

KAJIAN EFISIENSI SISTEM WAFFLE SLAB TERHADAP PELAT KONVENSIONAL

Paula¹ dan Edison Leo²

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
Email: paula.setiawan@yahoo.com

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

ABSTRAK

Pelat dengan pelat tipis dan kumpulan balok rusuk berbentuk T yang saling menyilang dikenal dengan nama *Waffle Slab*. Di antara berbagai sistem pelat, sistem *waffle slab* masih jarang sekali digunakan, padahal sistem *waffle slab* memiliki keuntungan yaitu dengan ketebalan pelat yang sangat tipis dan pemakaian besi tulangan yang cukup hemat pada pelatnya dikarenakan pelat *waffle slab* memiliki kekakuan yang besar pada pelat sehingga lendutan pada pelat relatif kecil. Selain itu, penggunaan sistem *waffle slab* juga dapat mempengaruhi tata letak kolom. Semakin kecilnya lendutan pada balok maka jarak antar kolom pada portal bisa lebih jauh dari struktur yang biasa. Tujuan dari studi ini adalah untuk membandingkan sistem *waffle slab* dengan sistem pelat konvensional ditinjau dari segi kekakuan, ketebalan pelat, jarak antar kolom dan penggunaan material beton serta tulangan. Metode untuk analisis struktur menggunakan *equivalent frame method* dan menggunakan *finite element program*. Dari hasil analisis dapat disimpulkan bahwa pada sistem *waffle slab*, jarak antar kolom dapat lebih panjang dibandingkan dengan sistem pelat konvensional dan dengan tebal pelat yang lebih tipis, sistem *waffle slab* lebih kaku dibandingkan dengan sistem pelat konvensional. Hasil analisis tulangan menunjukkan perbandingan penggunaan volume beton dan tulangan baja pada sistem *waffle slab* bisa lebih sedikit jumlahnya dibandingkan dengan sistem pelat konvensional.

Kata kunci: *waffle slab*, pelat konvensional, kekakuan.

1. PENDAHULUAN

Suatu bangunan gedung bertingkat memiliki beberapa komponen struktur atas salah satunya adalah pelat. Pelat merupakan elemen struktur yang menerima *gravity loads* pada gedung baik berupa beban mati maupun beban hidup secara langsung yang sifatnya lebih dominan terhadap lentur dengan bentuk yang melebar dan ketebalan yang relatif kecil (Costa & Araujo, 2014; Susanti, Youlanda, & Winaya, 2016). Beban gravitasi yang bekerja pada pelat akan disalurkan ke kolom melalui hubungan dari balok-balok (Pillai & Menon, 2003).

Berdasarkan buku yang ditulis Pillai & Menon (2003), sistem pelat terdiri dari beberapa macam yaitu (1) sistem *flat plate* adalah sistem pelat yang ditopang secara langsung oleh kolom tanpa adanya balok, (2) sistem *flat slab* adalah pelat yang diperkaku di bagian dengan kolom yang disokong oleh *drop panel*, (3) sistem *ribbed slab* adalah sistem pelat yang terdiri dari pelat yang tipis dan balok-balok rusuk. Balok rusuk dapat di desain sebagai *one-way ribbed slab*, (4) atau bisa juga di desain sebagai *two-way ribbed slab* atau yang dikenal sebagai sistem *waffle slab*, (5) dan sistem pelat konvensional adalah sistem pelat yang ditopang oleh balok yang kaku.

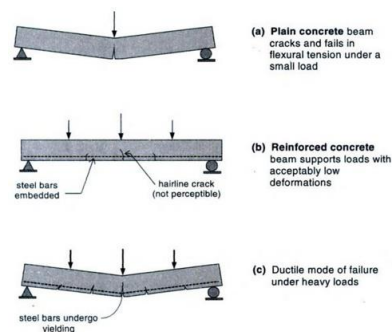
Waffle slab dapat divisualisasikan sebagai kumpulan dari balok T yang saling menyilang dan saling berhubungan pada bidang horizontal yang membentuk ruang-ruang kecil dimana balok silang tersebut menumpu pelat tipis di atasnya (Park & Gamble, 1980). Pada umumnya sistem *waffle slab* ini menggunakan bahan dari konstruksi beton bertulang dengan ketebalan pelat yang sangat tipis dan pemakaian besi tulangan yang cukup hemat pada pelatnya dikarenakan pelat *waffle slab* memiliki kekakuan yang besar pada pelat sehingga lendutan pada pelat relatif kecil (Susanti, Youlanda, & Winaya, 2016). Selain itu, penggunaan sistem *waffle slab* juga dapat mempengaruhi tata letak kolom. Semakin kecilnya lendutan pada balok maka jarak antar kolom pada portal bisa lebih jauh dari struktur yang biasa, umumnya panjang bentang bisa mencapai sekitar 10 m (Park & Gamble, 1980).

Di antara berbagai sistem pelat, sistem *waffle slab* masih jarang sekali digunakan. *Waffle slab* biasanya digunakan pada proyek-proyek khusus yang membutuhkan ruangan yang luas dengan jumlah kolom yang sedikit dan ruangan dengan pelat lantai yang memiliki lendutan yang kecil dan frekuensi getaran yang kecil. Biasanya digunakan dalam pembangunan bandara, jembatan, gedung parkir, serta bangunan komersil dan industri, perpustakaan atau *gallery art* yang mengutamakan nilai estetika pada plafon bangunan.

Pada studi penelitian ini penulis akan melakukan analisis dan desain kajian efisiensi dalam penggunaan sistem *waffle slab* terhadap pelat konvensional ditinjau dari segi kekakuan, ketebalan pelat, jarak antar kolom dan penggunaan material beton serta tulangan.

Beton dan beton bertulang

Beton adalah suatu massa padat yang terbuat dari gabungan material yang terdiri dari pasir, kerikil semen, dan air. Beton sangat kuat terhadap tekan, tetapi sangat lemah terhadap tarik. Kekuatan tariknya hanya 1/10 dari kuat tekannya (Pillai & Menon, 2003). Sebagai hasilnya, retakan akan timbul ketika beban, penyusutan, atau perubahan suhu menimbulkan tegangan tarik yang melebihi kekuatan tarik beton. Untuk itu, diperlukan tulangan baja di dalam beton untuk menahan gaya tarik tersebut (Wight, 2016).



Gambar 1. Kontribusi tulangan baja dalam beton bertulang (*Reinforced Concrete Design*, 2003:6)

Pelat

Pelat adalah komponen horizontal struktur yang menahan beban gravitasi (beban mati dan beban hidup) yang bekerja dan menyalurkannya ke rangka vertikal dari sistem struktur. Pelat bekerja sebagai diafragma/unsur pengaku horizontal yang bermanfaat untuk mendukung kekakuan dari elemen rangka vertikal struktur (Pillai & Menon, 2003).

Sistem pelat

Dalam buku yang ditulis oleh Pillai & Menon (2003), dalam konstruksi beton bertulang, pelat biasanya terdiri dari salah satu sistem di bawah ini:

1. Sistem Pelat Ditumpu oleh Dinding (*Wall-Supported Slab System*)
Pada sistem ini, tebal pelat berkisar antara 100-200 mm dengan panjang bentang sekitar 3-7,5 m ditumpu oleh *load-bearing walls*. Sistem ini digunakan terutama pada bangunan tingkat rendah.
2. Sistem Pelat Ditumpu oleh Balok (*Beam-Supported Slab System*)
Sistem ini umumnya digunakan pada bangunan tingkat tinggi dan juga struktur rangka tingkat rendah. Beban gravitasi yang bekerja pada pelat diteruskan ke kolom melalui hubungan balok. Balok yang langsung berhubungan dengan kolom disebut balok induk (atau *girders*), sedangkan balok yang ditumpu oleh balok induk dinamakan balok anak.

Berdasarkan kemampuannya untuk menyalurkan gaya akibat beban, pelat dibedakan menjadi pelat satu arah dan pelat dua arah. Hal ini ditentukan berdasarkan momen lentur yang lebih dominan pada bentang satu arah atau dua arah dengan membandingkan berdasarkan rasio bentang terpanjang dan bentang terpendeknya (Pillai & Menon, 2003).

Waffle slab

Untuk bentang pelat yang panjang dan relatif memikul beban hidup yang ringan dapat di desain dengan konstruksi balok jois menjadi sistem *waffle slab* (Wight, 2016). Menurut SNI 2847:2013, konstruksi balok jois terdiri dari kombinasi monolit rusuk berspasi beraturan dan slab diatasnya yang disusun untuk membentang dalam satu arah atau dua arah ortogonal. Ketentuan dalam menentukan jarak antar rusuk dan dimensi rusuk adalah sebagai berikut:

1. Lebar rusuk tidak boleh kurang dari 100 mm,
2. Tinggi rusuk tidak lebih dari $3\frac{1}{2}$ kali lebar minimum badannya,
3. Spasi bersih antar rusuk tidak boleh melebihi 750 mm.

Konstruksi balok jois yang tidak memenuhi batasan di atas harus dirancang sebagai slab dan balok.

Lendutan

Agar dapat menahan deformasi akibat lendutan tanpa menimbulkan kerusakan maka pada suatu struktur beton harus disyaratkan mempunyai kekuatan yang cukup kuat. Nilai lendutan yang terjadi tidak boleh melebihi nilai lendutan ijin yang disyaratkan dalam SNI 2847-2013 pasal 9.5.3.1 sebagai berikut:

1. $L/240$ untuk konstruksi atap atau lantai yang menumpu atau disatukan dengan komponen nonstruktural yang mungkin tidak akan rusak oleh lendutan yang besar.
2. $L/360$ untuk lantai yang tidak menumpu atau tidak disatukan dengan komponen nonstruktural yang mungkin akan rusak oleh lendutan yang besar.

Tebal minimum pelat

Berikut beberapa syarat ketentuan yang harus diperhatikan dalam menentukan tebal pelat untuk pelat konvensional.

1. Konstruksi Pelat 1 Arah

Menurut SNI 2847:2013 pasal 9.5.2.1, tebal minimum yang ditentukan dalam Tabel 9.5(a) berlaku untuk konstruksi satu arah yang tidak menumpu atau tidak disatukan dengan partisi atau konstruksi lain yang mungkin akan rusak akibat lendutan yang besar, kecuali bila perhitungan lendutan menunjukkan bahwa ketebalan yang lebih kecil dapat digunakan tanpa menimbulkan pengaruh yang merugikan.

2. Konstruksi Pelat 2 Arah

Menurut SNI 2847:2013 pasal 9.5.3.2, untuk pelat tanpa balok interior yang membentang di antara tumpuan dan mempunyai rasio bentang panjang terhadap bentang pendek yang tidak lebih dari 2, tebal minimumnya harus memenuhi ketentuan Tabel 9.5(c) pada SNI 2847:2013 dan tidak boleh kurang dari nilai berikut:

- a) Tanpa panel drop (*drop panels*) yaitu 125 mm
- b) Dengan panel drop (*drop panels*) yaitu 100 mm

Menurut SNI 2847:2013 pasal 9.5.3.3, Untuk pelat dengan balok yang membentang di antara tumpuan pada semua sisinya, tebal minimumnya, h , harus memenuhi ketentuan sebagai berikut:

- a) Jika $\alpha m < 0,2$ maka $h \geq 120$ mm (1)

- b) Jika $0,2 \leq \alpha m \leq 2$ maka:

$$h = \frac{Ln(0,8 + \frac{fy}{1400})}{36 + 5\beta(\alpha m - 0,2)} \text{ dan } h \geq 120 \text{ mm} \quad (2)$$

- c) Jika $\alpha m > 2$ maka:

$$h = \frac{Ln(0,8 + \frac{fy}{1400})}{36 + 9\beta} \text{ dan } h \geq 90 \text{ mm} \quad (3)$$

dengan β = rasio bentang bersih pelat dalam arah memanjang dan arah memendek, Ln = panjang bersih pada arah memanjang dari konstruksi dua arah, yang diukur dari muka ke muka tumpuan pada pelat tanpa balok, αm = nilai α rata-rata, dan α = rasio kekakuan lentur penampang balok terhadap kekakuan lentur pelat

$$\alpha = \frac{Ec \times Ib}{Ecs \times Is} \quad (4)$$

dengan Ec = modulus elastisitas beton, Ecs = modulus elastisitas pelat beton, Ib = momen inersia terhadap sumbu titik pusat penampang bruto balok, dan Is = momen inersia terhadap sumbu titik pusat penampang bruto pelat.

3. Konstruksi Waffle Slab

Menurut SNI 03-2847-2013 pasal 8.13.6.1 tebal pelat pada sistem *waffle slab* harus memenuhi syarat berikut:

- a) $h \geq 50$ mm (5)
- b) $h \geq Ln/12$ (6)

Equivalent frame method

Pada portal ekuivalen, kolom dianggap menyatu dengan balok-pelat transversal terhadap bentangan yang ditinjau melalui aksi torsi (Wight, 2016). Balok pelat yang mengalami torsi ini membentang dari garis sumbu-sumbu panel yang membatasi masing-masing sisi dari balok pelat yang ditinjau. Aksi torsi dari balok-pelat transversal akan

mengurangi kekakuan lentur efektif dari kolom aktual. Efek ini diperhitungkan dalam analisis dalam bentuk Kolom Ekuivalen yang mempunyai kekakuan lentur lebih kecil dari kolom aktualnya.

Besarnya nilai kekakuan lentur kolom ekuivalen dapat ditentukan sebagai berikut:

$$\frac{1}{K_{ec}} = \frac{1}{\sum K_c} + \frac{1}{K_t} \quad (7)$$

dengan K_{ec} = kekakuan lentur kolom ekuivalen, $\sum K_c$ = jumlah kekakuan lentur kolom actual dari kolom atas dan bawah pelat, dan K_t = kekakuan punter dari penahan puntir (*torsion arm*).

Nilai kekakuan torsi K_t dapat ditentukan sebagai berikut:

$$K_t = \sum \frac{9 E_{cs} C}{l_2 (1 - \frac{c_2^2}{l_2^2})^3} \quad (8)$$

dengan E_{cs} = modulus elastisitas balok pelat, c_2 = ukuran kolom, l_2 = lebar dari balok pelat yang ditinjau, dan C = konstanta penampang untuk menentukan kekakuan punter yang dapat dihitung dengan rumus

$$C = \sum \left[\left(1 - 0.63 \frac{x}{y} \right) \frac{x^3 y}{3} \right] \quad (9)$$

Kekakuan kolom ekuivalen (K_{ec}), kekakuan balok pelat (K_{cs}) kemudian digunakan untuk memnentukan faktor distribusi (Analisa Struktur dengan Metode *Cross*) dari setiap elemen struktur untuk mendapatkan momen- momen terfaktor (momen negatif, momen positif, dan momen ujung kolom) pada masing-masing ujung batang. Distribusi momen terfaktor yang diperoleh dari hasil analisis struktur kemudian didistribusikan ke masing-masing lajur kolom (*column strip*) dan lajur tengah (*middle strip*).

Penulangan lentur

Desain penulangan dilakukan sesuai dengan SNI 2847:2013, dengan desain tulangan ditentukan oleh rasio tulangan. Rasio tulangan harus berada diantara rasio tulangan minimum dan maksimum untuk menjamin struktur dalam keadaan daktil.

$$\text{Rasio tulangan minimum, } \rho_{min} = \frac{1.4}{f_y} \quad (10)$$

$$\text{Rasio tulangan maksimum } (\rho_{max}) = 0.75 \rho_b \quad (11)$$

$$\rho_b = \frac{0.85 f_c}{f_y} \beta_1 \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \quad (12)$$

dengan f_y = mutu baja tulangan (MPa), f_c' = mutu beton (MPa)

Jumlah luas tulangan yang diperlukan tergantung dari nilai rasio tulangan.

$$A_s = \rho b d \quad (13)$$

dengan A_s = luas Tulangan yang diperlukan (mm^2), ρ = rasio tulangan, dan b dan d = dimensi elemen struktur beton.

Dimensi elemen struktur dan jumlah tulangan yang digunakan memiliki kekuatan menahan beban yang disebut dengan kapasitas. Kapasitas lentur beton bertulang adalah sebagai berikut:

$$M_n = C_c (d - a/2) = 0.85 f_c' . a . b (d - a/2) \quad (14)$$

atau

$$M_n = T (d - a/2) = A_s . f_y (d - a/2) \quad (15)$$

Nilai kapasitas dari elemen struktur ini harus melebihi nilai momen lentur yang terjadi akibat adanya beban-beban. Analisa struktur akan menganalisis gaya dalam yang terjadi pada elemen struktur tersebut akibat beban *ultimate*. Hasil analisis struktur untuk momen lentur adalah Momen *Ultimate* (M_u). Nilai M_u ini yang harus memenuhi persamaan, $M_u \leq \phi M_n$ agar persyaratan keamanan struktur dapat dipenuhi.

Analisis kuat geser pelat

Ada dua jenis geser yang harus ditinjau:

1. Geser satu arah atau geser balok meninjau penampang kritis pada jarak d dari muka kolom dan pelat ditinjau sebagai balok lebar yang membentang antar tumpuannya.

2. Geser dua arah atau geser ponds yang terjadi sekeliling kerucut terpancung. Penampang kritis terletak pada $d/2$ dari muka kolom, *capital*, atau *drop panel*.

Untuk kondisi tanpa tulangan geser, kuat geser beton diambil sebagai nilai terkecil dari:

$$\phi V_c = \phi \frac{1}{3} \sqrt{f'c} \cdot b_o \cdot d \quad (16)$$

$$\phi V_c = \phi \left(1 + \frac{2}{\beta_c}\right) \frac{1}{6} \sqrt{f'c} \cdot b_o \cdot d \quad (17)$$

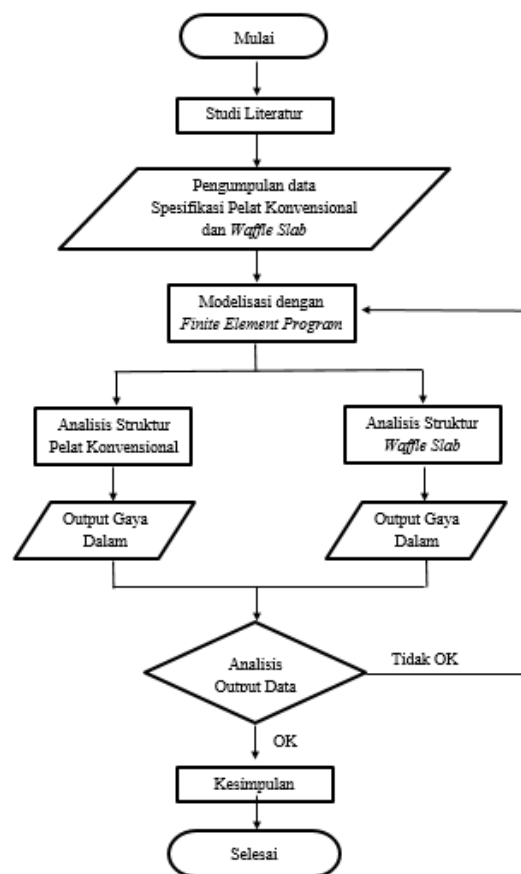
dengan β_c = rasio sisi panjang kolom terhadap sisi pendeknya

$$\phi V_c = \phi \left(\frac{\alpha_s \cdot d}{b_o} + 2\right) \frac{1}{12} \sqrt{f'c} \cdot b_o \cdot d \quad (18)$$

dengan α_s = 40 untuk kolom interior, 30 untuk kolom tepi, dan 20 untuk kolom susut.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan berdasarkan hasil analisis dengan bantuan program. Dalam melaksanakan penelitian dan analisis, langkah-langkah yang ditempuh penulis digambarkan melalui diagram alir penelitian seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir penelitian

3. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Data spesifikasi

Tinggi <i>story</i>	= 4 m	$f'c$ balok dan pelat	= 35 MPa
<i>Superimposed Dead Load</i> , SDL	= 225 kg/m ²	$f'c$ kolom	= 40 MPa
<i>Live Load</i> (fungsi bangunan perpustakaan)	= 479 kg/m ²	f_y	= 400 MPa
Ukuran Kolom	= 500/500 mm		

Ukuran Balok Induk = 400/800 mm

Ukuran Balok Rusuk sesuai dengan yang diatur dalam SNI 2847-2013 Pasal 8.13 mengenai Konstruksi Balok Jois sebagai berikut:

- 1) Lebar rusuk tidak boleh kurang dari 100 mm. SNI 2847:2013 (8.13.2)
Gunakan lebar rusuk 100 mm.
- 2) Tinggi rusuk tidak lebih dari $3\frac{1}{2}$ kali lebar minimum badannya. SNI 2847:2013 (8.13.2)
 $3,5 \times 100 \text{ mm} = 350 \text{ mm} \rightarrow$ Gunakan tinggi rusuk 350 mm.
- 3) Spasi bersih antar rusuk tidak boleh melebihi 750 mm. SNI 2847:2013 (8.13.3)
Spasi antar rusuk 820 mm.
- 4) Tebal slab tidak boleh kurang dari: SNI 2847:2013 (8.13.6.1)
 - a) $1/12$ jarak bersih antar rusuk = $1/12 \times 750 = 62,5 \text{ mm}$.
 - b) 50 mm.
 Digunakan tebal slab 80 mm > 62,5 mm.

Analisis bentang maksimum pelat

Dengan menetapkan tebal pelat 125 mm, dan ukuran balok seperti pada data spesifikasi di atas, dilakukan analisis bentang maksimum pelat terhadap sistem *waffle slab* dan sistem pelat konvensional dengan kombinasi pembebanan 1 DL + 1 SDL + 1 LL seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Hasil analisis bentang maksimum sistem pelat konvensional

No	Jarak antar Kolom (m)	Lendutan Max (mm)		Lendutan Ijin (mm)	Lendutan Max (mm)		Lendutan Ijin (mm)
		Dead Load + Live Load Tipe 1	Dead Load + Live Load Tipe 2	L/240	Live Load Tipe 1	Live Load Tipe 2	L/360
1	15	101.9710	112.2720	62.5000	47.1530	56.6660	41.6667
2	10	47.2870	51.9000	41.6667	22.2320	26.6270	27.7778
3	9.5	38.7280	42.5880	39.5833	18.1440	21.9730	26.3889
4	9.2	33.8840	37.2270	38.3333	15.8404	19.1810	25.5556
5	9	31.7860	34.8800	37.5000	14.8480	17.9420	25.0000
6	7	12.6620	13.7460	29.1667	5.8310	6.9120	19.4444
7	5	3.5550	3.6820	20.8333	1.6610	1.8480	13.8889

Tabel 2. Hasil analisis bentang maksimum sistem *waffle slab*

No	Jarak antar Kolom (m)	Lendutan Max (mm)		Lendutan Ijin (mm)	Lendutan Max (mm)		Lendutan Ijin (mm)
		Dead Load + Live Load Tipe 1	Dead Load + Live Load Tipe 2	L/240	Live Load Tipe 1	Live Load Tipe 2	L/360
1	15	104.9930	108.8780	62.5000	46.3940	50.9650	41.6667
2	13	57.8590	59.6970	54.1667	25.6010	27.7310	36.1111
3	12.5	49.1730	50.7499	52.0833	21.7730	23.6320	34.7222
4	12	41.3019	42.7313	50.0000	18.2510	19.8540	33.3333
5	10	18.8680	19.5860	41.6667	8.3500	9.0180	27.7778
6	9.2	14.1746	14.4675	38.3333	6.3503	6.8220	25.5556
7	5	1.0570	1.0880	20.8333	0.4652	0.4830	13.8889

Jarak antar kolom maksimum pada sistem pelat konvensional adalah 9,2 m, sedangkan pada sistem *waffle slab* adalah 12,5 m, maka jarak antar kolom pada sistem *waffle slab* lebih panjang 35% dibandingkan dengan sistem pelat konvensional.

Analisis lendutan

Dengan bentang jarak antar kolom yang sama, lendutan pada sistem pelat konvensional lebih besar dibandingkan dengan sistem *waffle slab*. Bila di rata-rata, terdapat perbedaan nilai lendutan sekitar 130% yang dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Perbedaan nilai lendutan

Jarak antar Kolom (m)	Lendutan Max <i>Waffle Slab</i>	Lendutan Max Pelat Konvensional	Perbandingan (%)
5	1.057	3.555	236.3292
9.2	14.1746	33.884	139.0473
10	18.868	47.287	150.6201
15	104.993	101.971	2.8783
Rata-rata			132.2187

Analisis tebal minimum pelat

Berdasarkan bentang maksimum pelat, dilakukan analisis tebal minimum pelat. Untuk sistem *waffle slab* digunakan bentang 12,5 m dan jarak antar balok rusuk 0,92 m. Sedangkan untuk sistem pelat konvensional digunakan bentang 9,2 m. Hasil analisis tebal minimum pelat ditabelkan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.

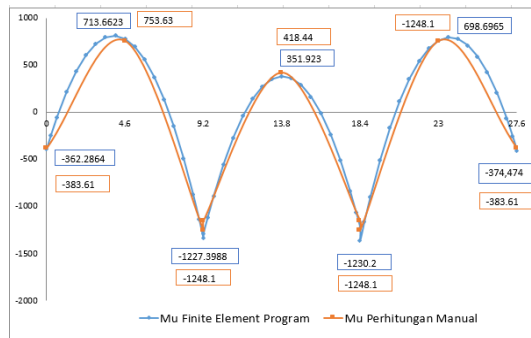
Tabel 4. Hasil analisis tebal minimum pelat

Sistem Pelat Konvensional				Sistem <i>Waffle Slab</i>			
No	Tebal Minimum Pelat (mm)	Lendutan Max (mm)	Lendutan Ijin (mm) L/240	No	Tebal Minimum Pelat (mm)	Lendutan Max (mm)	Lendutan Ijin (mm) L/240
1	100	53.378	38.3333	1	62.5	57.208	52.0833
2	125	37.227	38.3333	2	80	52.415	52.0833
3	130	34.477	38.3333	3	100	49.786	52.0833
4	140	27.287	38.3333				
5	150	24.044	38.3333				
5	180	17.599	38.3333				
6	200	14.932	38.3333				

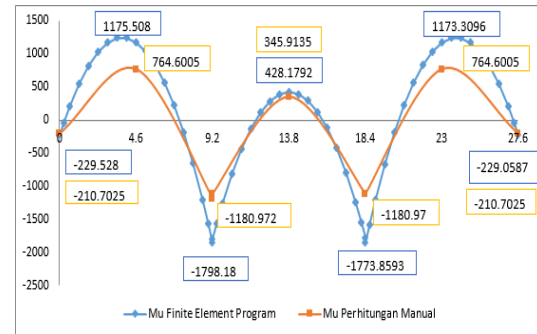
Untuk jarak antar kolom yang sama yaitu 9,2 m, tebal pelat pada sistem pelat konvensional adalah 125 mm dan tebal pelat pada sistem *waffle slab* adalah 80 mm, maka sistem *waffle slab* memiliki tebal pelat lebih tipis 56,25% dari sistem pelat konvensional.

Analisis momen pada pelat

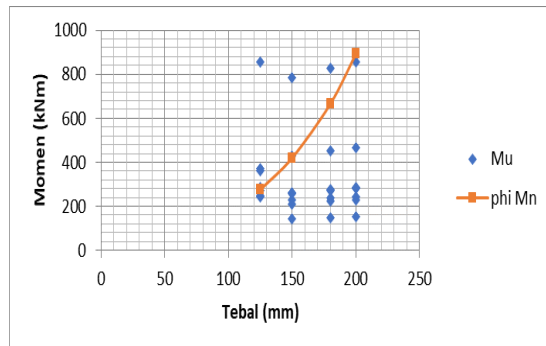
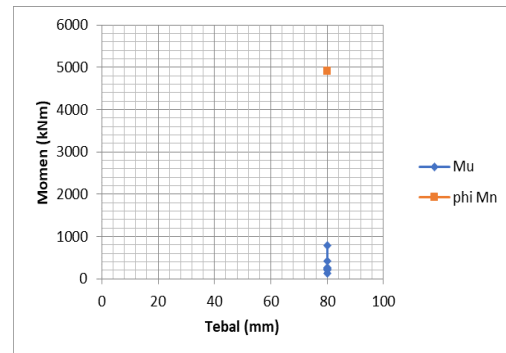
Analisis struktur pada pelat menggunakan bantuan dari *finite element program* dan dicocokkan dengan perhitungan manual dengan metode portal ekuivalen (*equivalent frame method*). Hasil analisis struktur berupa momen untuk sistem pelat konvensional dapat dilihat pada Gambar 3 dan untuk sistem *waffle slab* dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 3. Diagram momen sistem pelat konvensional

Gambar 4. Diagram momen sistem *waffle slab*

Dari tabel di atas kemudian diperoleh grafik sebagai berikut untuk melihat hubungan pengaruh tebal pelat terhadap momen lentur *tension control* pada sistem pelat konvensional dan sistem *waffle slab* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5 dan Gambar 6.

Gambar 5. Hubungan pengaruh tebal pelat terhadap momen lentur *tension control* pada sistem pelat konvensionalGambar 6. Hubungan pengaruh tebal pelat terhadap momen lentur *tension control* pada sistem *waffle slab*

Rekapitulasi penulangan pelat

Berdasarkan dari hasil analisis struktur *equivalent frame method* dan *finite element program* maka akan diperoleh momen yang kemudian digunakan untuk melakukan analisis penulangan pelat. Hasil rekapitulasi penulangan pada pelat dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Rekapitulasi penulangan pelat

PELAT KONVENSIONAL					WAFFLE SLAB				
Span Location (Arah X)		Momen (kNm)	Jarak (mm)	Tulangan	Span Location (Arah X)		Momen (kNm)	Jarak (mm)	Tulangan
End Span					End Span				
Column Strip	Exterior Negative	243.42	143.75	D13-150	Column Strip	Exterior Negative	39.3703	209.0909	D13-200
	Positive	466.699	73.0159	D13-70		Positive	705.3046		2D25/ribs (6 ribs)
Middle Strip	Interior Negative	854.016	77.9661	D19-75	Middle Strip	Interior Negative	1177.309	148.3871	D19-145
	Exterior Negative	0	0	0		Exterior Negative	0	0	
	Positive	284.672	124.324	D13-120		Positive	392.4364		2D19/ribs (5 ribs)
Interior Span					Interior Span				
Column Strip	Positive	228.937	153.333	D13-150	Column Strip	Positive	256.9075		2D19/ribs (6 ribs)
Middle Strip	Positive	152.624	184	D13-180	Middle Strip	Positive	171.2717		2D19/ribs (5 ribs)

Tabel 5. Rekapitulasi penulangan pelat (Lanjutan)

Span Location (Arah Y)		Momen (kNm)	Jarak	Tulangan	Span Location (Arah Y)		Momen (kNm)	Jarak	Tulangan
End Span					End Span				
Column Strip	Exterior Negative	368.072	93.8776	D13-90	Column Strip	Exterior Negative	203.0665	209.0909	D13-200
	Positive	422.366	80.7018	D13-80		Positive	604.6069		2D25/ribs (6 ribs)
Middle Strip	Interior Negative	978.37	82.1429	D19-80	Middle Strip	Interior Negative	1440.98	121.0526	D19-145
	Exterior Negative	0	0	0		Exterior Negative	0	0	
	Positive	281.577	124.324	D13-120		Positive	403.0713		2D19/ribs (5 ribs)
Interior Span					Interior Span				
Column Strip	Positive	412.73	83.6364	D13-80	Column Strip	Positive	602.5102		2D19/ribs (6 ribs)
	Positive	275.154	184	D13-180		Positive	401.6735		2D19/ribs (5 ribs)

Rekapitulasi volume beton dan tulangan baja

Berdasarkan hasil analisis penulangan pelat, maka dapat diperoleh volume beton, volume tulangan baja dan berat tulangan baja untuk masing-masing sistem pelat. Hasil analisis volume beton, volume tulangan baja, dan berat tulangan baja dapat dilihat pada Tabel 6.

Hasil analisis untuk jarak antar kolom yang sama yaitu 9,2 m menunjukkan bahwa sistem pelat konvensional membutuhkan volume beton dan volume tulangan baja yang lebih besar dibandingkan dengan sistem *waffle slab*. Pada sistem pelat konvensional, volume beton yang dibutuhkan lebih boros 22,178 % dan volume tulangan baja yang dibutuhkan lebih boros 71,976 % dari sistem *waffle slab*.

Tabel 6. Rekapitulasi volume beton dan tulangan baja

Sistem Pelat Konvensional				Sistem Waffle Slab			
Keterangan	Volume Beton (m ³)	Volume Tulangan Baja (m ³)	Berat Tulangan Baja (kg)	Keterangan	Volume Beton (m ³)	Volume Tulangan Baja (m ³)	Berat Tulangan Baja (kg)
Pelat dengan Tebal 200 mm	101.5680	-		Pelat dengan Tebal 80 mm	83.1312	-	
D13		1.4702	11541.4549	D13		0.1343	1054.4519
D19		0.7538	5917.6927	D19		0.9286	7289.6146
				D25		0.2303	1807.9964
TOTAL	101.5680	2.2241	17459.1476	TOTAL	83.1312	1.2933	10152.0628

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal yaitu:

1. Dengan bentang jarak antar kolom yang sama, lendutan pada sistem pelat konvensional lebih besar dibandingkan dengan sistem *waffle slab*. Bila di rata-rata, terdapat perbedaan nilai lendutan sekitar 130 %.
2. Jarak antar kolom maksimum pada sistem pelat konvensional adalah 9,2 m, sedangkan pada sistem *waffle slab* adalah 12,5 m, maka jarak antar kolom pada sistem *waffle slab* lebih panjang 35 % dibandingkan dengan sistem pelat konvensional.
3. Untuk jarak antar kolom yang sama yaitu 9,2 m dan memenuhi syarat dari segi kekakuan dan segi kekuatan, tebal pelat pada sistem pelat konvensional adalah 200 mm dan tebal pelat pada sistem *waffle slab* adalah 80 mm, maka sistem *waffle slab* memiliki tebal pelat lebih tipis 150 % dari sistem pelat konvensional.
4. Untuk jarak antar kolom yang sama, volume beton pada sistem pelat konvensional sebesar 101,568 m³, sedangkan volume beton pada sistem *waffle slab* sebesar 83,1312 m³, maka volume beton pada sistem pelat konvensional lebih boros 22,178 % dari sistem *waffle slab*.
5. Untuk jarak antar kolom yang sama, volume tulangan baja pada sistem pelat konvensional sebesar 2,2241 m³, sedangkan volume tulangan baja pada sistem *waffle slab* sebesar 1,2933 m³, maka volume tulangan baja pada sistem pelat konvensional lebih boros 71,976 % dari sistem *waffle slab*.

Saran

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan, maka saran yang dapat diberikan penulis yaitu:

1. Untuk penelitian selanjutnya, dapat dilakukan analisis dengan adanya pengaruh dari beban gempa yang tidak diperhitungkan dalam studi penelitian ini.
2. Untuk penelitian selanjutnya, dapat dilakukan analisis gedung untuk melihat kajian efisiensi sistem *waffle slab* terhadap pelat konvensional sehingga lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- Idham, N. C. (2012). *Merancang Bnagunan Gedung Bertingkat Rendah*. Graha Ilmu, Yogyakarta
- Nasution, A. (2009). *Analisis dan Desain Struktur Beton Bertulang*. IYB, Bandung
- Park, R. and Gamble, W. L. (1980). *Reinforced Concrete Slab*. John Wiley and Sons, Canada
- Pillai, S. U., and Menon, D. (2003). *Reinforced Concrete Design*. Tata-McGraw Hill, New Delhi
- Puspantoro, B. (1993). *Teori dan Analisis Balok Grid*. Andi Offset, Yogyakarta
- SNI 2847:2013. 2013. *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Structure Point. (2017). "Two-way Joist (Waffle Slab) Concrete Floor System Analysis and Design". Tersedia di https://www.structure-point.org/publication/pdf/Two-Way-Joist-Concrete-Waffle-Slab-Floor-Design-Detailing_.pdf (26 Agustus 2018)
- Susanti, E., Youlanda, N. A., and Winaya, A. (2016). "Studi Perbandingan Pelat Berusuk Dua Arah (Waffle Slab) dan Pelat Konvensional". *Jurnal IPTEK*, 20(1), 25-36
- Wang, C. K., and Salmon, C. G. (1994). *Disain Beton Bertulang*. Erlangga, Jakarta
- Wight, J. K. (2016). *Reinforced Concrete Mechanics and Design*. Pearson, New Jersey