICASGE' 17)*
- Katili, I. (2004). *Metode Elemen Hingga untuk Pelat Lentur*. Universitas Indonesia
- Logan, D. L. (2007). *A First Course in the Finite Element Method, Fourth Edition*. Nelson
- Kumar, S. & Chandra, S. (2014). Experimental Study on Self Compacting RC Slab With and Without Opening. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2(8), 202-206.
- Mohan, R. T., & Sansakaranarayanan, K. M. (2016). Analysis of Two-way Slabs with and Without Opening for Different Boundary Conditions. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 6(7), 151-156.
- Punmia, B. C., Jain, A. K., & Jain, A. K. (2007). *Limit State Design of Reinforced Concrete* (1st ed.). Laxmi Publications (P) LTD
- Timoshenko, S. (1951). *Theory of Elasticity*. McGraw
- Wijaya, H. (2013). *Analisis Struktur Pelat Berlubang Dengan Metode Elemen Hingga* [Skripsi, Universitas Tarumanagara]
- Wight, J. K. (2020). *Reinforced Concrete Mechanics and Design*. Pearson