

**PERILAKU PELAT BETON BERTULANG
DENGAN PIPA PVC SEBAGAI PEMBENTUK RONGGA**

*“Behavior Hollow Concrete Reinforced Slab with Utilization
of PolivinyI Chloride Pipe as A Cavity”*

**WAHYU MAHENDRA TRIAS ATMADJA
P0800316015**



**PROGRAM DOKTOR TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2021**

LEMBAR PENGESAHAN DISERTASI

PERILAKU PELAT BETON BERONGGA DENGAN PIPA PVC
SEBAGAI PEMBENTUK RONGGA

Disusun dan diajukan oleh :

WAHYU MAHENDRA TRIAS ATMADJA
P0800316016

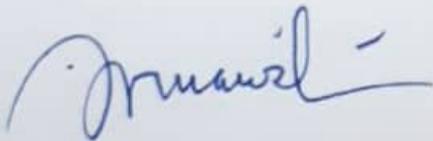
Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Doktor Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 9 Agustus 2021 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui

Promotor


Prof. Dr. Ing Herman Parung, M. Eng
NIP. 19620729 198703 1 001

Co. Promotor,



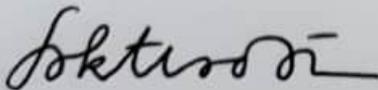
Dr. Eng. Hj. Rita Irmawaty, ST., MT
NIP. 19720619 200012 2 001

Co. Promotor,



Dr. Eng. Ir. A. Arwin Amiruddin, ST., MT
NIP. 19791226 200501 1 001

Ketua Program Studi Doktor,



Prof. Ir. Sakti Adji Adisasmitha, M. Eng. Sc., Ph.D
NIP. 19640422 199303 1 001

Dekan Fakultas Teknik,



Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Arsyad Thaha, MT
NIP. 1960123 1198609 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertandatangan di bawah ini ;

Nama : Wahyu Mahendra Trias Atmadja
NIM : P0800316015
Program Studi : Doktor Teknik Sipil
Jenjang : S3

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul :

Perilaku Pelat Beton Berongga dengan Pipa PVC sebagai Pembentuk Rongga

Behavior Hollow Concrete Reinforced Slab with Utilization of Polivinyll Chloride Pipe as a Cavity

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa disertasi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi disertasi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 9 Agustus 2021

Yang menyatakan



Wahyu Mahendra Trias Atmadja

ABSTRAK

WAHYU MAHENDRA TRIAS ATMADJA. *Perilaku Struktur Pelat Beton Bertulang dengan Pipa PVC sebagai Pembentuk Rongga* (dibimbing oleh Herman Parung, Rita Irmawaty dan Andi Arwin Amirudin).

Abstrak. Peningkatan kuat lentur pada pelat beton bertulang dapat dilakukan dengan menambah tebal efektif pelat (d). Namun penambahan ini akan membuat pelat menjadi lebih berat. Berat pelat dapat dikurangi dengan mengganti sejumlah beton pada daerah tarik dengan rongga tanpa mengurangi kuat lentur, dikarenakan sifat beton yang lemah terhadap kuat tarik. Penelitian dilakukan untuk mengetahui pengaruh rongga yang terbentuk dari pipa PVC yang telah dimodifikasi pada pelat beton bertulang terhadap kuat lentur, kuat geser, lendutan, kekakuan dan pola retaknya. Tiga benda uji terdiri dari pelat pejal dengan tebal 14 cm dan pelat berongga dengan tebal masing-masing 14 cm dan 15,9 cm. Semua pelat dibuat dengan ukuran skala penuh (275 cm x 180 cm) dengan sistem dua arah. Metode pembebanan adalah pembebanan merata yang dinaikkan secara bertahap hingga mencapai kapasitasnya. Sistem tumpuan benda uji semuanya adalah tumpuan sendi sepanjang sisi tepinya. Semua pelat terbuat dari beton cor ditempat dengan ukuran dan jarak tulangan yang sama. Pelat berongga terbuat dari pipa PVC yang telah dimodifikasi memiliki diameter 7,6 cm. Pelat berongga dengan tebal 14 cm memiliki tebal efektif yang sama dengan pelat solid namun volume betonnya 13,83 % lebih sedikit. Pelat berongga dengan tebal 15,9 cm memiliki volume beton yang sama dengan pelat solid namun tebal efektifnya lebih besar 11,9 % lebih besar. Dari hasil pengujian dengan menggunakan pelat pejal sebagai pembandingan didapatkan nilai kuat lentur ultimate pada pelat berongga tebal 14 cm sebesar 81,687 % dan pelat berongga tebal 15,9 cm sebesar 96,508%. Kekakuan pada pelat berongga tebal 14 cm sebesar 87,194 % dan pada pelat berongga tebal 15,9 cm sebesar 152,885 % terhadap pelat pejal. Daktalitas pelat berongga tebal 14 cm sebesar 112,586 % dan pada pelat berongga tebal 15,9 cm 93,520% dibandingkan terhadap pelat pejal. Sedangkan pola retak pada pelat pejal adalah retak lentur dan retak pada pelat berongga tebal 14 cm dan pelat berongga tebal 15,9 cm adalah kombinasi dari rusak lentur dan geser.

Kata Kunci : Pelat Berongga PVC, Kapasitas Lentur, Daktalitas, Kekakuan, Pola Retak dan Geser

ABSTRACT

WAHYU MAHENDRA TRIAS ATMADJA. *Behavior Hollow Concrete Reinforced Slab with Utilization of Polivinyll Chloride Pipe as a Cavity* (Guidance by **Herman Parung, Rita Irmawaty dan Andi Arwin Amirudin**).

Abstrak. The improvement of flexural strength in reinforced concrete slab can be done by increasing the effective thickness of slab (d). However, the addition of thickness will make slab heavier. The weight of slab can be reduced by reducing volume of concrete in tension area in the form of spherical void without reducing flexural strength, because of the concrete's characteristic that weak in tension strength. The experiment was conducted to investigate the influence of spherical void in reinforced concrete slab to flexural strength, shear strength, deflection, stiffness and crack pattern. This experiment employed three specimens that consist of solid slab with 14 cm thickness and biaxial hollow slabs with 14 cm and 15,9 cm thickness respectively. All models were full-scale slabs (275 cm length x 170 cm width) with two-way direction. The loading method was uniform load that increased gradual until it reach their capacity. All models support system were simply supported around the edges. All models were made of in-situ concrete with identical bar size and spacing pattern. The spherical voids in biaxial hollow slabs were made by pvc with 7.6 cm diameter. Biaxial hollow slab with 14 cm thickness had equal effective height with solid slab but 13, 83 % less volume of concrete. Biaxial hollow slab with 15,9 cm thickness had equal volume of concrete with solid slab but 11,9 % greater effective thickness. The test results showed that the ultimate flexural strength value on Hollow Concrete Plate 14 cm was 81,687% and Hollow Concrete Plate 15,9 cm was 96,508% compared to solid plate as a control. The stiffness in Hollow Concrete Plate 14 cm was 87,194% and on Hollow Concrete Plate 15,9 cm was 146,696% with Solid Plate as a control. The ductility of Hollow Concrete Plate 14 cm was 101,054% and that of Hollow Concrete Plate 15,9 cm was 93,520 % if compared with Solid Plate, while the crack pattern on Solid Plate were flexural crack and in Hollow Concrete Plate 14 cm and Hollow Concrete Plate 15,9 cm a combination of flexural and shear crack.

Keywords : Hollow Reinforce Concrete PVC, Flexural Capacity, Ductility, Stiffness, Crack Pattern and Shear.

DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN DESERTASI	iii
PRAKATA	iv
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiv
BAB I. PENDAHULUAN	
A. Latar Belakang Permasalahan.....	1
B. Perumusan Masalah.....	5
C. Tujuan Penelitian.....	5
D. Batasan Masalah.....	6
E. Manfaat Penelitian.....	7
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	
A. Pelat Beton Bertulang.....	8
1. Pelat Satu Arah.....	8
2. Pelat Rusuk (<i>Joist Construction</i>).....	9
3. Pelat Dua Arah.....	9
B. Pelat Beton Bertulang Non Masif.....	14

1. <i>Half Slaf</i> Keramik Komposit Beton.....	14
2. Pelat Berlubang Menerus (<i>Hollow Core Slab</i>).....	17
C. Pelat Beton Bertulang Berongga Bola.....	23
1. Kuat Lentur.....	25
2. Kuat Geser.....	26
3. Lendutan.....	29
4. Pola Retak.....	30
D. Distribusi Tegangan dan Regangan pada Penampang Pelat Solid.....	32
E. Metode Analisis Kekuatan Lentur Pelat Dua Arah.....	33
1. Metode Koefisien Momen.....	33
2. Metode Perencanaan Langsung.....	35
3. Metode Navier.....	36
F. Lendutan.....	39
G. Kekakuan.....	40
H. Daktilitas.....	40
I. Pola Retak pada Pelat Beton Bertulang.....	42
J. Gaya Geser pada Pelat.....	43
K. Kerangka Konseptual.....	45
L. Hipotesis.....	47
M. Definisi Operasional.....	47

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

A. Tahapan Penelitian.....	49
B. Lokasi dan Waktu Penelitian.....	51
C. Alat dan Bahan Penelitian.....	51

1. Alat Ukur Regangan Baja Tulangan.....	51
2. Alat Ukur Regangan Beton.....	51
3. Alat Ukur Lendutan.....	52
4. Alat Uji Pembebanan.....	53
5. Alat Pengujian Benda Uji.....	53
D. Variabel Penelitian.....	54
E. Prosedur Penelitian.....	56
1. Persiapan dan Perancangan Benda Uji.....	56
2. Pembuatan Benda Uji.....	57
3. Setting Alat Pengujian dan Pengujian Benda Uji.....	62
4. Analisis Data Hasil Pengujian dan Analisis Berdasarkan Teori.....	64
5. Perbandingan Hasil Pengujian dan Analisis Berdasarkan Teori.....	64

BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

A. Komposisi Mix Design.....	66
1. Karakteristik Agregat.....	66
2. Komposisi Beton.....	66
B. Hasil Pengujian Material.....	67
1. Pengujian Kuat Tarik Baja.....	67
2. Pengujian Kuat Tekan Beton.....	67
3. Pengujian Kuat Lentur Beton.....	68
4. Modulus Elastisitas.....	68
C. Analisa dan Pembasan Pengujian Pelat.....	69
1. Berat Sendiri Pelat.....	69

2. Uji Kuat Lentur Pelat.....	72
3. Kondisi Batas Layan	82
4. Kekakuan.....	88
5. Pola Retak.....	89
6. Daktalitas.....	92
7. Gaya Geser Pelat.....	93
D. Kebaharuan/Novelty.....	98
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
A. Kesimpulan.....	100
B. Saran.....	101

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1 Jenis-Jenis Pelat	11
Gambar 2 Gaya-Gaya Dalam pada Berbagai Jenis Pelat.....	12
Gambar 3 Penampang Pelat Keramik Beton.....	15
Gambar 4 Keraton yang Sudah Dirangkai Sebagai Bagian Bawah Half Plate.....	15
Gambar 5 Pelat Keraton Setelah <i>Topping</i> Beton	15
Gambar 6 Sketsa Pelat Keraton yang Menumpu pada Balok.....	16
Gambar 7 Grafik Penggunaan Keraton	16
Gambar 8 Hollow Core Slab	18
Gambar 9 Spesifikasi <i>Hollow Core Slab</i>	19
Gambar 10 Perilaku Pelat <i>HCS</i> Akibat Lentur.....	20
Gambar 11 <i>Workshop</i> Produksi Pelat <i>Precast HCS</i>	22
Gambar 12 Konstruksi Gedung dengan Pelat <i>HCS</i>	22
Gambar 13 <i>Bubble Deck</i>	23
Gambar 14 <i>Bubble Deck</i>	24
Gambar 15 Aliran Gaya pada Pelat Beton Bertulang Berongga Bola	24
Gambar 16 Aliran Gaya 3D pada Pelat Beton Bertulang Berongga Bola.....	24
Gambar 17 Perilaku Struktur Pelat Beton Bertulang Berongga Bola.....	25
Gambar 18 Jarak Antar Bola (Aldejohann dan Schellenbach,2003)	26
Gambar 19 Grafik Kapasitas Geser Pelat Beton Bertulang Berongga Bola.....	29
Gambar 20 Grafik Rasio Lendutan Pelat Beton Bertulang Berongga Bola (CB) terhadap Pelat Solid Beton (MD)	30
Gambar 21 Pola Retak Benda Uji Seri 1 (Aldejohann dan Schellenbach,2003)	30
Gambar 22 Pola Retak Benda Uji Seri 2 (Aldejohann dan Schellenbach,2003)	31
Gambar 23 Retak pada Pelat MD 450-V1	31
Gambar 24 Retak pada Pelat BD 450-V3.....	31
Gambar 25 Distribusi Tegangan dan Regangan pada Penampang Pelat Solid	32
Gambar 26 Distribusi Tegangan dan Regangan pada Penampang Pelat Berongga	33
Gambar 27 Denah Pelat dengan Tumpuan Sendi Sepanjang Sisinya	36

Gambar 28	Kurva Beban Terhadap Lendutan.....	40
Gambar 29	Grafik Daktilitas (Paulay and Priestley,1992).....	41
Gambar 30	Pola Retak Pelat Segiempat Akibat Beban Merata dengan Tumpuan Sepanjang Keempat Sisi Tepinya (Park and Gamble,1980)	43
Gambar 31	Geser pada Pelat Akibat Beban Area.....	44
Gambar 32	Bagan Alir Penelitian.....	50
Gambar 33	<i>Strain Gauge</i> Baja.....	51
Gambar 34	<i>Strain Gauge</i> Beton.....	52
Gambar 35	Penempatan Strain Gauge dan LVDT.....	52
Gambar 36	Desain Pelat Pejal (PB-1)	55
Gambar 37	Desain Pelat Berongga dengan Tebal 14 cm (PB-2).....	55
Gambar 38	Desain Pelat Berongga dengan Tebal 15,9 cm (PB-3).....	56
Gambar 39	Pemasangan Pipa <i>PVC</i> pada Tulangan.....	58
Gambar 40	<i>Strain Gauge</i> Terpasang pada Pelat.....	59
Gambar 41	Persiapan Pengerjaan Pengecoran.....	60
Gambar 42	<i>Slump Test</i>	60
Gambar 43	Pengecoran Pelat Benda Uji.....	61
Gambar 44	Perataan Permukaan Pelat Uji	61
Gambar 45	Hasil Akhir Pengecoran Benda Uji.....	62
Gambar 46	<i>Setting</i> Perletakan Sendi dan <i>Frame Load</i>	63
Gambar 47	Simulasi Pembebanan	64
Gambar 48	Hubungan Beban Terhadap Lendutan Tengah Bentang Pelat pada Kondisi Retak Awal	73
Gambar 49	Diagram Analitis dan Eksperimen Beban Retak Awal	75
Gambar 50	Diagram Analitis dan Eksperimen Beban Leleh	76
Gambar 51	Diagram Perbandingan Beban Maksimum dengan Metode Koefisien Momen	78
Gambar 52	Beban Regangan Beton Bentang Tengah pada PP-1,PB-2 dan PB-3	79
Gambar 53	Beban Regangan Tulangan Bentang Tengah pada PP-1 PB-2 dan PB-3	81
Gambar 54	Beban Terdistribusi Merata pada Tumpuan Sederhana	83
Gambar 55	Pola Retak Pelat PP-1	90
Gambar 56	Pola Retak Pelat PB-2	91
Gambar 57	Pola Retak Pelat PB-3	93
Gambar 58	Daktilitas Pelat Hasil Eksperimen.....	94

Gambar 59	Penampang Geser Pelat Berongga Bola	94
Gambar 60	Daerah Geser pada pelat Solid	95
Gambar 61	Geser pada pelat Berongga.....	98
Gambar 62	Diagram Perbandingan Kuat Geser Pelat Hasil Analisis dan Hasil Eksperimen	98

DAFTAR TABEL

Halaman

Tabel 1	Perbandingan Bubble Deck dengan Pelat beton Bertulang Solid.....	25
Tabel 2	Spesifikasi Benda Uji hasil Penelitian Aldejohann dan Schnellenbach.....	28
Tabel 3	Hasil Penelitian Aldejohann dan Schnellenbach Seri 1	28
Tabel 4	Hasil Penelitian Aldejohann dan Schnellenbach Seri 2	29
Tabel 5	Koefisien Momen untuk Pelat Persegi Akibat Beban Merata	34
Tabel 6	Lendutan Ijin Maksimum	39
Tabel 7	Detail Benda Uji Pelat	54
Tabel 8	Rekapitulasi Hasil Pengujian Karakteristik Agregat	64
Tabel 9	Komposisi Job Mix Formula Beton	65
Tabel 10	Hasil Pengujian Kuat Tarik Baja	67
Tabel 11	Kuat Lentur Beton Balok Normal	68
Tabel 12	Pengujian Modulus Elastisitas Beton Normal.....	71
Tabel 13	Berat Sendiri Pelat	73
Tabel 14	Klasifikasi Benda Uji.....	70
Tabel 15	Rekapitulasi Pengujian Pelat	74
Tabel 16	Beban Retak Awal Hasil Analisa dan Eksperimen.....	75
Tabel 17	Beban Leleh Hasil Analisa dan Eksperimen	76
Tabel 18	Beban Maksimum Eksperimen dan Analisis Metode Koefisien Momen	77
Tabel 19	Regangan Baja pada Saat Retak Awal, Leleh dan Ultimit.....	82
Tabel 20	Lendutan Ijin pada Tengah Bentang	83
Tabel 21	Lendutan Retak Awal Hasil Eksperimen dan Analisis.....	88
Tabel 22	Lebar Retak Ijin	88
Tabel 23	Kekakuan Pelat Hasil Eksperimen dan Analisis.....	89
Tabel 24	Daktalitas Pelat	93
Tabel 25	Kuat Geser hasil Ekperimen dan Analisis	97

BAB 1

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang Permasalahan

Kebutuhan biaya pembuatan pelat lantai beton bertulang pada bangunan bertingkat menjadi semakin tinggi, akibat harga material dan upah tukang yang semakin mahal. Hal ini mendorong munculnya berberbagai macam inovasi material dan teknologi baru pada pelat beton bertulang untuk mendapatkan pelat lantai yang lebih ringan, efisien dan ekonomis tetapi tetap dapat memikul dan mendukung beban yang bekerja serta tidak mengurangi kekakuan dan kekuatan pelat lantai selama usia pakai bangunan.

Pada tahun 1950, ditemukan pelat beton berongga memanjang yang dinamakan *hollow core slab*. Adanya lubang membuat pelat menjadi lebih ringan akan tetapi dengan adanya lubang membuat hollow core slab hanya berperilaku sebagai pelat satu arah. Hal lain yang menjadi kendala adalah dalam hal implementasi teknologi dan sistem pracetak ini di lapangan masih banyak ditemukan berbagai masalah. Salah satunya adalah penggunaan sistem pracetak ini masih belum tercapainya prinsip yang seharusnya, yaitu lebih mendatangkan manfaat lebih dalam hal penggunaan sistem ini dibanding dengan sistem tradisional.

Berbagai penelitian terus dikembangkan untuk menemukan pelat dua arah yang memiliki berat sendiri yang lebih ringan antara lain menempatkan material yang lebih ringan diantara tulangan atas dan tulangan bawah pelat seperti polystreofom. Metode tersebut tidak mendapatkan respon yang baik dalam dunia konstruksi dikarenakan rendahnya ketahanan terhadap gaya geser, *local punching* dan ketahanan terhadap api. Pada tahun 1990, Joergen Breuning

menemukan pelat beton dengan model tulangan fabrikasi dimana antara tulangan atas dan tulangan bawah terdapat bola berlubang yang kemudian dinamakan *Bubble Deck*. Pada umumnya daerah tekan yang terdapat pada penampang pelat sangat kecil dalam mencapai keseimbangan gaya tarik dan gaya tekan dalam penampang, sehingga rongga ditengah pelat beton tidak mengurangi kekuatan pelat dan dengan adanya rongga ditengah pelat beton tersebut dapat mengurangi volume beton dan berat sendiri struktur.

Pengembangan teknologi alternatif pelat beton berongga telah dilakukan oleh beberapa peneliti antara lain pada tahun 2005 Aldejohann and Schnellencbach melakukan penelitian *biaxial hollow slab* dimana kedua jenis pelat tersebut memiliki rongga pada beton di daerah tarik sehingga mengurangi berat sendiri. Aplikasi pelat beton berongga bola (*biaxial hollow slab*) masih sangat sedikit. Hal ini dikarenakan hasil penelitian maupun aturan yang membahas masalah ini terbatas. Pilihan ketebalan pelat jenis ini yang telah dipatenkan dan diteliti memiliki ketebalan minimum 23 cm dan banyak digunakan untuk struktur pelat datar (*flate plate*). Pembuatan pelat berongga pada umumnya dilakukan dengan sistem pracetak (*precast*) dengan mutu beton tinggi dan dilakukan di pabrik dengan teknologi yang sudah moderen, demikian pula dengan rongga di dalam pelat beton memanjang (*hollow core slab*) dibuat di pabrik dengan mesin khusus sedangkan lubang pada pelat beton berlubang bola (*biaxial hollow slab*) dibuat dengan cara menanam bola-bola plastik didalam beton yang juga sulit didapat dikarenakan untuk keperluan ini di Indonesia harganya masih sangat mahal

Pada tahun 2009 Kris Bayu Aji dalam penelitiannya yang berjudul perilaku lentur dan geser pelat beton berongga bola sistem dua arah menyatakan bahwa peningkatan kuat lentur pada pelat beton bertulang dapat dilakukan dengan

menambah tebal efektif pelat (d'). Namun penambahan ini akan membuat material pelat menjadi lebih berat. Berat pelat dapat dikurangi dengan mengganti sejumlah beton pada daerah tarik dengan rongga berbentuk bola tanpa mengurangi kuat lentur dikarenakan sifat beton yang lemah terhadap kuat tarik. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh rongga berbentuk bola terhadap kuat lentur, kuat geser, lendutan, kekakuan dan pola retak. Daktilitas pada pelat tidak diperhitungkan karena keterbatasan alat uji terhadap beban maksimum pelat.

Andry Soeharno pada tahun 2009 dalam penelitiannya yang berjudul Perilaku Lentur Pelat Sistem Satu Arah Beton Bertulang Berongga Bola juga melakukan penelitian pelat berongga bola dengan sistem cor di tempat (*cast in situ*). Pembebanan terhadap tiga benda uji dengan ukuran skala penuh dibebani dengan metoda *four point load* dengan tumpuan sederhana pada kedua ujung sisi pendek dan sisi lainnya sepenuhnya lepas.

Pada tahun 2013 La Ode Abdul Majid Muizu dan Dyah Widiastri Intansari melakukan penelitian pelat beton bertulang berongga satu arah dengan sistem cor di tempat (*cast in situ*) dengan rongga memanfaatkan botol bekas kemasan air minum. Pengujian dilakukan secara statik terpusat disepertiga bentang pada struktur balok balok sederhana (*simply supported*). Pada penelitian ini juga diamati terhadap beban berulang 20% dari beban retak awal dilakukan sebanyak 10 kali pembebanan. Rongga dibuat dengan menggunakan bekas kemasan air mineral ukuran 1,5 liter. Hasil kapasitas beban maksimum pelat berongga menghasilkan perbedaan yang signifikan jika dibandingkan dengan pelat solid dikarenakan botol plastik bekas kemasan air minum bersifat tidak kaku sehingga membuat botol berubah bentuk menjadi oval pada saat pengecoran yang selanjutnya menyebabkan daerah beton tekan menjadi lebih kecil dari semula.

Sebagaimana konsep pada penelitian terdahulu yang tersebut diatas pada penelitian ini saat terjadi keseimbangan gaya tarik dan gaya tekan, daerah tekan (*stress block*) pada pelat umumnya sangat kecil. Sehingga secara teoritis, apabila terdapat rongga ditengah penampang pelat tentunya tidak mempengaruhi kuat lentur karena daerah tekan berada diatas rongga sampai serat terluar. Adanya rongga yang terbentuk dari pipa PVC bertujuan untuk menghilangkan sejumlah volume beton yang tidak terlalu berpengaruh terhadap kuat lentur pelat beton bertulang sehingga berat sendiri pelat menjadi lebih ringan dan diperoleh penghematan material beton.

Pada penelitian ini digunakan metode cor ditempat (*cast in-situ*) untuk mensimulasikan pembuatan beton dengan teknologi yang lebih terjangkau dengan memanfaatkan pipa *PVC* sebagai pembentuk rongga sehingga didapatkan desain pelat berongga dengan ketebalan yang lebih bervariasi. Pemilihan pipa *PVC* sebagai material pembentuk rongga dengan pertimbangan kemudahan ketersediaan material pipa *PVC* didaerah-daerah dan dari segi kekuatan pipa *PVC* dapat mereduksi perubahan bentuk lubang selama pelaksanaan pengecoran dan pematatan beton. Benda uji didesain untuk pelat sistem dua arah yang ditumpu dengan tumpuan sendi sepanjang keempat sisinya dengan simulasi pembebanan merata yang diharapkan menyerupai dengan pembebanan asli di lapangan. Sedangkan analisis kinerja pelat berongga untuk menghitung kuat lenturnya digunakan analisis koefisien momen, untuk menghitung lendutan menggunakan metode Navier dan Metode Ugural diamati juga daktilitas, kekakuan serta pola retaknya. Sedangkan untuk menghitung kuat gesernya digunakan metode sesuai SK-SNI 01-2847-2019 pasal 22.6.1.6 tentang perhitungan kemampuan pelat dua arah non prategang dalam menahan gaya geser.

B. Perumusan Masalah

Sebagaimana yang telah diuraikan dalam pendahuluan maka disertasi ini akan menganalisis penggunaan pipa *polivinyll chloride* sebagai pembentuk rongga pada pelat bertulang berongga. Berdasarkan identifikasi penelitian diatas maka dalam disertasi ini disusun rumusan masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana perilaku kapasitas lentur baik pada saat beban retak awal, beban leleh dan beban maksimum pada pelat beton bertulang berongga yang dibandingkan dengan pelat pejal.
2. Bagaimana kekakuan dan daktalitas pelat beton bertulang, berongga yang dibandingkan dengan pelat pejal.
3. Bagaimana pola retak yang terjadi pada pelat beton bertulang berongga yang dibandingkan dengan pelat pejal.
4. Bagaimana perilaku geser yang terjadi pada pelat beton bertulang, berongga yang dibandingkan dengan pelat pejal.

C. Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan kasus volume dan tebal beton pada pelat beton berongga sama dengan volume dan tebal beton pada pelat pejal. Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisis perilaku kapasitas lentur baik pada saat beban retak awal, beban leleh dan beban maksimum pada pelat beton bertulang berongga yang dibandingkan dengan pelat pejal.
2. Menganalisis kekakuan dan daktalitas pelat beton bertulang berongga yang dibandingkan dengan pelat pejal.
3. Menganalisis pola retak yang terjadi pada pelat beton bertulang berongga yang dibandingkan dengan pelat pejal.

4. Menganalisis dan mengevaluasi perilaku geser yang terjadi pada pelat beton bertulang berongga yang dibandingkan dengan pelat pejal.

D. Batasan Masalah

Mengingat luasnya permasalahan yang mungkin terjadi pada pengujian pelat ini, agar lebih terfokus maka batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Benda uji berupa pelat beton bertulang sistem dua arah dengan ukuran skala penuh (*full scale*) sebanyak tiga jenis dimana benda uji jenis pertama berupa pelat beton bertulang pejal sedangkan benda uji lainnya berupa pelat berongga dengan pembentuk rongga adalah *PVC*. Pelat beton berongga kedua memiliki tebal yang sama dengan pelat beton bertulang pejal sedangkan pelat beton berongga ketiga memiliki volume beton yang sama dengan pelat beton bertulang pejal.
2. Pola pembebanan berupa beban statik merata dengan tumpuan sendi pada keempat sisi tepi pelat.
3. Pembuatan benda uji pelat dengan cara cor ditempat (*cast in situ*).
4. Pengamatan hanya terbatas pada perilaku lentur, lendutan dan retak, sampai mencapai beban maksimum.
5. Analisis pembandingan hasil eksperimen menggunakan :
 - Metode koefisien momen untuk membandingkan kuat lentur pada kondisi beban maksimum.
 - Metode Navier dan Ugural untuk membandingkan lendutan pada kondisi awal retak.
 - Analisis geser pelat dua arah SNI 2847:2019 untuk membandingkan kuat geser pelat pada kondisi maksimum.

E. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah dengan adanya rongga yang dimodifikasi dari pipa *PVC* dapat diketahui penghematan dan keuntungan yang dapat diperoleh baik dari sisi penggunaan bahan beton maupun pengurangan berat sendiri struktur, sehingga jenis struktur pelat berongga dengan modifikasi pipa *PVC* sebagai pembentuk rongga dengan sistem cor di tempat dapat diaplikasikan penggunaannya di masyarakat umum karena tidak memerlukan penggunaan alat berat sebagaimana dalam proses penggunaan konstruksi pelat beton pracetak tetapi dengan menggunakan alat-alat yang sederhana.

Dengan harapan perilaku struktur pada pelat berongga *PVC* menghasilkan kekuatan lentur yang lebih baik daripada penelitian-penelitian yang dilakukan sebelumnya, penelitian lebih lanjut diharapkan mampu mengembangkan pelat berongga dua arah dengan pipa *PVC* sebagai pembentuk rongga menjadi industri manufaktur melalui fabrikasi komponen pelat pracetak bangunan dengan berbagai ukuran dan tentunya dengan proses evaluasi yang terus menerus terhadap efisiensi dan efektifitasnya terutama terhadap tujuan utama proyek yaitu tercapainya target waktu, mutu dan biaya.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

A. Pelat Beton Bertulang

Pelat merupakan struktur bidang (permukaan) yang lurus, (datar atau tidak melengkung) yang tebalnya jauh lebih kecil dibanding dengan dimensinya yang lain (Szilard,1974). Geometri suatu pelat bisa dibatasi oleh garis lurus atau garis lengkung. Ditinjau dari segi statika, kondisi tepi (*boundary condition*) pelat bisa bebas (*free*), bertumpuan sederhana (*simply supported*) dan jepit, termasuk tumpuan elastis dan jepit/pengekang (*restraint*) elastis, atau dalam beberapa hal bisa berupa tumpuan titik/terpusat. Beban statis atau dinamis yang dipikul oleh pelat umumnya tegak lurus permukaan pelat.

Pada umumnya struktur pelat beton dapat diklasifikasikan menjadi tiga kelompok (Setiawan,2016), yaitu :

1. Pelat Satu Arah

Jika sistem pelat hanya ditumpu di kedua sisinya, maka pelat tersebut akan melentur atau mengalami lendutan dalam arah tegak lurus dari sisi tumpuan. Beban akan didistribusikan oleh pelat dalam satu arah saja yaitu ke arah tumpuan. Pelat jenis ini disebut juga dengan pelat satu arah. Apabila pelat bertumpu di keempat sisinya, dan rasio bentang panjang terhadap bentang pendek lebih besar atau sama dengan 2, maka hampir 95 % beban akan dilimpahkan dalam arah bentang pendek, dan pelat akan menjadi sistem pelat satu arah. Sistem pelat satu arah cocok digunakan pada bentangan 3 – 6 meter, dengan beban hidup sebesar 2,5 – 5 KN/m².

2. Pelat Rusuk (*Joist Construction*)

Sistem pelat rusuk terdiri dari pelat beton dengan ketebalan 50 hingga 100 mm, yang ditopang oleh sejumlah rusuk dengan jarak beraturan. Rusuk mempunyai lebar minimum 100 mm dan mempunyai tinggi tidak lebih dari 3,5 kali lebar minimumnya. Rusuk biasanya bersisi miring dan disusun dalam jarak tertentu yang tidak melebihi 750 mm. Rusuk ditopang oleh balok induk utama yang langsung menumpu pada kolom. Jarak antar rusuk dapat dibentuk dengan bekisting kayu atau baja yang dapat dilepas, atau dapat juga digunakan pengisi permanen berupa lempung bakar atau ubin beton yang memiliki kuat tekan minimal sama dengan kuat tekan beton yang digunakan pada pelat rusuk. Sistem pelat rusuk cocok digunakan untuk struktur pelat dengan bentangan 6 meter sampai dengan 9 meter serta memikul beban hidup sebesar 3,5 – 5,5 KN/m².

3. Pelat Dua Arah

Apabila struktur pelat beton ditopang di keempat sisinya, dan rasio antara bentang panjang terhadap bentang pendeknya kurang dari 2, maka pelat tersebut dikategorikan sebagai sistem pelat dua arah. Sistem pelat dua arah sendiri dapat dibedakan menjadi beberapa jenis berikut :

a. Sistem balok-pelat dua arah.

Pada sistem struktur ini pelat beton ditumpu oleh balok di keempat sisinya. Beban dari pelat ditransfer ke keempat balok penumpu yang selanjutnya mentransfer bebannya ke kolom. Sistem pelat dua arah dengan balok ini dapat digunakan untuk bentangan 6 – 9 meter, dengan beban hidup sebesar 2,5 – 5,5 KN/m². Balok akan meningkatkan kekakuan pelat, sehingga lendutan yang terjadi akan relatif lebih kecil.

b. Sistem slab datar (*flat slab*)

Ini merupakan sistem struktur pelat beton dua arah yang tidak memiliki balok penumpu di masing-masing sisinya. Beban pelat ditransfer langsung ke kolom. Kolom cenderung akan menimbulkan kegagalan geser pada pelat, yang dapat dicegah dengan beberapa alternatif :

- Memberikan penebalan setempat pada pelat (*drop panel*) serta menyediakan kepala kolom (*column capital*).
- Menyediakan penebalan panel namun tanpa kepala kolom, panel di sekitar kolom harus cukup tebal untuk memikul terjadinya tegangan tarik diagonal yang muncul akibat geser pada pelat.
- Menggunakan kepala kolom tanpa ada penebalan panel, namun hal ini jarang diaplikasikan. Sistem *slab* datar dapat digunakan untuk bentangan 6-9 meter, dengan beban hidup sebesar 4-7 kN/m².

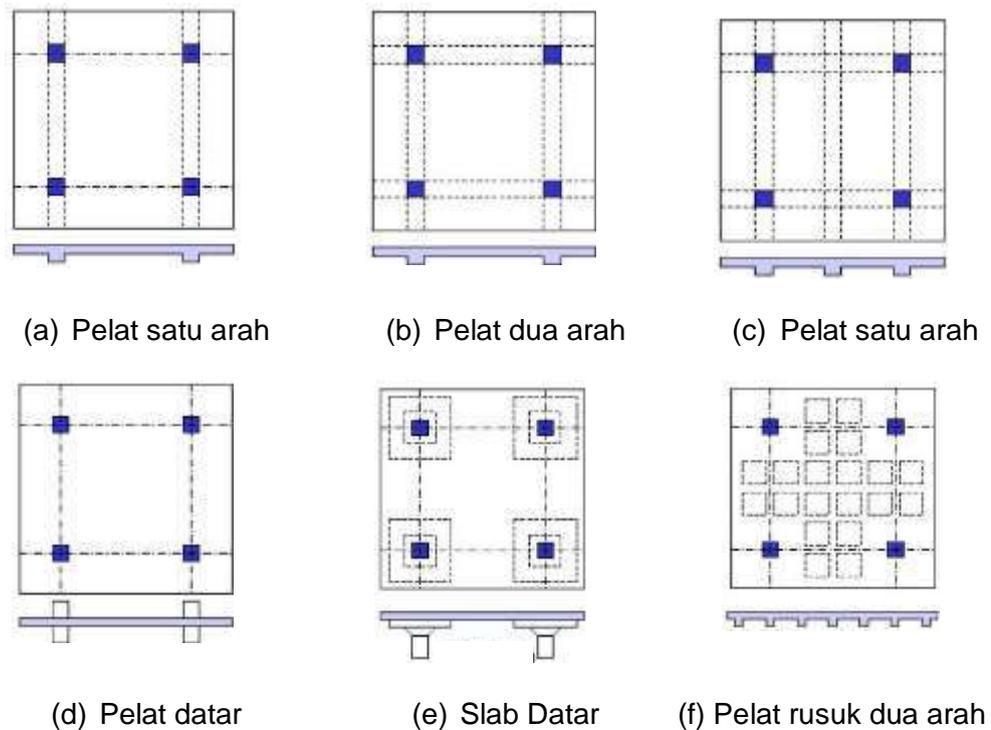
c. Sistem pelat datar (*flat plate*)

Sistem ini terdiri dari pelat yang tertumpu langsung ke kolom tanpa adanya penebalan panel dan kepala kolom. Potensi kegagalan struktur terbesar akan timbul akibat geser pada pelat, yang akan menghasilkan tegangan tarik diagonal. Sebagai akibat tidak adanya penebalan panel dan kepala kolom, maka dibutuhkan ketebalan pelat yang lebih besar atau dengan memberikan penulangan ekstra di area sekitar kolom. Sistem *slab* datar dapat digunakan untuk struktur pelat dengan bentangan 6-7,5 meter dan beban hidup sebesar 2,5-4,5 kN/m².

d. Pelat dua arah berusuk dan pelat *waffle*.

Ini merupakan sistem pelat dua arah dengan ketebalan pelat antara 50 mm hingga 100 mm yang ditumpu oleh rusuk rusuk dalam dua arah. Jarak antar rusuk berkisar antara 500 mm hingga 750 mm. Tepi-tepi pelat dapat

ditopang oleh balok, atau dapat juga pelat langsung menumpu pada kolom dengan memberikan penebalan pada pelat di sekitar kolom. Sistem pelat yang disebutkan terakhir sering disebut dengan istilah pelat *waffle*.



Gambar 1. Jenis Jenis Pelat

Aksi struktural suatu pelat lebih banyak dipengaruhi oleh ketebalannya dibandingkan dengan pengaruh ukuran lainnya. Secara umum berdasarkan aksi strukturalnya, pelat dibedakan menjadi empat kategori utama (Szilard,1974) pelat yaitu :

1. Pelat Kaku

Merupakan pelat tipis yang memiliki ketegaran lentur (*flexural rigid*), dan memikul beban dengan aksi 2 dimensi, terutama dengan momen dalam (lentur dan puntir) dan gaya geser transversal yang umumnya sama dengan balok. Pelat yang dimaksud dalam bidang teknik adalah pelat kaku, kecuali jika dinyatakan lain. Gaya gaya dalam yang bekerja dalam pelat kaku dapat dilihat pada gambar 2.(a)

2. Membran

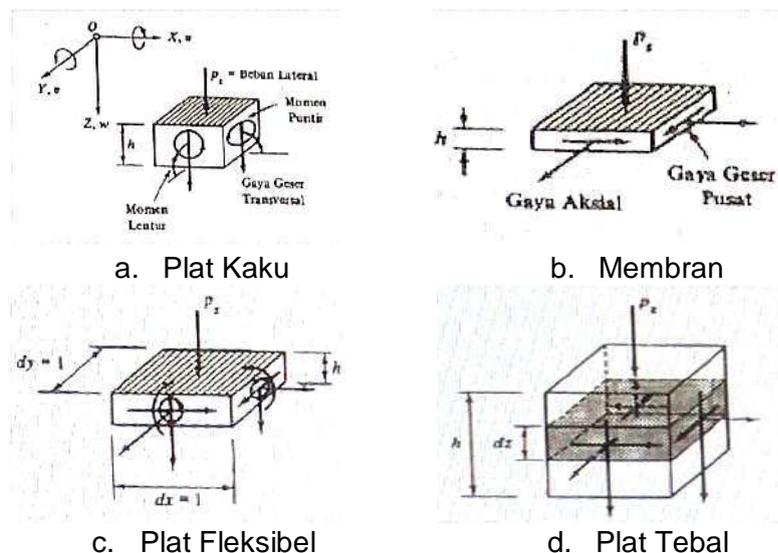
Merupakan pelat tipis tanpa kekakuan lentur dan memikul beban lateral hanya dengan gaya geser aksial dan gaya geser terpusat. Karena ketebalannya yang sangat tipis, kemampuan menahan momennya dapat diabaikan. Aksi pemikul beban seperti ini bisa didekati dengan jaringan kabel yang tegang. Gaya gaya dalam yang bekerja dalam membran dapat dilihat pada gambar 2.(b).

3. Pelat Tebal.

Merupakan pelat yang kondisi tegangan dalamnya menyerupai kondisi kontinu 3 dimensi. Gaya gaya dalam yang bekerja dalam pelat tebal dapat dilihat pada gambar 2.(d).

4. Pelat fleksibel.

Merupakan gabungan dari pelat kaku, membran dan memikul beban luar dengan gabungan aksi momen dalam, gaya geser aksial, gaya geser pusat, gaya geser *transversal*. Gaya gaya dalam yang bekerja dalam pelat fleksibel dapat dilihat pada Gambar 2.(c).



Gambar 2. Gaya – Gaya Dalam Pada Berbagai Jenis Pelat (Szilard, 1974)

Pada pelat kaku atau pelat tipis dengan lendutan yang lebih kecil dibanding dengan ketebalannya, dapat dikembangkan suatu teori pelat tipis (Sulistyo, 2000) dengan syarat dan asumsi sebagai berikut :

1. Beban tegak lurus terhadap bidang tengah atau momen.
2. Material bersifat *homogen, isotropic* dan *linear elastik*.
3. Berlaku asas Bernuolli sehingga dianggap tidak ada deformasi geser arah sumbu z ($\gamma_{xz} = 0$ dan $\gamma_{yz} = 0$).
4. Regangan dan tegangan pada sumbu z sangat kecil dibandingkan dengan sumbu x atau sumbu y sehingga dapat diabaikan.

Berdasarkan persyaratan dan asumsi tersebut, mengakibatkan semua titik yang terdapat pada bidang datar tegak lurus dengan bidang tengah pelat, dianggap mengalami perpindahan yang sama besar pada arah sumbu z. Selain itu berlaku hubungan linier untuk tegangan dan regangan bahan sebagai berikut ini :

$$\sigma_x = \frac{E}{(1-\nu^2)} (\epsilon_x + \nu \epsilon_y) \dots \dots \dots (1)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1-\nu^2)} (\epsilon_y + \nu \epsilon_x) \dots \dots \dots (2)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu^2)} \gamma_{xy} \dots \dots \dots (3)$$

Formula (1), (2) dan (3) diatas menunjukkan bahwa hubungan tegangan dan regangan bahan terbatas pada bidang x dan bidang y saja (dua dimensi).

Menurut Timoshenko dan Wolnowsky (1992), teori pelat tipis ini menganggap titik-titik yang semula terletak pada suatu garis normal terhadap permukaan tengah pelat setelah terjadi pelenturan. Asumsi ini mengabaikan pengaruh gaya - gaya geser pada lendutan pelat, pengaruh geser menjadi penting artinya. Timoshenko dan Wolnowsky (1992) juga menyatakan bahwa teori pendekatan dari pelat tipis tersebut ternyata tidak berlaku apabila beban-

beban terpusatnya besar sehingga teori pelat tebal harus diterapkan dengan memandang permasalahan pelat sebagai suatu masalah elastis tiga dimensi. Sebagai konsekuensinya, analisis tegangan menjadi lebih berperan pada permasalahan tersebut.

B. Pelat Beton Bertulang Non Masif

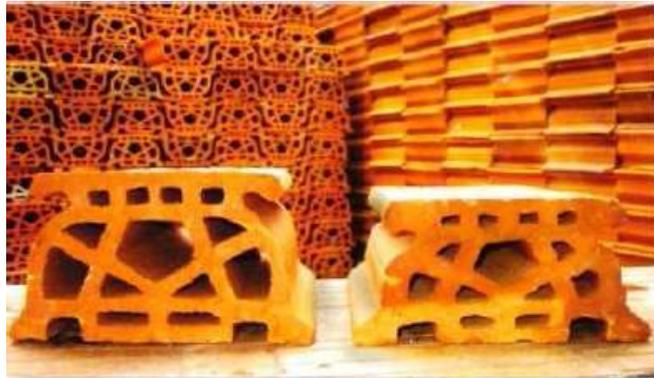
1. *Half Slab (HS)* Keramik Komposit Beton.

Keramik beton atau disingkat Keraton merupakan elemen pelat yang terbuat dari komposit keramik *segmental* dan *toping* beton. Bentuk dan bahan pembuat keraton menyerupai batu bata, tetapi bagian tengahnya berlubang-lubang.

Keberadaan lubang atau rongga dapat mengurangi berat Keraton dibanding beton masif konvensional. Keraton ini terbuat dari bahan dasar tanah liat yang dicetak dengan cetakan khusus. Keramik ini mempunyai rongga seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Terdapat dua tipe Keraton yaitu tipe CB 9 dengan tebal 9 cm hingga 10 cm dan tipe CB 12 dengan tebal 12 cm hingga 13 cm. Dimensi panjang 24 cm hingga 25 cm dan lebar 21 cm hingga 22 cm. Gambar 4 menunjukkan Keraton yang dirangkai memanjang dengan campuran semen pasir dan direkatkan dengan mortar sebagai bagian bawah *half slab*. Untuk memperkuat strukturnya, Keraton juga diberi tulangan baja yang diletakkan pada keempat sisinya, dengan diameter tulangan 6 mm untuk bagian atas dan diameter 8 mm untuk bagian bawahnya. Pemberian tulangan dilakukan untuk sistem penulangan searah karena hanya dikaitkan dengan dua balok yang berhadapan.

Segmen segmen Keraton yang telah dirangkai menjadi pelat kemudian di cor bagian atasnya dengan *toping* beton seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.

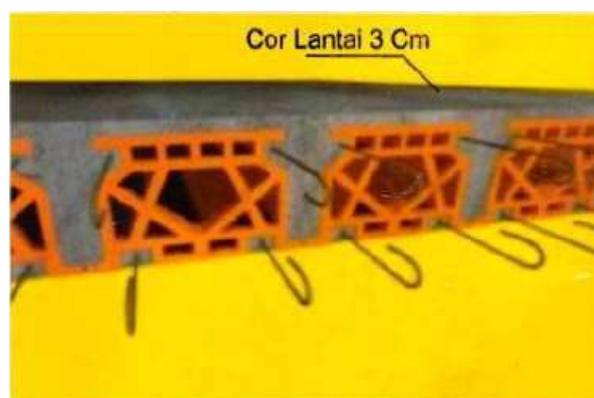
Gambar 6 menunjukkan Keraton yang telah tersusun sebagai pelat yang menumpu pada balok. Terlihat pula tulangan segmen Keraton yang mengikat pada rangkaian tulangan balok.



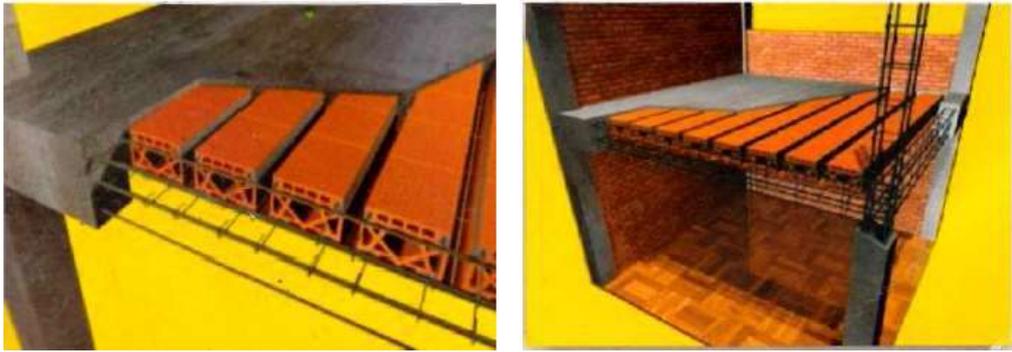
Gambar 3. Penampang Pelat Keramik Beton



Gambar 4. Keraton yang Sudah Dirangkai Sebagai Bagian Bawah *Half-Slab*

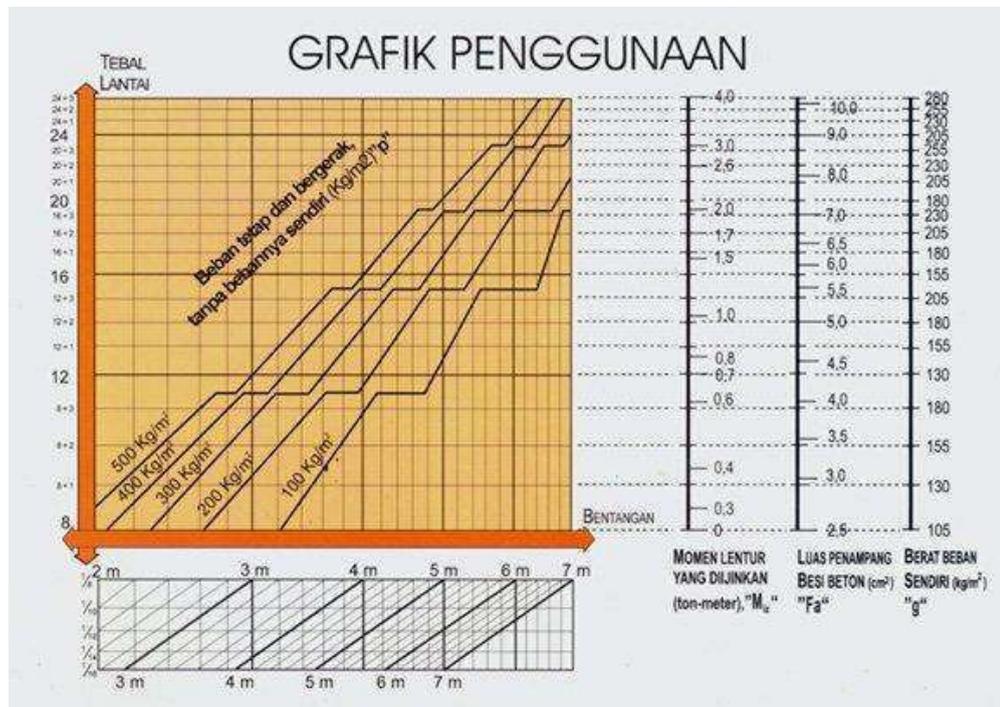


Gambar 5. Pelat Keraton Setelah *Toping* Beton



Gambar 6. Sketsa Pelat Keraton Yang Menumpu Pada Balok.

Riwayat pembebanan (*historical loading*) dari *specimen* Keraton ditunjukkan pada gambar 7 sebagai berikut:



Gambar 7. Grafik Penggunaan Keraton (www.duitemoro.com)

Keunggulan penggunaan Keraton antara lain :

1. Lebih murah daripada pelat beton biasa, dengan kekuatan setara.
2. Lebih ringan dengan bobot mati antara 180 kg/m² – 225 kg/m², sehingga

mengurangi beban bangunan secara keseluruhan.

3. Lebih cepat pemasangannya, dan tidak membutuhkan perancah.
4. Tidak memerlukan alat bantu seperti *crane*, sehingga dapat mengurangi biaya konstruksi.
5. Berfungsi sebagai peredam suara dan panas.
6. Bagian bawah dapat diperlakukan dengan diekspos sehingga memberikan dampak *visual natural* pada desain interior.

2. Pelat Berlubang Menerus (*Hollow Core Slab*)

Ide mengenai *Hollow Core Slabs (HCS)* berawal dari berawal dari teori elastis tegangan lentur, dimana diketahui bahwa tegangan maksimum ditahan oleh sisi terluar penampang, sedangkan bagian tengah penampang hanya menahan sebagian kecil dari tegangannya. Pada saat kondisi *ultimate* tercapai, kapasitas momen antara *resultan* tegangan terjadi pada sisi tekan dan sisi tarik. Dengan demikian beton pada bagian tengah diasumsikan tidak menyumbangkan kekuatan lentur. Berdasarkan hal tersebut muncullah pemikiran untuk memberikan lubang pada bagian tengah beton dengan tujuan untuk mengurangi berat sendiri pelat tanpa mengurangi kekuatan lenturnya. Oleh karena itu pula konsep ini mulai diterapkan pada komponen struktur yang secara dominan menahan tegangan lenturnya. Dalam penelitiannya, Pajari (2005) melakukan validasi kuat geser pada badan (*web*) penampang *HCS* prategang terhadap persamaan yang terdapat dalam *Eurocode 2 (BS Code)*. Hasil eksperimen yang dilakukan menunjukkan bahwa perhitungan kapasitas geser dengan *Eurocode 2* dan “metode Yang,s” melebihi (*overestimate*) rerata nilai kapasitas geser dari seluruh jenis *slabs* yang di uji. Di antara keduanya, metode Yang memberikan hasil yang lebih baik untuk spesimen dalam penelitian ini. Di samping itu, dari

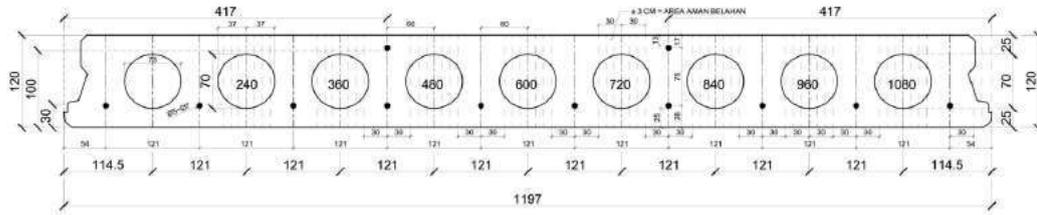
penelitian ini diketahui pula bahwa selisih antara hasil perhitungan dengan hasil eksperimen bervariasi menurut ketebalan dan bentuk lubangnya. Selisih yang lebih besar cenderung terjadi pada *slab* yang lebih tipis.



Gambar 8. *Hollow Core Slab.*

Hollow Core Slab memiliki berat sendiri yang lebih ringan sebesar 40-50% daripada pelat solid dengan dimensi yang sama. *Hollow Core Slab* diproduksi dengan ketebalan 150, 200, 240, 265, 320, 400 dan 500 mm sebagai produk standar. Lebar standarnya adalah 1200 mm, dan panjangnya dapat sampai 21 m tergantung kondisi pembebanan. Pelat dengan tebal dan lebar diluar ukuran standar dapat disediakan sesuai dengan perencanaan struktur. Spesifikasi dan potongan melintang *Hollow Core Slab* dapat dilihat pada gambar 9 sebagai berikut :

Penampang tebal 120 mm

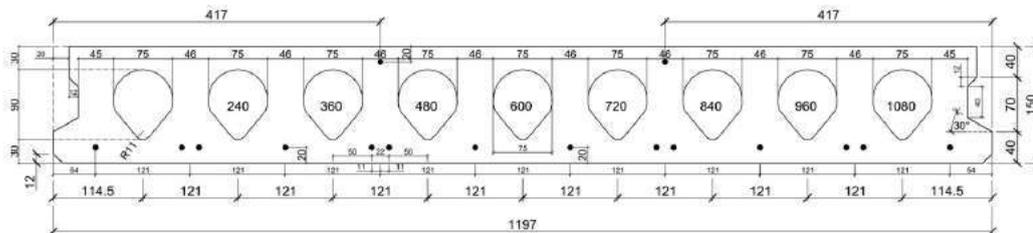


Spesifikasi dan tipe tebal 120 mm



Type	Area (cm ²)	Self Load (Kg/m ²)	Rongga
HCS 120	990,88	209	26%

Penampang tebal 150 mm

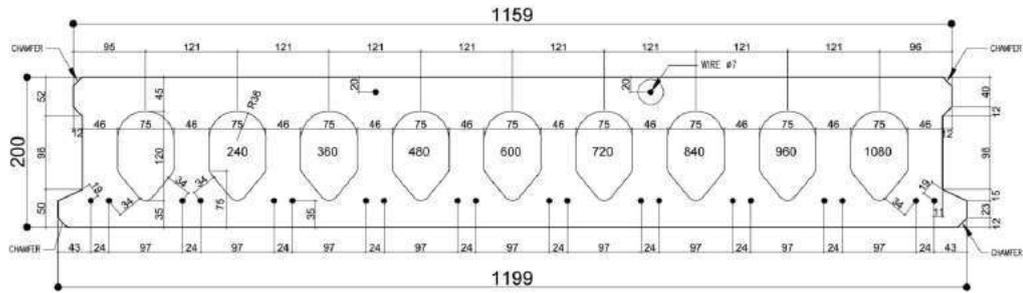


Spesifikasi dan tipe tebal 150 mm



Type	Area (cm ²)	Self Load (Kg/m ²)	Rongga
HCS 150	1.117,18	247	35,80%

Penampang tebal 200 mm

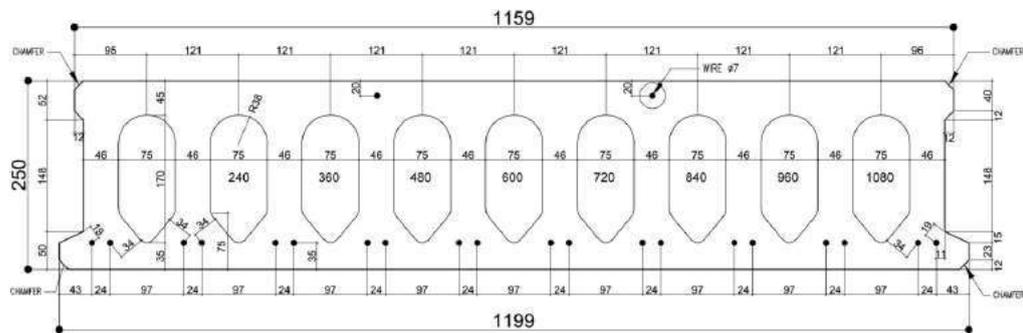


Spesifikasi dan tipe tebal 200 mm



Type	Area (cm ²)	Self Load (Kg/m ²)	Rongga
HCS 200	1.323,68	260	42,60%

Penampang tebal 250 mm



Spesifikasi dan tipe tebal 250 mm

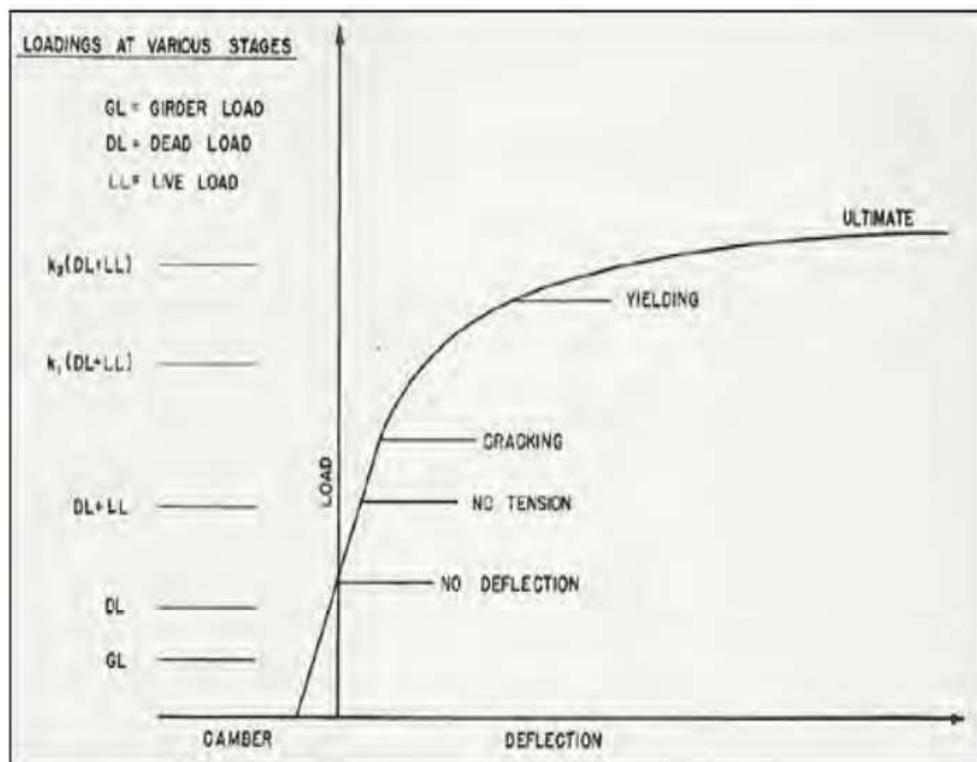


Type	Area (cm ²)	Self Load (Kg/m ²)	Rongga
HCS 250	1.530,18	306	46,70%

Gambar 9. Spesifikasi *Hollow Core Slab*

Secara umum perilaku *Hollow Core Slab* akibat lentur dibedakan menjadi 5 (Pajari,2005) yaitu :

1. Tidak berdefleksi (*no deflection*), jika kondisi tegangan persegi (merata) di setiap irisan penampang.
2. Tidak tarik (*no tension*), jika kondisi tegangan segitiga dengan tegangan nol pada tepi bawah penampang.
3. Retak (*cracking*), jika tegangan pada tepi bawah mencapai modulus retak bahan.
4. Leleh (*yeilding*), jika baja telah mencapai titik lelehnya.
5. *Ultimate*, yaitu menggambarkan kondisi saat runtuh.



Gambar 10. Perilaku Pelat HCS Akibat Lentur.

Keunggulan dari sistem pelat menerus (*HCS*)

- a. Diproduksi dengan mesin di pabrik, bentuk potongan memanjang sesuai dengan konstruksi yang akan dibuat dan disimpan berdasarkan jadwal konstruksi sehingga siap untuk dikirim ke proyek.



Gambar 11. *Workshop* Produksi Pelat *Precast HCS*

- b. Kecepatan pemasangan , karena pelat telah diproduksi dalam bentuk *precast* sehingga mengurangi waktu konstruksi.



Gambar 12. Konstruksi Gedung Dengan Pelat *HCS*

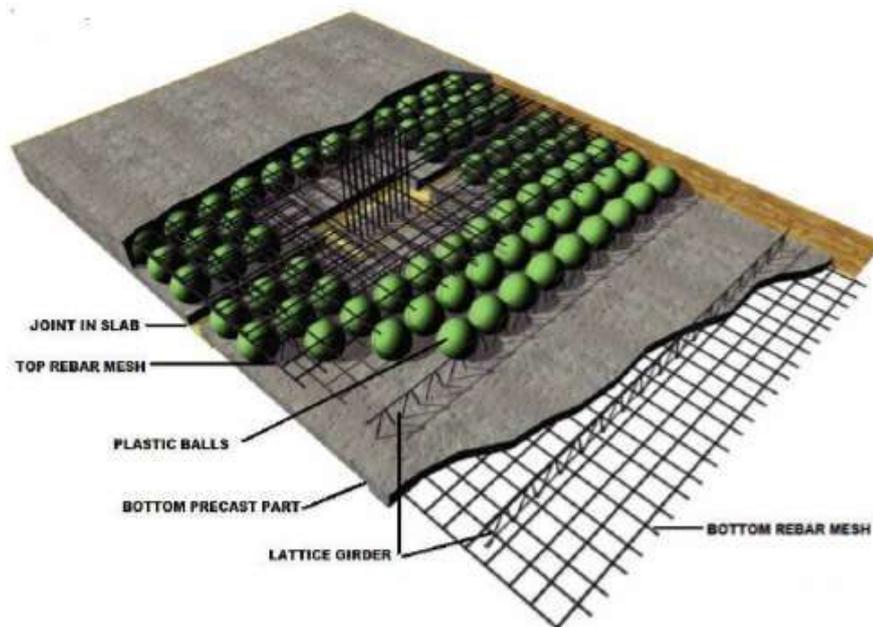
- c. Mengurangi perancah atau penyangga, sistem pelat *HCS* tidak memerlukan banyak penyangga selama konstruksi berlangsung.
- d. Efisien dan penampang ringan, lubang pada pelat *Hollow Core Slab* akibat prategang akan mengurangi beban mati dan berat sendiri tanpa

mengurangi kekuatannya. Ketebalan dari pelat dan pola kabel *wire* dapat divariasikan pada harga minimum yang cocok untuk bentang dan bebannya.

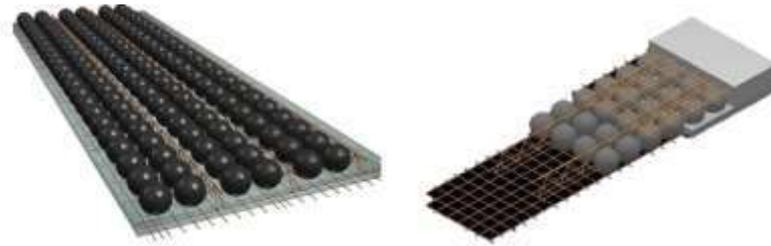
- e. Bentang panjang, pelat *Hollow Core Slab* dapat dibuat untuk bentang panjang.

C. Pelat Beton Bertulang Berongga Bola

Keterbatasan *Hollow Core Slab* sebagai pelat satu arah memacu berbagai penelitian untuk menemukan pelat beton bertulang yang ringan dan dapat berperilaku sebagai pelat dua arah. Pada tahun 1990-an, Joergen Breuning menemukan pelat beton berongga bola yang dinamakan *Bubble Deck*. Penulangan pelat beton tersebut terdiri dari model tulangan pabrikan dimana antara tulangan atas dan bawah menjepit bola berlubang (*CUR-Recommendation 86/2001*).

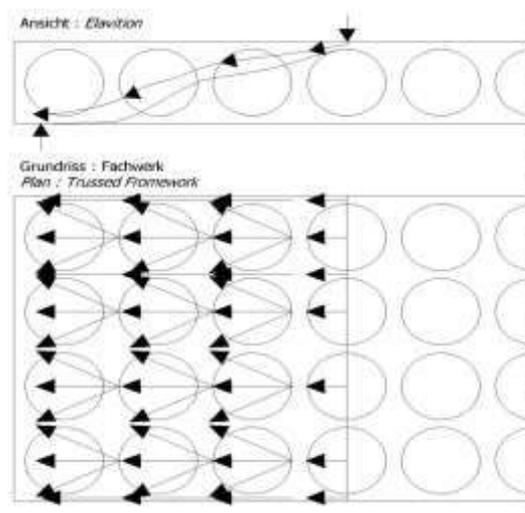


Gambar 13. *Bubble Deck* (Aldejohann dan Schnellenbach, 2003)

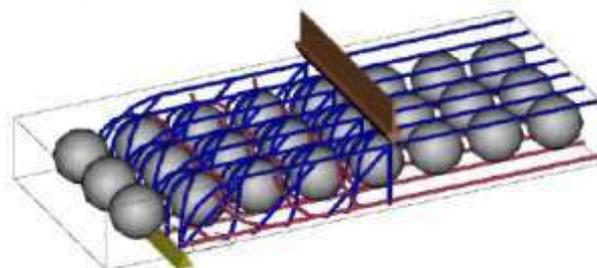


Gambar14. *Bubble Deck (Betonwerk + Fertigteil Technik, 10/2005)*

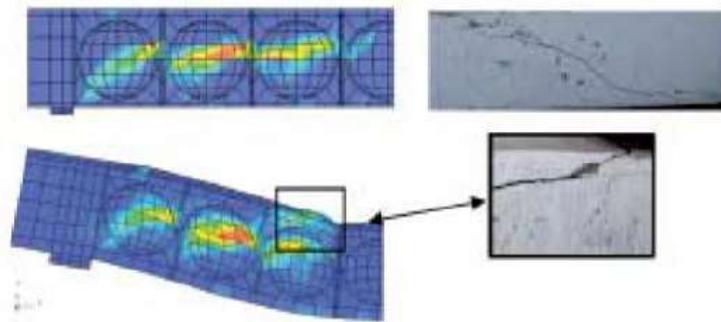
Pelat beton bertulang berongga bola dapat mendistribusikan gaya yang lebih baik dibandingkan *Hollow Core Slab*, dikarenakan bentuk tiga dimensi rongga dari struktur tersebut dapat menyebabkan aliran gaya bekerja lebih baik seperti yang terlihat dalam gambar 15 sampai gambar 17 sebagai berikut ini,



Gambar 15. Aliran Gaya pada Pelat Beton Bertulang Berongga Bola (Aldejohann dan Schnellenbach, 2002)



Gambar 16. Aliran Gaya 3D pada Pelat Beton Bertulang Berongga Bola (Aldejohann dan Schnellenbach, 2002)



Gambar 17. Perilaku Struktur Pelat Beton Bertulang Berongga Bola (Aldejohann dan Schnellenbach, 2002)

1. Kuat Lentur

Secara umum, pelat beton berongga bola memiliki perilaku yang sama dengan pelat beton solid. Dibandingkan karakteristik antara keduanya dapat dilihat pada Tabel 1 sebagai berikut :

Tabel 1. Perbandingan *Bubble Deck* dengan Pelat beton Bertulang Solid**

Perbandingan terhadap Pelat Beton Bertulang Solid (%)	<i>Bubble Deck</i> dengan Pelat Beton Bertulang Solid		
	Kekuatan	Kekakuan lentur	Volume Beton
	Sama	Sama	Sama
Kekuatan	100	105	150*
Kekakuan lentur	87	100	300
Volume Beton	66	69	100

* Dengan Kondisi jumlah tulangan yang sama

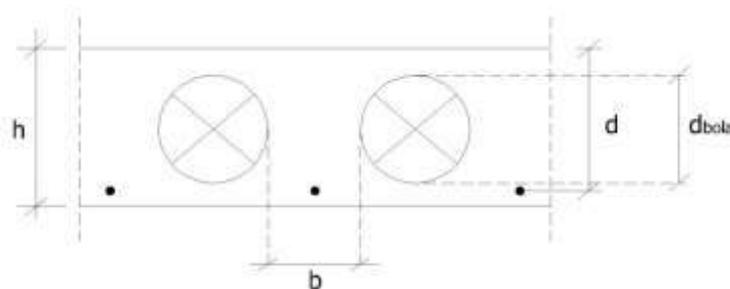
** “ *Bubble Deck Tesis and reports Summary* “ Issue 1 June 2006

Aldejohann dan Schnellenbach (2003) menyebutkan dengan ketebalan pelat dan rasio penulangan yang sama, retak awal lentur pada pelat beton berongga bola terjadi akibat beban 10 % lebih rendah di bandingkan pelat solid. Namun pada penelitian tersebut tidak terjadi kerusakan lentur. Sedangkan

menurut hasil tes yang dilakukan *Eindhoven University of Technology* dalam “*Bubble Deck Thesis and report Summary*” Issue I june 2006, perilaku pelat beton berongga bola dengan ketebalan 230 mm dan 455 mm sama dengan pelat solid dalam jangka waktu pendek maupun lama.

2. Kuat Geser

Perbedaan utama antara pelat beton berongga bola dengan pelat solid adalah ketahanan terhadap geser. Semakin berkurangnya volume beton akan mengurangi kuat geser. Aldejohann dan Schnellenbach (2003) menyatakan bahwa analisa kuat geser pelat berongga bola dalam DIN 1045-1, berdasarkan jarak antar bola seperti yang terlihat dalam gambar 18 sebagai berikut :



Gambar 18. Jarak Antar Bola (Aldejohann dan Schnellenbach, 2003)

Hal ini membuat kuat geser pelat hanya sebesar 10 % dari kuat geser pelat solid. Peraturan tersebut tidak menggambarkan kuat geser pelat berongga bola yang sesungguhnya. Sedangkan DIBt (*Deutsches Institut für Bautechnik*) menurut Aldejohann dan Schnellenbach, (2003), menyatakan bahwa kuat geser pelat berongga bola sebesar 35 % dari kuat geser pelat solid dengan pendekatan bentuk geometri dari pelat tersebut. Namun akhir-akhir ini berdasarkan perhitungan *finite element*, nilai kuat geser dapat lebih dari itu. Beberapa penelitian mengenai kuat geser pada pelat beton berongga bola yang

terangkum dalam "*Bubble Deck Tesis and report Summary*" Issue 1 June 2006, sebagai berikut.

- a) Penelitian kuat geser pelat beton bertulang berongga bola yang dilakukan Aldejohann dan Schnellenbach, (2003) terdiri dari dua seri dimana seri pertama memiliki ketebalan 450 mm dan seri kedua sebesar 250 mm. Setiap seri penelitian terdiri dari pelat beton bertulang solid (MD-VI), pelat beton bertulang berongga bola dengan sistem *cast in situ* (BD-VI) serta pelat beton bertulang berongga bola dengan sistem *pre-cast* pada tahap pertama dan *cast in situ* Pada tahap kedua (BD-V2 & BD-V3). Spesifikasi selengkapnya dari benda uji terdapat dalam tabel 2. Aldejohann dan Schnellenbach, menyebutkan bahwa kuat geser ultimit dari pelat beton bertulang berongga bola sebesar 55-64 % dari kuat geser ultimit pelat solid dengan ketebalan pelat dan rasio penulangan yang sama. Hasil penelitian selengkapnya dapat dilihat pada tabel 3 dan tabel 4.
- b) Menurut M.P. Nielsen dari *The Technical Univesity of Denmark*, kuat geser pelat beton berongga dengan tebal pelat 188 mm dan rasio a/d (jarak antara pusat beban ke tumpuan dibagi tebal pelat) 1,4 sebesar 81 % dibandingkan dengan pelat solid.
- c) Kleinmenn dari *The Eindhoven University of Technology* menyatakan kuat geser pelat beton berongga bola dengan tebal pelat 340 mm dan rasio s/d 2,15 sebesar 77 % dari kuat geser pelat solid.
- d) Sedangkan hasil test dari *The Technical University of Danmstadt*, kuat geser pelat beton berongga bola sebesar 72-78 % dari kuat geser pelat solid dengan rasio s/d 2,15.
- e) Berdasarkan hasil penelitian John Munk dan Tomas Moerk dari *The Engineering School in Horsens, Denmark*, pelat yang memiliki ketebalan 130

mm dan rasio s/d 2,3 memberikan kuat geser sebesar 76 % dibandingkan pelat solid.

- f) Menurut *Darmstadt Concrete (Annual Journal on Concrete and Concrete Structures)*, kapasitas geser dari pelat beton berongga bola yang memiliki ketebalan 230 mm dan 450 mm dengan berbagai nilai s/d dapat dilihat dalam grafik pada gambar 19 sebagai berikut :

Tabel 2. Spesifikasi Benda Uji hasil Penelitian Aldejohann dan Schnellenbach (Aldejohann dan Schnellenbach, 2003)

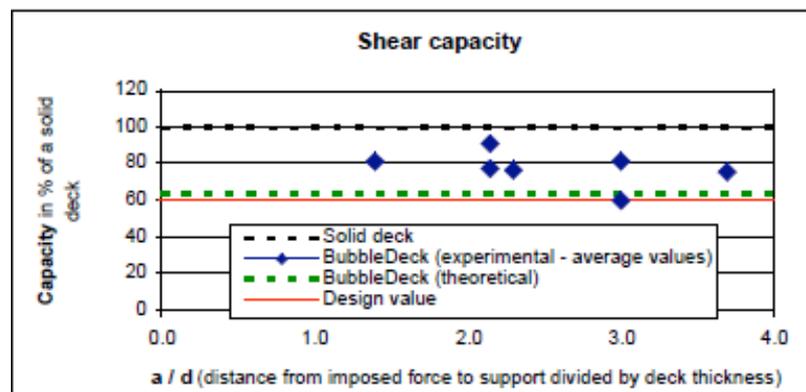
Specimen	HxBxL	b_{μ}	D_{BD}	d(mm)	F_{μ}	
Series 1	MD450-VI	450X1650X4800	-	-	1,70	395
	BD450-VI	450X1650X4800	40 mm	36 cm	1,70	395
	BD450-V2	450X1650X4800	40 mm	36 cm	1,70	395
	BD450-V3	450X1650X4800	40 mm	36 cm	1,70	395
Series 2	MD450-VI	250X820X2600	-	-	1,85	209
	BD450-V3	250X820X2600	20 mm	18 cm	1,85	209
	BD450-V3	250X820X2600	20 mm	18 cm	1,85	209
	BD450-V3	250X820X2600	20 mm	18 cm	1,85	209

Tabel 3. Hasil Penelitian Aldejohann dan Schnellenbach Seri 1 (Aldejohann dan Schnellenbach, 2005)

	MD 450 V-1	CB 450 V-1	CB 450 V-2	CB 450 V-3
Deflection W_{maks} (mm)	16.84	13.68	13.92	13.90
$V_{structure}$ (KN)	16.86	16.86	16.86	16.86
Crack load V_{cr} (KN)	654	340	328	316
Crack Load in % of MD	100%	52%	50%	48%
Failure load V_{ii} (kN)	654	367	359	416
MD failure load in % of MD	100%	56%	55%	64%

Tabel 4. Hasil Penelitian Aldejohann dan Schnellenbach Seri 2
(Aldejohann dan Schnellenbach, 2005)

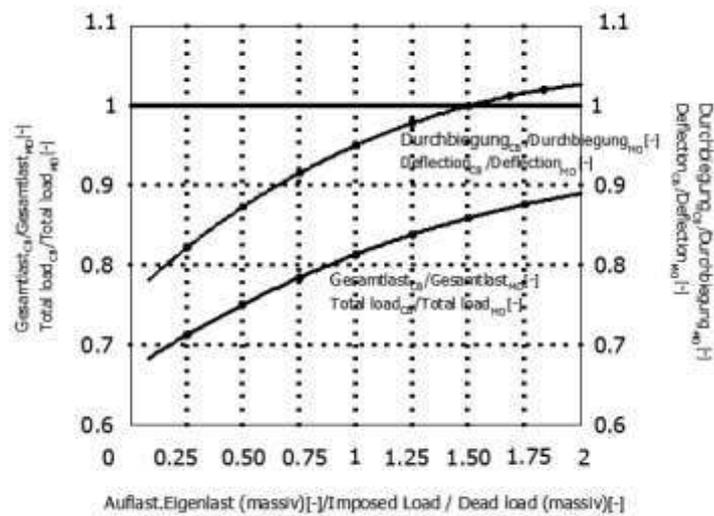
	MD 450 V-1	CB 450 V-1	CB 450 V-2	CB 450 V-3
Deflection W maks (mm)	15.64	11.68	10.40	10.68
$V_{structure}$ (KN)	6.47	6.47	6.47	6.47
Crack load V_{cr} (KN)	263	157	154	150
Crack Load in % of MD	100%	60%	60%	57%
Failure load V_{ii} (kN)	350	210	192	198
MD failure load in % of MD	100%	60%	55%	57%



Gambar 19. Grafik Kapasitas Geser Pelat Beton Bertulang Berongga Bola
(*"Bubble Deck Tesis and report Summary" Issue 1 June 2006*)

3. Lendutan

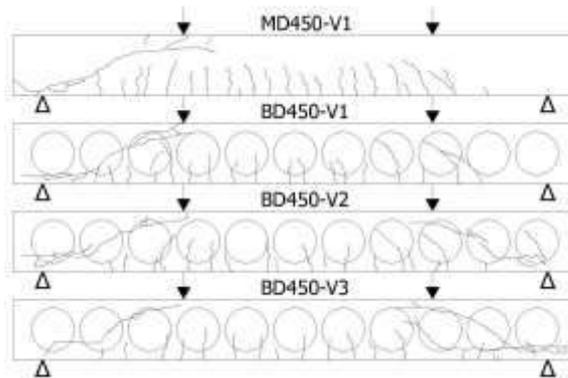
Berdasarkan grafik pada Gambar 20, lendutan pada pelat beton bertulang berongga bola lebih besar daripada pelat solid apabila ratio antara beban hidup terhadap beban mati sekitar 1,5 atau lebih. Dalam konstruksi bangunan gedung, rasio antara beban hidup terhadap beban mati biasanya lebih kecil dari 1,5 sehingga secara praktis dapat disimpulkan lendutan pelat beton bertulang berongga bola lebih kecil daripada pelat solid.



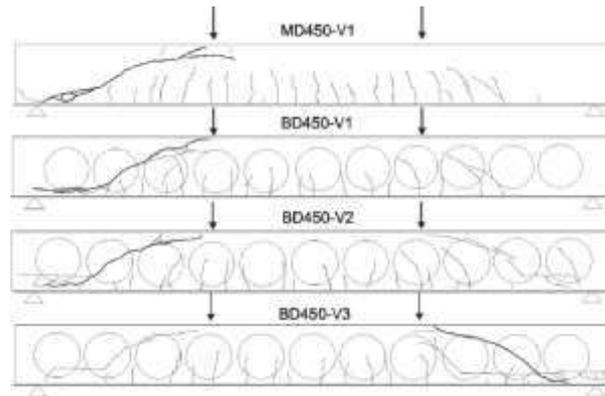
Gambar 20. Grafik Rasio Lendutan Pelat Beton Berongga Bola (CB) terhadap Pelat Beton Solid (MD) (Aldejohann dan Schnellenbach, 2005)

4. Pola Retak

Pola retak yang terjadi pada benda uji pelat hasil penelitian Aldejohann dan Schnellenbach, (2003), secara jelas dapat dilihat pada Gambar 21 dan Gambar 22. Pada pengujian seri pertama, tebal benda uji pelat sebesar 450 mm yang terdiri dari pelat beton solid (MD-VI), pelat beton berongga bola cast in-situ (BD-VI) dan dua buah pelat beton berongga bola precast dan cast in-situ (BD-V@ & BD-V3). Pengujian seri kedua sama seperti pengujian seri pertama hanya ketebalan pelat benda uji sebesar 250 mm.



Gambar 21. Pola Retak Benda Uji Seri 1 (Aldejohann dan Schnellenbach, 2003)



Gambar 22. Pola Retak Benda Uji Seri 2 (Aldejohann dan Schnellenbach, 2003)



Gambar 23. Retak pada Pelat MD 450-VI (Aldejohann dan Schnellenbach, 2003)



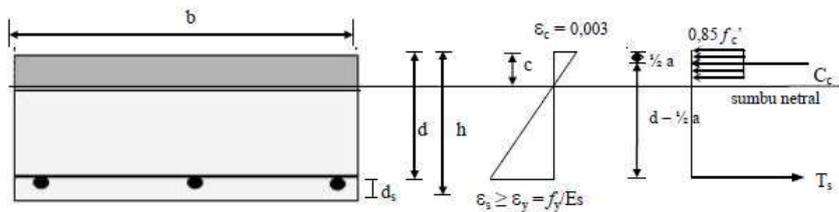
Gambar 24. Retak pada Pelat BD 450-V3 (Aldejohann dan Schnellenbach, 2003)

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Aldejohann dan Schnellenbach, pelat beton berongga bola memiliki pola retak yang serupa dengan pelat beton solid. Retak lentur terjadi setelah benda uji dibebani mulai dari tengah bentang menuju tumpuan dan didaerah geser, retak lentur agak

miring tidak seperti di bagian tengah bentang. Penambahan beban tidak menyebabkan retak baru hingga salah satu retak geser membentuk busur mulai dari tumpuan sampai titik pusat beban, yang kemudian diikuti oleh retak geser lainnya. Pada pelat beton berongga yang terbuat dari gabungan beton *precast* dan *in-situ* (V2 dan V3), terjadi retak pada sambungan beton *precast* dan *in-situ*. Hal ini terlihat jelas pada pelat BD 450-V3, dimana terjadi kerusakan geser pada sambungan betonnya seperti yang terlihat dalam Gambar 24.

D. Distribusi Tegangan dan Regangan pada Penampang Pelat Solid

Dengan memperlakukan pelat sama seperti layaknya balok pada bentang sederhana, momen memiliki nilai yang seragam bentang. Distribusi tegangan dan regangan pada penampang pelat solid dan pelat berongga dapat dilihat pada gambar 25 dan gambar 26. Dalam keadaan seimbang, gaya tekan beton (C_c) akan diimbangi oleh gaya tarik tulangan baja (T_s). Pada kondisi tulangan baja telah mengalami leleh ($f_s = f_y$), maka berlaku persamaan berikut ini,



Gambar 25. Distribusi Tegangan dan Regangan pada Penampang Pelat Solid.

$$C_c = T_s \dots\dots\dots (4)$$

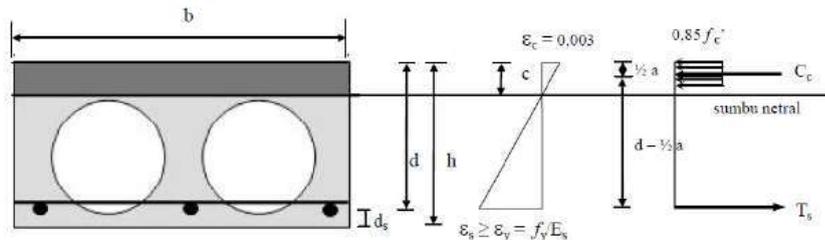
$$C_c = 0,85 \cdot f_c \cdot a \cdot b \dots\dots\dots (5)$$

$$T_s = A_s \cdot F_y \dots\dots\dots (6)$$

Apabila regangan baja (E_s) = 2.10^5 Mpa dan kuat tekan beton $f_c' \leq 30$ MPa maka,

$$M_n = T_s (d - \frac{1}{2} \cdot a) = C_c (d - \frac{1}{2} \cdot a) = 0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot a \cdot (d - \frac{1}{2} \cdot a) \quad (7)$$

$$M_u = M_n \cdot \theta ; \theta = 0,8$$



Gambar 26. Distribusi Tegangan dan Regangan pada Penampang Pelat Berongga Bola.

Pada umumnya, daerah tekan pada pelat sangat kecil untuk mencapai keseimbangan gaya tarik dan tekan. Sehingga, apabila daerah tekan pada pelat berongga bola berada diatas rongga bola maka adanya rongga bola tidak mengurangi kemampuan pelat dalam menahan lentur. Untuk meningkatkan kemampuan lentur, tebal pelat dapat ditambah dengan volume beton yang sebelumnya berada di rongga bola sehingga lengan momen lebih besar sebanding dengan meningkatnya momen nominal pelat.

E. Metode Analisis Kekuatan Lentur Pelat Dua Arah

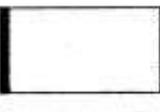
Dalam analisis kekuatan lentur pelat dua arah dapat digunakan beberapa metode antara lain adalah :

1. Metode Koefisien Momen.

Metode ini dalam menghitung momen arah bentang pendek (M_{lx}) dan momen arah bentang panjang (M_{ly}) pada pelat dua arah dengan menggunakan

koefisien momen. Metode ini dapat digunakan untuk berbagai macam jenis tumpuan dengan beban berupa beban merata. Koefisien momen untuk pelat persegi akibat beban terbagi rata dapat dilihat pada tabel 5 sebagai berikut :

Tabel 5. Koefisien Momen untuk Pelat Persegi Akibat Beban Merata

	Ly / Lx	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
	Mlx	44	52	59	66	73	78	84	88	93	97	100
	Mly	44	45	45	44	44	43	41	40	39	38	37
	Mlx	21	25	28	31	34	36	37	38	40	40	41
	Mly	21	21	20	19	18	17	16	14	13	12	12
	Mtx	52	59	64	69	73	76	79	81	82	83	83
	Mty	52	54	56	57	57	57	57	57	57	57	57
	Mlx	28	33	38	42	45	48	51	53	55	57	58
	Mly	28	28	28	27	26	25	23	23	22	21	19
	Mtx	68	77	85	92	98	103	107	111	113	116	118
	Mty	68	72	74	76	77	77	78	78	78	78	79
	Mlx	22	28	34	42	49	55	62	68	74	80	85
	Mly	32	35	37	39	40	41	41	41	41	40	39
	Mtx	70	79	87	94	100	105	109	112	115	117	119
	Mlx	32	34	36	38	39	40	41	41	42	42	42
	Mly	22	20	18	17	15	14	13	12	11	10	10
	Mtx	70	74	77	79	81	82	83	84	84	84	84
	Mlx	31	38	45	53	60	66	72	78	83	88	92
	Mly	37	39	41	41	42	42	41	41	40	39	38
	Mtx	84	92	99	104	109	112	115	117	119	121	122
	Mlx	37	41	45	48	51	53	55	56	58	59	60
	Mly	31	30	28	27	25	24	22	21	20	19	18
	Mtx	84	92	98	103	108	111	114	117	119	120	121
	Mlx	21	26	31	36	40	43	46	49	51	53	55
	Mly	26	27	28	28	27	26	25	23	22	21	21
	Mtx	55	65	74	82	89	94	99	103	106	110	114
	Mty	60	65	69	72	74	76	77	78	78	78	78
	Mlx	26	29	32	35	36	38	39	40	40	41	41
	Mly	21	20	19	18	17	15	14	13	12	12	11
	Mtx	60	66	71	74	77	79	80	82	83	83	83
	Mty	55	39	38	38	37	36	36	35	35	34	34

— terletak bebas
 terjepit penuh

Nilai koefisien momen pada tabel 5 diatas tergantung rasio antara panjang dan lebar pelat, serta tergantung jenis tumpuannya.

$$M_{lx} = 0,001 \cdot Cx \cdot w \cdot L_x^2 \dots\dots\dots (8)$$

M_{lx} = Momen arah bentang pendek pelat, kNm/m'

Cx = Koefisien momen untuk menghitung M_{lx} sesuai Tabel Koefisien Momen

W = beban per meter persegi yang ditahan pelat, kN/m²

L_x = panjang bentang pendek pelat.m.

2. Metode Perencanaan Langsung.

Metode perencanaan langsung adalah metode berdasarkan SNI 2847:2019.

Pasal 10.2, cara perencanaan langsung memiliki batasan sebagai berikut :

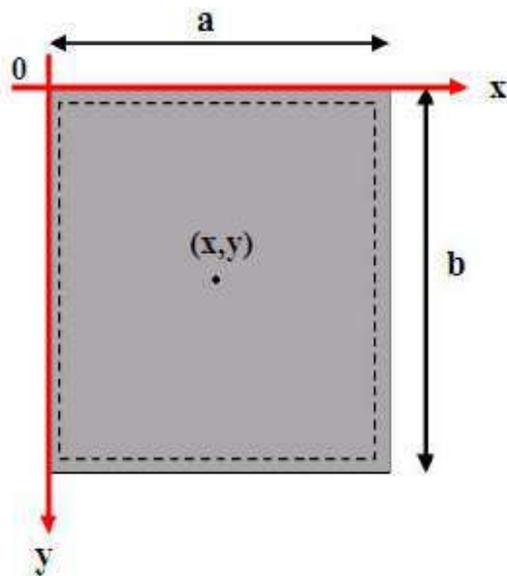
- a. Minimum harus ada tiga bentang menerus dalam masing masing arah.
- b. Panel pelat harus berbentuk persegi dengan rasio anatar bentang yang lebih panjang terhadap yang lebih pendek pusat ke pusat tumpuan dalam panel tidak lebih besar daripada 2.
- c. Panjang bentang yang berturutan pusat ke pusat tumpuan dalam masing-masing arah tidak boleh berbeda dengan lebih dari sepertiga bentang yang lebih panjang.
- d. Pergeseran (*offset*) kolom dengan maksimum sebesar 10 persen dari bentangnya (dalam arah pergeseran) dari baik sumbu antara garis-garis pusat kolom yang berturutan diizinkan.
- e. Semua beban harus akibat gravitasi saja dan didistribusikan merata pada panel keseluruhan. Beban hidup tak terfaktor tidak boleh melebihi dua kali beban mati tak terfaktor.
- f. Untuk panel dengan balok diantara tumpuan pada semua sisinya harus dipenuhi persamaan untuk balok dalam dua arah tegak lurus.

$$0,2 \leq \frac{\alpha_{f1} \cdot l_2^2}{\alpha_{f2} \cdot l_1^2} \leq 5,0$$

Dimana α_{f1} dan α_{f2} dihitung sesuai dengan persamaan $\alpha_f = \frac{E_{cb} \cdot I_b}{E_{cs} \cdot I_s}$

3. Metode Navier.

Pada tahun 1820, Navier mengemukakan makalahnya pada *French Academy of Sciences* mengenai pelat segiempat bertumpuan sederhana yang mengalami lentur dengan deret trigonometris ganda. Penyelesaian Navier kadang kadang disebut penyelesaian persamaan diferensial yang dipaksakan karena cara ini mentransformasi secara paksa persamaan diferensial pelat menjadi persamaan aljabar, sehingga mempermudah operasi matematis yang diperlukan. Metode Navier ini menggunakan deret Fourier sinus ganda. Untuk pelat dengan tumpuan sendi sepanjang keempat sisinya seperti ditunjukkan pada gambar 27 dan pola pembebanannya adalah beban merata p_0 (Ugural,1981) adalah sebagai berikut :



Keterangan :

----- = tumpuan sendi

a = panjang bentang pendek

b = panjang bentang panjang

(x,y) = posisi titik yang ditinjau
sesuai koordinat sumbu x
dan koordinat sumbu y.

Gambar 27. Denah Pelat dengan Tumpuan Sendi Sepanjang Sisinya.

- Fourier series (untuk beban terbagi merata) :

$$P(x,y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} p_{mn} \sin \frac{m \cdot \pi \cdot x}{a} \sin \frac{n \cdot \pi \cdot y}{a} \dots\dots\dots (9)$$

$$w(x,y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} a_{mn} \sin \frac{m \cdot \pi \cdot x}{a} \sin \frac{n \cdot \pi \cdot y}{a} \dots\dots\dots (10)$$

m = jumlah setengah kurva sinus pada arah x

n = jumlah setengah kurva sinus pada arah y.

p_{mn} dan a_{mn} adalah koefisien-koefisien yang harus dicari.

- *Boundary condition* :

$$W = 0 \quad \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad (\text{pada } x = 0 \text{ dan } x = a) \dots\dots\dots (11)$$

$$W = 0 \quad \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0 \quad (\text{pada } y = 0 \text{ dan } y = b) \dots\dots\dots (12)$$

- Persamaan (9) masing masing dikalikan dengan $\sin \frac{m' \cdot \pi \cdot x}{a} \sin \frac{n' \cdot \pi \cdot y}{b} dx dy$ dan diintegalkan antara batas 0,a dan 0,b :

$$\int_0^b \int_0^a p(x,y) \sin \frac{m' \cdot \pi \cdot x}{a} \sin \frac{n' \cdot \pi \cdot y}{b} dx dy$$

$$= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} p_{mn} \int_0^b \int_0^a \sin \frac{m \cdot \pi \cdot x}{a} \sin \frac{n \cdot \pi \cdot y}{b} \sin \frac{m' \cdot \pi \cdot x}{a} \sin \frac{n' \cdot \pi \cdot y}{b} dx dy \dots (13)$$

- Persamaan sebelah kanan di integrasikan, digunakan $m = m'$ dan $n = n'$ sehingga menjadi :

$$\int_0^b \int_0^a p(x,y) \sin \frac{m \cdot \pi \cdot x}{a} \sin \frac{n \cdot \pi \cdot y}{b} dx dy = p_{mn} \frac{a}{2} \frac{b}{2}$$

$$p_{mn} = \frac{4}{a \cdot b} \int_0^b \int_0^a p(x,y) \sin \frac{m \cdot \pi \cdot x}{a} \sin \frac{n \cdot \pi \cdot y}{b} dx dy \dots\dots\dots (14)$$

- Governing differential equations for deflection :

$$\frac{\partial^4 .w}{\partial .x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 .w}{\partial x^2 . \partial y^2} + \frac{\partial^4 .w}{\partial .y^4} = \frac{P}{D} \dots\dots\dots (15)$$

- Persamaan (15) dimasukkan ke dalam persamaan (12)

$$\sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ a_{mn} \left[\left(\frac{m \cdot \pi}{a} \right)^4 + 2 \left(\frac{m \cdot \pi}{a} \right)^2 \left(\frac{n \cdot \pi}{b} \right)^2 + \left(\frac{n \cdot \pi}{b} \right)^4 \right] - \frac{p_{mn}}{D} \right\} \sin \frac{m \cdot \pi \cdot x}{a} \sin \frac{n \cdot \pi \cdot y}{b} = 0 \dots\dots\dots (16)$$

- Karena persamaan (16) harus bernilai = 0 maka :

$$a_{mn} \pi^4 \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2 - \frac{p_{mn}}{D} = 0$$

$$a_{mn} = \frac{p_{mn}}{\pi^4 \cdot D \cdot \left[\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right]^2} \dots\dots\dots (17)$$

- Maka persamaan defleksi adalah :

$$W = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{p_{mn}}{\pi^4 \cdot D \cdot \left[\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right]^2} \cdot \sin \frac{m \cdot \pi \cdot x}{a} \sin \frac{n \cdot \pi \cdot x}{b} \dots\dots\dots (18)$$

dengan :

$$D = \frac{E \cdot h^3}{12(1-\nu^2)}$$

Dan D untuk pelat berongga adalah :

$$D = \frac{E \cdot h^3}{12(1-\nu^2)} \times \frac{I_{berongga}}{I_{solid}}$$

- Karena beban yang terjadi adalah beban terbagi merata, maka :

$$p_{mn} = \frac{4p_0}{m \cdot n \cdot \pi^2} \dots\dots\dots (19)$$

p_0 = lendutan pada titik (x,y) mm.

- Substitusikan persamaan (18) ke persamaan (19)

$$W = \frac{16p_0}{\pi^6 \cdot D} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{m \cdot \pi \cdot x}{a} \sin \frac{n \cdot \pi \cdot x}{b}}{m \cdot n \cdot \left[\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right]^2} \dots\dots\dots (20)$$

F. Lendutan

Lendutan harus diperiksa apabila pelat memikul konstruksi yang akan mengalami kerusakan akibat lendutan yang besar. Batasan lendutan yang ditentukan berdasarkan SNI 2847:2019 pasal 24.2.2 adalah :

Tabel 6. Lendutan ijin maksimum

Jenis komponen struktur	Kondisi		Lendutan yang diperhitungkan	Batas lendutan
Atap datar	Tidak memikul atau tidak disatukan dengan elemen elemen nonstruktural yang mungkin akan rusak akibat lendutan yang besar		Lendutan seketika akibat Lr dan R maksimum	l/180
Lantai			Lendutan seketika akibat L	l/360
Atap atau lantai	Memikul atau disatukan dengan elemen-elemen nonstruktural	Mungkin akan rusak akibat lendutan yang besar	Bagian dari lendutan total yang terjadi setelah pemasangan elemen nonstruktural, yaitu jumlah dari lendutan jangka panjang akibat semua beban tetap dan lendutan seketika akibat penambahan beban hidup	l/480
		Tidak akan rusak akibat lendutan yang besar		l/240

Kondisi yang seperti benda uji pada penelitian ini untuk pelat yang tidak manahan atau tidak disatukan dengan komponen non struktural yang mungkin akan rusak oleh lendutan yang besar, dengan lendutan seketika akibat beban hidup, batas lendutannya adalah sebesar :

$$\Delta h = \frac{l}{360} \dots\dots\dots (21)$$

dengan :

Δh = lendutan maksimum ditengah bentang pelat, mm.

L = panjang bentang, mm

G. Kekakuan

Menurut Gere dan Timoshenko (1987), kekakuan didefinisikan sebagai gaya yang dibutuhkan untuk menghasilkan suatu lendutan sebesar satu satuan sehingga kekakuan elastis pada pelat beton bertulang metode secan dapat dihitung sesuai gambar 28 dengan menggunakan persamaan berikut ini :

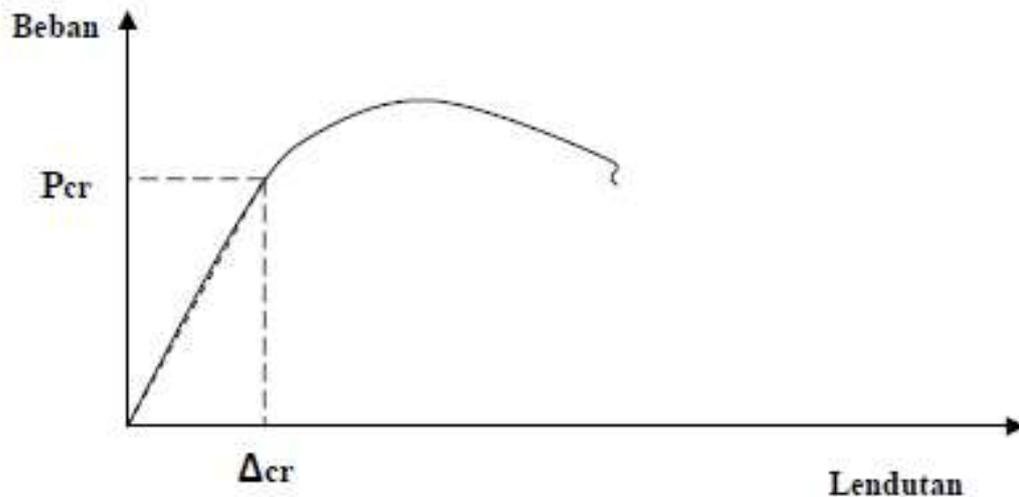
$$K = P_{cr} / \Delta_{cr} \dots\dots\dots (22)$$

dengan :

K = Kekakuan pelat, KN/mm

P_{cr} = Beban saat retak awal / batas elastis, kN.

Δ_{cr} = Lendutan saat retak awal / batas elastis, mm.

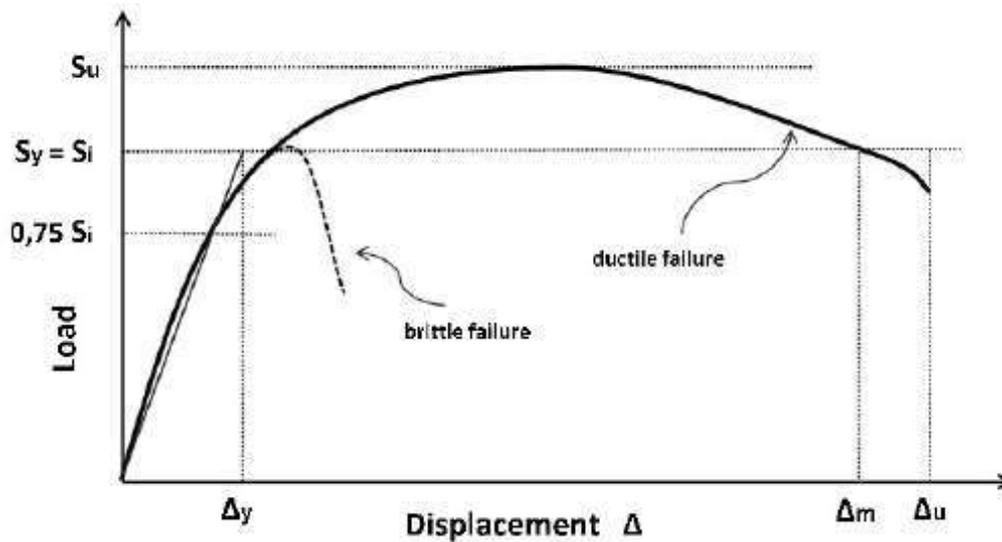


Gambar 28. Kurva Beban Terhadap Lendutan

H. Daktalitas

Suatu struktur beton bertulang dapat bersifat getas atau daktail. Struktur bersifat getas apabila struktur segera rusak ketika beban luar yang bekerja pada struktur tersebut melebihi kekuatan elastisitasnya atau batas lelehnya.

Sedangkan struktur bersifat daktail apabila struktur tidak langsung rusak setelah melewati batas elastis, namun melendut dahulu sampai batas waktu tertentu dan akan rusak apabila batas plastisnya terlampaui. Daktalitas struktur pelat beton bertulang dapat ditentukan dari rasio lendutan maksimum terhadap lendutan leleh (Paulay and Priestley,1992) seperti ditunjukkan pada gambar 29 sebagai berikut :



Gambar 29. Grafik Daktalitas (Paulay and Pristley,1992)

Rumus daktalitas :

$$\mu_m = \Delta_m / \Delta_y \dots\dots\dots (23)$$

dengan:

μ_m = daktalitas maksimum

Δ_m = lendutan maksimum

Δ_y = lendutan leleh

$$S_y = S_i = 0,8 \cdot S_u \dots\dots\dots (24)$$

dengan :

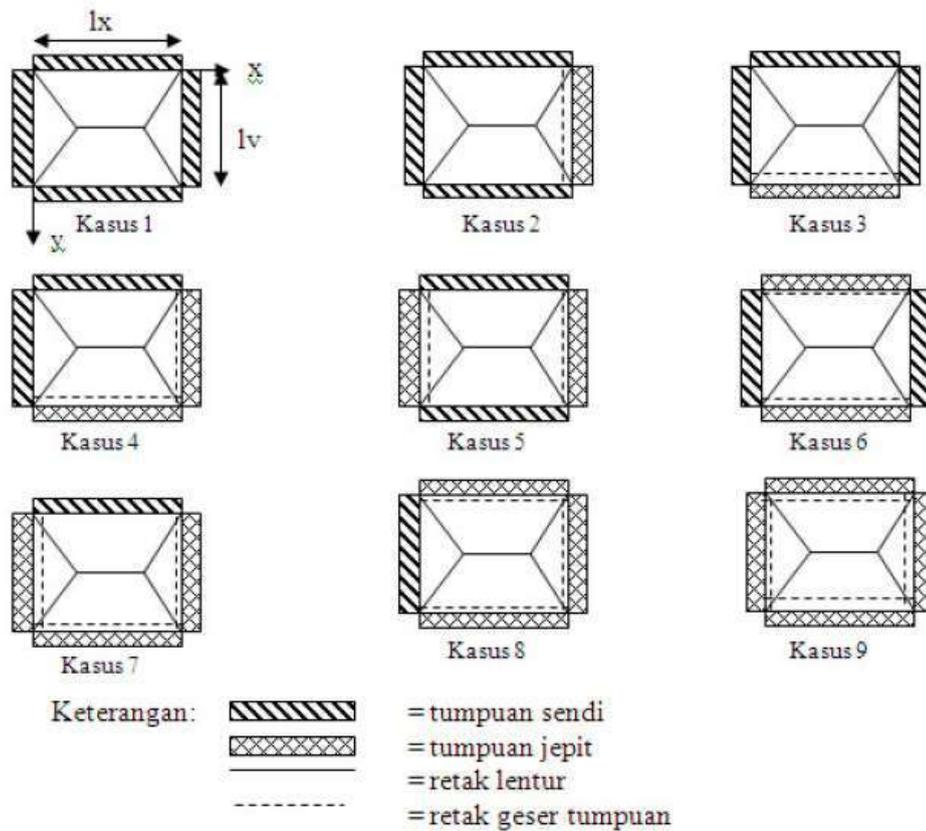
$S_y = S_i$ = beban leleh

S_u = beban puncak.

Lendutan leleh dapat diperoleh dengan memplot titik pertemuan antara garis beban leleh dengan garis yang dibuat dengan menarik garis linier mulai titik nol kurva beban-lendutan ditarik lurus melalui titik perpotongan kurva dengan garis 0,75 beban leleh.

I. Pola Retak pada Pelat Beton Bertulang

Bentuk retak yang terjadi pada struktur beton bertulang dapat diklasifikasikan dalam dua kategori utama yaitu retak yang disebabkan akibat adanya beban retak lentur (*flexural crack*) dan retak geser (*shear cracks*). Kategori retak tersebut dapat diketahui dengan melihat pola retak yang terjadi pada permukaan bawah pelat. Retak lentur pada pelat segi empat yang dibebani merata pola retaknya berupa garis-garis retak yang melintang dari sisi tumpuan ke tumpuan lainnya yang membentuk pola menyerupai amplop. Retak geser ada dua macam, yaitu retak geser yang diakibatkan gaya geser pons di sekitar daerah beban dan gaya geser disekitar tumpuan pelat. Retak akibat gaya pons disekitar beban akan membentuk pola retak berupa garis yang mengelilingi sekitar beban tersebut. Sedangkan retak akibat gaya geser disekitar tumpuan akan membentuk pola retak berupa garis sejajar tumpuan sepanjang tumpuan. Pola retak juga tergantung dari jenis tumpuannya. Pola retak pelat segi empat akibat beban merata dengan berbagai jenis tumpuan (Park and Gamble, 1980) dapat dilihat pada gambar 30 sebagai berikut :



Gambar 30. Pola Retak Pelat Segiempat Akibat Beban Merata dengan Tumpuan Sepanjang keempat Sisi Tepinya (Park and Gamble,1980)

J. Gaya Geser pada Pelat

Kerusakan pada pelat dapat disebabkan karena gaya-geser. Gaya geser dapat terjadi akibat beban terpusat atau beban area. Beban terpusat atau beban area yang ditahan pelat dapat menyebabkan tegangan tegangan geser pada suatu tampang disekitar beban tersebut. Dalam SK SNI 2847:2019 pasal 22.6.1 6, perhitungan kemampuan pelat dua arah non prategang dalam menahan gaya geser diambil nilai terkecil dari tiga rumus berikut ini :

$$1. V_c = 0,17 \left\{ 1 + \frac{2}{\beta} \right\} \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_c} \cdot b_o \cdot d \dots\dots\dots (25)$$

βc = rasio sisi panjang terhadap sisi pendek beban area

b_o = keliling penampang daerah tegangan geser.

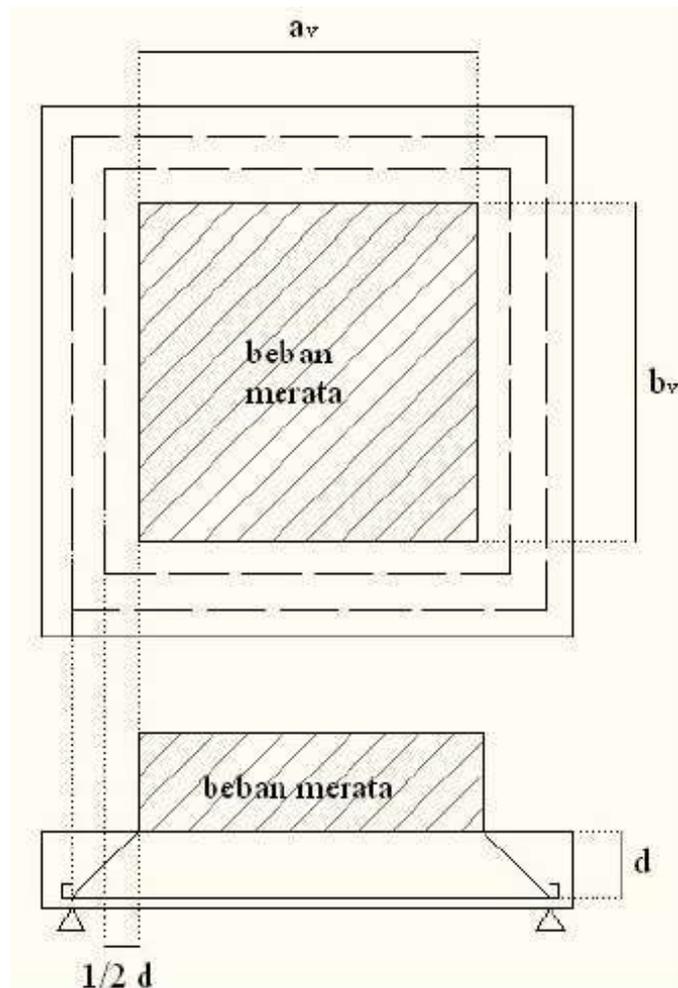
$$b_o = 2(a_v + b_v + 2d)$$

λ = faktor modifikasi, untuk beton normal 1

$$2. \quad V_c = 0,083 \cdot \left(\frac{\alpha_s \cdot d}{b_o} + 2 \right) \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_o \cdot d \quad \dots \dots \dots (26)$$

Dengan α_s sebesar 40 untuk beban area di tengah pelat, 30 untuk di tepi dan 20 untuk disudut pelat.

$$3. \quad V_c = 0,33 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_o \cdot d \quad \dots \dots \dots (27)$$



Gambar 31. Geser pada Pelat akibat Beban Area

K. Kerangka Konseptual

Dengan diketemukannya pelat beton bertulang memanjang yang dinamakan *Hollow Core Slab* pada tahun 1950 membuat pelat menjadi lebih ringan akan tetapi dengan adanya lubang memanjang membuat *hollow core slab* hanya berperilaku sebagai pelat satu arah. *Joergen Beurning* (1990) menemukan pelat beton dengan bola-bola sebagai pengisi antara tulangan tarik dan tekan serta berfungsi sebagai pelat dua arah yang dinamakan *bubble deck*. Pada umumnya daerah tekan pada pelat sangat kecil untuk mencapai keseimbangan gaya tarik dan tekan sehingga penggunaan bola berfungsi untuk mengurangi volume beton yang diperlukan. Aplikasi dan aturan-aturan dari *bubble deck* masih terbatas untuk pelat beton yang memiliki ketebalan minimum 230 mm dan diameter bola 180 mm.

Dyah Widiastri Intasari (2013) pada penelitiannya yang memanfaatkan botol kemasan air minum sebagai pembentuk rongga pada tebal beton 14 cm pada pelat masif (PM), pelat berongga (PBT-1 dan PBT-2) dengan variasi jarak antar rongga yang berbeda menghasilkan nilai kuat lentur untuk beban maksimum pada pelat massif (PM) dari hasil analitis sebesar 77,283 kN dan eksperimen sebesar 76,685 kN, pada pelat berongga PBT-1 hasil analitisnya sebesar 82,551 kN dan hasil ekperimennya 69,090 kN dan pada pelat berongga PBT-2 hasil analitisnya sebesar 82,240 kN dan hasil ekperimennya 68,600 kN sedangkan La Ode Abdul Majid Muizu (2013) pada eksperimennya dengan memanfaatkan botol bekas kemasan air minum meneliti perilaku lentur pelat sistem satu arah pada volume beton tetap dengan benda uji pelat masif (PM) dengan tebal 140 mm, pelat berongga (PBV1) tebal 164,5 mm dan pelat berongga (PBV2) 157,5 mm diperoleh beban maksimum pada pelat berongga (PBV1) sebesar 79,380 kN lebih besar dari nilai beban maksimum pada pelat

masif (PM) sebesar 76,685 kN dan pelat berongga (PBV2) sebesar 73,010 kN. Kekakuan hasil eksperimen pada pelat massif (PM) sebesar 32,082 kN/mm, pelat berongga (PBV1) sebesar 30,627 kN/mm dan pelat berongga (PBV2) sebesar 14,120 kN/mm. Retak yang terjadi pada semua benda uji termasuk dalam pola retak lentur.

Penelitian tentang pelat beton bertulang berongga yang dilakukan oleh Alfian Sanjaya (2015) dengan pemanfaatan kaleng bekas kemasan susu sebagai pembentuk rongga dilakukan pengujian terhadap tiga benda uji yang terdiri dari satu pelat solid (PM) dengan dua pelat berongga, dengan variasi penempatan rongga sejajar (PBK-1) dan penempatan rongga zigzag (PBK-2) dengan ketebalan masing-masing 140 mm namun volume betonnya berbeda 17 % pada PBK-1 dan 15 % pada PBK-2 lebih sedikit dari pelat solid, dengan sistem cor ditempat. Semua pelat berukuran skala penuh dan pengujiannya dilakukan secara statik dengan beban terpusat di sepertiga bentang pada struktur balok sederhana. Rongga dibuat dengan menggunakan kaleng bekas kemasan susu ukuran 0,348 liter. Eksperimen ini menghasilkan kuat lentur berupa beban maksimum pada pelat masif sebesar 80,115 kN, pelat berongga PBK-1 sebesar 73,020 kN dan pelat berongga PBK-2 sebesar 85,985 kN. Sedangkan kekakuan pada pelat masif sebesar 6.79 kN/mm, pelat berongga PBK-1 5,35 kN/mm dan PBK-2 sebesar 5,62 kN/mm. Retak yang terjadi pada semua benda uji pelat termasuk dalam kategori pola retak lentur.

Dengan menggunakan referensi beberapa penelitian tersebut diatas, penelitian ini membandingkan pelat massif tebal 14 cm dengan pelat berongga menggunakan modifikasi pipa PVC dengan diameter rongga 76 mm sebagai pembentuk rongga pada pelat beton bertulang sistem dua arah dengan variasi ketebalan pelat berongga-1 setebal 14 cm dan dan pelat berongga-2 yang

mempunyai volume yang sama dengan pelat masif dengan tebal 15,9 cm dengan menggunakan skala penuh pada pemodelannya. Pembebanan dilakukan dengan sistem dua arah dan simulasi pembebanan merata dengan tumpuan sendi sepanjang keempat sisinya. Selain menggunakan analisa yang sama pada penelitian sebelumnya yang meliputi analisa kekuatan lentur, lendutan dengan menggunakan metode navier dan kekakuan pada penelitian ini juga akan dilakukan analisa pola retak, daktilitas dan gaya geser pada pelat.

L. Hipotesis

Berdasarkan latar belakang masalah yang dikemukakan serta rumusan permasalahan dan kajian literatur yang ada , maka hipotesis pada penelitian ini adalah dengan semakin besar nilai tebal efektif pelat beton bertulang berongga akan meningkatkan kuat lentur pelat dan kekakuannya. Sedangkan penempatan rongga pada pelat akan mengurangi kekuatan lentur dan kekuatan geser pelat.

M. Definisi Operasional

Variabel yang diteliti pada eksperimen pembebanan pelat beton berongga dengan menggunakan pipa PVC sebagai pembentuk rongga pada pelat beton bertulang dua arah adalah variabel bebas yaitu kapasitas lentur pelat beton bertulang berongga. Kemudian variabel terikatnya yaitu lendutan pelat, kekakuan pelat, daktilitas pelat, pola retak pelat dan kekuatan geser pelat beton berongga. Adapun definisi operasional kedua variabel tersebut adalah :

- a. Kapasitas lentur pelat beton bertulang berongga adalah kemampuan struktur pelat berongga PVC dalam menahan beban maksimum yang bekerja sesuai persyaratan teknis yang diijinkan.

- b. Lendutan pelat beton bertulang berongga adalah perpindahan yang terjadi pada suatu titik akibat beban yang bekerja pada struktur elemen pada suatu titik dalam arah vertical.
- c. Kekakuan pelat beton bertulang berongga adalah kemampuan gaya yang dibutuhkan struktur pelat beton berongga PVC untuk menghasilkan suatu lendutan sebesar satu satuan yang bekerja pada daerah elastis struktur pelat tersebut.
- d. Daktalitas pelat beton bertulang berongga adalah kemampuan struktur pelat beton bertulang dalam menahan beban setelah melewati batas elastisnya untuk melendut sampai dengan batas waktu tertentu sampai dengan batas plastisnya terlampaui.
- e. Pola retak pelat beton bertulang berongga adalah pola keretakan struktur pelat beton bertulang berongga yang terjadi yang diakibatkan apabila tegangan tarik beton melampaui kuat tarik beton.
- f. Kekuatan geser pelat beton bertulang berongga adalah gaya yang bekerja pada bidang horizontal pelat beton bertulang berongga.