

# Pengaruh Rasio Pembebanan Aksial Terhadap Perilaku Elastis-Plastis Rangka Perimeter Luar Sistem Struktur Tabung Dalam Tabung

Nasruddin, M.Yahya Siradjuddin, Wiwik Wahidah Osman, Abdul Mufti Radja

Staf Pengajar Jurusan Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin

## Abstrak

Penelitian ini bertujuan mendapatkan metode desain bangunan tahan gempa pada gedung dengan sistem struktur "tabung dalam tabung". Sistem struktur terdiri dari dua unsur pokok yaitu; inti (*core*) bangunan sebagai tabung dalam dan kolom-kolom berjarak sangat rapat yang diikat disetiap lantai dengan dinding spandrel sebagai tabung luar (perimeter luar). Kerapatan kolom dan kekakuan dinding spandrel membuat perimeter luar berperilaku sebagai tabung kantilever. Kombinasi kedua bagian ini dapat meningkatkan kekakuan bangunan secara keseluruhan terhadap gaya lateral, khususnya terhadap beban yang ditimbulkan akibat gempa bumi. Fokus penelitian pada tabung luar (perimeter luar) dengan rekayasa struktur rangka yang terbuat dari dinding spandrel sebagai komponen balok dan kolom beton pendek yang di-jaket-kan dengan tabung baja (*steel tube*) yang disebut *Tube Reinforced Concrete* (TRC) sebagai komponen kolom. Penelitian secara eksperimental terhadap rangka sudah dilakukan terhadap dua spesimen tes dengan program pembebanan. Penelitian ini fokus pada pengaruh rasio pembebanan aksial terhadap perilaku elastis-plastis dari rangka perimeter luar. Metode penelitian digunakan metode software analisis berbasis *Finite Element Metode* (FEM) disebut *Kawano Code*. Jenis pembebanan siklik statik untuk mensimulasi gerakan ayunan bangunan akibat gaya gempa. Variabel penelitian adalah beban aksial dengan tiga rasio pembebanan 0.12, 0.5, dan 0.8. yang dianggap mewakili posisi (*subassembly*) rangka bangunan pada tiga tempat, bagian bawah, tengah, dan atas. Hasil penelitian ini dapat menjadi *guidance* bagi perencana atau orang yang bergelut dalam dunia konstruksi bangunan gedung dalam merencanakan gedung dengan struktur tabung dalam tabung yang tanggap terhadap bencana gempa bumi.

**Kata-kunci** : sistem struktur tabung dalam tabung, perimeter luar, rasio pembebanan aksial, siklik statik.

## Pendahuluan

Struktur tabung dalam tabung (*Tube in Tube Structure*) adalah salah satu sistem struktur untuk bangunan tinggi, dikembangkan oleh *Fazlur Khan* dari *Skidmore, Owings & Merrill*. Bangunan-bangunan pencakar langit seperti *Hancock Building*, *Sear Building*, *Standard Oil Building di Chicago*, dan *World Trade Center* di New York adalah karya-karya dari *Fazlur Khan*. Konsep dasar sistem struktur ini adalah sistem struktur yang terdiri dinding inti (*core*) beton bertulang sebagai tabung interior dan rangka perimeter luar yang terdiri kolom berjarak sangat rapat diikat dengan dinding spandrel disetiap lantainya membentuk tabung eksterior. Fasade bangunan terlihat seperti dinding yang dilubangi (untuk jendela). Tabung interior maupun tabung eksterior berlaku sebagai tabung tertutup terkantilever di tanah, sehingga tambahan pengaku diagonal interior yang mahal

tidak diperlukan lagi. Sistem ini efisien dalam penggunaan bahan bangunan per kaki persegi hampir separuh dari jumlah yang digunakan untuk bangunan rangka kaku (Permadi, 2003).

Interaksi antara tabung interior dan tabung eksterior meningkatkan kemampuan sistem struktur bangunan dalam menahan gaya lateral. Meskipun sistem struktur ini termasuk paling efektif menahan gaya lateral, namun pada beberapa kasus kejadian gempa bumi yang besar, sistem struktur ini dapat mengalami kerusakan struktural yang hebat akibat eksitasi gempa, yaitu kalahnya tulangan fleksural pada daerah sendi plastis bagian bawah struktur dinding (Paulay, 1992).

Sedang untuk perimeter luar disebabkan terbentuknya kapasitas fleksural yang besar dari dinding spandrel yang didesain dengan bentang pendek, kemungkinan memicu gaya geser yang

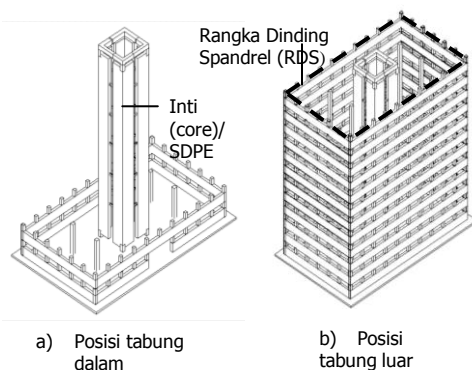
besar. Di sisi lain, kolom yang didesain berjarak sangat rapat memikul beban gravitasi yang kecil. Kurangnya beban tekan aksial yang signifikan pada kolom, terkombinasi dengan kehadiran fleksural tulangan dalam jumlah besar pada dinding spandrel memicu kerusakan hebat pada interior sambungan kolom dan dinding spandrel (Paulay, 1992).

Dari permasalahan yang timbul, sebuah sistem baru diusulkan dengan melakukan rekayasa struktur pada setiap komponen pembentuknya. Komponen tabung interior diperkenalkan rekayasa dinding geser ganda (*couple shear wall*) yang berbeda dengan dinding geser ganda konvensional. Pada sistem ini, dinding geser tidak ditanam langsung ke pondasi atau balok, layaknya pada dinding geser biasa, tetapi melalui empat pasang kolom beton bertulang pendek dibungkus selimut tabung baja untuk meningkatkan kemampuan gesernya. Kolom pendek ini disebut TRC (*Tube Reinforced Concrete*) (Nasruddin, 2011). Penerapan kolom TRC dilakukan juga pada tabung eksterior dengan mengkombinasikan kolom pendek TRC dengan dinding spandrel. Hal yang spesifik dari Sistem Rangka Pemikul Momen (SRPM)/*Moment Resting Frame* (MRF) adalah kolom TRC sengaja didesain untuk gagal lebih awal pada saat pembebanan siklik agar bisa berfungsi sebagai perangkat penyerap energy gempa (*passive damper*).

### Konsep Baru Struktur Tabung Dalam Tabung (STDT)

Sistem Struktur Tabung Dalam Tabung (STDT) yang baru berbeda dengan STDT pada umumnya. STDT baru seperti yang terlihat pada Gambar 1, sebuah konsep dimana seluruh deformasi pada STDT dijamin oleh tabung dalam dibuat dari struktur dinding geser ganda yang disebut Struktur Dinding Penyerap Energi (SDPE) (Nasruddin, 2013). Bentuk SDPE mirip struktur dinding geser ganda pada umumnya, kecuali pada elemen penyanggah dari panil dinding disebut kolom TRC (*Tube Reinforced Concrete*). Elemen dinding tidak ditanam langsung ke pondasi, tetapi hanya dihubungkan dengan dua pasang kolom pendek TRC yang terletak di atas dan di bawah dari dinding geser ganda. Keberadaan kolom TRC menghadirkan celah antara panil dinding dan pondasi/balok. Adanya celah memungkinkan SDPE mengembangkan mekanisme keruntuhan tanpa

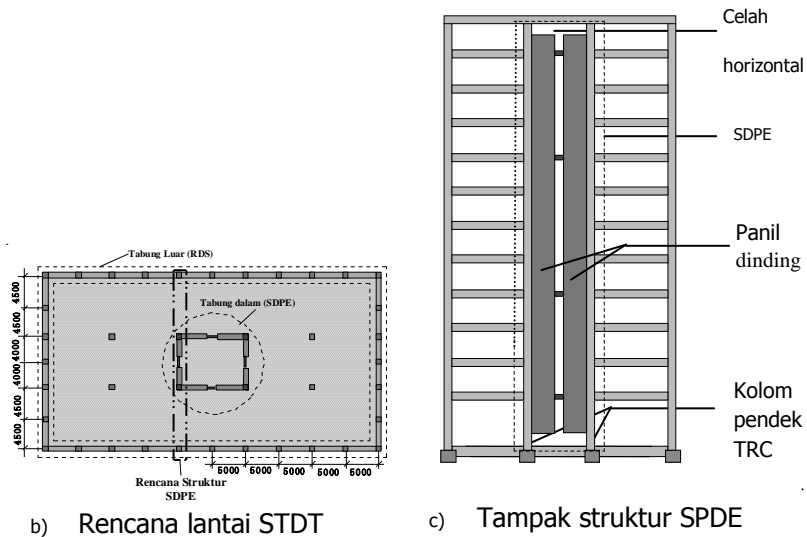
adanya kerusakan yang berarti pada permukaan panil dinding, umumnya terjadi pada struktur dinding geser biasa. Selain itu, perbedaan SDPE dengan dinding geser biasa terletak pada material balok kopling (*coupling beam*). Dinding geser ganda biasa balok kopling terbuat dari beton bertulang, pada SDPE balok koplingnya terbuat dari material baja *H-shape* yang berfungsi sebagai *hysteretic damper* memiliki kemampuan absorpsi energi gempa yang tinggi. SDPE diharapkan berperan untuk menahan momen guling (*overturning moment*) dari bangunan gedung secara keseluruhan akibat adanya beban lateral.



**Gambar 1.** Konsep baru Struktur Tabung Dalam Tabung (STDT)

### Tabung Dalam (Struktur Dinding Penyerap Energi)

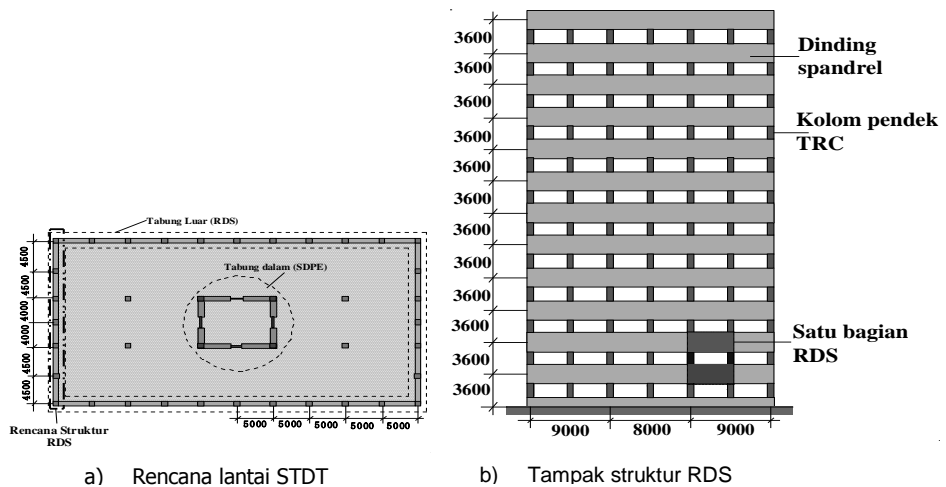
Sistem struktur dinding dimana panel-panel dinding dihubungkan atau dikopling satu sama lain dengan balok atau girder disebut struktur dinding geser ganda. Balok kopling memiliki kapabilitas mendisipasi energi gempa diseluruh bagian dari bangunan jika didesain dengan baik. Pada beberapa kasus gempa bumi besar, eksitasi seismik bisa menyebabkan kerusakan balok kopling dan retak fleksural daerah sendi plastis bagian bawah dari panel dinding beton bertulang. Agar mekanisme kerusakan seperti ini tidak terjadi, maka diusulkan alternatif sistem struktur dinding geser ganda yang mampu memecahkan persoalan cacat bawaan. Sistem dinding geser ganda ini disebut dengan Struktur Dinding Penyerap Energi (SDPE).



**Gambar 2.** Rencana Perletakan SDPE pada STDT

Spesimen tes diuji dengan kombinasi pembebanan siklik lateral dan gaya aksial yang konstan merupakan simulasi dari gaya gempa bumi. Untuk perekaman data pergeseran (*displacement*) secara horizontal maupun vertikal pada spesimen tes pada saat pembebanan digunakan alat *displacement transducer*. Perekaman regangan pada besi tulangan, pelat tabung baja, dan permukaan beton digunakan alat *strain gauge*. Pada penelitian ini variabel parameter adalah; ukuran, posisi, dan detail penulangan pada area pembebanan dari balok kopling.

Hasil pengujian lateral siklik pada spesimen SDPE menunjukkan spesimen berperilaku sangat lentur dan memiliki daya disipasi energi gempa yang cukup, dapat disimpulkan bahwa spesimen tes berperilaku cukup memuaskan dari sisi pandang tuntutan dasar dari sebuah sistem struktur yaitu kekakuan, kelenturan, dan daya disipasi energi gempa. Balok kopling baja dan detail pembesian pada area pembenaman menunjukkan kinerja memuaskan dengan kemampuan serapan energi cukup besar dan mengalami mekanisme leleh dalam rasio



**Gambar 3.** Rencana Perletakan RDS pada STDT

kemiringan sangat kecil tanpa memperlihatkan adanya kerusakan berarti pada balok kopling. Dapat disimpulkan bahwa balok kopling baja *H-shape* dapat berfungsi sebagai peredam pasif (*passive damper*).

**Tabung Luar (Rangka Dinding Spandrel)**

Pengujian satu bagian RDS terdiri dari sebuah model satu bentang dua lantai dengan skala 1/4 dilakukan dengan dua spesimen tes. Spesimen tes tersusun atas dinding spandrel beton bertulang dan kolom pendek TRC yang teruji dan terbukti mempunyai deformabilitas yang luar biasa (Tomii, 1989). Kolom TRC memiliki kemampuan menahan gaya geser sangat tinggi, kegagalan shear yang getas sangat sukar untuk terjadi. Pada mekanisme kegagalan plastis dari RDS, kolom TRC kalah dikedua ujungnya di mana bagian ini merupakan bagian dari kolom yang tidak terselimuti oleh tabung baja persegi. Tujuan dari eksperimen ini adalah untuk menguji perilaku elastis-plastis yang stabil dari RDS di bawah pembebanan siklik statik lateral.

**Metode**

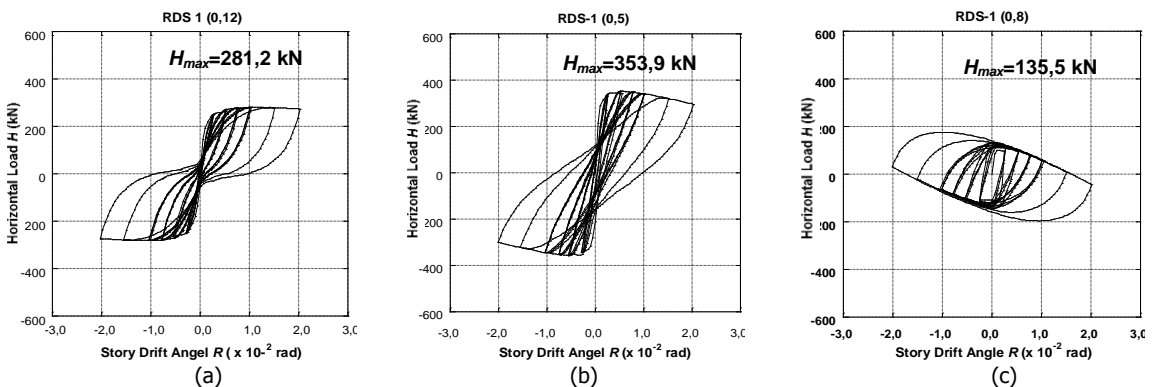
Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Material, Struktur, dan Konstruksi Bangunan Program Studi Arsitektur Jurusan Arsitektur, Universitas Hasanuddin. Penginputan data material: kuat tekan beton, kuat tarik baja, modulus elastisitas baja dan beton, poison ratio dan sebagainya ke dalam program mengacu pada data material yang diperoleh pada penelitian yang dilakukan secara eksperimental. Uji siklik statik pada spesimen tes RDS dilakukan menggunakan program metode analisis rangka, dikembangkan oleh Kawano (1998) disebut *Kawano Code*.

Metode ini mampu melakukan analisis bidang struktural Sistem Rangka Pemikul Momen (SRPM)/*Moment Resisting Frame* (MRF) yang terdiri elemen balok dan kolom, dimana geometri non-linier dan material non-linier diperhitungkan. Elemen kekakuan dihitung menggunakan integral *Gaussian*. Potongan melintang dari elemen balok-kolom diintegrasikan secara numerik dengan membagi potongan kedalam sejumlah lapisan yang disebut sebagai *stress fiber*.

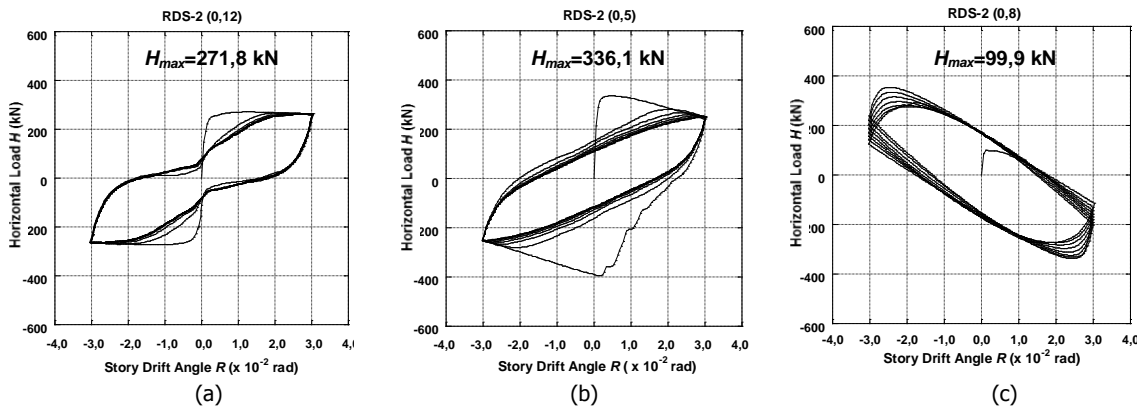
**Analisis dan Pembahasan**

**Spesimen Tes RDS-1**

Hasil analisis untuk spesimen tes RDS-1 terlihat pada Gambar 4. Dengan loading program yang secara gradual meningkat dengan *control displacement* terlihat bahwa peningkatan *horizontal strength* dari spesimen tes RDS-1 (0,12) secara gradual juga meningkat dengan  $H_{max}=281,2$  kN. Sampai dengan akhir pembebanan tidak terlihat adanya kecenderungan penurunan *horizontal strength*. Hasil yang berbeda ditunjukkan oleh specimen tes RDS-1 (0,5) dimana pada awal pembebanan terlihat *horizontal strength*-nya meningkat, tetapi pada pertengahan hingga akhir pembebanan terjadi penurunan *horizontal strength*. Hasil yang baik di tunjukkan oleh RDS-1 (0,5) dengan capaian *horizontal strength* tertinggi  $H_{max}=353,9$ kN. Spesimen tes RDS-1 (0,8) menunjukkan perilaku yang berbeda dengan nilai horizontal strength paling rendah yaitu  $H_{max}=135,5$ kN. Hal ini disebabkan karena tingkat kekakuan dari spesimen tes rendah akibat posisi spesimen tes dengan rasio pembebanan 0,8.



**Gambar 4.** Hasil Analisis Spesimen Tes RDS-1 Untuk Rasio Pembebanan Aksial 0,12, 0,5, 0,8



**Gambar 5.** Hasil Analisis Spesimen Tes RDS-2 Untuk Rasio Pembebanan Aksial 0,12, 0,5, 0,8

### Spesimen Tes RDS-2

Hasil analisis untuk specimen tes RDS-2 dapat dilihat pada Gambar 5. Dengan loading program yang ekstrim dengan cara memberikan pembebanan yang langsung ber-displacement besar 30 mm, memberikan perilaku mekanik yang berbeda dengan RDS-1. Horizontal strength untuk specimen tes RDS-2 (0,12) cenderung meningkat dan kemudian stabil pada *cycle* pertama dengan capaian horizontal strength sebesar  $H_{max}=271,8\text{kN}$ . Namun pada *cycle* kedua dan seterusnya terjadi penurunan horizontal strength secara gradual dengan *cycle* yang hampir berimpit (*piching*). Hal yang sebaliknya terjadi pada RDS-2(0,5), saat *cycle* pertama pada awal pembebanan terjadi peningkatan nilai *horizontal strength*, namun setelah itu terjadi penurunan. Selanjutnya pada *cycle* berikutnya terjadi penurunan horizontal strength secara gradual dengan selisih nilai yang sangat kecil sehingga *cycle*-nya cenderung berimpit (*piching*). Pada specimen tes RDS-2(0,8), *horizontal strength* sangat rendah dengan  $H_{max}=99,9\text{kN}$ . Hasil analisis menunjukkan specimen tes RDS-2 (0,5) memiliki horizontal strength paling tinggi dengan nilai  $H_{max}=336,1\text{kN}$ .

### Kesimpulan

Dari analisis yang dilakukan terhadap specimen tes RDS-1 dan RDS-2 dapatlah ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Pemberian loading program yang berbeda pada specimen tes RDS-1 dan RDS-2

memberikan perilaku mekanis yang berbeda. Hampir semua specimen tes pada RDS-1 terjadi peningkatan horizontal strength secara gradual, hal yang sebaliknya terjadi pada RDS-2. Selain itu nilai horizontal strength dari RDS-1 tinggi dari RDS-2.

2. Uji siklik pada kedua specimen tes RDS-1 dan RDS-2 dengan rasio pembebanan yang berbeda-beda juga memberikan perilaku mekanis yang berbeda-beda pula. Rasio pembebanan aksial 0,5 memberikan nilai horizontal strength yang tertinggi dan rasio pembebanan aksial 0,8 memberikan nilai horizontal strength yang terendah pada masing-masing specimen RDS01 dan RDS-2
3. Perilaku elastis-plastis dari rangka perimeter luar RDS jika rasio pembebanan aksial yang diberikan berbeda-beda akan memberikan perilaku mekanis yang berbeda pula .

### Daftar Pustaka

- Kawano A., Griffith, M.C., Joshi, H.R., and Warner, R.F., (1998): *Analysis of Behavior and Collapse of Concrete Frames Subjected to Seismic Ground Motion*, Department Civil and Environmental Engineering, The University of Adelaide, Research Report No. R163.
- L. Meng, K. Ohi, and K. Takanashi (1992): A Simplified Model of Steel Structure Members with Strength Deterioration for Earthquake Response Analysis, *Journal of Structural and Construction Engineering, AIJ*, No. 437, Hal. 115-124,.7. (dalam bahasa Jepang).
- M. Tomii, K. Sakino, Y. Sun, and J.L. Zhong (1989): *Experimental Study on Bending Shear of Reinforced Concrete Short Columns Encased in a Thin Steel Tube*, *Journal of the Japan Concrete Institute (JCI)*, Vol.11, No. 2, Hal 513-518,.6. (dalam bahasa Jepang).

- Nasruddin (2013): *Rekayasa Pada "Struktur Dinding Geser Ganda"*, Sebuah Upaya Dalam Meningkatkan Duktilitas Bangunan Gedung, Prosiding Temu Ilmiah Ikatan Peneliti Lingkungan Binaan Indonesia (IPLBI) 2013, Hal. E-19 – E-24.
- Nasruddin and Kawano (2012): *Elasto-Plastic Behavior Of Rc Frames Composed Of Tubed Reinforced Concrete Short Columns And Spandrel Walls, Proceedings of The International Symposium on Lowland Tecnology*, Bali Indonesia, Hal. 1030-1039.
- Nasruddin, Nakahara H., and Kawano A. (2011): *Design Method for Preventing Brittle Failures of Energy Dissipation Structural Walls, Journal of Habitat Engineering, Vol.3 No.1, Hal 1-10, Maret 2011*.
- Nasruddin, Sakino K., Nakahara H., and Matsubayashi H. (2010): *Punching Shear Strength of Edge Columns in Energy Dissipation Structural Walls (EDSWs), 4th International Conference on Steel & Composite Structures, Sydney Australia, Hal. 282 - 284*.
- Permadi (2003): *Sistem Struktur Tube In Tube Dan Penerapannya Pada Bangunan Tinggi*, Jurnal NALARs, Volume 2 Nomor 1 Januari 2003, Hal. 35-49.
- Paulay, T. and Priestley, M.J.N. (1992): *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings, John Wiley & Sons, New York*.
- Sakino K. and Yaskoshi K. (2010): *Studies on the double-tube Hybrid structure*, Proceedings of the Kyushu Branch of the Architectural Institute of Japan, No. 49, Hal. 557-564., (dalam bahasa Jepang).