

TUGAS AKHIR

**STUDI NILAI DAKTILITAS LENDUTAN BETON BERTULANG
BERONGGA DENGAN PEMANFAATAN PIPA *POLIVINYL
CHLORIDE* SEBAGAI PEMBENTUK RONGGA**

***DISPLACEMENT DUCTILITY VALUE STUDY OF HOLLOW
REINFORCED CONCRETE WITH THE UTILIZATION OF
POLIVINYL CHLORIDE AS VOID FORMING***

MUH. IRFANDU WIJAYA

D111 16 030



PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

2020



KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS HASANUDDIN
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL

Jl. Perintis Kemerdekaan 6 Bontomatene, 92172, Kab. Gowa, Sulawesi Selatan
✉ <http://civil.unhas.ac.id> ✉ civil@eng.unhas.ac.id

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Judul

**STUDI NILAI DAKTILITAS LENDUTAN PELAT BETON BERTULANG
BERONGGA DENGAN PEMANFAATAN PIPA POLYVINYL CHLORIDE
SEBAGAI PEMBENTUK RONGGA**

Disusun dan diajukan oleh

MUH. IRFANDU WIJAYA
D111 16 030

Telah memenuhi syarat untuk melaksanakan

UJIAN SARJANA
pada tanggal
30 November 2020

Menyetujui,
Dosen Pembimbing

Pembimbing I

Pembimbing II

Prof. Dr-Ing. Herman Parung, M.Eng
NIP: 196207291987031001

Dr.Eng. A. Arwin Amiruddin, ST, MT
NIP: 197912262005011001

Mengetahui,
Ketua Departemen Teknik Sipil



Prof. Dr. H. M. W. J. Jaronge, ST, MEng
NIP: 196305292002121002

PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini, nama Muh. Irfandu Wijaya, dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang berjudul "**Studi Nilai Daktilitas Lendutan Beton Bertulang Berongga dengan Pemanfaatan Pipa Polivinyl Chloride Sebagai Pembentuk Rongga**", adalah karya ilmiah penulis sendiri, dan belum pernah digunakan untuk mendapatkan gelar apapun dan dimanapun.

Karya ilmiah ini sepenuhnya milik penulis dan semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Gowa, Novemver 2020



ng membuat pernyataan,

Muh. Irfandu Wijaya
D111 16 030

KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur kita panjatkan kehadirat Allah SWT, atas berkat rahmat dan petunjuk-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir sebagai salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi pada Fakultas Teknik Departemen Teknik Sipil Universitas Hasanuddin. Tugas akhir ini disusun berdasarkan hasil penelitian di Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Tugas Akhir yang berjudul “**Studi Nilai Daktilitas Lendutan Beton Bertulang Berongga dengan Pemanfaatan Pipa *Polyvinyl Chloride* Sebagai Pembentuk Rongga**” ini diharapkan dapat memberikan pengetahuan kepada pembaca dan juga kepada penulis dalam memahami karakteristik beton pracetak secara umum dan khususnya *joint* pracetak sambungan model takik.

Penyusunan Tugas Akhir ini tidak lepas dari bimbingan, petunjuk dan perhatian dari dosen pembimbing. Maka dalam kesempatan kali ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak **Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, M.T.**, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
2. Bapak **Prof. Dr. H. Muh. Wihardi Tjaronge S.T., M.Eng.**, dan Bapak **Dr. Eng. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T.** selaku Ketua dan Sekretaris Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Bapak **Prof. Dr. Ing. Herman Parung, M.Eng.**, selaku Dosen Pembimbing I dan Bapak **Dr. Eng. Andi Arwin Amiruddin, S.T., M.T.**, selaku Dosen Pembimbing II yang telah banyak meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan, motivasi, dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga selesainya penulisan tugas akhir ini.
4. Bapak **Dr. Eng. Andi Arwin Amiruddin, S.T., M.T.** selaku Kepala Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memberikan izin atas segala fasilitas yang digunakan.
5. Seluruh dosen yang telah membantu penulis selama mengikuti pendidikan di Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
6. Seluruh staf dan karyawan di Departemen Teknik Sipil, di Fakultas Teknik, di Universitas Hasanuddin.

7. Seluruh asisten dan staf Laboratorium Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Yang teristimewa penulis persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua yang tercinta, yaitu Ibunda **Hasbiah** dan Ayahanda **Hasen**, atas doa, kasih sayang, motivasi dan segala dukungannya selama ini, baik moral maupun material yang telah diberikan.
2. Bapak **Wahyu Mahendra Trias Atmadja, S.T., M.T., A. Mustaghfirin, Muhammad Rifqi Dasril**, dan **Bella Annisa Alhayyu** sebagai partner tim yang telah berjuang bersama selama proses penelitian berlangsung.
3. **Suci Ramdhani** yang telah mendampingi serta memberikan motivasi saat penyusunan tugas akhir.
4. Teman – teman **KKD Struktur** yang telah banyak membantu selama proses penelitian dilaksanakan.
5. Teman-teman **PATRON 2017**, mahasiswa Departemen Teknik Sipil dan Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin **Angkatan 2016** yang telah memberikan warna tersendiri.

Penulis menyadari bahwa setiap karya buatan manusia tidak akan luput dari kekurangan, oleh karena itu mengharapkan kepada pembaca kiranya dapat memberi sumbangan pemikiran demi kesempurnaan dan pembaharuan tugas akhir ini. Semoga Allah SWT melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya dan semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat, khususnya dalam bidang Teknik Sipil.

Gowa, Agustus 2020

Muh. Irfandu Wijaya

D111 16 030

ABSTRAK

Kebutuhan akan gedung bertingkat baik untuk perkantoran maupun untuk tempat hunian (apartemen) di Indonesia terus meningkat. Namun permasalahan terbesar yang ada di Indonesia adalah rawan terjadi gempa sehingga diperlukan elemen struktur yang memiliki daktilitas yang cukup khususnya pada pelat.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisa hubungan antara beban dan *displacement*, serta nilai daktilitas pada pelat beton bertulang berongga terhadap pelat masif/pejal.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode studi eksperimental dengan benda uji terdiri dari 3 buah komponen pelat, yaitu 1 buah komponen pelat pejal (PP) dan 2 buah komponen pelat berongga dengan pipa PVC sebagai pembentuk rongga. Pada pelat berongga terbagi menjadi tipe 1 (PB 1) dan tipe 2 (PB 2).

Hasil penelitian yang diperoleh, yaitu pada pelat pejal memiliki nilai beban paling besar yaitu 410,64 kN dan lendutan terbesar yaitu 34,18 mm. Perbandingan antara nilai beban dan lendutan PB 1 dan PB 2 terhadap PP diperoleh nilai beban dan lendutan sebagai berikut: $P_{PB\ 1} = -18,38 P_{Pejal}$ dan $P_{PB\ 2} = -3,50 P_{Pejal}$. Taraf kinerja struktur untuk pelat pejal maupun pelat berongga tipe 1 dan 2 berada pada tingkat daktil parsial. Perbandingan antara PB 1 dan PB 2 dengan PP diperoleh nilai daktilitas $\mu_{\delta\ PB\ 1} = 12,64 \mu_{\delta\ Pejal}$ dan $\mu_{\delta\ PB\ 2} = -6,43 \mu_{\delta\ Pejal}$.

Kata Kunci: Daktilitas, Pelat, Berongga

ABSTRACT

The need for multi-storey building both for office and residential (apartment) in Indonesia continues to increase. But the biggest problem in Indonesia is that it is prone to earthquake so that it takes element of structure that have a sufficient ductility especially on the plate.

The purpose of this study is to analyze the relationship between load and displacement, as well as the value of ductility on hollow reinforced concrete plates compared to massive plate/ solid.

The method used in this study is an experimental study method with test object consisting of 3 plate components, namely 1 plate component (PP) and 2 hollow plate components with PVC pipe as cavity bending. On hollow plate are divided into type 1 (PB 1) and type 2 (PB 2).

The results of the study obtained, namely on the solid plate have the largest load value is 410.64 kN and the largest displacement is 34.18 mm. The comparison between load value and displacement PB 1 and PB 2 against PP obtained load and displacement percentage as follows: $P_{PB\ 1} = -18,38 P_{Solid}$ and $P_{PB\ 2} = -3,50 P_{Solid}$. Structure performance levels for both solid plate and type 1 and 2 hollow plate are at partial ductile level. The comparison between PB 1 and PB 2 with PP obtained the percentage of ductility $\mu_{\Delta\ P\delta\ 1} = 12.64 \mu_{\delta\ Solid}$ and $\mu_{\delta\ PB\ 2} = -6.43 \mu_{\delta\ Solid}$.

Keywords: *Ductility, Plate, Hollow*

DAFTAR ISI

TUGAS AKHIR	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH	iii
KATA PENGANTAR	iv
ABSTRAK.....	vi
<i>ABSTRACT</i>	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL.....	xii
BAB 1. PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang.....	1
B. Perumusan Masalah	3
C. Tujuan Penelitian	3
D. Batasan Masalah	3
E. Manfaat Penelitian	4
F. Sistematika Penulisan.....	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	6
A. Pelat	6
B. Pelat Beton Bertulang	9
C. Sistem Pelat 2 Arah	10
D. Daktilitas	10
E. Hollow Core Slab	17
F. Pelat Beton Bertulang Berongga Bola.....	18

BAB. 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	30
A. Diagram Alir Penelitian.....	30
B. Waktu dan Lokasi Penelitian	31
C. Detail Benda Uji	31
D. Alat-Alat Penelitian.....	33
D.1. Peralatan Pengujian Material.....	33
D.2. Peralatan Pembuatan Benda Uji.....	34
D.3. Peralatan Pengujian Benda Uji.....	34
E. <i>Setting</i> Alat Pengujian dan Pengujian Benda Uji	35
BAB 4. ANALISA DAN PEMBAHASAN	38
A. Karakteristik Material.....	38
A.1. Komposisi Material	38
A.2. Kuat Tekan Beton.....	38
A.3. Kuat Lentur Beton.....	40
A.4. Elastisitas Beton	41
A.5. Kuat Tarik Tulangan	42
B. Hubungan Beban dan Lendutan	43
C. Nilai Daktilitas Pelat	47
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN	52
A. Kesimpulan	52
B. Saran	52
DAFTAR PUSTAKA.....	54
LAMPIRAN	56

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Gaya – gaya Dalam Pada Berbagai Jenis Pelat	7
Gambar 2. Grafik Beton terhadap Lendutan Pelat Beton Getas dan Daktail.....	11
Gambar 3. Daktilitas Regangan	12
Gambar 4. Daktilitas Kelengkungan	13
Gambar 5. Daktilitas Perpindahan.....	17
Gambar 6. <i>Hollow-core slab (Precast Buildcon India Ltd.)</i>	18
Gambar 7. <i>Bubble Deck</i>	19
Gambar 8. <i>Bubble Deck (Betonwerk + Fertigteil Technik, 10/2005)</i>	19
Gambar 9. Aliran Gaya pada Pelat Beton Bertulang Berongga Bola	20
Gambar 10. Aliran Gaya 3D pada Pelat Beton Bertulang Berongga Bola	20
Gambar 11. Perilaku Struktur Pelat Beton Bertulang Berongga Bola	21
Gambar 12. Jarak Antar Bola	22
Gambar 13. Grafik Kapasitas Geser Pelat Beton Bertulang Berongga Bola	25
Gambar 14. Grafik Rasio Lendutan Pelat Beton Berongga Bola (CB) terhadap Pelat Beton Solid (MD).....	26
Gambar 15. Pola Retak Benda Uji Seri 1	27
Gambar 16. Pola Retak Benda Uji Seri 2	27
Gambar 17. Retak pada Pelat MD 450-VI	28
Gambar 18. Retak pada Pelat BD 450-V3.....	28
Gambar 19. Diagram Alir Penelitian	30
Gambar 20. Pelat Pejal (PP)	32
Gambar 21. Pelat Berongga Tipe 1 (PB 1).....	32
Gambar 22. Pelat Berongga Tipe 2 (PB 2).....	33
Gambar 23. Perletakan LVTD dan Strain Gauge	37
Gambar 24. Skema <i>Setting</i> Alat dan Benda Uji.....	37
Gambar 25. Pengujian Kuat Tekan Beton Normal.....	39

Gambar 26. Pengujian Kuat Lentur Beton Normal	40
Gambar 27. Pengujian Modulus Elastisitas Beton	41
Gambar 28. Pengujian Kuat Tarik Tulangan	42
Gambar 29. Proses Pengujian Pelat	44
Gambar 30. Grafik Hubungan Beban Maksimum dengan Lendutan.....	45
Gambar 31. Hubungan Beban dan Lendutan Pelat Pejal	47
Gambar 32. Hubungan Beban dan Lendutan PB 1	48
Gambar 33. Hubungan Beban dan Lendutan PB 2	49
Gambar 34. Grafik Nilai Daktilitas Pelat	50

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Perbandingan Bubble Deck dengan Pelat beton Bertulang Solid**	21
Tabel 2. Spesifikasi Benda Uji hasil Penelitian Aldejohann dan Schnellenbach	23
Tabel 3. Hasil Penelitian Aldejohann dan Schnellenbach Seri 1	24
Tabel 4. Hasil Penelitian Aldejohann dan Schnellenbach Seri 2	24
Tabel 5. Detail Benda Uji Pelat.....	31
Tabel 6. Komposisi Beton.....	38
Tabel 7. Data Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Silinder Normal.....	39
Tabel 8. Data Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton Balok Normal	40
Tabel 9. Hasil pengujian Modulus Elastisitas Beton Normal	41
Tabel 10. Data Hasil Pengujian Kuat Tarik Tulangan	42
Tabel 11. Perhitungan Analisa Beban dan Lendutan.....	46
Tabel 12. Perhitungan Nilai Daktilitas Peninjauan pada Pelat	50
Tabel 13. Perhitungan Analisa Daktilitas	51

BAB 1. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Kebutuhan akan gedung bertingkat baik untuk perkantoran maupun untuk tempat hunian (apartemen) di Indonesia terus meningkat. Hal ini dilatar belakangi oleh iklim perekonomian Indonesia yang terus tumbuh dan berkembang. Hal ini memicu banyaknya pembangunan gedung-gedung bertingkat dengan tuntutan proses konstruksi yang relatif singkat. Penggunaan sistem beton pracetak dapat menghemat waktu konstruksi jika dibandingkan dengan beton cor setempat. Salah satu sistem beton pracetak yang banyak digunakan saat ini adalah sistem pelat HCS (Hollow core slab). Namun permasalahan yang muncul adalah pada sistem pelat HCS yang ada masih belum dapat berperilaku sebagai diafragma struktur, sehingga untuk penggunaannya masih terbatas pada struktur bangunan bertingkat rendah.

Struktur bangunan tahan gempa yang dikehendaki harus memiliki kekuatan dan daktilitas yang cukup. Sebab ketika terjadi gempa, elemen struktur yang memiliki daktilitas besar dapat menyerap energi lebih banyak daripada elemen struktur yang memiliki daktilitas kecil. Elemen yang paling penting dan membutuhkan perhatian khusus adalah bagian struktur pelat sehingga diperlukan sambungan yang dapat meningkatkan kekuatan dan daktilitas yang optimal dalam menahan beban gempa.

Adapun perkembangan teknologi alternatif yang pernah dilakukan adalah dengan menggunakan pelat beton berongga. Beberapa peneliti yang telah mengkaji mengenai pelat beton berongga antara lain pada tahun 2005 Aldejohann dan Schnellencbach melakukan penelitian *Biaxial Hollow Slab* dimana kedua jenis pelat tersebut memiliki rongga pada beton di daerah tarik sehingga mengurangi berat sendiri. Pada tahun sebelumnya (1990), Joergen Breuning menemukan pelat berongga bola yang dinamakan *Bubble Deck*. Pada tahun 2009 Kris Bayu Aji dan Andry Soeharno melakukan penelitian pelat berongga bola dengan sistem cor di tempat (*cast in situ*). 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.

Penggunaan pelat beton berongga bola (*biaxial hollow slab*) masih sangat sedikit digunakan. Kurangnya hasil penelitian maupun aturan yang membahas masalah ini menjadi salah satu faktor penyebabnya. Pilihan ketebalan pelat jenis ini yang telah dipatenkan dan diteliti memiliki ketebalan minimum 23 cm dan banyak digunakan untuk struktur pelat datar (*flate plate*).

Pelat beton berongga dengan pembentuk rongga dengan menggunakan material yang lain dengan ukuran tebal pelat yang lebih kecil dan beton cor ditempat yang banyak digunakan di Indonesia masih perlu

diteliti dan dikembangkan. Sehingga hal tersebut mendasari penelitian mengenai studi daktilitas dari pelat beton berongga.

B. Perumusan Masalah

Sebagaimana yang telah diuraikan dalam pendahuluan maka penelitian ini akan menganalisis penggunaan pipa *polivinyll chloride* sebagai pembentuk rongga pada pelat bertulang berongga. Berdasarkan identifikasi penelitian diatas maka didapatkan rumusan masalah tentang bagaimana perilaku lentur terhadap nilai daktilitas lendutan pada pelat beton bertulang berongga terhadap dengan pelat masif/pejal.

C. Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan kasus volume beton pada pelat beton berongga sama dengan volume beton pada pelat beton masif. Tujuan dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Menganalisis hubungan beban terhadap lendutan pada pelat beton bertulang berongga terhadap pelat masif/pejal.
2. Menganalisis nilai daktilitas lendutan pada pelat beton bertulang berongga terhadap pelat masif/pejal.

D. Batasan Masalah

Penelitian ini dibatasi pada hal – hal 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 solid sedangkan benda uji lainnya berupa pelat berongga dengan pembentuk rongga adalah *PVC*. Pelat beton berongga kedua memiliki tebal yang sama dengan pelat beton bertulang solid sedangkan pelat beton berongga ketiga memiliki volume beton yang sama dengan pelat beton bertulang solid.

2. Pola pembebanan berupa beban statik merata dengan tumpuan sendi sepanjang keliling 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.

E. Manfaat Penelitian

Hasil penelitian dari perilaku lentur pelat beton bertulang berongga ini diharapkan dapat memberikan kontribusi penghematan pemakaian beton pada pelat beton bertulang dan didapatkan pelat yang lebih ringan tanpa mengurangi kekuatannya. Pelat beton berongga ini dapat memungkinkan untuk dikerjakan dilapangan dengan alat alat yang sederhana serta penggunaan beton *cast in-situ*.

F. Sistematika Penulisan

Penulisan tugas akhir ini akan diuraikan dalam sistematika penulisan yang dibagi menjadi lima bab pokok bahasan sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Menjelaskan tentang latar belakang permasalahan, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, serta sistematika penulisan secara singkat.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Menyajikan kerangka teori konseptual mengenai penelitian secara singkat dan gambaran umum dari sampel penelitian yang akan diuji.

BAB III METODE PENELITIAN

Membahas tentang penelitian yang meliputi: tahapan penelitian, penentuan dimensi dan bahan penelitian, lokasi dan waktu penelitian, pengujian yang dilakukan, pengumpulan data, serta variable penelitian.

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

Menyajikan hasil analisis perhitungan data – data yang diperoleh dari hasil pengujian serta pembahasan dari hasil pengujian yang dilaksanakan.

BAB V PENUTUP

Kesimpulan dari hasil penelitian yang dilakukan dan saran.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

A. Pelat

Pelat adalah elemen bidang horisontal struktur yang mendukung beban mati maupun beban hidup dan menyalurkannya pada kerangka vertikal dari sistem struktur (Sudarmoko,1996).

Pelat adalah struktur bidang datar yang semua bidang tengahnya (*midplane*) datar dan setelah mengalami beban tegak lurus padanya atau momen lentur akan mengalami lenturan (Sulistyo,2000).

Menurut Szilard (1974) pelat dibedakan menjadi 4 kategori, yaitu :

1. Pelat Kaku

Merupakan pelat tipis yang memiliki ketegaran lentur (*flexural rigid*), dan memikul beban dengan aksi 2D, terutama dengan momen dalam (lentur dan puntir) dan gaya geser transversal yang umumnya sama dengan balok.

2. Membran

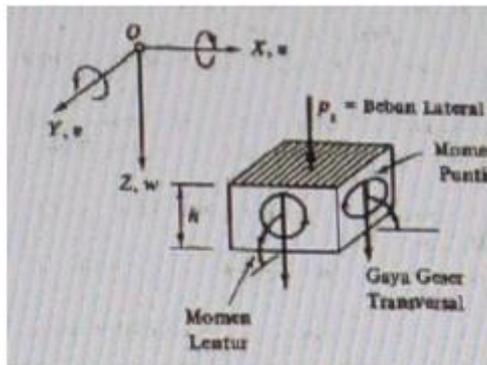
Merupakan pelat tipis tanpa ketegangan lentur dan memikul beban lateral dengan gaya geser aksial dan gaya geser terpusat.

3. Pelat Tebal.

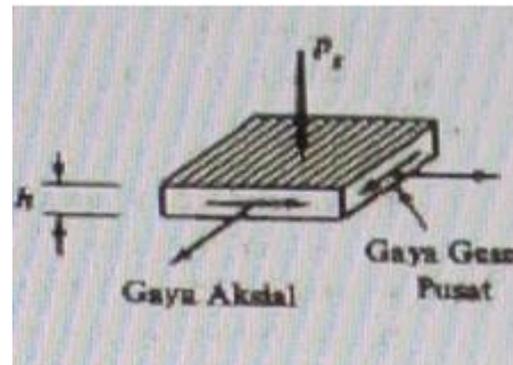
Merupakan pelat yang kondisi tegangan dalamnya menyerupai kondisi kontinu 3D.

4. Pelat flexibel.

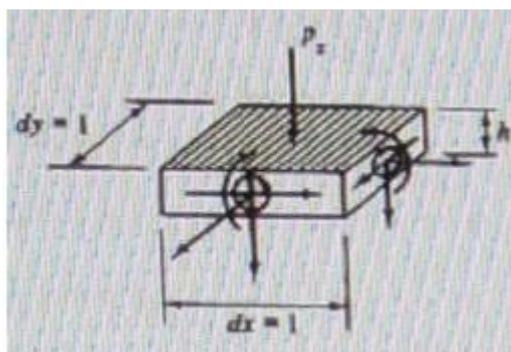
Merupakan gabungan dari pelat kaku, membran dan memikul beban luar dengan gabungan aksi momen dalam, gaya geser aksial, gaya geser pusat, gaya geser transversal.



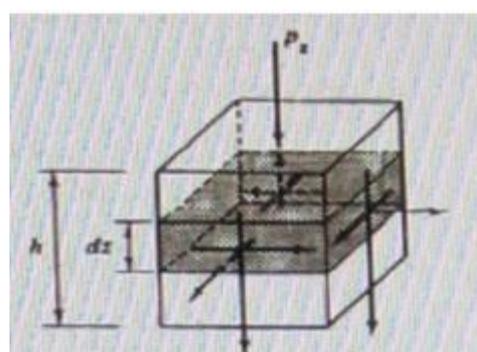
a. Plat Kaku



b. Membran



c. Plat Fleksibel



d. Plat Tebal

Gambar 1. 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 Bernoulli 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 :

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

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

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

Rumus 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

Menurut Sudarmoko (1996), pelat beton bertulang yang biasa digunakan untuk lantai rumah, atap maupun jembatan memiliki ciri sebagai berikut ini.

- a. Kaku.
- b. Mempunyai kemampuan menahan lenturan, baik satu arah ataupun dua arah.
- c. Tegangan geser relatif kecil, kecuali dibebani beban terpusat yang besar.
- d. Tulangan tekan biasanya jarang diperlukan.
- e. Masalah lendutan merupakan sesuatu yang penting dan perhitungannya serupa dengan balok.

Berdasarkan perbandingan antara bentang panjang dan pendeknya, pelat beton bertulang dibedakan satu arah dan pelat dua arah. Pelat dikatakan satu arah apabila perbandingan antara bentang panjang dan bentang pendeknya dua kali atau lebih, sedangkan apabila perbandingan keduanya kurang dari dua termasuk pelat dua arah. Menurut Sudarmoko (1996).

C. Sistem Pelat 2 Arah

Sistem pelat dua arah dapat terjadi pada pelat tunggal maupun menerus, asal perbandingan panjang bentang kedua sisi memenuhi. Persyaratan jenis pelat dua arah jika perbandingan dari bentang panjang terhadap bentang pendek kurang dari dua.

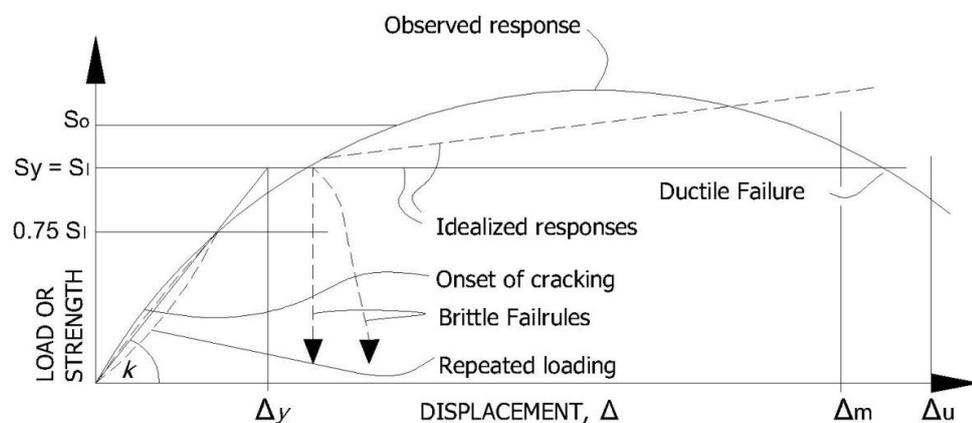
Beban pelat lantai pada jenis ini disalurkan ke empat sisi pelat atau ke empat belok pendukung, akibatnya tulangan utama pelat diperlukan pada kedua arah sisi pelat. Permukaan lendutan pelat mempunyai kelengkungan ganda.

D. Daktilitas

Daktilitas adalah kemampuan struktur atau komponen struktur untuk mengalami deformasi *inelastic* bolak – balik berulang setelah leleh pertama, sambil mempertahankan kekakuan dan kekakuan yang cukup untuk mendukung bebannya, sehingga struktur tetap berdiri walaupun sudah retak/rusak dan diambang keruntuhan. Menurut Parkk dan Paulay (1975) daktilitas merupakan kemampuan suatu struktur untuk mengalami lendutan yang cukup besar pada saat beban maksimal tanpa mengalami penurunan kekuatan yang berarti sebelum terjadi keruntuhan.

Faktor daktilitas struktur gedung μ adalah rasio antara simpangan maksimum struktur gedung akibat pengaruh Gempa Rencana pada saat mencapai kondisi di ambang keruntuhan (δ_m) dengan simpangan struktur gedung pada saat terjadinya pelelehan pertama (δ_y). Pada kondisi elastic penuh nilai $\mu = 1,0$. Tingkat daktilitas struktur dipengaruhi oleh pola retak

atau sendi plastis. 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 elastisnya. Sedangkan struktur bersifat daktail apabila struktur tidak langsung rusak namun berubah bentuk dulu secara plastis sampai batas tertentu dan akan rusak apabila batas plastisnya terlampaui. Menurut Park dan Paulay (1975), daktilitas struktur pelat beton bertulang dapat ditentukan dari rasio lendutan saat beban ultimit terhadap lendutan saat tulangan baja mulai leleh, sesuai gambar sebagai berikut ini.



Gambar 2. Grafik Beton terhadap Lendutan Pelat Beton Getas dan Daktail

Gambar 2 menunjukkan kurva beban terhadap lendutan suatu struktur yang bersifat getas dan daktail. Pada struktur yang bersifat daktail, terjadi lendutan plastis yang cukup besar sebelum runtuh. Sedangkan pada struktur yang bersifat getas, struktur akan segera runtuh setelah lendutan elastis maksimum terlampaui.

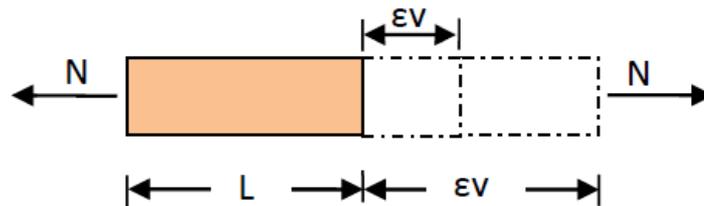
Menurut Paulay & Priestley (1992) daktilitas terbagi dalam:

1. Daktilitas Regangan (*Strain Ductility*)

Daktilitas regangan (μ_ϵ) adalah perbandingan regangan maksimum (ϵ_u) dengan regangan leleh (ϵ_y) pada balok yang mengalami beban aksial tarik atau tekan.

$$\mu_\epsilon = \frac{\epsilon_u}{\epsilon_y} \dots\dots\dots (9)$$

Seperti terlihat pada Gambar 3 berikut:



Gambar 3. Daktilitas Regangan

Dimana ϵ_u adalah total regangan yang terjadi dan ϵ_y adalah regangan pada saat leleh. Daktilitas yang sangat berpengaruh pada struktur dapat tercapai pada panjang tertentu pada salah satu bagian dari struktur tersebut. Jika regangan inelastik dibatasi dengan panjang yang sangat pendek, maka akan terjadi penambahan yang besar pada daktilitas regangan. Daktilitas regangan merupakan daktilitas yang dimiliki oleh material yang digunakan.

2. Daktilitas Kelengkungan (*Curvature Ductility*)

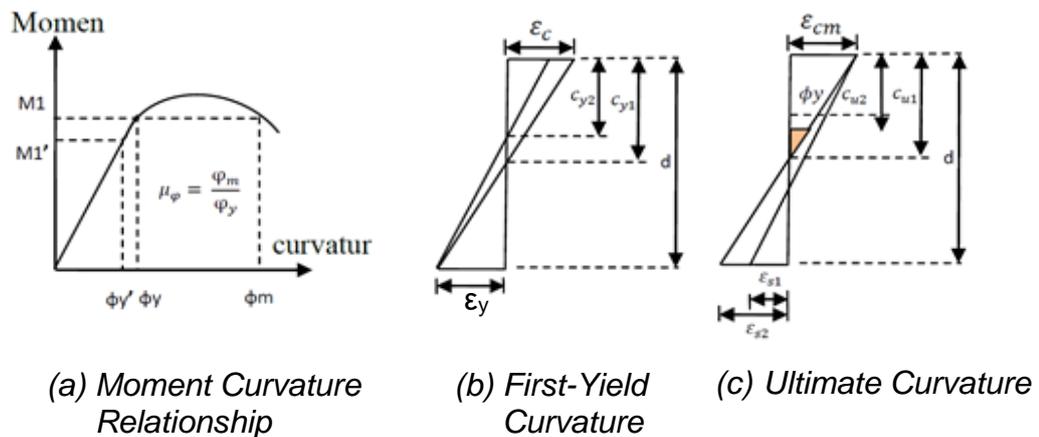
Daktilitas kelengkungan (μ_ϕ) adalah perbandingan antara sudut kelengkungan (putaran sudut per unit panjang) maksimum (ϕ_u) dengan

sudut kelengkungan leleh (ϕ_y) dari suatu elemen akibat gaya lentur.

Dimana ϕ = sudut klengkungan (putaran sudut per unit panjang)

$$\mu\phi = \frac{\phi_u}{\phi_y} \dots\dots\dots (10)$$

- *Yield Curvature.* Penentuan daktilitas rencana dapat dilihat dari hubungan daktilitas dan faktor reduksi. Hubungan tersebut dapat divariasikan dengan pendekatan hubungan gaya struktur dan lendutan pada keadaan elasto plastis atau bilinear. Hal ini menyebabkan kurva gambar 4 dapat diubah menjadi kurva gambar 6.



Gambar 4. Daktilitas Kelengkungan

Ini berarti bahwa *yield curvature* ϕ_y tidak perlu pertepatan dengan titik leleh pertama dari gaya regang, dimana pada umumnya berada pada titik yang lebih rendah ϕ_y' (Gambar 4(a)), pada kenyataannya jika gaya didistribusikan di seluruh bagian seperti yang terjadi pada

kasus kolom. Untuk kasus umum ini, *yield curvature* pertama c seperti yang diberikan pada Gambar 4(b) ditunjukkan dengan :

$$\Phi_y' = \frac{\varepsilon_y}{(d-c_y)} \dots\dots\dots (11)$$

Dimana $\varepsilon_y = f_y/E_s$ dan c_y adalah jarak dari luar ke natural-axis. Dengan mengekstrapolasi linear ke Momen M_1 , seperti Gambar 6(a), *yield curvature* ϕ_y ditunjukkan sebagai :

$$\Phi_y = \frac{M_1}{M_{1'}} \Phi_{y'} \dots\dots\dots (12)$$

Jika potongan tersebut memiliki rasio gaya yang tinggi, atau gaya aksial terpusat yang besar, gaya tekan tegangan yang terjadi dapat terjadi sebelum leleh pertama terjadi. Untuk kasus seperti ini *yield curvature* dapat diberikan sebagai :

$$\Phi_y' = \frac{\varepsilon_c}{c_y} \dots\dots\dots (13)$$

Dimana ε_c diambil sebesar 0,0015. Untuk hubungan antara Φ_y dan Φ_y' dengan $M_{1'} = 0,75 M_1$ dapat ditunjukkan sebagai :

$$\Phi_y = 1,33\Phi_y' \dots\dots\dots (14)$$

- *Maximum Curvature*. *Curvature* maksimum yang ada pada potongan, atau *Ultimate Curvature* yang lebih umum disebutkan, akan dikontrol oleh *compression strain* maksimum ε_{cm} pada serat terluar. Berdasar pada grafik Gambar 4(c), *curvature* ini dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\Phi_m = \frac{\varepsilon_{cm}}{c_u} \dots\dots\dots (15)$$

Dimana c_u adalah jarak garis netral pada saat *ultimate*.

- *Factors Affecting Curvature Ductility*. Ada beberapa faktor yang mempengaruhi *curvature ductility*. Faktor utama dari *curvature ductility* ini adalah *ultimate compression strain* ϵ_{cm} . Parameter lainnya adalah *axial force*, *compression strength*, dan *reinforcement yield strength*.
 - *Axial Force*. Seperti yang dilihat pada Gambar 4(b) dan 4(c), keberadaan gaya aksial dapat meningkatkan tinggi dari daerah tekan baik pada pelelehan pertama c_{y2} dan pada ultimate c_{u2} . Pada saat tekanan dengan kondisi tanpa gaya aksial (c_{y1} dan c_{u1}), gaya aksial meningkatkan nilai Φ_y , dan menurunkan nilai Φ_u . Sehingga, gaya tekan aksial dapat sangat mereduksi kapasitas daktilitas pada bagian tersebut. Sebagai hasilnya, memperkecil selimut beton sangat diharapkan pada bagian bawah kolom daktil. Kesimpulannya, keberadaan gaya tekan aksial dapat meningkatkan kapasitas daktilitas.
 - *Compression Strength*. Meningkatnya kuat tekan pada beton atau bata adalah lawan dari efek gaya aksial: jarak garis netral pada saat leleh dan *ultimate* kedua-duanya direduksi, sehingga terjadi reduksi *yield curvature* dan peningkatan *ultimate curvature*. Oleh karena itu, peningkatan kuat tekan

adalah cara yang efisien untuk meningkatkan kapasitas daktilitas.

- *Reinforcement Yield Strength*. Jika permintaan gaya regangan dilakukan dengan pengreduksian daerah gaya dari kuat leleh tertinggi, *ultimate curvature* tidak akan terpengaruhi jika tidak tegangan baja melebihi kekuatan tegangan *ultimate* terendah. Bagaimanapun juga, penambahan tegangan leleh ϵ_y berarti *yield curvature* akan bertambah.

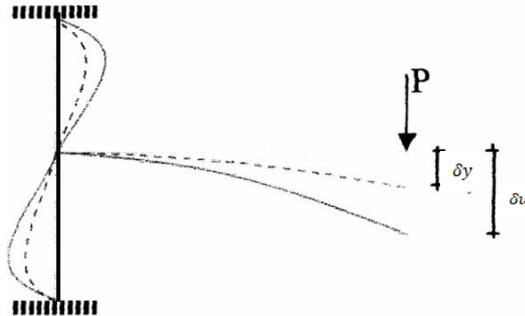
Untuk meningkatkan *curvature ductility*, hal yang dapat dilakukan adalah dengan memperkuat tulangan tekan atau memperlemah tulangan tarik. Jika dilihat dari Gambar 4, dengan memperlemah tulangan tarik, maka akan mempercepat terjadinya leleh pertama. Hal lain yang dapat dilakukan adalah dengan menambahkan tulangan geser.

3. Daktilitas Lendutan

Daktilitas Lendutan (μ_δ) adalah perbandingan antara perpindahan struktur maksimum (δ_u) arah lateral terhadap perpindahan struktur saat leleh (δ_y).

$$\mu_\delta = \frac{\delta_u}{\delta_y} \dots\dots\dots (16)$$

Seperti terlihat pada Gambar 5 berikut:



Gambar 5. Daktilitas Lendutan

Mengenai tingkatan daktilitas, Tata Cara Perencanaan Struktur Ketahanan Gempa untuk bangunan gedung SNI 1726:2019, mengklasifikasikan tingkat daktilitas sebagai berikut:

1. Daktail penuh adalah suatu tingkat daktilitas struktur gedung, di mana strukturnya mampu mengalami simpangan pasca-elastik pada saat mencapai kondisi diambang keruntuhan yang paling besar, yaitu dengan mencapai nilai faktor daktilitas sebesar 5,3.
2. Daktail parsial adalah seluruh tingkat daktilitas struktur gedung dengan nilai faktor daktilitas di antara untuk struktur gedung yang elastik penuh sebesar 1,0 dan untuk struktur gedung yang daktail penuh sebesar 5,3.
3. Elastik penuh adalah suatu tingkat daktilitas struktur gedung dengan nilai faktor daktilitas sebesar 1,0.

E. Hollow Core Slab

Hollow-core slab yang ditemukan sekitar tahun 1950-an adalah pelat beton yang memiliki berat 40-50 % lebih ringan dibandingkan pelat solid. Hal ini dikarenakan adanya lubang memanjang yang terbentuk dari cetakan

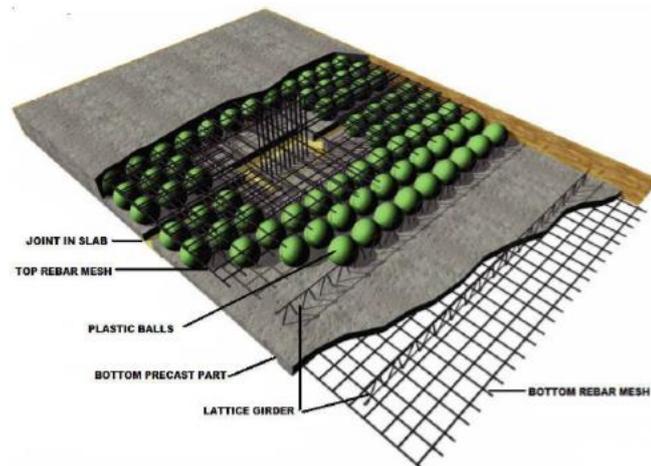
metode khusus pada saat pabrikan. Berdasarkan perhitungan, terdapat banyak volume beton pada pelat solid yang hanya menambah beban pelat saja. Maka dari itu, volume beton yang tidak terlalu diperlukan tersebut digantikan dengan lubang bulat memanjang. Namun demikian, pelat ini hanya berperilaku sebagai pelat satu arah.



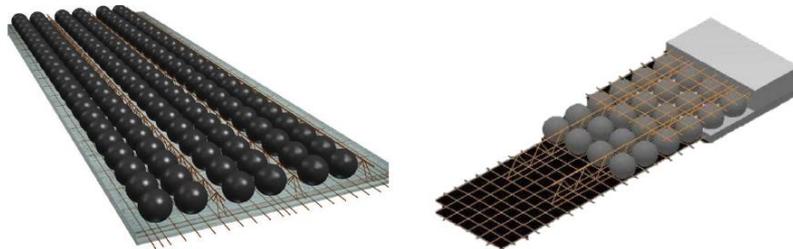
Gambar 6. *Hollow-core slab (Precast Buildcon India Ltd.)*

F. 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*).

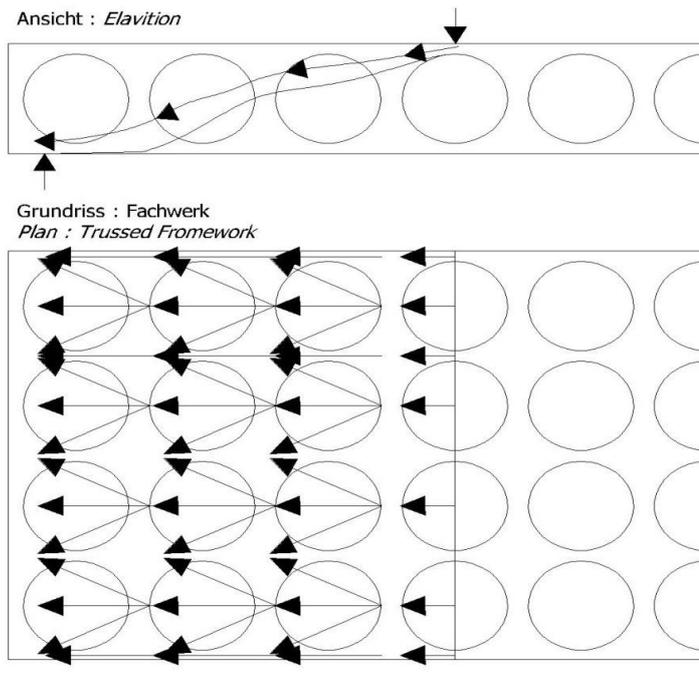


Gambar 7. *Bubble Deck* (Aldejohann dan Schnellenbach, 2003)

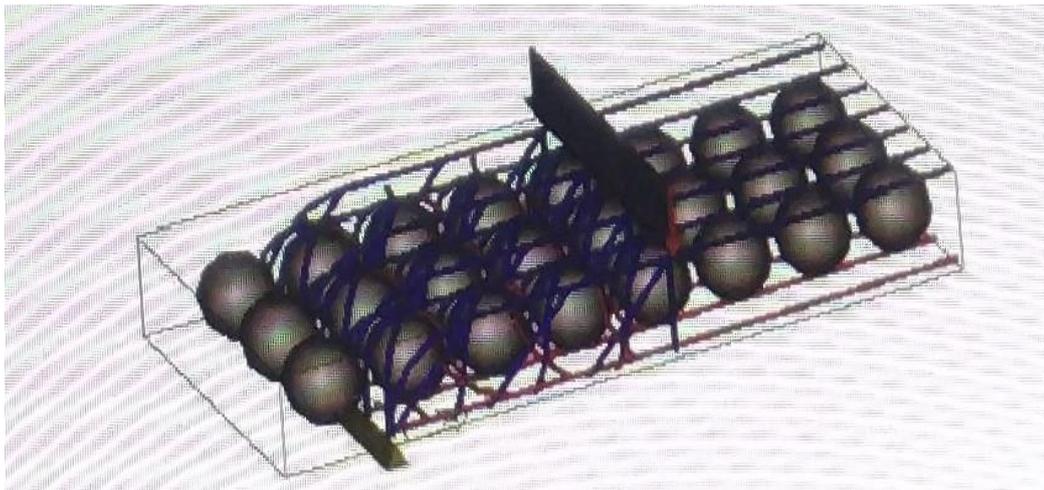


Gambar 8. *Bubble Deck* (*Betonwerk + Fertigteil Technik*, 10/2005)

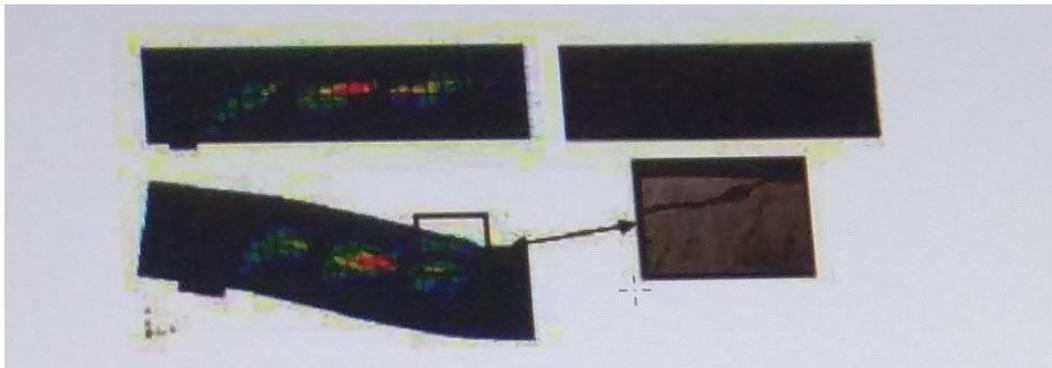
Pelat beton bertulang berongga bola dapat mendistribusikan gaya yang lebih baik dibandingkan *Hollow Core Slab*, dikarenakan bentuk tiga dimensi rongga dari struktur tersebut dapat menyebabkan aliran gaya bekerja lebih baik seperti yang terlihat dalam gambar 9 sampai gambar 11 sebagai berikut ini.



Gambar 9. Aliran Gaya pada Pelat Beton Bertulang Berongga Bola
 (Aldejohann dan Schnellenbach, 2002)



Gambar 10. Aliran Gaya 3D pada Pelat Beton Bertulang Berongga Bola
 (Aldejohann dan Schnellenbach, 2002)



Gambar 11. 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. di bawah ini.

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 Sama	Kekakuan lentur Sama	Volume Beton Sama
Kekuatan	100	105	150*
Kekakuan lentur	87	100	300
Volume Beton	66	69	100

* Dengan Kondisi jumlah tulangan yang sama

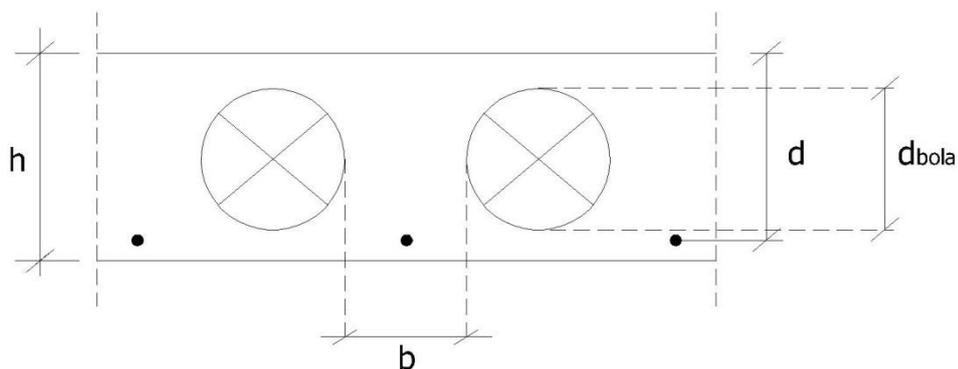
** “ *Bubble Deck Tesis and reports Summary* “ Issue 1 June 2006

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 test yang dilakukan *Eindhoven University of Technology* dalam “*Bubble Deck Tesis 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 12.



Gambar 12. 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.

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

Spesimen		HxBxL	b_{μ}	D_{μ}	d(mm)	F_{μ} (N/mm^2)
Series 1	MD450-V1	450x1650x480 0	-	-	1,70	395
	BD450-V1	450x1650x480 0	40mm	36 cm	1,70	395
	BD450-V2	450x1650x480 0	40mm	36 cm	1,70	395
	BD450-V3	450x1650x480 0	40mm	36 cm	1,70	395
Series 2	MD250-V1	250x820x2600	-	-	1,85	209
	BD250-V1	250x820x2600	20mm	18 cm	1,85	209
	BD250-V2	250x820x2600	20mm	18 cm	1,85	209
	BD250-V3	250x820x2600	20mm	18 cm	1,85	209

Tabel 3. Hasil Penelitian Aldejohann dan Schnellenbach Seri 1

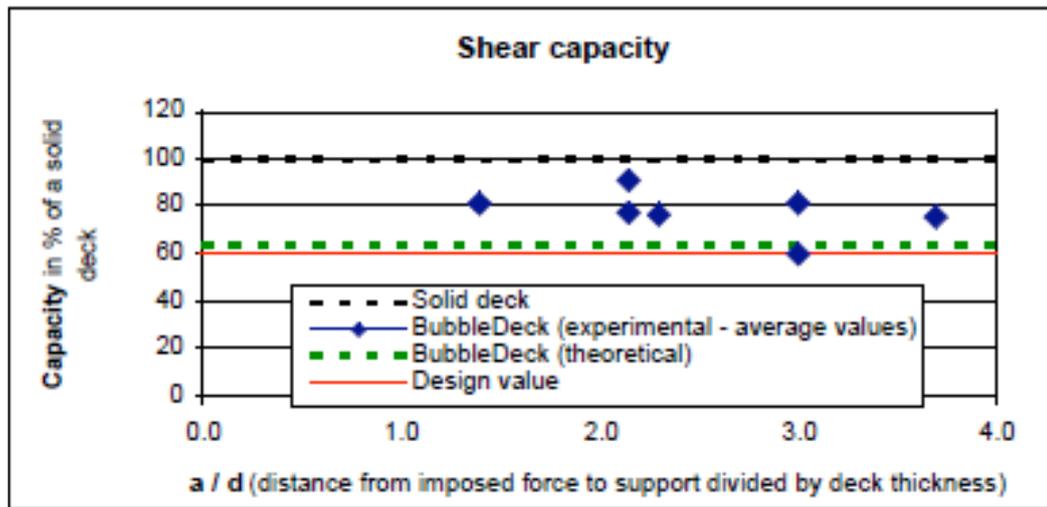
(Aldejohann dan Schnellenbach, 2005)

	MD 450 V-1	CB 450 V-1	CB 450 V-2	CB 450 V-3
Durchbiegung Deflection W maks (mm)	16.84	13.68	13.92	13.90
V_{angbak} $V_{\text{structure}}$ (KN)	16.86	16.86	16.86	16.86
Risslats V_{cr} Crack load V_{cr} (KN)	654	340	328	316
Risslast in % Von MD Crack Load in % of MD	100%	52%	50%	48%
Versagenlast V_{II} Failure load V_{II} (kN)	654	367	359	416
Versagenlast in % von MD failure load in % of MD	100%	56%	55%	64%

Tabel 4. Hasil Penelitian Aldejohann dan Schnellenbach Seri 2

(Aldejohann dan Schnellenbach, 2005)

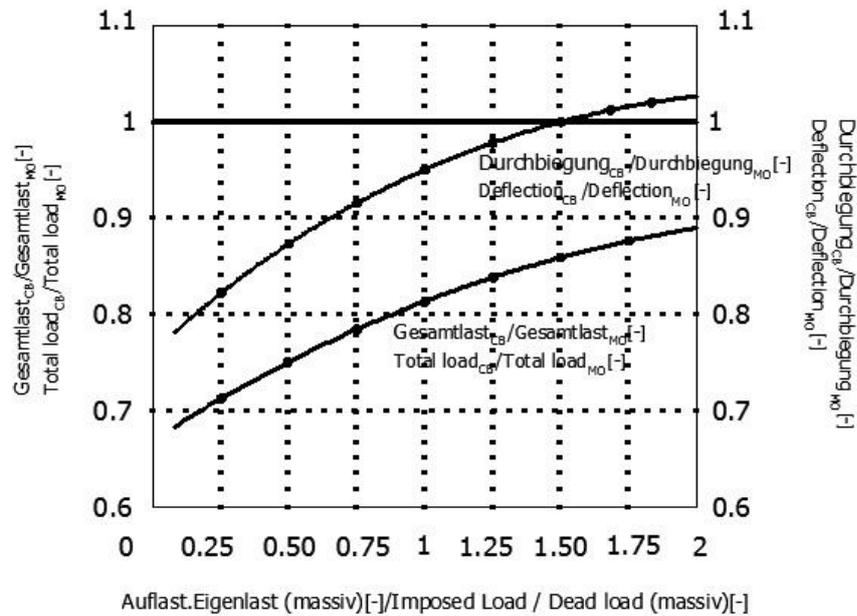
	MD 450 V-1	CB 450 V-1	CB 450 V-2	CB 450 V-3
Durchbiegung Deflection W maks (mm)	15.64	11.68	10.40	10.68
V_{angbak} $V_{\text{structure}}$ (KN)	6.47	6.47	6.47	6.47
Risslats V_{cr} Crack load V_{cr} (KN)	263	157	154	150
Risslast in % Von MD Crack Load in % of MD	100%	60%	60%	57%
Versagenlast V_{II} Failure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



Gambar 13. Grafik Kapasitas Geser Pelat Beton Bertulang Berongga Bola
 (“Bubble Deck Tesis and report Summary” Issue 1 June 2006)

3. Lendutan

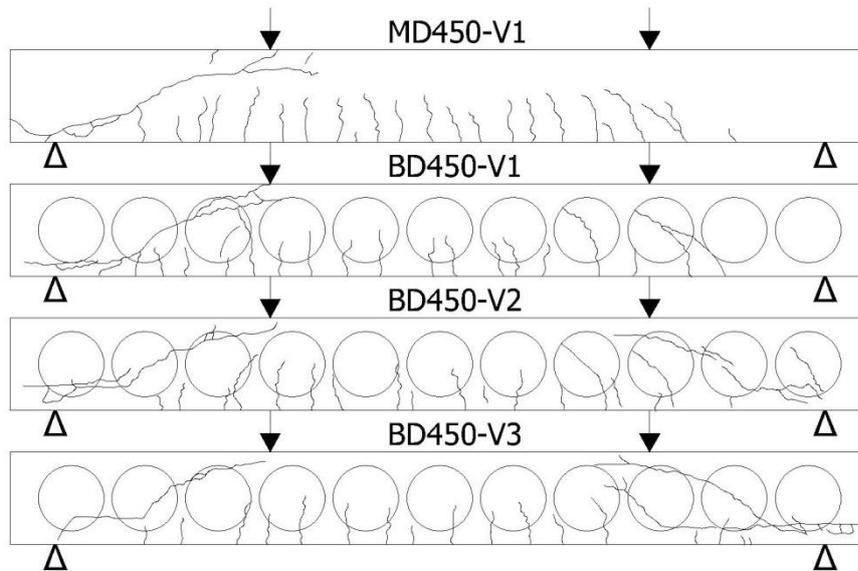
Berdasarkan grafik pada Gambar 14, lendutan pada pelat beton bertulang berongga bola lebih besar daripada pelat solid apabila ratio antara beban hidup terhadap beban mati sekitar 1,5 atau lebih. Dalam konstruksi bangunan gedung, ratio antara beban hidup terhadap beban mati biasanya lebih kecil dari 1,5 sehingga secara praktis dapat disimpulkan lendutan pelat beton bertulang berongga bola lebih kecil daripada pelat solid.



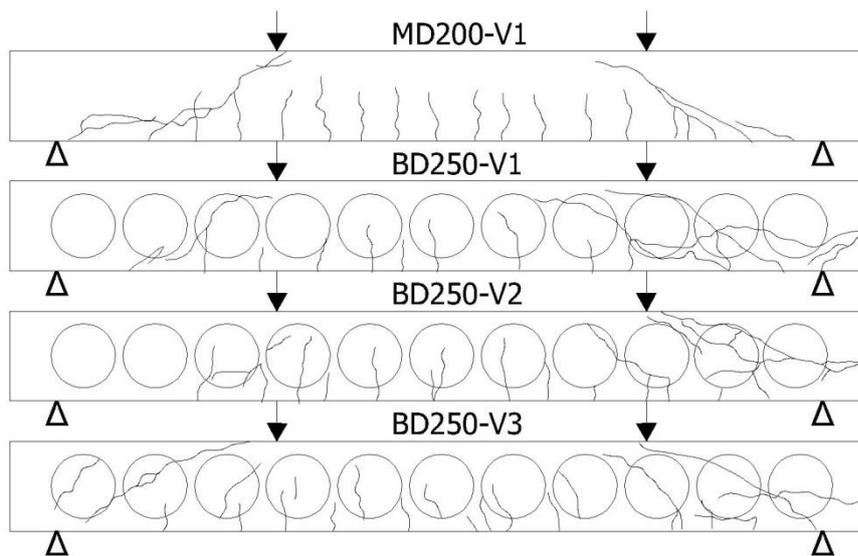
Gambar 14. Grafik Rasio Lendutan Pelat Beton Berongga Bola (CB) terhadap Pelat Beton Solid (MD) (Aldejohann dan Schnellenbach, 2005)

4. Pola Retak

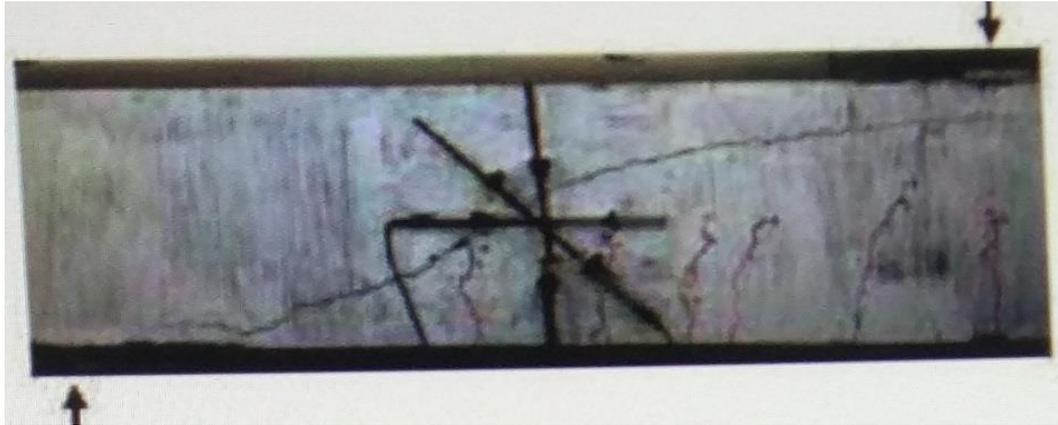
Pola retak yang terjadi pada benda uji pelat hasil penelitian Aldejohann dan Schnellenbach, (2003), secara jelas dapat dilihat pada Gambar 15 dan Gambar 16. Pada pengujian seri pertama, tebal benda uji pelat sebesar 450 mm yang terdiri dari pelat beton solid (MD-VI), pelat beton berongga bola *cast in-situ* (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 15. Pola Retak Benda Uji Seri 1 (Aldejohann dan Schnellbach, 2003)



Gambar 16. Pola Retak Benda Uji Seri 2 (Aldejohann dan Schnellbach, 2003)



Gambar 17. Retak pada Pelat MD 450-VI (Aldejohann dan Schnellenbach, 2003)



Gambar 18. 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 18.