



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENERAPAN STRUKTUR MAKHLUK HIDUP
KE DALAM
RANCANGAN STRUKTUR BANGUNAN**

SKRIPSI

**ZWESTIN GOMGOM WELFRY
0606076072**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM ARSITEKTUR
DEPOK
JUNI 2010**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENERAPAN STRUKTUR MAKHLUK HIDUP
KE DALAM
RANCANGAN STRUKTUR BANGUNAN**

SKRIPSI

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Arsitektur**

**ZWESTIN GOMGOM WELFRY
0606076072**

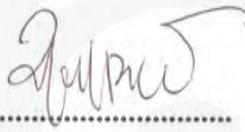
**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM ARSITEKTUR
DEPOK
JUNI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Zwestin Gomgom Welfry

NPM : 0606076072

Tanda Tangan : 

Tanggal : 28 Juni 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Zwestin Gomgom Welfry
NPM : 0606076072
Program Studi : Arsitektur
Judul Skripsi :

Penerapan Struktur Makhluk Hidup Ke Dalam Rancangan Struktur Bangunan

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Arsitektur pada Program Studi Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. A. Sadili Somaatmadja M.Si.

()

Penguji : Prof. Dr. Ir. Emirhadi Suganda M.Sc.

()

Penguji : Ir. Sukisno M.Si.

()

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 28 Juni 2010

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Arsitektur Jurusan Arsitektur pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Ir. Achmad Sadili Somaatmadja M.Si., selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (2) Prof. Dr. Ir. Emirhadi Suganda M.Sc. dan Ir. Sukisno M.Si. selaku penguji yang telah memberi banyak masukan saat sidang;
- (2) Ir. Hendrajaya Isnaeni, M.Sc, Ph. D selaku koordinator skripsi;
- (3) papa, mama, kakak, abang dan adik saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral;
- (4) para dosen Jurusan Arsitektur Fakultas Teknik Universitas Indonesia, terutama Yandi Andri Yatmo S.T., M.Arch., Ph.D. selaku dosen pembimbing akademis saya;
- (5) teman-teman baik saya, yaitu : Gemala Dewi, Dinastia Gilang, Chairunnisa, Sandra Devanny, Agnes Aulia, Siti Nur Ayu Agustina Rachman, dan Sherly Listiyanti yang sedikit banyak telah membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini;
- (6) teman-teman Jurusan Arsitektur Fakultas Teknik Universitas Indonesia, terutama angkatan 2006;
- (7) teman-teman SMA 14 : Ni Putu, Putu Ruminingsih, Purwita, 3 IPA 3, Rohkris 14 yang sedikit banyak telah mengisi kehidupan saya
- (8) terakhir namun yang paling penting kepada Yang Mahakuasa karena telah menciptakan makhluk hidup yang begitu luar biasa. Terima kasih Bapa

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 28 Juni 2010

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Zwestin Gomgom Welfry

NPM : 0606076072

Program Studi : Arsitektur

Departemen : Arsitektur

Fakultas : Teknik

Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas skripsi saya yang berjudul :

Penerapan Struktur MakhluK Hidup

Ke Dalam

Rancangan Struktur Bangunan

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas RoyaltiNoneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 28 Juni 2010

Yang menyatakan

(Zwestin Gomgom Welfry)

vii

ABSTRAK

Nama : Zwestin Gomgom Welfry
Program Studi : Arsitektur
Judul : Penerapan Struktur Makhluk Hidup Ke Dalam Rancangan Struktur Bangunan

Alam merupakan guru terbaik yang ada di dunia ini. Semua sumber pokok pengetahuan yang dimiliki oleh manusia berakar dari alam. Makhluk hidup merupakan bagian dari alam. Sudah menjadi rahasia umum bahwa struktur yang ada pada tiap makhluk hidup merupakan struktur ideal yang mendiami dunia.

Struktur kaku tumbuhan pohon dikotil yang terdiri dari satu batang utama mampu menopang berat tumbuhan secara keseluruhan yang semakin membesar ke atas. Struktur lengkung dan tipis cangkang hewan keong mampu menahan beban berupa serangan kepiting yang menimpa dirinya. Prinsip-prinsip utama dari struktur bangunan berupa kestabilan, keseimbangan, kekokohan dan kekuatan ada pada struktur makhluk hidup tersebut.

Karena alasan-alasan tersebutlah maka banyak desain-desain yang ada di dunia meniru desain struktur makhluk hidup. Banyak perancang yang menerapkan sistem struktur makhluk hidup pada struktur bangunan rancangannya. Para perancang berusaha untuk menerapkan struktur ideal yang dimiliki oleh makhluk hidup ke dalam struktur bangunan yang dirancangnya. Bandara Stuttgart dan Teater Keong Mas TMII merupakan beberapa contoh bangunan yang menerapkan sistem struktur makhluk hidup ke dalam rancangan struktur bangunannya.

Kata kunci:

Makhluk hidup, alam, struktur, pohon dikotil, cangkang keong.

ABSTRACT

Nama : Zwestin Gomgom Welfry
Program Studi : Architecture
Judul : Implementation of Living Things Structure Into The Design of Building Structures

Nature is the best teacher in this world. All the principal sources of knowledge that possessed by humans are rooted from nature. Living things are part of nature. It was common knowledge that the existing structure of each living thing is an ideal structure that inhabits the world.

Rigid structure of dicotyledonous trees consisting of one main stem which is able to sustain the overall weight of trees. Curved structures and thin shells of snails are able to withstand from the attacks that hit them. Principle main of the structures, such as stability, balance, solidity and strength exist in the structure of living things.

For that reasons, so many designs that exist in the world are imitating the design of living structure. Many architects implements the structure of living things to their building structures design. The designers tried to apply the ideal structure that possessed by living things into their building structures design. Stuttgart Airport and Theatre Keong Mas TMII are the examples of building that apply the structural system of living things into the design of the building structures.

Key words:

Living things, nature, structure, dicotyledonous trees, snail shell

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
LEMBAR PENGESAHAN	iv
KATA PENGANTAR	v
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	vii
ABSTRAK	viii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiv
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Batasan Permasalahan.....	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Metode Penelitian	4
1.6 Sistematika Penulisan	4
2. KAJIAN TEORI ALAM, ARSITEKTUR, STRUKTUR.....	6
2.1 Alam.....	7
2.2 Arsitektur dan Alam.....	8
2.3 Struktur dan Alam.....	10
2.4 Persyaratan Struktur.....	12
3. KAJIAN TEORI STRUKTUR MAKHLUK HIDUP	16
3.1 Tumbuhan Pohon	16
3.1.1 Perkembangan Tumbuhan Pohon	17
3.1.2 Sistem Struktur Pohon	19
3.1.2.1 Beban-beban yang Menimpa Pohon	19
3.1.2.2 Prinsip Struktural Pohon Dikotil.....	23
3.1.2.2 Elemen Struktur Pohon	28
3.2 Hewan Keong.....	33
3.2.1 Morfologi Hewan Keong.....	34
3.2.2 Sistem Struktur Keong.....	35
3.2.2.1 Cangkang Keong.....	35
3.2.2.2 Bentuk Cangkang Keong.....	36
3.2.2.3 Lapisan Cangkang Keong.....	36
3.2.2.3 Prinsip Struktural Cangkang Keong.....	38
4. STUDI KASUS	42
4.1 Terminal Bandara Stuttgart.....	42

4.1.1 Data Teknis	42
4.1.2 Deskripsi.....	43
4.1.3 Analisis Struktur Bangunan.....	44
4.1.4 Analisis Kolom Pohon Baja dan Struktur Pohon Alam.....	49
4.1.5 Kesimpulan	51
4.2 Teater Keong Mas TMII... ..	52
4.2.1 Data Teknis	52
4.2.2 Deskripsi.....	52
4.2.3 Analisis Bentuk Bangunan.....	55
4.2.4 Analisis Struktur Bangunan.....	56
4.2.5 Analisis Struktur Cangkang Keong Mas TMII dengan Cangkang Keong Alami.....	59
4.2.6 Kesimpulan.....	62
4.3 Hasil Analisis	63
5. KESIMPULAN	65
DAFTAR REFERENSI	67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Prinsip keseimbangan	12
Gambar 2.2	Prinsip keseimbangan jungkat-jungkit	13
Gambar 2.3	Prinsip kestabilan	14
Gambar 2.4	Prinsip kekakuan	15
Gambar 3.1	Pohon pakis pada periode karboniferus	17
Gambar 3.2	Pohon paku ekor kuda pada periode karboniferus.....	18
Gambar 3.3	Pohon paku kawat pada periode karboniferus	18
Gambar 3.4	Pohon berjenis monokotil	19
Gambar 3.5	Pohon berjenis dikotil	19
Gambar 3.6	Diagram beban statis yang terjadi pada pohon	20
Gambar 3.7	Lingkaran tahun pada potongan melintang batang pohon dikotil.....	21
Gambar 3.8	Pangkal batang sebagai bukti besar beban statis yang diterima ..	21
Gambar 3.9	Gerakan mengayun-ayun mahkota pohon ketika menerima beban dinamis	22
Gambar 3.10	Arah aliran gaya dalam menyalurkan beban	23
Gambar 3.11	Alur tumbang pohon	24
Gambar 3.12	Alur tumbang pohon	24
Gambar 3.13	Gerakan mengayun mahkota pohon ketika menerima beban.....	25
Gambar 3.14	<i>Sinker roots</i> menahan pohon agar tidak naik ke atas (stabil)....	27
Gambar 3.15	Lebar akar pohon lebih lebar atau sama dengan lebar mahkota pohon.....	28
Gambar 3.16	Elemen struktur pohon.....	28
Gambar 3.17	Bagian-bagian akar tunggang	29
Gambar 3.18	Hewan siput atau keong (<i>snail</i>) yang memiliki cangkang luar...	34
Gambar 3.19	Hewan siput (<i>slug</i>) yang tidak memiliki cangkang luar.....	34
Gambar 3.20	Morfologi hewan keong	34
Gambar 3.21	Jenis-jenis cangkang keong	36
Gambar 3.22	Lapisan-lapisan cangkang keong	38
Gambar 3.23	Lapisan-lapisan cangkang keong dan fungsi tiap lapisan	39
Gambar 3.24	Retakan pada lapisan terluar cangkang keong	40
Gambar 3.25	Aliran gaya pada cangkang keong	41
Gambar 4.1	Terminal Bandara Stuttgart	42
Gambar 4.2	Bagian dalam terminal Bandara Stuttgart	43
Gambar 4.3	Potongan terminal Bandara Stuttgart	44
Gambar 4.4	Substruktur pohon baja dan penggabungan keempat substruktur pohon baja	45
Gambar 4.5	Satu struktur pohon baja menopang satu atap tunggal	45
Gambar 4.6	Satu struktur pohon baja menopang satu atap tunggal	46

Gambar 4.7	Sambungan penjepit sendi antara subcabang struktur pohon baja dan kisi balok	46
Gambar 4.8	Sambungan penjepit sendi antara subcabang struktur pohon baja dan kisi balok	46
Gambar 4.9	Aliran gaya pada struktur pohon baja	47
Gambar 4.10	Analisis aliran gaya pada struktur pohon baja yang tidak digabung.....	47
Gambar 4.11	Struktur pohon baja sebagai struktur <i>third-order</i>	48
Gambar 4.12	Struktur pohon baja membentuk suatu susunan segitiga	48
Gambar 4.13	Perbedaan struktur pohon alami dengan kolom pohon baja.....	49
Gambar 4.14	Analisis jika subcabang kolom pohon baja memiliki sifat fleksibel	50
Gambar 4.15	Teater Keong Mas TMII	52
Gambar 4.16	Areal Teater Keong Mas TMII	54
Gambar 4.17	Jenis struktur cangkang Keong Mas TMIII serupa keong berjenis cangkang <i>sinitral</i>	55
Gambar 4.18	Perbedaan bagian dalam cangkang Keong Mas TMII dengan cangkang keong alami	56
Gambar 4.19	Jenis-jenis struktur <i>shell</i> (a) struktur <i>shell</i> rotasi, (b) atruktur <i>shell</i> hipernolis. (c) struktur <i>shell</i> kurva tunggal	56
Gambar 4.20	Jenis-jenis struktur <i>shell</i> yang ada pada struktur cangkang Keong Mas TMII	57
Gambar 4.21	Gambar potongan Keong Mas TMII	57
Gambar 4.22	Tes pembebanan pada bangunan Keong Mas TMII	58
Gambar 4.23	Konstruksi bangunan Keong Mas TMII	59
Gambar 4.24	Beton penyusun struktur shell dan baja pada kanopi lobi	59
Gambar 4.25	Beton penyusun struktur shell dan baja pada kanopi lobi.....	59
Gambar 4.26	Beton penyusun struktur shell dan baja pada kanopi lobi	59
Gambar 4.27	Garis lengkung pada struktur cangkang keong alami dan struktur cangkang Keong Mas TMII	60
Gambar 4.28	Garis lengkung pada struktur cangkang keong alami dan struktur cangkang Keong Mas TMII	60
Gambar 4.29	Garis lengkung pada struktur cangkang keong alami dan struktur cangkang Keong Mas TMII	60

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Perbandingan Kolom Pohon Baja dan Struktur Pohon Alami.....	63
Tabel 4.2 Perbandingan Cangkang Keong Mas TMII dan Cangkang Keong Alami.....	64

BAB I PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Alam merupakan guru terbaik yang ada di dunia ini. Semua sumber pokok pengetahuan yang dimiliki oleh manusia berakar dari alam.¹ Alam sebagai lingkungan pertama manusia merupakan sumber mula-mula dari pengetahuan lainnya dan merupakan subjek dari pemikiran manusia tentang hubungannya dengan yang lainnya.² Menurut buku *Evolutionary Architecture*, alam merupakan dasar dari seorang perancang melakukan suatu perancangan. Arsitektur tidak akan pernah ada tanpa adanya hubungan yang kuat dengan alam. Oleh karena itu, segala hal yang telah dilihat dan dirasakan oleh seorang perancang dari alam dijadikan acuan untuk membuat suatu rancangan.

Makhluk hidup merupakan bagian dari alam. Setiap makhluk hidup yang ada di alam ini, baik itu manusia, hewan dan tumbuhan memiliki ciri-ciri yang khusus dan unik pada setiap bentuk dan struktur yang membentuk tubuhnya. Struktur yang ada pada tiap makhluk hidup tersebut memiliki kestabilan, keseimbangan, dan kekokohan dalam menopang berat tubuh mereka. Kestabilan, keseimbangan dan kekokohan itu terbentuk karena struktur makhluk hidup yang ada di alam ini telah mengalami evolusi dalam kurun waktu yang sangat lama dan mampu melewati rintangan dalam beradaptasi dengan lingkungannya. Sebagai contohnya, yakni manusia yang memiliki struktur tubuh yang terdiri dari rangka kaki, tangan, rusuk dan tempurung kepala mampu menopang berat tubuh manusia yang dapat mencapai beratus kilo. Selain itu, struktur tubuh manusia memiliki persendian yang mampu membuat manusia menggerakkan setiap anggota tubuhnya.

¹ Crowe, Norman. *Nature and the idea of a man-made world*, (Cambridge: MIT Press, 1995), hlm.4.

² Ibid

Dari organisme tumbuhan, struktur tumbuhan berupa pohon dikotil yang terdiri dari akar dan satu batang utama mampu menopang berat pohon dikotil secara keseluruhan yang semakin membesar ke atas. Dari organisme hewan, struktur hewan berupa keong memiliki cangkang yang mampu melindungi tubuh lunaknya dari serangan predator. Walaupun memiliki struktur cangkang yang bersifat tipis, cangkang keong mampu menahan pukulan capit kepiting.

Melalui contoh-contoh makhluk hidup yang ada di alam inilah, para perancang pun mulai berpikir untuk membuat struktur bangunan yang mengadaptasi struktur makhluk hidup. Tulisan ini akan membahas bangunan-bangunan yang rancangan strukturnya mengadaptasi struktur makhluk hidup yang ada di alam.

1.2 PERMASALAHAN

Alam telah banyak memberikan manfaat bagi manusia di berbagai bidang ilmu. Di dalam ilmu kesehatan, alam telah banyak memberikan manfaat salah satunya berupa penggunaan tumbuh-tumbuhan untuk diolah menjadi obat penyembuh rasa sakit. Di dalam penerapan ilmu fisika, telah ditemukan pembangkit listrik tenaga air yang memanfaatkan potensi alam berupa air sungai dan air danau. Lalu bagaimana pengaruh alam di bidang ilmu arsitektur? Di dalam ilmu arsitektur pun, alam merupakan dasar ilmu bagi seorang arsitek untuk melakukan perancangan. Salah satu peran alam di dalam bidang arsitektur adalah penerapan bentuk struktur makhluk hidup ke dalam rancangan struktur bangunan.

Telah banyak bangunan di dunia yang memiliki bentuk struktur yang menyerupai bentuk struktur makhluk hidup. Namun permasalahan yang penulis ingin ketahui adalah:

1. Apakah bangunan yang memiliki bentuk struktur bangunan yang menyerupai dengan bentuk struktur makhluk hidup juga memiliki sifat struktur yang menyerupai dengan sifat struktur makhluk hidup?
2. Apakah struktur makhluk hidup cocok diterapkan kedalam rancangan struktur bangunan?
3. Bagaimana penerapan struktur makhluk hidup ke dalam rancangan struktur bangunan?

4. Apa keuntungan yang didapat dari penerapan struktur makhluk hidup ke dalam rancangan struktur bangunan?

Beberapa pertanyaan inilah yang akan coba dijawab oleh penulis.

1.3 BATASAN PERMASALAHAN

Penulisan ini membahas tentang pengadaptasian sistem alam di dalam bidang ilmu arsitektur khususnya di dalam bidang penerapan struktur makhluk hidup ke dalam rancangan bangunan. Struktur makhluk hidup terdiri dari tiga yaitu struktur tumbuhan, hewan, dan manusia. Namun tulisan ini hanya akan membahas struktur makhluk hidup berupa tumbuhan dan hewan. Struktur makhluk hidup berupa manusia tidak akan dibahas sebab bangunan yang menerapkan bentuk struktur manusia masih sangat terbatas.

Struktur tumbuhan yang akan di analisis adalah tumbuhan pohon dikotil sedangkan struktur hewan yang akan di analisis adalah struktur cangkang hewan keong. Tulisan ini akan membandingkan struktur makhluk hidup berupa pohon dikotil dan cangkang keong dengan struktur bangunan yang memiliki bentuk menyerupai struktur pohon dikotil dan cangkang keong. Selain itu juga akan dibahas tentang kestabilan penerapan struktur makhluk hidup tersebut ke dalam rancangan struktur bangunan.

1.4 TUJUAN PENELITIAN

Penulisan ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh alam pada bidang arsitektur khususnya terhadap penerapan rancangan struktur makhluk hidup ke dalam rancangan struktur bangunan. Selain itu penulisan skripsi ini juga bertujuan untuk mengetahui apakah bangunan yang memiliki bentuk struktur menyerupai dengan struktur makhluk hidup juga memiliki sifat struktur yang sama dengan sifat struktur makhluk hidup. Di samping itu juga, tulisan ini ingin mengetahui kestabilan, keseimbangan, kekokohan dan kekuatan penerapan struktur makhluk hidup ke dalam rancangan struktur bangunan.

Untuk memperjelas tentang penulisan ini, diberikan contoh bangunan yang menerapkan struktur makhluk hidup yang ada di alam, yaitu bangunan yang

menerapkan struktur hewan berupa cangkang keong dan struktur tumbuhan berupa pohon dikotil. Harapan saya, tulisan ini bisa menambah referensi tentang pengadaptasian alam pada bidang arsitektur khususnya di dalam bidang rancangan struktur bangunan.

1.5 METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang dilakukan adalah penelitian deskriptif analitis, sedangkan pendekatan penelitian adalah kualitatif. Kemudian, dianalisis guna mendapatkan hasil penelitian berupa jawaban pertanyaan penelitian. Penelitian dilakukan secara deskriptif analitis guna mengetahui penerapan struktur makhluk hidup ke dalam rancangan struktur bangunan. Data-data diperoleh dari buku-buku referensi, makalah-makalah, penulisan ilmiah, dan internet.

1.6 SISTEMATIKA PENULISAN

Dalam skripsi ini penulis membagi pembahasannya dalam beberapa bagian. Bagian-bagian tersebut sebagai berikut:

BAB I Pendahuluan

Bagian pertama berisi tentang latar belakang, permasalahan, batasan permasalahan, tujuan penelitian, metode penelitian dan sistematika penulisan.

BAB II Kajian Teori Alam, Arsitektur dan Struktur

Bagian ini akan membahas lebih lanjut mengenai kajian-kajian teori tentang alam, hubungan arsitektur dan struktur dengan alam sebagai dasar dari suatu perancangan, serta persyaratan struktur yang baik bagi suatu bangunan.

BAB III Kajian Teori Struktur Makhluk Hidup

Bagian ini akan menganalisis karakteristik struktur makhluk hidup berupa tumbuhan pohon dikotil dan cangkang hewan keong serta penganalisaan beban-beban yang menimpa struktur tersebut.

BAB IV Studi Kasus

Bagian ini akan mengambil contoh bangunan yang menerapkan sistem struktur makhluk hidup ke dalam rancangan struktur bangunan kemudian akan dibandingkan dengan struktur makhluk hidup yang ditiru. Lalu akan dianalisis tentang kestabilan, kekokohan, keseimbangan dan kekuatannya. Bangunannya terdiri dari dua bangunan, masing-masing merupakan perwakilan dari bangunan yang menggunakan struktur cangkang hewan keong dan tumbuhan pohon dikotil.

BAB V Kesimpulan dan Saran

Hasil pemikiran akhir dari seluruh bab yang sudah dibahas.

BAB II
KAJIAN TEORI
ALAM, ARSITEKTUR DAN STRUKTUR

Makhluk hidup menyatakan keberadaannya di dunia ini dengan membuat tempat untuk bernaung. Untuk membuat tempat bernaung tersebut, makhluk hidup berupa organisme-organisme yang ada di alam telah dikaruniai dari lahir dengan intuisi yang tepat dalam menentukan lokasi tempat naungannya, material yang akan digunakan untuk membuat naungan, dan bagaimana material tersebut disusun menjadi suatu struktur yang akan ditempati. Namun berbeda dengan manusia, manusia tidak memiliki kemampuan tersebut. Manusia harus mempelajari pengetahuan akan desain dan konstruksi sebelum membuat tempat naungannya. Untuk mempelajari bagaimana cara membangun, manusia harus mengetahui sumbernya terlebih dahulu.

Eugene tsui dalam bukunya *Evolutionary Architecture: Nature As A Basis For Design*, memberikan pernyataan sebagai berikut “*Condense the estimated existence of the planet (5 billion years) into a single year. If human beings first emerged 3 to 5 million years ago, then compared to the lifetime of the planet, we will have existed for about 1 hour and 50 minutes. If we then agree that human culture has existed for about 10000 years, then we will existed as a “cultured” species for approximately 13 seconds*”³. Dari pernyataan tersebut, disimpulkan bahwa keberadaan alam lebih dulu ada sebelum manusia. Oleh karena itu, pengetahuan manusia yang diumpamakan sebagai menit sangat terbatas bila dibandingkan dengan alam yang telah mengalami perjalanan panjang dalam melewati berbagai macam rintangan. Dengan pengetahuan yang terbatas tersebut, manusia berusaha mengembangkan kehidupannya dengan cara belajar dari alam, mensarikan yang ia pelajari, kemudian menerapkan apa yang ia pelajari ke dalam kehidupannya.

³ Eugene Tsui. *Evolutionary Architecture: Nature As A Basis For Design* (Kanada: John Wiley & Sons,1997), hlm. 4.

Telah banyak penelitian tentang penerapan alam yang dilakukan oleh manusia khususnya pada bidang arsitektur. Eugene tsui, Santiago Calatrava, Von Gerkan adalah beberapa contoh nama arsitek yang menerapkan sistem alam ke dalam rancangan bangunannya. Eugene Tsui dengan rancangannya, Tsui house atau lebih dikenal dengan *The Fish House*, menerapkan bentuk dan sifat binatang tardigrade ke dalam rancangan bangunannya. Santiago Calatrava dengan rancangannya, Stasiun Orient Lisboa, menerapkan bentuk struktur tumbuhan pohon dikotil. Begitu juga dengan Von Gerkan dengan rancangannya, Terminal Bandara Stuttgart, menerapkan bentuk struktur pohon dikotil sebagai bentuk struktur penopang atap bandara.

2.1 ALAM

Alam memiliki pengertian yang sangat luas. Di dalam sejarah peradaban manusia, perbincangan tentang alam telah menjadi pokok permasalahan yang sangat sering diperbincangkan. Jika dilihat berdasarkan asal katanya, kata alam berasal dari kata Latin “*natura*” dan secara harfiah berarti kelahiran.⁴ “*Natura*” adalah terjemahan Latin dari kata Yunani “*physis*”, yang berhubungan dengan tanaman, hewan, dan fitur lain dari dunia yang berkembang atas kemauan mereka sendiri.⁵

Menurut kebudayaan kuno Indian yang berada di bagian utara, selatan dan meso Amerika, alam bukan benda yang tidak bernyawa. Alam dikaruniai oleh suatu kehidupan yang terdiri dari air, tanah, gunung, pohon, tumbuhan, binatang dan manusia.⁶ Unsur-unsur di alam yang menempati bumi ini kemudian membentuk suatu rangkaian kesatuan raga dan jiwa untuk dapat mempertahankan perannya di dalam menjalankan kehidupan. Menurut pandangan Barat, alam semesta dibagi menjadi dua kategori, organik, melibatkan makhluk hidup seperti

⁴ Wikipedia. Alam. <http://en.wikipedia.org/wiki/Alam> (Maret 2010)

⁵ Ibid

⁶ Muench, David dan Donald G. Pike. *Anasazi: Ancient People of the Rock*. With a foreward by Frank Waters. Palo Alto, (California: American West Publishing Company, 1975), hlm. 11.

manusia, tumbuhan dan binatang, dan anorganik atau bukan benda hidup seperti daratan, tanah, air, batu dan tambang. Unsur-unsur organik tersebut kemudian berkembang dan mengalami penyesuaian diri dengan unsur-unsur anorganik yang ada di sekitarnya. Menurut pemikiran ahli-ahli di zaman Yunani, “*Nature was a vast living organism, consisting of a material body spread out in space and permeated by movements in time, the whole body was endowed with life so that all its movements were vital movements, and all its movements were purposive, directed by intellect*”.⁷ Makhluk hidup yang tersebar dan menghuni permukaan bumi tersebut diberkahi suatu akal untuk mengatur tubuhnya sesuai dengan apa yang diinginkan. Oleh karena itu, di dalam melakukan pergerakan seperti membuat batasan di bumi sebagai tempat bernaung, makhluk hidup tersebut tidak hanya melakukan pergerakan yang asal dan terus-menerus namun pergerakan yang cerdas dan teratur. Makhluk hidup yang bergerak secara cerdas dan teratur tersebut kemudian menyesuaikan diri dengan unsur-unsur lain yang ada di alam semesta. Selama 3,8 milyar tahun, mereka berjuang melewati rintangan yang berasal dari unsur-unsur lain yang ada di alam semesta itu sendiri, menghadapi masalah yang manusia hadapi sekarang dalam arsitektur (struktur, warna, pemanasan dan pendinginan) dan telah mengembangkan energi dan material yang efisien untuk menyelesaikan solusi demi bertahan hidup.

2.2 ARSITEKTUR DAN ALAM

Arsitektur lahir dari dinamika antara kebutuhan (kebutuhan kondisi lingkungan yang kondusif, keamanan) dan cara (bahan bangunan yang tersedia, struktur yang dipakai dan teknologi konstruksi). Saat kondisi sekitar sudah tidak bersahabat lagi, manusia harus memiliki sebuah tempat perlindungan yang mampu melindungi dari kondisi cuaca seperti panas terik, angin dan hujan. Untuk membuat tempat perlindungan tersebut, diperlukan suatu gagasan atau ide yang akan diwujudkan menjadi hasil karya nyata yang dilakukan secara sadar (bukan berdasarkan naluri). Semua itu harus dilewati dengan proses pembelajaran.

⁷ Collingwood RG. *The Idea of Nature* (Oxford: Clarendon Press, 1945), hlm. 111.

Menurut Eugene Tsui dalam bukunya yang berjudul *Evolutionary Architecture: Nature As A Basis For Design*, “Architecture may be defined as the art that goes back to the origins-to nature itself”.⁸ Kata arsitektur sendiri berasal dari kata Yunani yaitu “arch” yang berarti pertama atau asli dan “tect” yang berarti kemampuan menempatkan berbagai macam material secara bersama. Hal ini berarti arsitektur menyatakan secara tidak langsung bahwa desain berasal dari alam sehingga dalam proses pembelajaran akan merancang, manusia cenderung hidup dengan belajar dan meniru desain-desain yang ada di alam (*Aristoteles statement : Man imitates nature*)

Umumnya desain-desain yang ditiru di alam oleh manusia adalah desain-desain makhluk hidup yang ada di alam seperti tumbuhan, binatang dan manusia. Alasan meniru makhluk hidup sebagai model dalam mendesain karena desain makhluk hidup telah mengalami percobaan dan kesalahan dalam menjalani hidup sehingga bentuk yang dimiliki oleh makhluk hidup yang ada sekarang merupakan bentuk yang sempurna yang telah diuji kestabilan, keseimbangan dan kekuatannya. Alasan lain menjadikan alam sebagai model dalam desain dan pencarian solusi, adalah:⁹

1. Alam menggunakan cahaya alami
2. Alam hanya menggunakan energi yang dibutuhkan
3. Alam menyesuaikan bentuk dengan fungsi
4. Alam mendaur ulang segala hal
5. Alam membentuk kerjasama
6. Alam merupakan ‘bank’ dari keberagaman
7. Alam menggunakan keahlian sendiri
8. Alam tidak menggunakan segala sesuatu berlebihan
9. Alam menyediakan kekuatan tak terbatas
10. Meniru mekanisme yang ditemukan di alam.
11. Mempelajari prinsip organisasi dari perilaku sosial organism

⁸ Eugene Tsui. *Evolutionary Architecture: Nature As A Basis For Design* (Kanada: John Wiley & Sons, 1997), hlm. 9.

⁹ Wikipedia. Janine Benyus. <http://en.wikipedia.org/wiki/JanineBenyus> (Maret 2010)

2.3 STRUKTUR DAN ALAM

Struktur didefinisikan sebagai penyatuan material yang berfungsi menahan beban.¹⁰ Struktur selalu terlibat di dalam kehidupan kita dengan berbagai cara. Kita tidak dapat menolak keberadaan struktur. Dalam hubungannya dengan bangunan, struktur merupakan sarana menyalurkan beban dan akibat penggunaan atau kehadiran bangunan ke dalam tanah.¹¹ Struktur yang terdiri dari beberapa unsur-unsur kecil ditempatkan dan disusun dengan cara tertentu agar seluruh kesatuan struktur tersebut dapat berfungsi secara keseluruhan dalam memikul beban, baik yang beraksi secara vertikal berupa gravitasi maupun horizontal berupa angin. Jika susunan resultannya dan hubungan timbal balik di antara semua unturnya tidak berfungsi sebagai unit keseluruhan dalam menyalurkan semua jenis beban yang diantisipasi ke dalam tanah, maka susunan itu tidak dapat disebut dengan struktur.

Ketika berbicara tentang struktur, kita tidak hanya berbicara tentang bangunan atau mengapa jembatan dapat roboh, tetapi kita juga berbicara tentang bagaimana kerangka manusia yang terdiri dari tulang dan sendi dapat menopang keseluruhan berat badan manusia, bagaimana burung dapat terbang dan menopang berat badannya dengan sayapnya atau mengapa batang tumbuhan dapat stabil berdiri dengan satu batang utama walaupun diterpa oleh angin. Menurut Edmun Happold di dalam bukunya yang berjudul *A personal Perception of Engineering*, akar dari struktur merupakan alam. Semua makhluk hidup di dunia ini memiliki struktur yang membentuk dirinya dan berfungsi untuk menopang berat tubuhnya sendiri serta menahan gaya-gaya dari luar tubuhnya.

Di dalam menjalani kehidupan, makhluk hidup mengalami suatu proses yang dikenal dengan sebutan seleksi alam. Seiring waktu, sebagai makhluk hidup, kehidupan menjadi lebih susah dan diperlukan suatu persaingan untuk dapat bertahan hidup. Kelangsungan hidup berlangsung dengan cara memburu dan yang diburu, memakan dan yang dimakan. Makhluk hidup yang lemah, tidak akan dapat bertahan dalam lingkaran kehidupan. Makhluk hidup yang dapat bertahan

¹⁰ Gorden, J E. *Structures : Or Why Things Don't Fall Down* (Penguin Books), hlm. 17.

¹¹ Departemen Arsitektur FTUI. *Struktur*. hlm. 3.

telah menyesuaikan bentuk dan struktur tubuhnya dengan unsur yang ada di alam sehingga menghasilkan suatu bentuk yang sempurna.

Pada awal terbentuknya alam, binatang umumnya terbuat dari struktur material yang lunak bukan material yang kaku. Material lunak tersebut dapat membuat tubuhnya lebih mudah menggeliat dan memperpanjang tubuhnya ke dalam berbagai bentuk. Pada zamannya, material lunak tersebut lebih kuat daripada material kaku seperti tulang. Selain itu, penggunaan material kaku membebani kesulitan di dalam hubungan antara tumbuh dan bereproduksi. Namun seiring bertambahnya waktu dan lewatnya proses seleksi alam, binatang tersebut mulai berkembang dan menyesuaikan diri dengan keadaan alam sekitar. Binatang yang tadinya tinggal di laut jadi datang tinggal di darat. Sebagian dari mereka mengembangkan dan memanfaatkan kerangka yang kaku, gigi atau tanduk. Struktur tubuh yang tadinya merupakan struktur lunak mulai berkembang menjadi struktur kaku berupa kerangka tulang. Struktur tubuh yang tadinya diam tidak bisa bergerak menjadi struktur sayap yang dapat dikembangkan untuk mengangkat badannya. Struktur-struktur hewan yang telah mengalami seleksi alam dan proses evolusi ini menjadi stabil, seimbang dan kuat dalam menopang beban tubuhnya dan menerima gaya dari samping.

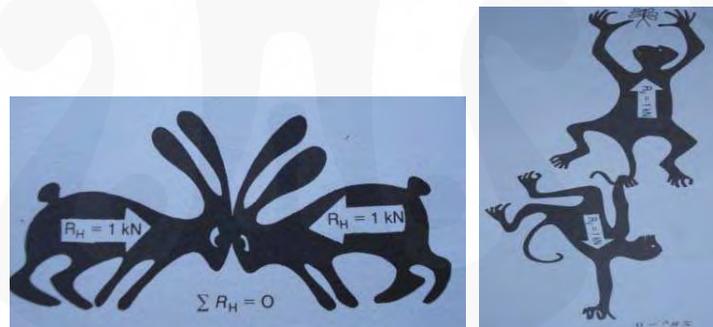
Kalau hewan primitif terdiri dari material yang fleksibel, hal ini tidak terjadi pada tumbuhan. Tumbuhan primitif biasanya lembut atau lunak, namun tidak seperti hewan, tumbuhan tidak dapat mengejar makanannya atau lari dari musuh. Namun, tumbuhan masih tetap dapat melindungi dirinya dengan bertambah tinggi dan melakukan sesuatu. Seiring dengan waktu, tumbuhan juga mengalami perubahan dan perkembangan pada bentuk dan strukturnya. Tumbuhan yang ada sekarang seperti pohon, melakukan gerakan mengayun-ayun pada cabang dan rantingnya bertujuan untuk menghilangkan energi angin serta mencegah terjadinya patah pada cabang dan ranting. Selain itu juga, pohon dapat berdiri tegak dengan satu batang utama yang dimiliki walaupun diterpa dengan badai kencang. Struktur-struktur tumbuhan yang telah mengalami seleksi alam dan proses evolusi ini menjadi stabil, seimbang dan kuat dalam menopang beban tubuhnya dan menerima gaya dari samping. Struktur-struktur yang ada di alam ini dapat dijadikan sebagai contoh dalam mendesain struktur bangunan.

2.4 PERSYARATAN STRUKTUR

Untuk menunjukkan peran struktur sebagai penopang suatu bangunan, struktur harus memiliki empat persyaratan yang harus dipenuhi. Persyaratan tersebut meliputi: struktur harus seimbang, struktur harus stabil, struktur harus memiliki kekuatan, dan struktur harus memiliki kekakuan.¹² Persyaratan-persyaratan ini jugalah yang terdapat pada struktur makhluk hidup di alam

1. Keseimbangan

Struktur harus mampu mencapai keadaan seimbang ketika sedang menerima dan menyalurkan beban yang berasal dari dalam dan luar. Keseimbangan akan tercapai apabila gaya yang bekerja pada suatu benda dengan suatu gaya akan seimbang bila ada gaya lain yang besarnya sama dan bekerja pada arah yang berlawanan. Jadi untuk berada dalam keadaan yang seimbang, jumlah besarnya gaya yang terjadi harus 0 ($\sum R_h$ (keseimbangan gaya horizontal) = 0, $\sum R_v$ (keseimbangan gaya vertical) = 0, $\sum M = 0$).



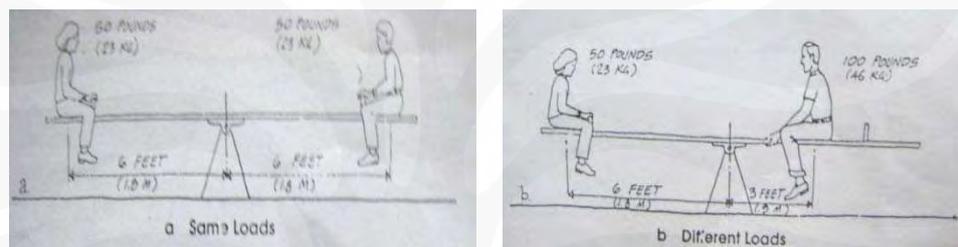
Gambar 2.1. Prinsip keseimbangan

Sumber: Dokumentasi pribadi

Prinsip keseimbangan dapat dilihat pada jungkat-jungkit. Jika panjang lengan dari suatu jungkat-jungkit sama dan pin berada di tengah maka ketika dua orang anak yang memiliki berat yang sama duduk di kedua lengan jungkat-jungkit maka jungkat-jungkit tersebut tidak akan berpindah atau berada dalam keadaan seimbang ($\sum M = 0$). Namun, ketika satu orang dari anak tersebut pindah duduk mendekati pin maka jungkat-

¹² Macdonal, Angus J. *Structure and Architecture* (Oxford: Reed Educational and Professional Publishing Ltd 1994, 2001), hlm . 9.

jungkit tersebut akan bergerak, anak yang berada di lengan yang lebih panjang akan turun sedangkan anak yang berada pada lengan yang lebih pendek akan naik ($\sum M_{\text{anak yang berada di lengan terpendek}} < \sum M_{\text{anak yang berada di lengan terpanjang}}$). Jika panjang kedua lengan jungkat-jungkit sama namun berat kedua anak berbeda maka jungkat-jungkit tersebut akan bergerak juga. Namun, jika anak yang memiliki tubuh yang lebih berat tersebut pindah duduk mendekati pin maka jungkat-jungkit tersebut tidak akan bergerak atau mencapai keadaan seimbang.



Gambar 2.2. Prinsip keseimbangan jungkat-jungkit

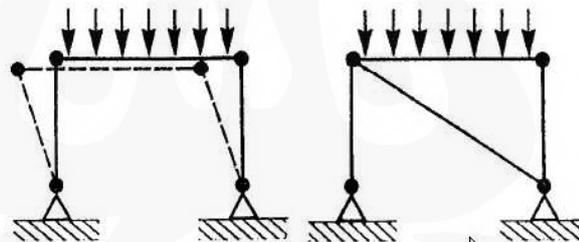
Sumber: *Why Building Fall down*, Matthys Levy dan Mario Salvadori, hlm. 297

Contoh lain yang akan menjelaskan prinsip keseimbangan adalah gerobak tangan. Ketika gerobak tangan tidak dalam melakukan pekerjaan maka gerobak tangan tersebut berada dalam pusat keseimbangan yang statis. Hal ini disebabkan karena besar gaya yang berasal dari bumi (gaya tarik bumi) seimbang dengan reaksi gaya yang datang dari roda dan komponen lain yang terdapat pada gerobak tangan tersebut. Namun, ketika gaya horizontal diterima oleh gerobak tangan tersebut dari si pengguna gerobak maka gerobak tersebut akan bergerak horizontal dan gerobak tersebut sudah tidak berada dalam keadaan kesimbangan statis lagi. Hal ini terjadi karena hubungan antara gerobak tangan dengan bumi tempat berpijaknya gerobak tidak mampu menahan reaksi gaya horizontal tersebut. Gerobak tangan merupakan perpaduan dari struktur dan mesin. Gerobak tangan menjadi sebuah struktur ketika gerobak tersebut dalam keadaan diam dan akan menjadi sebuah mesin jika gerobak tersebut menerima gaya horizontal dari si pengguna gerobak. Di dalam arsitektur, struktur yang ada diterima harus seimbang ketika menerima gaya dari luar baik horizontal maupun vertikal.

Universitas Indonesia

2. Kestabilan

Syarat utama dari struktur arsitektur adalah tetap berada di tempat, tidak berpindah, atau, seperti yang dikatakan ahli teknik yaitu stabil.¹³ Setiap elemen-elemen struktur bekerja sama untuk menahan gaya dari luar bangunan sehingga jika ada gaya yang datang, baik secara vertikal maupun horizontal, struktur tersebut tidak akan bergerak ataupun berpindah. Stabil dan seimbang merupakan dua hal yang berbeda. Seimbang belum tentu stabil karena suatu benda yang seimbang akan runtuh jika mendapat gaya secara menyamping. Pada gambar dibawah ini, yang bingkai bujur sangkar memiliki empat buah ensel yang terdapat di sebelah kiri menggambarkan keadaan seimbang namun tidak stabil karena apapun gaya menyamping yang diberikan pada kolomnya akan membuat bingkai tersebut rubuh. Bingkai bujur sangkar yang berada di sebelah kanan menggambarkan keadaan yang stabil dan seimbang. Bingkai tersebut seimbang setelah ditambahkan elemen diagonal karena elemen diagonal tersebut membantu penyaluran gaya sehingga tidak ada saluran gaya langsung yang melawan gaya tarik bumi.



Gambar 2.3. Prinsip kestabilan

Sumber: *Structure and architecture*, Angus J Macdonald, hlm. 10

3. Kekuatan

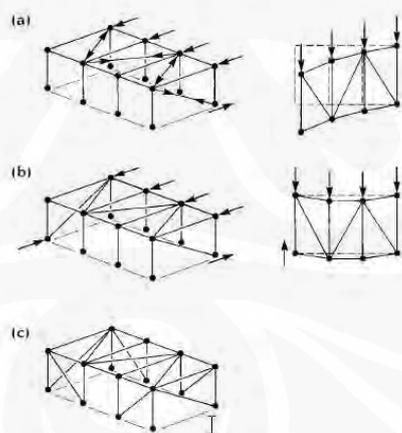
Ketika mutu tekanan dari tiap-tiap elemen suatu struktur dan beban maksimum yang diterima suatu struktur berada pada batas yang dapat diterima maka kekuatan pada struktur akan terpenuhi. Maksudnya adalah struktur tidak akan rubuh jika beban maksimum tidak melebihi kekuatan suatu material. Kekuatan suatu struktur juga bergantung terhadap integritas

¹³ Levy, Matthys dan Mario Salvadori. *Why Buildings Fall Down : How Structures Fail* (New York. W W Norton Company, 1994), hlm. 296.

struktur tersebut secara keseluruhan. Jika suatu struktur memiliki perhitungan yang stabil pada strukturnya serta penampang tiap elemen struktur memiliki kekuatan yang cukup besar dan ukuran yang sesuai maka struktur tersebut tidak akan rubuh dalam menerima beban tapi kelenturan yang terlalu besar pada suatu struktur dapat menyebabkan struktur tersebut mudah goyah. Struktur tersebut akan menerima defleksi (pembelokan) yang cukup besar dari beban yang diterima serta akan terjadi perubahan bentuk yang dapat menyebabkan kerusakan pada komponen-komponen bangunan seperti kaca atau pemutarbalikan (distorsi) bentuk bangunan.

4. Kekakuan

Kekakuan juga merupakan unsur yang harus diperhatikan dalam membuat suatu sistem struktur. Jika suatu bangunan memiliki struktur yang lentur maka bangunan tersebut akan mudah goyah. Kelenturan yang terlalu besar pada suatu struktur dapat menyebabkan struktur tersebut goyah sehingga akan terjadi pembelokan yang cukup besar yang dapat membuat bangunan rubuh. Bentuk struktur yang terdiri dari segitiga merupakan bentuk struktur yang lebih kaku daripada bentuk persegi empat. Bentuk tersebut tidak akan goyah bila menerima beban dari atas maupun samping.



Gambar 2.4. Prinsip kekakuan

Sumber: *Structure and architecture*, Angus J Macdonald, hlm. 13

BAB III
KAJIAN TEORI
STRUKTUR MAKHLUK HIDUP

Contoh sistem struktur di alam yang akan dibahas pada tulisan adalah sistem struktur makhluk hidup berupa tumbuhan yaitu pohon dikotil dan hewan yaitu cangkang keong. Tumbuhan pohon dikotil dan cangkang hewan keong memiliki sistem struktur yang baik di dalam menahan beban-beban yang menimpa dirinya baik itu beban statis maupun dinamis. Sistem struktur yang akan dibahas berkaitan dengan keseimbangan, kestabilan, kekuatan serta kekakuan struktur tumbuhan pohon dikotil dan cangkang hewan keong dalam menopang beban dirinya sendiri serta menahan berat yang berasal dari luar dirinya, seperti angin dan serangan pemangsa.

3.1 TUMBUHAN POHON

Pohon merupakan suatu benda kayu besar yang menyediakan naungan bagi benda yang ada di dekatnya. Pohon memiliki batang tunggal yang tumbuh tegak untuk menopang tajuk pohon. Pohon merupakan komponen penting yang hidup di bumi sebab pohon dapat mencegah terjadinya pengikisan tanah yang dapat menyebabkan banjir. Selain itu, pohon juga menghasilkan oksigen, gas yang diperlukan oleh manusia dan hewan untuk bernafas. Ada tiga hal mendasar yang membedakan pohon dari semua jenis tumbuhan yang ada di bumi ini, yaitu¹⁴:

1. Pohon memiliki batang kayu, akar dan ranting yang tidak akan mati pada saat musim dingin, tetapi tetap akan tumbuh dari tahun ke tahun
2. Pohon hidup lebih lama dari organisme lain yang ada di bumi. Pohon dapat hidup lebih dari 1000 tahun
3. Pohon merupakan organisme terbesar yang ada di bumi. Ketinggiannya dapat mencapai lebih dari 100 m dan beratnya lebih dari 6.600.000 kg

¹⁴ <http://www.cirrusimage.com/trees.htm>

3.1.1 PERKEMBANGAN TUMBUHAN POHON

Pada periode Silurian, sekitar 400 juta tahun yang lalu, tanaman berpembuluh pertama (dengan pipa internal) muncul di permukaan bumi.¹⁵ Kemudian pada periode Karboniferus, sekitar 360 juta tahun yang lalu, tumbuhan pohon paling awal hadir di muka bumi.¹⁶ Pohon yang paling awal hadir di bumi merupakan pohon yang termasuk ke dalam kategori jenis tumbuhan paku, yaitu pohon pakis, paku ekor kuda dan paku kawat.¹⁷ Keberadaan pohon pakis masih dapat kita temukan sekarang dengan bentuk yang tidak jauh berbeda dari sebelumnya. Namun, paku ekor kuda dan paku kawat telah berevolusi menjadi bentuk yang berbeda dari sebelumnya. Pada periode Karboniferus, paku ekor kuda mencapai ketinggian 15-20 m dan paku kawat mencapai ketinggian 30-40 m. Jika dibandingkan dengan paku ekor kuda dan paku kawat yang ada pada saat ini, ukuran kedua tumbuhan paku tersebut berubah menjadi lebih kecil. Pada paku kawat, ketinggiannya maksimum hanya mencapai 1 m sedangkan untuk paku ekor kuda, ketinggiannya hanya mencapai sekitar 1-2 m. Tumbuhan-tumbuhan paku tersebut telah memiliki ciri-ciri dasar dari tumbuhan pohon yaitu terdiri dari akar, batang dan daun sejati. Namun, tumbuhan-tumbuhan paku tersebut belum dapat dikatakan sebagai tumbuhan pohon yang sesungguhnya karena belum memiliki kulit kayu dan batang kayu.



Gambar 3.1. Pohon pakis pada periode karboniferus

Sumber: <http://taggart.glg.msu.edu/isb200/carbfor.htm>

¹⁵ Thomas, Peter. *Tree : Their Natural History* (Cambridge: University Press, 2004), hlm. 3.

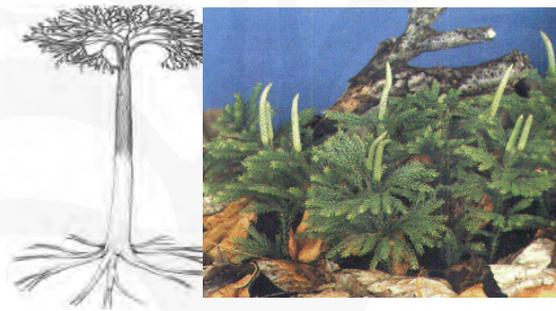
¹⁶ Ibid

¹⁷ Thomas, Peter. *Tree : Their Natural History* (Cambridge: University Press, 2004), hlm. 1.



Gambar 3.2. Pohon paku ekor kuda pada periode karboniferus

Sumber: <http://taggart.glg.msu.edu/isb200/carbfor.htm>



Gambar 3.3. Pohon paku kawat pada periode karboniferus

Sumber: <http://taggart.glg.msu.edu/isb200/carbfor.htm>

Seiring dengan berevolusinya tumbuhan paku kawat dan paku ekor kuda maka munculah tumbuhan pohon jarum (*conifer*), pohon sikas, pohon ginkgo dan beberapa tumbuhan pohon berbiji terbuka (*gymnospermae*). Jenis-jenis pohon tersebut merupakan perintis dari pohon batang tunggal berkayu keras. Kemudian sekitar 120 juta tahun yang lalu, pada periode Cretaceous, tumbuhan berbiji tertutup (*Angiospermae*) muncul di muka bumi. Tumbuhan pohon yang termasuk ke dalam kategori tumbuhan berbiji tertutup (*angiospermae*) terbagi menjadi dua jenis yaitu, tumbuhan pohon berjenis monokotil (berkeping satu) seperti pohon kelapa dan tumbuhan pohon berjenis dikotil (berkeping dua) seperti pohon mangga, oak dan jambu. Kedua jenis tumbuhan pohon tersebut merupakan jenis tumbuhan pohon yang paling banyak ditemukan di muka bumi sekarang¹⁸.

¹⁸ Ibid



Gambar 3.4. Pohon berjenis monokotil

Sumber: <http://schools-wikipedia.org/2006/wp/t/Tree.htm>



Gambar 3.5. Pohon berjenis dikotil

Sumber: <http://karenswhimsy.com/tree-clipart.shtm>

3.1.2 SISTEM STRUKTUR POHON

Sistem struktur pohon yang akan dibahas pada skripsi ini adalah sistem struktur pohon berjenis dikotil. Bentuk pohon berjenis dikotil telah banyak diterapkan oleh arsitek-arsitek di dunia pada desain bangunannya oleh karena itu penulis ingin mengetahui apakah bangunan yang memiliki bentuk struktur menyerupai bentuk pohon berjenis dikotil tersebut juga memiliki sistem struktur menyerupai sistem struktur pohon berjenis dikotil. Beberapa contoh bangunan yang menyerupai bentuk struktur pohon dikotil adalah restaurant Baushanzli oleh Santiago Calatrava, stasiun Oriont Lisbao oleh Santiago Calatrava dan bandara Stuggart oleh Von Gerkan. Ketiga bangunan ini diklaim oleh perancangnya sebagai bangunan yang menyerupai bentuk struktur pohon berjenis dikotil. Untuk itu sebelum menganalisa dan membandingkan apakah sistem struktur salah satu dari ketiga bangunan tersebut sesuai dengan sistem struktur pohon berjenis dikotil, penulis akan terlebih dahulu membahas sistem struktur pohon.

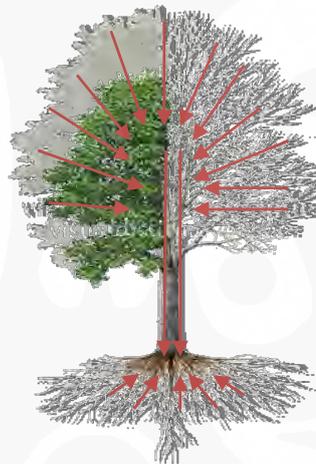
3.1.2.1 BEBAN-BEBAN YANG MENIMPA POHON

Seperti halnya dengan struktur yang ada pada suatu bangunan, struktur tumbuhan pohon harus mampu bertahan dari beban-beban yang mengenai dirinya

agar tetap dapat berdiri dengan tegak. Beban-beban yang diterima oleh pohon dikotil terdiri dari dua jenis, yaitu beban statis dan beban dinamis.¹⁹

a. Beban statis

Beban statis merupakan beban konstan yang perpindahannya hanya sedikit atau bahkan tidak ada.²⁰ Beban statis biasanya disebut juga dengan sebutan beban gravitasi karena beban yang termasuk ke dalam beban statis langsung memberi tekanan ke bawah tanah yaitu ke arah pusat gravitasi bumi. Beban statis dapat berupa beban mati yaitu berat dari tubuh pohon itu sendiri dan beban hidup yaitu beban yang terjadi karena adanya perpindahan sementara seperti pertumbuhan pohon. Selama pohon terus mengalami pertumbuhan maka beban statis yang ada pada pohon akan terus meningkat. Beban statis yang terdapat pada pohon akan selalu ada karena pertumbuhan pohon tidak pernah berhenti.



Gambar 3.6. Diagram beban statis yang terjadi pada pohon

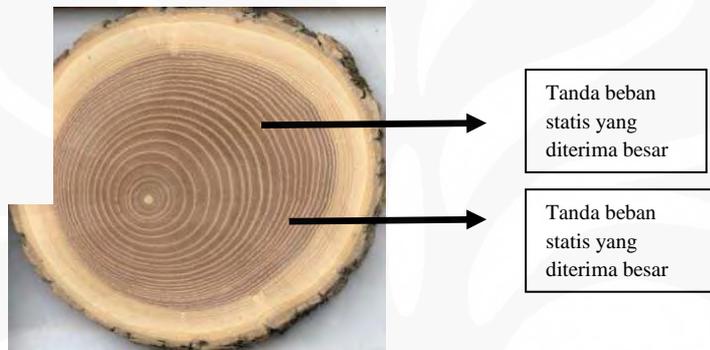
Sumber: <http://visual.merriam-webster.com/plants-gardening/plants/tree/structure-tree.php>
(telah diedit)

Pembuktian terjadinya beban statis pada pohon dapat dilihat melalui lingkaran tahun yang terdapat di potongan melintang batang pohon dikotil. Lingkaran tahun yang menebal menandakan bahwa pohon tersebut sedang menerima beban statis yang besar sedangkan lingkaran tahun yang menipis

¹⁹ James, Ken. (May 2003). Dynamic loading of trees. *Journal of Arboriculture*.

²⁰ Ibid

menandakan bahwa pohon tersebut sedang menerima beban statis yang kecil.²¹ Tanda beban statis lainnya dapat dilihat melalui dinding penopang pangkal pohon dikotil yang berada pada dasar batang pohon serta perbatasan batang pohon dengan ranting pohon.²² Semakin tebal dinding penopang pangkal pohon maka semakin besar beban gravitasi yang diterima oleh pohon.



Gambar 3.7. Lingkaran tahun pada potongan melintang batang pohon dikotil

Sumber: <http://www.sligh.biz/redoak/tree.html>



Gambar 3.8. Pangkal batang sebagai bukti besar beban statis yang diterima

Sumber: [http://www.cactus-art.biz/schede/PHYTOLACCA/Phytolacca dioica/Phytolacca dioica/Phytolacca dioica.html](http://www.cactus-art.biz/schede/PHYTOLACCA/Phytolacca_dioica/Phytolacca_dioica/Phytolacca_dioica.html)

b. Beban dinamis

Beban dinamis merupakan beban yang terjadi akibat adanya suatu proses perpindahan yang cukup besar. Tidak seperti beban statis yang terus-menerus terjadi pada pohon, beban dinamis hanya terjadi sewaktu-

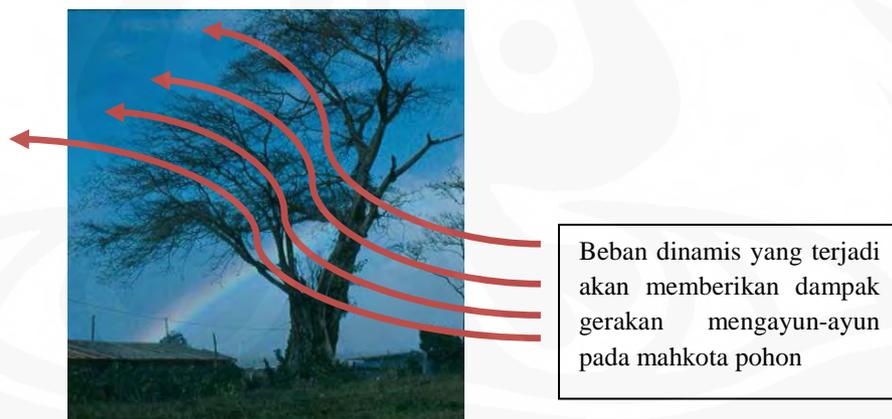
²¹ Ibid

²² Ibid

waktu. Beban dinamis dapat berupa ombak, angin dan gempa bumi.²³ Namun, beban dinamis paling besar yang terdapat pada pohon adalah angin.²⁴

Angin merupakan udara yang bergerak akibat adanya perbedaan tekanan udara dengan arah aliran angin dari tempat yang memiliki tekanan tinggi ke tempat yang memiliki tekanan rendah. Beban angin pada pohon dapat berupa aliran angin dengan tekanan konstan, hembusan angin pendek, hembusan angin yang datang secara tiba-tiba dengan tekanan yang tinggi, dan hembusan angin yang keras dan berat seperti badai. Beban angin berupa badai merupakan beban angin terbesar yang terjadi pada pohon. Beban tersebut dapat menyebabkan kegagalan pada pohon.

Beban dinamis yang terjadi pada pohon akan ditangkap terlebih dahulu oleh mahkota pohon (daun dan ranting). Mahkota pohon akan mengurangi besar gaya dinamis dari aliran angin tersebut dengan memberikan gerakan mengayun-ayun pada ranting dan daun. Besar gaya dinamis yang telah berkurang tersebut kemudian disebarkan ke cabang, batang dan akar pohon.



Gambar 3.9. Gerakan mengayun-ayun mahkota pohon ketika menerima beban dinamis

Sumber: <http://www.vlbanting.com/costaricageneralscenes.htm> (telah diedit)

²³ Wikipedia. *Structural Loads*. http://en.wikipedia.org/wiki/Structural_Loads (28 April 2010)

²⁴ James, Ken. (May 2003). Dynamic loading of tress. *Journal of Arboriculture*.

3.1.2.2 PRINSIP STRUKTURAL POHON DIKOTIL (KESEIMBANGAN, KESTABILAN, KEKUATAN DAN KEKAKUAN POHON DIKOTIL)

Pohon merupakan suatu struktur kompleks yang terdiri dari akar, batang, cabang, ranting dan daun. Bagian-bagian struktur pohon tersebut saling bekerja sama dalam menahan beban-beban yang menimpa tubuhnya dengan tujuan untuk mempertahankan keseimbangan dan kestabilan tubuhnya sehingga pohon dapat terus bertahan hidup.

Ketika menahan beban statis yang menimpa dirinya, pohon dikotil harus dapat mencapai keadaan seimbang agar dapat berdiri dengan tegak. Beban statis yang berasal dari mahkota pohon yaitu daun, ranting, dan cabang serta pertengahan batang dan pangkal bawah batang memberikan gaya aksi ke arah akar batang. Akar batang memberikan gaya reaksi dari pusat bumi ke arah pangkal batang. Ketika besar gaya aksi yang berasal dari mahkota pohon dan batang memiliki besar yang sama dengan gaya reaksi yang berasal dari akar maka pohon akan mencapai keadaan seimbang. Jadi gaya aksi mahkota dan batang pohon dengan gaya reaksi pusat gravitasi bumi harus mencapai nilai 0 ($\sum R_v$ (keseimbangan gaya vertikal) = 0).

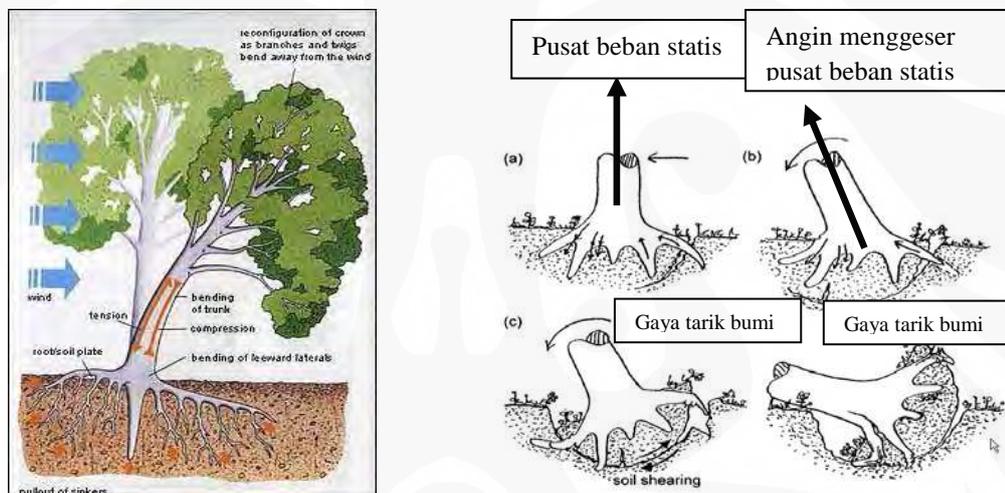


Gambar 3.10. Arah aliran gaya dalam menyalurkan beban

Sumber: http://www.bbc.co.uk/wales/mid/sites/ilovewales/pages/oak_tree.shtml#statis (telah diedit)

Titik keseimbangan pohon berada pada pusat beban statis yang ada pada pohon yaitu pada pertengahan bagian pangkal batang pohon. Berat dari tubuh

pohon ditarik ke bawah menembus tanah oleh gaya gravitasi. Selama pusat dari beban statis yang ada di pohon tetap berada pada pertengahan batang maka batang akan cukup kuat menahan pohon tetap berdiri dengan tegak.²⁵ Jika pusat dari beban statis yang ada di pohon tidak berada pada pertengahan bagian pangkal batang pohon maka gaya tarik bumi akan mendorong struktur pohon keluar (tumbang) dari tempat berpijaknya. Tumbangnya pohon disebabkan karena besar gaya tegang dan tekan batang pohon serta akar pohon berada dalam keadaan tidak seimbang atau tidak berada pada nilai 0. Ketidakseimbangan struktur pohon yang terjadi akibat bergesernya titik pusat beban statis dari pertengahan pangkal batang disebabkan oleh beban dinamis angin berupa badai. Badai dapat mendorong pusat beban statis pohon yang ada pada pertengahan batang keluar dari posisi seimbang yang menyebabkan pohon tumbang.²⁶



Gambar 3.11 dan 3.12. Alur tumbang pohon

Ketika badai mendorong pohon secara lateral, pusat beban statis akan bergeser dari pertengahan pangkal batang kemudian akan terjadi ketidakseimbangan pada gaya tegang dan tekan batang serta akar sehingga gaya tarik bumi akan memaksa pohon untuk keluar dari tanah.

Sumber: <http://www.nhm.ac.uk/nature-online/life/plants-fungi/magnificent-trees/session3/index.html> dan *Tree : Their Natural History*, Peter Thomas, hlm. 254

²⁵ Ibid

²⁶ Ennos, Roland. (2010). *Trees: Magnificent Structures*. <http://www.nhm.ac.uk/nature-online/life/plants-fungi/magnificent-trees/session3/index.html> (10 Mei 2010)

Tidak semua beban dinamis angin dapat membuat pohon tumbang. Beban angin berupa tekanan konstan, hembusan angin pendek dan hembusan angin yang datang secara tiba-tiba dengan tekanan yang tinggi masih dapat ditahan oleh pohon. Pohon dikotil memiliki struktur mahkota pohon berupa daun, ranting dan cabang yang fleksibel dalam menahan beban-beban angin tersebut. Ketika struktur pohon mengalami suatu kondisi pembebanan berupa angin maka gaya dari beban tersebut akan terlebih dahulu dialirkan ke struktur mahkota pohon yaitu cabang, ranting dan daun.²⁷ Pada saat aliran angin diterima oleh mahkota pohon maka cabang dan ranting pohon akan berayun secara dinamis mengikuti arah aliran angin dan tidak berayun kembali melawan arah aliran angin. Kemudian aliran angin tersebut akan disebarkan keluar menuju atas, kanan atau sisi lain pohon melalui sela-sela ranting pohon. Gerakan mengayun-ayun pada mahkota pohon disebut sebagai sistem *de-tunned*.²⁸ Gerakan tersebut bertujuan untuk memperkecil perpindahan energi dari gaya yang dihasilkan oleh angin ke batang dan akar pohon sehingga pohon dapat tetap berdiri dengan stabil. Semakin tebal perbatasan batang pohon dengan ranting maka semakin besar beban angin yang diterima oleh pohon



Gambar 3.13. Gerakan mengayun mahkota pohon ketika menerima beban dinamis dan arah aliran gaya dalam menyalurkan beban dinamis

Sumber: <http://www.flickr.com> (telah diedit)

²⁷ James, Ken. (May 2003). Dynamic loading of tress. *Journal of Arboriculture*.

²⁸ Ibid

Walaupun mahkota pohon dapat melakukan gerakan mengayun-ayun untuk memperkecil perpindahan energi ke batang dan akar pohon, batang dan akar pohon tetap akan menerima energi baik dari beban dinamis maupun statis. Untuk dapat menahan beban statis yang menimpa tubuhnya, pohon menggunakan satu batang tunggal daripada banyak batang terpisah karena satu batang tebal lebih baik dalam menolak pembengkokan daripada banyak batang tipis.²⁹ Sebagai pembuktian, batang pohon dikotil tetap dapat berdiri dengan stabil tanpa mengalami pembengkokan walaupun menahan beban statis dari tubuhnya sendiri yaitu dari mahkota dan batang pohon. Berbeda dengan pohon kelapa yang berjenis monokotil, pohon kelapa tidak begitu baik dalam menahan beban statis dari tubuhnya sendiri karena batang tunggalnya mengalami pembengkokan dalam menahan berat tubuhnya sendiri. Alasan lain mengapa batang pohon dikotil dapat menahan beban statis dan dinamis yang menimpa tubuhnya adalah batang pohon dikotil membesar pada bagian bawah (pangkal batang). Tujuan batang pohon dikotil membesar pada bagian pangkal batang untuk memperkuat batang dikotil dalam menahan beban statis dan dinamis yang menimpa tubuhnya sehingga pohon dapat tetap berdiri dengan stabil. Pembesaran batang pada tumbuhan dikotil dapat terjadi karena batang tumbuhan dikotil memiliki jaringan kambium yang berfungsi untuk membesarkan dan melebarkan batang kayu. Pembesaran batang pada setiap pohon dikotil tidaklah sama, pohon yang paling sering menerima beban angin akan memiliki pangkal batang pohon yang lebih besar daripada pohon yang jarang menerima beban angin.

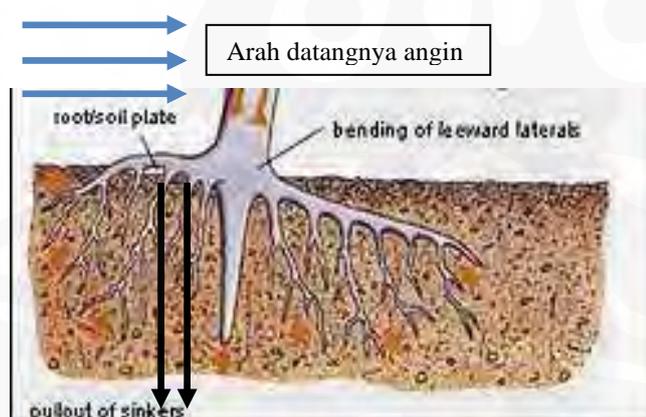
Di dalam menahan beban statis dan beban dinamis yang menimpa pohon dikotil, pohon dikotil memiliki pondasi berupa akar tunggang yang cukup kuat. Akar tunggang adalah akar yang terdiri atas satu akar besar yang merupakan kelanjutan batang, sedangkan akar-akar yang lain merupakan cabang dari akar utama.³⁰ Pada awal tumbuhnya pohon dikotil, akar yang mendominasi pohon dikotil hanyalah satu akar besar yang merupakan kelanjutan batang, biasa disebut

²⁹ Ennos, Roland. (2010). *Trees: Magnificent Structures*. <http://www.nhm.ac.uk/nature-online/life/plants-fungi/magnificent-trees/session3/index.html> (10 Mei 2010)

³⁰ Wahyono, Budi. Struktur dan Fungsi Bagian Tumbuhan. http://www.crayonpedia.org/mw/Struktur_dan_fungsi_bagian_tumbuhan (5 Mei 2010)

juga dengan *tap root*. Namun, seiring dengan perkembangan tubuhnya, *tap root* kemudian mulai mengeluarkan cabang-cabangnya sehingga akar pohon dikotil dewasa akan melebar di dalam tanah berbentuk seperti piring.

Akar pohon dikotil tersebut melebar membentuk cabang-cabang samping akar pohon di dalam tanah sejauh tepi mahkota pohon.³¹ Cabang-cabang samping akar pohon tersebut berfungsi secara baik sebagai penyerap nutrisi dari dalam tanah tetapi tidak berfungsi secara baik dalam menunjang berdirinya pohon. Oleh karena itu, akar pohon menyesuaikan strukturnya dengan mengembangkan *sinker roots* yang tumbuh secara vertikal ke bawah melalui cabang-cabang samping akar pohon untuk menunjang kestabilan pohon.³² Jika sebuah pohon didorong oleh beban angin maka akar pohon dan tanah akan terangkat naik disamping batang ke arah tempat datangnya angin.³³ Dengan adanya *sinker roots*, akar pohon yang naik kesamping batang dibawah tempat datangnya angin tidak akan naik seluruhnya ke atas tanah. *Sinker roots* yang berada tepat dibawah datangnya beban angin akan menahan akar pohon untuk tidak naik keatas. *Sinker roots* memegang peran penting dalam menghasilkan kestabilan pada akar pohon sehingga jika akar pohon terendam oleh banjir maka *sinker roots* tidak dapat berkembang lagi dan struktur pohon pasti akan menjadi tidak stabil.



Gambar 3.14. Sinker roots menahan pohon agar tidak naik ke atas (stabil)

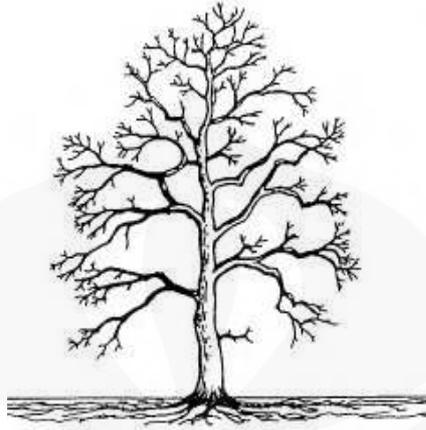
Sumber:

<http://www.nhm.ac.uk/nature-online/life/plants-fungi/magnificent-trees/session3/index.html>

³¹ Thomas, Peter. *Tree : Their Natural History* (Cambridge: University Press, 2004), hlm. 73.

³² Ennos, Roland. (2010). *Trees: Magnificent Structure..* <http://www.nhm.ac.uk/nature-online/life/plants-fungi/magnificent-trees/session3/index.html> (10 Mei 2010)

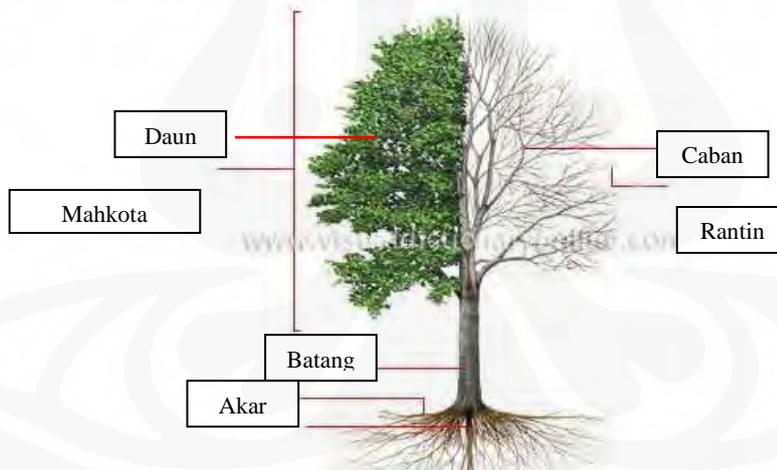
³³ Ibid



Gambar 3.15. Lebar akar pohon lebih lebar atau sama dengan lebar mahkota pohon
 Sumber: *Tree : Their Natural History*, Peter Thomas, hlm. 73

3.1.2.3 ELEMEN STRUKTUR POHON

Seperti yang telah disinggung sebelumnya pada prinsip keseimbangan, kestabilan, kekuatan dan kekakuan pohon dikotil, pohon merupakan struktur kompleks yang terdiri dari akar, batang dan mahkota pohon (cabang, ranting dan daun). Bagian-bagian tersebut membentuk suatu struktur kompleks stabil dan seimbang yang berfungsi menahan beban-beban yang telah dijelaskan sebelumnya, yaitu beban statis dan beban dinamis.



Gambar 3.16. Elemen struktur pohon

Sumber: <http://visual.merriam-webster.com/plants-gardening/plants/tree/structure-tree.php> (telah diedit)

1. Akar

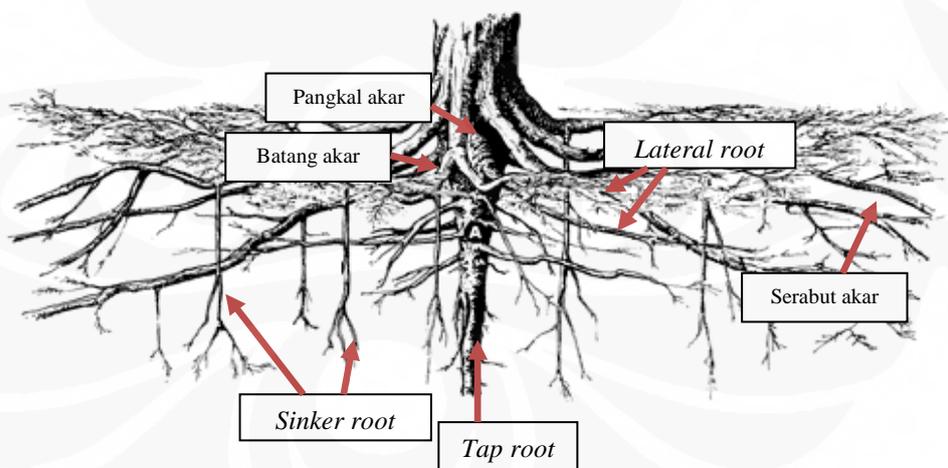
Akar adalah bagian tumbuhan yang tumbuh ke bawah dalam tanah atau air. Akar pohon dikotil berjenis akar tunggang. Akar tunggang adalah akar yang terdiri atas satu akar besar kelanjutan batang yang meruncing

pada bagian ujungnya. Bentuk runcing memudahkan akar menembus tanah.

Bagian-bagian akar tunggang

Akar tunggang terdiri dari beberapa bagian, yaitu

1. *Tap root* (Akar besar kelanjutan batang). *Tap root* merupakan akar utama yang ada pada tumbuhan dikotil. *Tap root* merupakan perpanjangan batang yang tumbuh lurus ke bawah. *Tap root* berfungsi sebagai penunjang berdirinya pohon.
2. *Lateral root* (Cabang akar). Batang akar terletak diantara pangkal batang dan *tap root*. Pada bagian batang akar timbul cabang-cabang akar yang masing-masing dapat bercabang-cabang lebih kecil. Cabang-cabang akar tersebut melebar sejauh tepi mahkota pohon. Cabang akar yang halus disebut serabut akar. Cabang-cabang samping akar pohon berfungsi secara baik sebagai penyerap nutrisi tetapi tidak berfungsi secara baik dalam menunjang berdirinya pohon.
3. *Sinker root*. *Sinker root* merupakan cabang dari *lateral roots* yang tumbuh lurus ke bawah. *Sinker roots* berperan sebagai penghasil kestabilan pada akar pohon dalam menunjang berdirinya pohon. *Sinker root* akan menjaga kestabilan akar pohon agar tidak naik ke atas ketika pohon diterpa oleh beban angin.



Gambar 3.17. Bagian-bagian akar tunggang

Sumber: <http://www.greenbeltconsulting.com/articles/treeandsoil.html>

Fungsi akar

Akar pohon dikotil (akar tunggang) memiliki tiga fungsi utama, yaitu:

- a. Menunjang berdirinya tumbuhan.³⁴ Akar yang tertancap ke dalam tanah berfungsi seperti pondasi bangunan. Akar membuat tumbuhan dapat berdiri kokoh di atas tanah. Akar dapat menahan beban yang berasal dari dirinya sendiri serta beban yang berasal dari luar dirinya seperti angin. Oleh karena itu, tumbuhan dapat bertahan dari terjangan angin kencang dan hujan.
- b. Menyerap air dan zat hara (mineral).³⁵ Tumbuhan memerlukan air dan zat hara untuk kelangsungan hidupnya. Untuk memperoleh kebutuhannya tersebut, tumbuhan menyerapnya dari dalam tanah dengan menggunakan akar.
- c. Sebagai alat pernapasan.³⁶ Struktur tanah tempat berdirinya suatu tumbuhan memiliki pori-pori. Melalui pori-pori tersebut akar tumbuhan memperoleh udara dari dalam tanah.

Selain kedua fungsi utama tersebut, akar pohon juga memiliki beberapa fungsi lain, yaitu sebagai penyimpan cadangan makanan sementara dan sebagai penentu ukuran dari sebuah pohon.³⁷

Karakteristik akar

Akar tumbuhan pohon dapat bergerak. Gerak akar tumbuhan pohon terjadi karena proses tumbuh dan pengaruh rangsang. Arah gerak pertumbuhan akar pohon ke bawah karena dipengaruhi oleh gaya gravitasi (*geotropi*). Akar dapat tumbuh menembus tanah karena mempunyai ujung yang berbentuk runcing. Akar menanggapi pengaruh rangsang yang ada di sekitarnya dengan cara bergerak menuju air dan zat hara (mineral). Air dan mineral bergerak pelan di dalam tanah sehingga akar harus bergerak menghampiri air dan mineral tersebut daripada harus menunggunya. Untuk

³⁴ Wikipedia. Akar. <http://id.wikipedia.org/wiki/Akar> (20 April 2010)

³⁵ Ibid

³⁶ Ibid

³⁷ Thomas, Peter. *Tree : Their Natural History* (Cambridge: University Press, 2004), hlm. 72.

mempertahankan keseimbangan dan kestabilan, akar tumbuhan pohon dikotil melebar di dalam tanah sejauh lebar mahkota pohon.

2. Batang

Batang merupakan bagian utama tumbuhan yang ada di atas tanah dan mendukung bagian-bagian lain dari tumbuhan, yaitu cabang, daun, bunga dan buah. Batang mempunyai pertumbuhan yang tidak terbatas, berbeda dengan daun yang mempunyai pertumbuhan terbatas, dan akhirnya ditanggalkan. Umumnya, warna batang muda adalah hijau muda, sedangkan warna batang yang telah tua adalah kecokelat-cokelatan.

Fungsi Batang

Batang memiliki dua fungsi utama, yaitu

- a. Penopang tumbuhan³⁸. Seperti halnya kolom dalam suatu struktur bangunan, batang pohon berfungsi sebagai penopang tubuh tumbuhan secara keseluruhan. Batang pohon menjaga agar tubuh tumbuhan tetap tegak walaupun diterjang gaya lateral seperti angin.
- b. Penyalur air, zat hara (mineral) dan zat makanan.³⁹ Batang pohon berfungsi menyalurkan air dan zat hara yang telah diserap oleh akar dari tanah ke seluruh tubuh tumbuhan pohon. Selain itu juga, batang menyalurkan zat-zat makanan hasil fotosintesis dari daun ke seluruh tubuh tumbuhan pohon.

Karakteristik Batang

Sama halnya dengan akar pohon, batang pohon juga dapat bergerak. Gerak batang pohon juga terjadi karena proses pertumbuhan. Namun pergerakan batang pohon tidak seperti akar pohon yang menuju ke bawah. Pergerakan batang pohon menuju ke atas atau menuju cahaya matahari. Batang pohon dikotil memiliki sifat yang kaku agar tidak jatuh ketika menerima beban statis yang berasal dari berat tubuhnya sendiri. Batang dikotil juga harus

³⁸ Wahyono, Budi. Struktur dan Fungsi Bagian Tumbuhan.
http://www.crayonpedia.org/mw/Struktur_dan_fungsi_bagian_tumbuhan (5 Mei 2010)

³⁹ Ibid

bersifat kuat sehingga tetap seimbang dan stabil jika menerima beban dinamis. Selain itu, batang pohon dikotil juga harus keras sehingga ketika pohon mengalami kerusakan, batang pohonnya tidak hancur berkeping-keping. Sifat penting lainnya yang harus dimiliki oleh batang pohon dikotil adalah ringan. Batang pohon dikotil harus ringan agar tidak mengalami pembengkokan ketika menerima beban dirinya sendiri.

3. Daun

Daun merupakan bagian tumbuhan yang tumbuh dari batang. Daun pada tumbuhan pohon umumnya pipih dan berwarna hijau. Warna hijau tersebut disebabkan warna klorofil yang ada pada daun.

Fungsi Daun

Daun memiliki fungsi sebagai berikut

1. Tempat fotosintesis. Fotosintesis merupakan proses pengolahan makanan dari karbon dioksida dan air menjadi zat tepung dengan bantuan energi cahaya. Hasil fotosintesis tersebut berupa zat-zat makanan yang berguna untuk kehidupan tumbuhan serta oksigen yang berguna bagi kehidupan manusia dan hewan. Zat-zat makanan hasil fotosintesis tersebut kemudian disebarkan melalui berkas-berkas pembuluh yang terdapat pada batang pohon.
2. Alat respirasi. Di permukaan daun terdapat mulut daun (stomata). Melalui stomata pertukaran gas terjadi. Daun mengambil karbondioksida dari udara dan melepas oksigen ke udara.
3. Sebagai tempat penguapan. Tidak semua air yang diserap akar dipakai oleh tumbuhan. Kelebihan air ini jika tidak dibuang dapat menyebabkan tumbuhan menjadi busuk dan mati. Sebagian air yang tidak digunakan dibuang melalui mulut daun dalam bentuk uap air.

Karakteristik Daun

Seperti halnya akar dan batang pohon, daun tumbuhan pohon juga dapat bergerak. Sebagian besar jenis pohon yang tumbuh di bumi dapat menggerakkan daunnya sendiri. Gerak tersebut terjadi karena proses

pertumbuhan dan pengaruh rangsang. Pada siang hari, daun bergerak menuju arah datangnya cahaya matahari agar dapat melakukan proses fotosintesis. Karakteristik daun dalam hal struktural adalah fleksibel. Sifat daun yang fleksibel berfungsi untuk menghamburkan energy dari beban dinamis yaitu angin.

4. Cabang dan ranting

Cabang dan ranting merupakan bagian perpanjangan dari batang. Bagian struktur pohon ini memiliki sifat struktural yang fleksibel. Saat aliran angin diterima oleh mahkota pohon maka cabang dan ranting pohon akan berayun secara dinamis mengikuti arah aliran angin dan tidak berayun kembali melawan arah aliran angin. Gerakan mengayun tersebut bertujuan untuk memperkecil perpindahan energi dari gaya yang dihasilkan oleh angin ke batang dan akar pohon sehingga pohon dapat tetap berdiri dengan stabil.

3.2 HEWAN KEONG

Keong merupakan hewan tidak bertulang belakang yang berasal dari kelas gastropoda. Kata gastropoda berasal dari kata Yunani, gastro berarti perut dan poda berarti kaki.⁴⁰ Jika digabungkan antra kata gastro dan poda maka kata gastropoda akan memiliki arti berkaki perut. Oleh karena itu hewan yang termasuk ke dalam kelas gastropoda, yaitu keong lebih dikenal sebagai hewan yang berjalan menggunakan perut. Walaupun nama “keong” dapat dipakai kepada setiap anggota yang termasuk ke dalam kelas gastropoda, kata keong biasanya lebih ditujukan kepada spesies yang memiliki cangkang luar pada bagian tubuhnya. Hewan gastropoda yang tidak memiliki cangkang luar pada bagian tubuhnya lebih dikenal sebagai siput. Hewan gastropoda tersebar luas di bumi, ada yang hidup di darat dan ada yang hidup di perairan.

⁴⁰ *Gastropoda.*

http://www.manandmollusc.net/advanced_introduction/moll101gastropoda.html



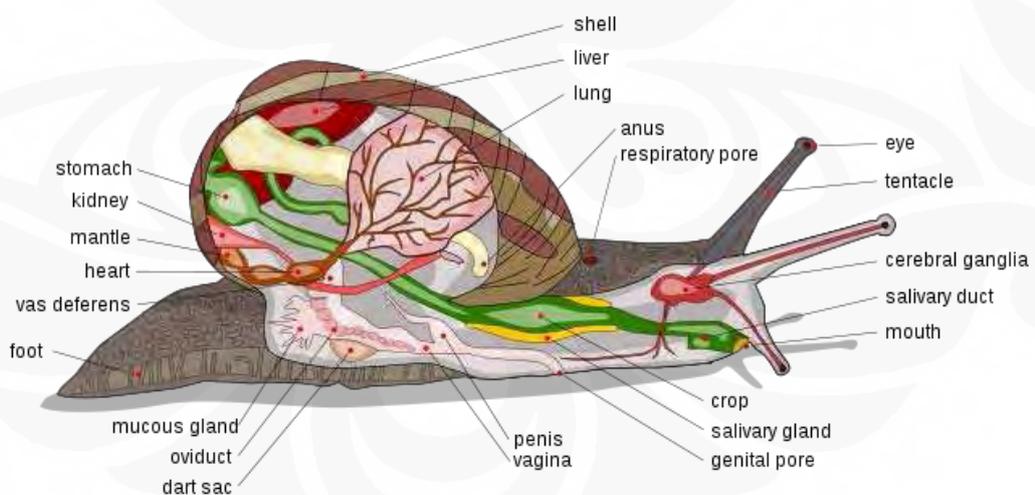
Gambar 3.18. Hewan siput atau keong (*snail*) yang memiliki cangkang luar
Sumber: <http://hortonhears.wordpress.com>



Gambar 3.19. Hewan siput (*slug*) yang tidak memiliki cangkang luar
Sumber: <http://www.naturephoto-cz.com>

3.2.1 MORFOLOGI HEWAN KEONG

Morfologi keong umumnya tidak jauh berbeda dengan hewan tidak bertulang belakang khususnya dan makhluk hidup umumnya. Keong tetap memiliki saluran pencernaan, pernapasan, pembuangan, reproduksi, peredaran darah dan saraf yang menyusun tubuhnya. Namun, berbeda dengan makhluk hidup lainnya keong memiliki cangkang luar yang melindungi tubuh lunaknya. Organ-organ di dalam cangkang berulir mengikuti cangkang. Berikut adalah gambar morfologi keong yang hidup di darat.



Gambar 3.20. Morfologi hewan keong
Sumber: <http://www.answers.com/topic/gastropoda-1>

Tubuh keong terbagi atas kepala, leher, kaki, dan alat-alat dalam(visceral). Pada kepala terdapat sepasang tentakel pendek sebagai alat pembau dan sepasang tentakel panjang sebagai alat penglihat. Di bawah kepala terdapat kelenjar mukosa yang menghasilkan lendir yang membasahi kaki sehingga mudah bergerak. Kaki lebar pipih dan selalu basah; berguna untuk berpindah secara merayap. Kaki sebenarnya merupakan perut yang tersusun oleh otot yang sangat kuat dan dapat bergerak bergelombang.

3.2.2 SISTEM STRUKTUR KEONG

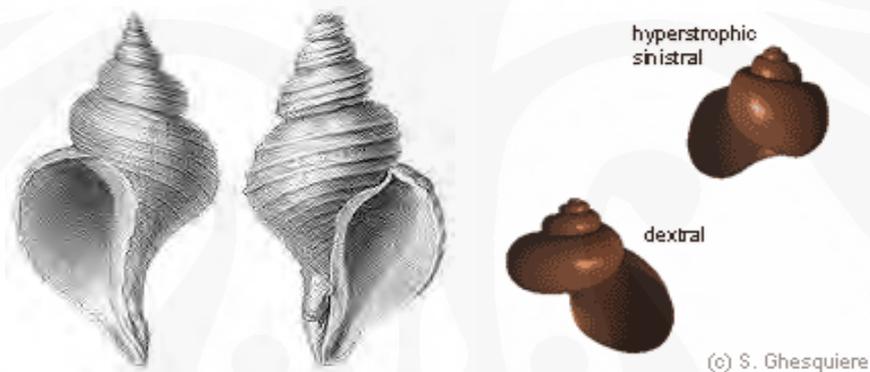
Bentuk hewan keong telah menjadi inspirasi bagi arsitek-arsitek dalam merancang bangunannya. Bagian tubuh hewan keong yang paling sering dijadikan inspirasi oleh arsitek-arsitek dalam merancang bangunannya adalah cangkang keong. Oleh karena itu penulis ingin mengetahui apakah bangunan yang memiliki bentuk menyerupai cangkang hewan keong tersebut juga memiliki sistem struktur bangunan menyerupai sistem struktur cangkang hewan keong. Contoh bangunan di Indonesia yang menyerupai bentuk cangkang hewan keong adalah Teater IMAX Keong Mas TMII. Bangunan tersebut memiliki bentuk yang menyerupai cangkang hewan keong. Untuk itu sebelum menganalisa dan membandingkan apakah sistem struktur Teater IMAX Keong Mas TMII tersebut sesuai dengan sistem struktur cangkang hewan keong, penulis akan terlebih dahulu membahas sistem struktur cangkang hewan keong.

3.2.2.1 CANGKANG KEONG

Tidak seperti tubuh keong yang lunak, cangkang keong yang menutupi tubuh lunak keong bersifat keras. Cangkang keong memiliki peran yang penting bagi kelangsungan hidup keong. Cangkang keong berfungsi sebagai alat pelengkap otot tubuhnya yang lunak serta sebagai perlindungan dari predator. Bagi keong yang memiliki habitat di darat, cangkang berperan sebagai pelindung dari sinar matahari dan kekeringan. Bagi keong yang tinggal di daerah yang kering, keong memiliki cangkang yang cukup tebal untuk membantu mereka mempertahankan kelembaban tubuh mereka. Hampir semua jenis keong terdiri dari satu potong yang cangkang dan biasanya memiliki bentuk bergulung secara spiral.

3.2.2.2 BENTUK CANGKANG KEONG

Secara Geometris, cangkang keong berbentuk bulat melingkar membentuk kerucut dengan pusat sumbu spiral.⁴¹ Alasan cangkang memiliki bentuk melingkar karena pusat gaya gravitasi yang tinggi membuat tubuh keong yang lunak sulit untuk menopang cangkang melingkarnya.⁴² Sebagian besar jenis gastropoda (lebih dari 90%) memiliki cangkang yang memutar ke kanan (*dextral shell*), tetapi sebagian kecil lainnya memiliki cangkang yang memutar ke kiri (*sinistral shell*) dan ada juga beberapa bagian kecil lainnya memiliki cangkang yang merupakan perpaduan antara *dextral shell* dan *sinistral shell* seperti keong berjenis *Amphidromus perverus*.⁴³ Keong yang memiliki cangkang yang memutar ke kiri (*sinistral shell*) akan memiliki organ tubuh pada bagian kiri dan tubuhnya akan memutar ke kanan.



Gambar 3.21. Jenis-jenis cangkang keong
Sumber: http://en.wikipedia.org/wiki/Gastropod_shell

3.2.2.3 LAPISAN CANGKANG KEONG

Tubuh lunak keong sangat rentan terkena ancaman dari pemangsa. Oleh karena itu, keong dikaruniai cangkang yang berfungsi melindungi tubuh lunaknya dari serangan pemangsa. Cangkang keong terdiri dari tiga lapisan penyusun. Lapisan-lapisan tersebut membentuk suatu sistem struktur yang berfungsi untuk

⁴¹ Wikipedia. *Gastropod Shell*. <http://en.wikipedia.org/wiki/GastropodShell> (16 Mei 2010)

⁴² Ibid

⁴³ *Shell*. <http://www.applesnail.net/content/anatomy/shell.php> (16 Mei 2010)

menahan dan menghamburkan energi yang berasal dari pemangsa. Lapisan-lapisan tersebut adalah :

a. Periostrakum.⁴⁴

Lapisan periostrakum terletak pada bagian paling luar cangkang keong. Lapisan periostrakum merupakan lapisan yang paling tipis dan gelap yang tersusun atas zat tanduk yang dihasilkan oleh tepi mantel sehingga sering disebut lapisan tanduk.⁴⁵ Secara umum, lapisan periostrakum berfungsi untuk melindungi lapisan yang ada di sebelah dalamnya serta memberi warna pada cangkang. Lapisan periostrakum juga terdiri dari partikel-partikel besi sulfida. Partikel-partikel ini berfungsi untuk menghamburkan energi yang berasal dari pemangsa.

b. Prismatic.⁴⁶

Lapisan perismatic terletak pada bagian tengah cangkang keong. Lapisan perismatic tidak hanya lebih tebal dari kedua lapisan lainnya tetapi juga lebih lunak.⁴⁷ Lapisan perismatic melindungi lapisan dalam cangkang keong agar tidak pecah.⁴⁸ Lapisan perismatic membantu lapisan periostrakum dalam menyerap tenaga dari pukulan pemangsa serta menghilangkan energi yang berasal dari pukulan pemangsa sebelum mencapai lapisan dalam cangkang. Batas antara lapisan periostrakum dan perismatic berbentuk bergelombang yang berfungsi sebagai perekat kedua lapisan tersebut agar tidak mudah terlepas dan tergelincir.

⁴⁴ Ibid

⁴⁵ Young, Ed. *Three layered shell of deep sea snail could inspire next gen.* <http://scienceblogs.com/notrocketscience/2010/01/three-layered-shell-of-deep-sea-snail-could-inspire-next-gen.php> (10 Mei 2010)

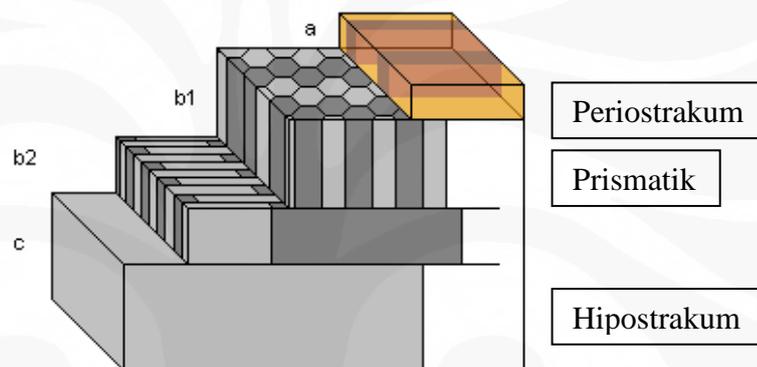
⁴⁶ Shell. <http://www.applesnail.net/content/anatomy/shell.php> (16 Mei 2010)

⁴⁷ Young, Ed. *Three layered shell of deep sea snail could inspire next gen.* <http://scienceblogs.com/notrocketscience/2010/01/three-layered-shell-of-deep-sea-snail-could-inspire-next-gen.php> (10 Mei 2010)

⁴⁸ Ibid

c. Hipostrakum⁴⁹.

Lapisan hipostrakum terletak pada bagian paling dalam cangkang keong. Lapisan ini tersusun atas kristal-kristal halus kalsium karbonat. Kalsium karbonat memberikan kekakuan dan kekuatan pada cangkang keong.⁵⁰ Lapisan hipostrakum berfungsi sebagai perlindungan terakhir keong untuk melindungi tubuh lunak keong dari serangan pemangsa. Lapisan hipostrakum yang bersifat kaku berfungsi mencegah terjadinya pembengkokan pada cangkang.



Gambar 3.22. Lapisan-lapisan cangkang keong

Sumber: <http://www.applesnail.net/content/anatomy/shell.php>

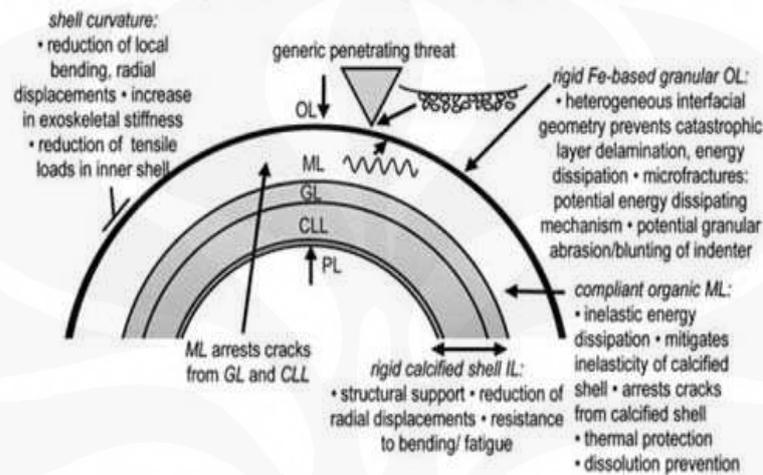
3.2.2.4 PRINSIP STRUKTURAL CANGKANG KEONG (KEKAKUAN DAN KEKUATAN CANGKANG KEONG)

Kepiting merupakan salah satu hewan yang paling sering memangsa keong. Binatang tersebut berusaha memangsa tubuh lunak keong dengan terlebih dahulu menghancurkan cangkangnya. Namun tidak mudah bagi kepiting untuk menghancurkan cangkang keong. Cangkang keong memiliki lapisan-lapisan penyusun yang kuat dan tangguh sehingga sukar untuk ditembus oleh kepiting. Lapisan-lapisan penyusun cangkang keong yang telah dijelaskan sebelumnya membentuk suatu sistem struktur yang berfungsi untuk menahan dan menghamburkan energi yang berasal dari kepiting, meringankan terjadinya

⁴⁹ *Shell*. <http://www.applesnail.net/content/anatomy/shell.php> (16 Mei 2010)

⁵⁰ *Ibid*

keretakan, mengurangi pembelokan (defleksi) dan menahan beban lentur dan tarik.



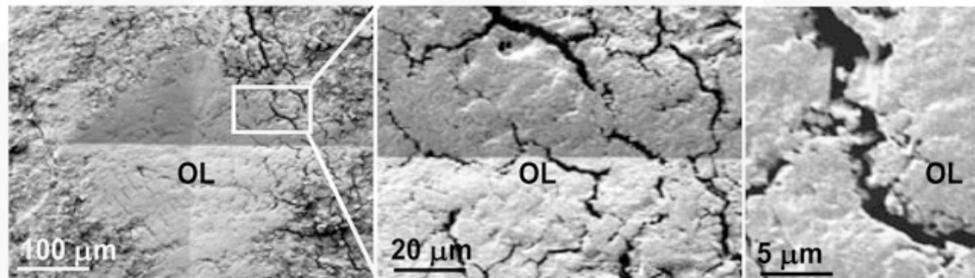
Gambar 3.23. Lapisan-lapisan cangkang keong dan fungsi tiap lapisan

Sumber: <http://scienceblogs.com/notrocketscience>

Ketika kepiting mencoba menghancurkan cangkang keong dengan capitnya maka lapisan periostrakum akan mengalami retakan kecil dan bergerigi. Lapisan luar cangkang keong (lapisan periostrakum) sengaja meretakkan bagiannya agar energi pukulan yang diberikan oleh kepiting tidak masuk ke lapisan tengah cangkang (lapisan perismatik). Partikel-partikel besi sulfida yang menyusun lapisan periostrakum akan menjadi pertahanan pertama yang melawan beban energi pukulan dari kepiting. Partikel-partikel besi sulfida akan menghilangkan beban energi pukulan yang dihasilkan oleh tekanan capit kepiting dan mencegah terbentuknya retakan yang lebih besar yang dapat menghancurkan cangkang.⁵¹ Partikel-partikel besi sulfida tersebut akan menyebarkan energi pukulan yang diberikan oleh capit kepiting ke seluruh bagian luar cangkang dan membentuk celah pada bagian tersebut sehingga energi pukulan yang berasal dari kepiting akan terlebih dahulu tersebar sebelum masuk ke lapisan tengah cangkang. Karena partikel-partikel besi sulfida dan zat tanduk yang menyusun lapisan periostrakum tersusun secara horizontal maka retak yang terjadi pada lapisan

⁵¹ *Secrets in the shell.* <http://www.americanscientist.org/issues/page2/secrets-in-the-shell> (Mei 2010)

periostrakum akan menyebar secara horizontal mengikuti alur partikel penyusun lapisan periostrakum. Partikel-partikel besi sulfida tersebut juga berfungsi untuk melemahkan senjata penyerang dengan cara mengikis capit kepiting.⁵²



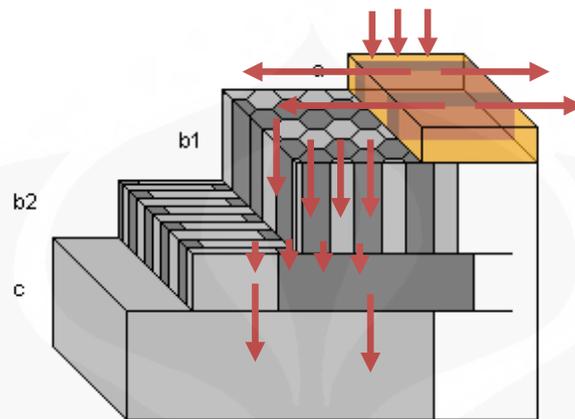
Gambar 3.24. Retakan pada lapisan terluar cangkang keong

Sumber: <http://www.americanscientist.org/issues/page2/secrets-in-the-shell>

Jika lapisan luar cangkang keong (lapisan periostrakum) sudah tidak mampu menahan beban energi pukulan yang dihasilkan oleh kepiting maka lapisan tengah cangkang (lapisan perismatik) akan mulai mengambil alih kinerja struktural cangkang. Lapisan perismatik lebih lunak dan lebih tebal diantara lapisan penyusun lainnya. Lapisan tersebut membantu melindungi lapisan dalam cangkang keong.

Materi lunak penyusun lapisan perismatik membantu cangkang keong menyerap energi pukulan kepiting. Energi pukulan yang tidak dapat dihamburkan oleh lapisan periostrakum diserap oleh lapisan perismatik dan akan dihilangkan sebelum mencapai lapisan dalam cangkang keong. Berbeda dengan lapisan periostrakum yang tersusun secara horizontal, lapisan perismatik tersusun secara vertikal. Sehingga, jika terjadi retakan akibat energi pukulan kepiting maka retakan tersebut tidak akan menyebar secara luas. Retakan tersebut akan ditahan oleh penghubung bergelombang yang berfungsi merekatkan lapisan perismatik dan hipostrakum.

⁵² Ibid



Gambar 3.25. Aliran gaya pada cangkang keong

Sumber: <http://www.applesnail.net/content/anatomy/shell.php> (telah diedit)

Jika pemangsa tetap berusaha mengeluarkan energi pukulannya maka satu atau lebih retakan akan mulai bermunculan melalui lapisan tengah. Ketika lapisan tengah mulai mengalami banyak retakan maka lapisan dalam cangkang akan mulai bekerja. Lapisan hipostrakum bersifat kaku dan kuat. Kekakuan dan kekuatan lapisan ini memperlambat terjadinya pembengkokkan dan pergeseran yang ditimbulkan oleh energi pukulan kepiting.⁵³ Ketika energi yang dihasilkan oleh kepiting melebihi kekuatan dan kekakuan lapisan dalam cangkang keong maka cangkang keong akan terbelah dua. Walaupun cangkang keong telah terbelah dua, tubuh lunak keong tidak akan terluka oleh cangkang. Kekakuan lapisan dalam cangkang membuat cangkang tidak akan mengalami banyak serpihan runtuh ketika kepiting berhasil membelahnya.

⁵³ Ibid

BAB IV

STUDI KASUS

Terdapat dua bangunan yang menjadi contoh studi kasus pada tulisan ini. Pemilihan bangunan berdasarkan perwakilan dari bangunan yang menerapkan bentuk struktur makhluk hidup berupa tumbuhan dan hewan ke dalam rancangan struktur bangunannya. Bangunan pertama adalah Terminal Bandara Stuttgart yang mewakili penerapan struktur makhluk hidup berupa tumbuhan pohon dikotil. Bangunan kedua adalah Teater Keong Mas TMII yang mewakili penerapan struktur makhluk hidup berupa cangkang hewan keong.

4.1 TERMINAL BANDARA STUTTGART



Gambar 4.1. Terminal Bandara Stuttgart

Sumber: www.jorgetutor.com/tuttifrutti.htm

4.1.1 DATA TEKNIS⁵⁴

Lokasi : Jerman
Fungsi : Terminal Satu dan Tiga Bandara Stuttgart
Arsitek : Meinhard Von Gerkan
Marg

⁵⁴ Schultz, Sobek, Habermann. *Steel Construction Manual* (Munich: Institut Fur Internationale Architektur, 2000), hlm. 326

Ahli Struktur : Schlaich Bergerman dan Weidleplan
 Periode Pembangunan : 1981-1991 (Perencanaan hingga konstruksi)
 Struktur : Baja tubular, 12 kolom penopang atap berbentuk seperti pohon

4.1.2 DESKRIPSI

Arsitektur dapat dianggap sebagai suatu ekspresi nasional setiap negara. Bandara udara merupakan salah satu bangunan yang mewakili arsitektur suatu negara. Ketika seorang pengunjung yang memiliki budaya tertentu mengunjungi suatu negara dengan kebudayaan yang berbeda dengan dirinya maka bandara merupakan cerminan pertama dari suatu negara dalam memperkenalkan negaranya. Oleh karena itu rancangan bandara udara harus memiliki penampilan menarik yang luar biasa sehingga memberikan kesan yang indah bagi pengunjung yang datang.



Gambar 4.2. Bagian dalam terminal Bandara Stuttgart
 Sumber: <http://www.flickr.com/photos/7314281@N04/2856888384>

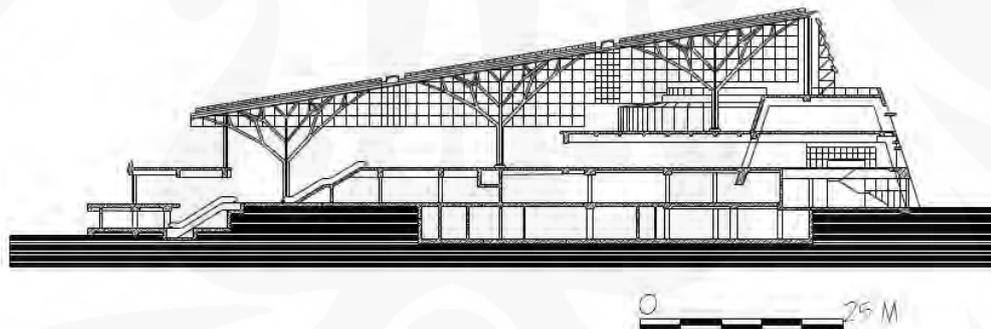
Bandara Stuttgart memiliki desain bangunan unik yang ditampilkan dari integrasi 12 struktur pendukung seperti pohon yang berfungsi menopang atap bandara.⁵⁵ Inspirasi desain bandara udara ini berasal dari hutan *Black Forest* yang ada di Jerman. Von Gerkan menginginkan suasana alami hutan seperti di hutan

⁵⁵ Ibid

Black Forest dapat dirasakan oleh pengunjung bandara. Tampilan bandara ini ditandai oleh ruangan terbuka yang dapat langsung melihat atap. Ruang lapang yang memiliki konsep ruang terbuka ini memudahkan penumpang dalam mengakses dan mengambil barang bawaannya. Sedikitnya batas masif yang terdapat pada bandara ini membuat penumpang dapat dengan mudah berjalan dan menemukan jalan mereka.

4.1.3 ANALISIS STRUKTUR BANGUNAN

Bandara udara Stuttgart terdiri dari dua belas konstruksi kolom seperti pohon yang menopang atap. Tinggi setiap kolom pohon baja mencapai 15 m.⁵⁶ Setiap satu kolom pohon baja menopang satu atap tunggal yang memiliki permukaan miring. Permukaan atap didesain miring bertujuan untuk memberitahukan arah yang harus dilalui penumpang untuk menuju pesawat. Bandara Stuttgart terdiri dari tiga tingkat. Masing-masing tingkat memiliki empat kolom pohon baja.



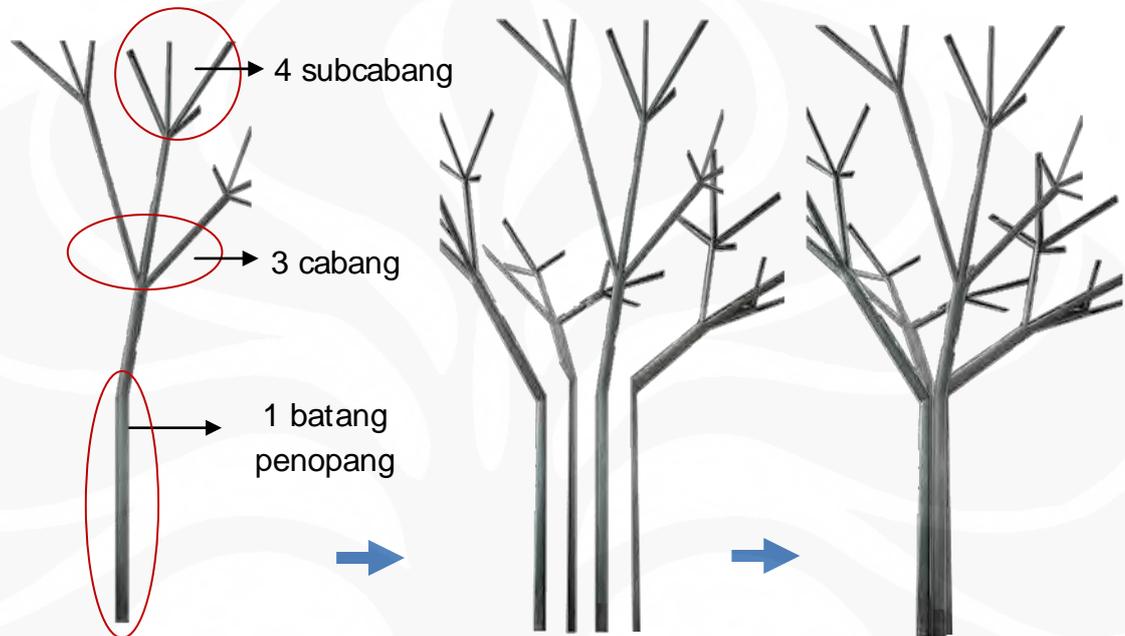
Gambar 4.3. Potongan terminal Bandara Stuttgart

Sumber: *Steel Construction Manua*, Schulitz, Sobek, Habermann, hlm. 327

Kolom pohon baja yang terdapat pada bandara Stuttgart ini sebenarnya merupakan penggabungan dari empat subkolom pohon. Keempat subkolom pohon baja yang merupakan baja tubular ini digabung secara berdempetan membentuk satu kolom pohon baja. Setiap subkolom pohon baja terdiri dari satu batang penopang, tiga cabang dan empat subcabang yang menopang atap. Jika diperhatikan, kolom pohon baja yang ada di Bandara Stuttgart tampak menyerupai

⁵⁶ Andrew W Charleson. *Structure As Architecture*. (Oxford: Elsevier, 2005), hlm. 217.

struktur pohon alami yang mengalami daun berguguran saat hidup di musim dingin.



Gambar 4.4. Substruktur pohon baja dan penggabungan keempat substruktur pohon baja

Sumber: <http://www.flickr.com/photos/7314281@N04/2856054585/> (telah diedit)



Gambar 4.5. Satu struktur pohon baja menopang satu atap tunggal

Sumber: *Steel Construction Manua*, Schultz, Sobek, Habermann, hlm. 328

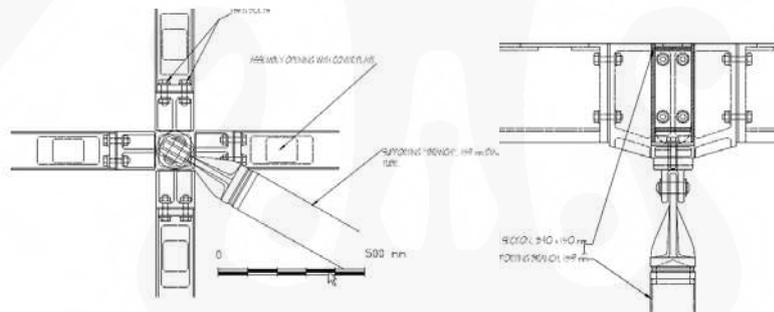
Atap miring yang ditopang oleh kedua belas kolom pohon baja merupakan atap tunggal yang terdiri dari dua belas buah sesuai dengan jumlah kolom pohon. Setiap permukaan atap empat persegi panjang yang ditopang oleh satu kolom pohon baja berukuran 22 m x 32 m.⁵⁷ Antara subcabang kolom pohon baja dengan permukaan atap didukung oleh . Setiap kisi balok dan subcabang kolom pohon baja dihubungkan oleh penjepit sendi

⁵⁷ Andrew W Charleson. *Structure As Architecture*. Oxford: Elsevier, 2005, hal. 42.

(pin jointed).⁵⁸ Penjepit sendi ini memperkuat hubungan atap dan kolom pohon baja sehingga perpindahan yang dapat menyebabkan terjadinya pembengkokan antara balok atap dan cabang kolom pohon baja dapat dihindari. Setiap permukaan atap tunggal tersebut dihubungkan oleh sebidang kaca panjang dan balok penyambung.



Gambar 4.6. Satu struktur pohon baja menopang satu atap tunggal
Sumber: <http://www.flickr.com/photos/7314281@N04/2856028481/>



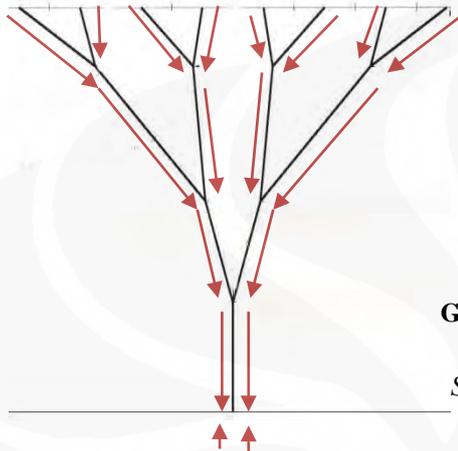
Gambar 4.7. dan 4.8. Sambungan penjepit sendi antara subcabang struktur pohon baja dan kisi balok

Sumber: *Steel Construction Manual*, Schulitz, Sobek, Habermann, hlm. 329

Beban yang berasal dari atap tersebut akan diterima oleh cabang-cabang kolom pohon baja kemudian dialirkan dan dikumpulkan pada batang pohon baja. Aliran gaya yang terjadi pada kolom pohon baja ini hampir serupa dengan aliran gaya yang terjadi pada struktur pohon di alam ketika pohon menerima beban statis yang berasal dari berat tubuhnya sendiri. Gaya yang berasal dari atap dialirkan ke

⁵⁸ Schulitz, Sobek, Habermann. *Steel Construction Manual* (Munich: Institut Fur Internationale Architektur, 2000), hlm. 329

cabang-cabang kolom pohon baja, kemudian diteruskan ke batang pohon baja dan pondasi pohon baja.



Gambar 4.9. Aliran gaya pada struktur pohon baja
Sumber: *Mechanics Of Novel Compression Structures*, S D Waller, hlm. 208 (telah diedit)

Walaupun kolom pohon baja yang menopang atap Bandara Stuttgart bukanlah satu kolom pohon baja utuh tetapi merupakan gabungan dari empat subkolom pohon baja, keempat subkolom pohon baja tersebut tetap dapat menahan beban yang berasal dari atap. Hal ini disebabkan karena keempat subkolom pohon baja tersebut digabungkan pada bagian batangnya dan ditunjang dengan satu pondasi yang sama sehingga gaya (beban) yang berasal dari atap tidak tersebar tetapi terkonsentrasi menuju satu pondasi yang sama. Jika seandainya, keempat subkolom pohon baja tersebut tidak mengalami penggabungan pada batang maupun pondasi maka kemungkinan pembengkokan yang terjadi pada batang akan lebih besar. Beban dari atap akan semakin menekan

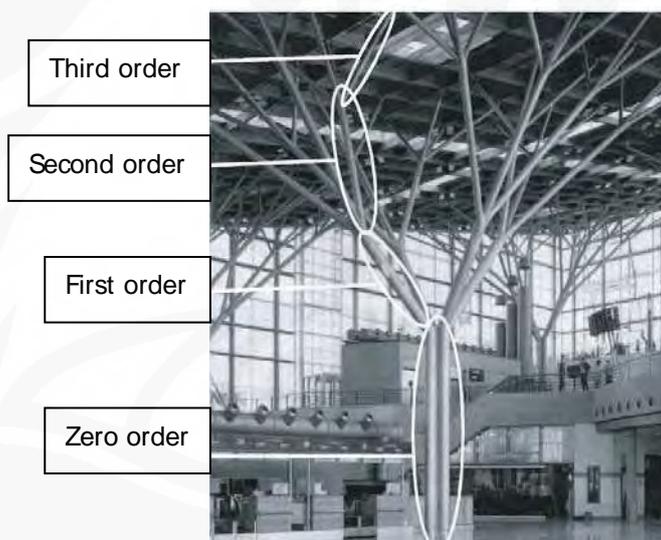


Gambar 4.10. Analisa aliran gaya pada struktur pohon baja yang tidak digabung
Sumber:

<http://www.flickr.com/photos/7314281@N04/2856054585/> (telah diedit)

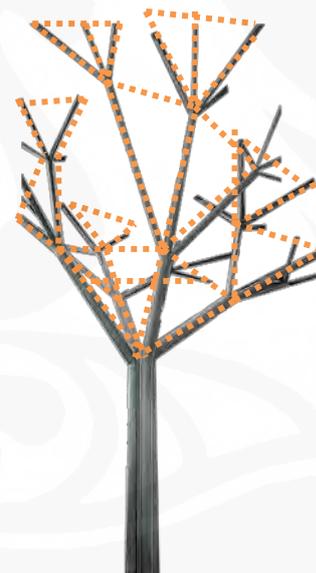
batang, terlebih didukung dengan bentuk cabang yang miring lebih jauh ke samping dan hanya berada di satu sisi saja.

Terdapat tiga titik poin pencabangan pada kolom pohon baja sehingga konstruksi kolom pohon baja ini juga disebut sebagai struktur *third-order*.⁵⁹ Titik-titik poin ini merupakan tempat penggabungan aliran gaya. Penggabungan aliran gaya terbesar terdapat di titik *zero order* yaitu pada bagian pertemuan cabang dengan batang. Jika diperhatikan, cabang-cabang kolom pohon baja ini membentuk suatu susunan segitiga. Seperti yang kita ketahui selama ini bahwa bentuk struktur yang terdiri dari segitiga merupakan bentuk struktur yang lebih kaku daripada bentuk persegi empat. Bentuk tersebut tidak akan goyah bila menerima beban dari atas maupun samping. Dengan adanya cabang-cabang yang membentuk suatu susunan segitiga maka kolom pohon baja yang ada di Bandara Stuttgart ini akan memiliki kekakuan dan kekuatan struktur yang baik sehingga tidak akan mudah goyah ketika menerima beban statis dari atap maupun beban dinamis berupa angin dan gempa.



Gambar 4.11. Struktur pohon baja sebagai struktur *third-order*

Sumber: *Mechanics Of Novel Compression Structures*
S D Waller, hlm. 29



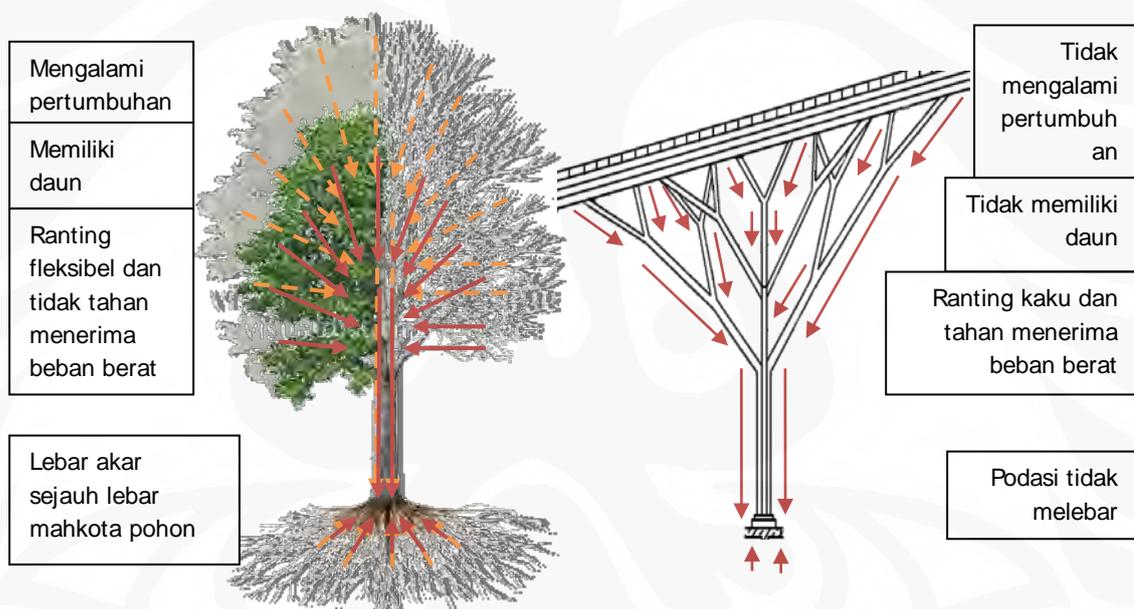
Gambar 4.12. Struktur pohon baja membentuk suatu susunan segitiga

Sumber:
<http://www.flickr.com/photos/7314281@N04/2856054585/> (telah diedit)

⁵⁹ S D Waller. *Mechanics Of Novel Compression Structures*. Cambridge: University Press, 2006, hal. 12.

4.1.4 ANALISIS KOLOM POHON BAJA DAN STRUKTUR POHON ALAMI

Walaupun bentuk dari kolom pohon baja di Bandara Stuttgart sangat menyerupai dengan bentuk struktur pohon alami, kolom pohon baja dengan struktur pohon alami sebenarnya banyak memiliki perbedaan. Hal mendasar yang membedakan kolom pohon baja bandara Stuttgart dengan struktur pohon di alam adalah pertumbuhan. Kolom pohon baja tidak mengalami pertumbuhan seperti yang dialami oleh struktur pohon di alam sehingga beban statis kolom pohon baja yang berasal dari berat dirinya dan atap yang ditopangnya akan selalu sama. Berbeda dengan struktur pohon alami yang terus mengalami pertumbuhan sehingga beban statis yang diterima akan selalu mengalami perubahan.



Gambar 4.13. Perbedaan struktur pohon alami dengan kolom pohon baja

Sumber: <http://visual.merriam-webster.com/plants-gardening/plants/tree/structure-tree.php> (telah diedit)

Perbedaan lainnya, kolom pohon baja tidak memiliki daun. Kolom pohon baja hanya tersusun dari batang, cabang, ranting dan pondasi. Berbeda dengan struktur pohon alami yang umumnya memiliki daun. Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya di bab 3, daun memiliki peran yang cukup penting di dalam sistem struktur pohon alami. Daun memiliki sifat fleksibel yang berfungsi

sebagai pelindung pertama ranting dari angin. Dengan adanya daun, angin dapat disebarkan sehingga ranting tidak akan mudah patah. Jika ranting tidak memiliki daun maka ranting akan mudah patah.

Walaupun kolom pohon baja tidak memiliki daun sebagai pelindung ranting, ranting (subcabang) kolom pohon baja tidak mudah mengalami patah. Hal ini disebabkan karena ranting kolom pohon baja memiliki sifat yang kaku dan kuat. Subcabang kolom pohon baja mampu menahan atap seluas 704 m² yang beratnya melebihi berat cabang kolom pohon baja. Tidak seperti subcabang kolom pohon baja yang kuat dan kaku, ranting (subcabang) struktur pohon di alam memiliki sifat yang fleksibel dan mudah patah sehingga ranting struktur pohon di alam tidak dapat menerima beban yang berat di atas rantingnya. Beban yang dapat ditopang ranting struktur pohon hanya dapat seberat daun. Namun, sifat ranting yang fleksibel tersebut memiliki peran penting untuk sistem struktur pohon yaitu untuk menyebarkan energi angin agar sebelum sampai ke batang. Selain itu juga, sifat ranting yang fleksibel berfungsi untuk menahan beban angin agar ranting tidak mudah patah.

Subcabang kolom pohon baja memang sengaja didesain kaku dan kuat. Hal ini bertujuan agar subcabang kolom pohon baja tersebut tidak mengalami pembengkokan ketika menerima beban dinamis berupa angin atau gempa. Jika subcabang kolom pohon baja tersebut dirancang sama dengan subcabang struktur pohon alami yaitu fleksibel maka atap yang ditopang oleh subcabang tersebut akan selalu bergerak-gerak, tidak akan tertopang dengan kuat dan akan lebih mudah terjadi pembengkokan. Hal tersebut dapat membahayakan orang-orang yang berdiri di bawah kolom tersebut.



Gambar 4.14. Analisis jika subcabang kolom pohon baja memiliki sifat fleksibel

Sumber: <http://www.flickr.com/photos>

Perbedaan lain yang terdapat antara kolom pohon baja dan struktur pohon di alam ada pada bentuk batang dan pondasinya. Bentuk batang yang menopang kolom pohon baja berbeda dengan bentuk batang yang menopang struktur pohon di alam. Batang yang menopang kolom pohon baja tidak membesar pada bagian bawahnya. Berbeda dengan batang struktur pohon di alam yang mengharuskan batangnya membesar pada bagian bawah agar dapat berdiri stabil ketika menerima beban statis dan dinamis yang menimpa dirinya. Bentuk pondasi kolom pohon baja juga berbeda dengan bentuk pondasi struktur pohon di alam. Bentuk pondasi kolom pohon baja tidak melebar sepanjang cabang kolom pohon baja. Berbeda dengan bentuk pondasi struktur pohon di alam yang melebar sepanjang mahkotanya.

4.1.5 KESIMPULAN

Secara garis besar, fungsi struktural dari batang dan pondasi yang terdapat pada kolom pohon baja sama dengan fungsi struktural batang dan pondasi yang terdapat pada struktur pohon di alam yaitu sebagai penopang dan penunjang berdirinya struktur pohon. Karakteristik dari batang pohon di alam juga tidak jauh berbeda dengan kolom pohon baja bandara Stuttgart yaitu kaku dan kuat. Kekakuan dan kekuatan yang dimiliki masing-masing batang baik dari kolom pohon baja maupun struktur pohon di alam mampu membuat batang struktur pohon tetap dapat berdiri dengan stabil walaupun menahan beban-beban yang menimpa dirinya. Namun, setelah dianalisa lebih lanjut, kolom pohon baja dan struktur pohon alami ternyata memiliki banyak perbedaan. Perbedaan-perbedaan yang telah dijelaskan sebelumnya merupakan sifat-sifat mendasar yang justru harus dimiliki oleh sebuah struktur pohon. Jadi, walaupun memiliki beberapa persamaan, kolom pohon baja di Bandar Stuttgart tidak dapat dianalogikan dengan struktur pohon yang hidup di alam. Secara jelasnya, kolom pohon baja hanya menerapkan bentuk yang sama pada luarnya saja tetapi tidak menerapkan sistem struktur pohon yang hidup di alam.

4.2 TEATER KEONG MAS TMII



Gambar 4.15. Teater Keong Mas TMII

Sumber: <http://www.flickr.com/photos>

4.2.1 DATA TEKNIS⁶⁰

Lokasi	: Taman Mini Indonesia Indah, Jakarta Timur
Fungsi	: Teater IMAX
Arsitek	: Dpl. Ing. Eddy W Utoyo, IAI Ir. Timmy Setiawan, IAI Ir. Frangky Du Ville, IAI Ir. Djoeachir, IAI Ir. Iman Sudibyo, IAI
Ahli Struktur	: Ir. Paul Retika, Msc
Pembangunan	: 1982
Luas lahan	: 7245 m ²
Luas bangunan	: 3250 m ²
Material struktur	: Beton dan baja

4.2.2 DESKRIPSI

Dibangun pada tahun 1982 di area Taman Mini Indonesia Indah (TMII) Jakarta Timur, teater IMAX Keong Emas telah menjadi simbol TMII sampai saat ini. Teater IMAX Keong Mas secara resmi dibuka pada tanggal 20 April 1984

⁶⁰ Arsip Data Kantor Teater Keong Mas TMII

oleh Ibu Tien Soeharto.⁶¹ Pada mulanya, teater ini bertujuan sebagai sarana rekreasi yang mendidik guna memperkenalkan kekayaan alam dan budaya bangsa melalui tayangan film (audio-visual) layar raksasa dengan menggunakan kecanggihan teknologi sinematografi modern proyektor IMAX melalui pemutaran film “Indonesia Indah”. Film tersebut juga menjadi salah satu cara bagi para turis untuk mengenal keindahan Indonesia. Namun pada saat ini, selain memutar film tentang Indonesia, teater IMAX Keong Emas juga memutar film asing (film import) yang tetap memiliki hubungan dengan ilmu pengetahuan, teknologi, kebudayaan, sumber daya alam, lingkungan dan pelestariannya tanpa meninggalkan nilai-nilai hiburan.

Teater Imax Keong Mas adalah satu-satunya teater IMAX terbesar di Indonesia yang bangunannya dibuat menyerupai bentuk sebuah keong raksasa.⁶² Pada tahun 1985-1991, teater IMAX Keong Emas pernah menyanggah rekor layar terbesar untuk teater IMAX di dunia dan masuk dalam Guinness Book of Record.⁶³ Selain itu, teater Imax Keong Mas juga termasuk ke dalam 7 teater Imax terbaik di dunia disandingkan dengan bangunan rancangan Santiago Calatrava yaitu gedung seni dan pertemuan L'Hemisferic.

Kata IMAX merupakan singkatan bahasa Inggris *Image Maximum*, yaitu sebuah proyeksi film yang memiliki kemampuan gambar dengan ukuran dan resolusi yang lebih besar dari film konvensional lainnya. Ukuran standar layar IMAX adalah 22 meter lebar dan 16 meter panjang.⁶⁴ Teater IMAX Keong Mas sudah memenuhi ukuran standar layar IMAX yaitu 21.5 m x 29.3 m. Dengan layar sebesar itu, Teater IMAX Keong Mas TMII mampu menampung 920 orang penonton kelas ekonomi dan 36 orang penonton kelas VIP. Selain memiliki ukuran layar yang besar teater IMAX Keong Mas juga memiliki sistem tata suara yang baik. Sistem tata suara teater IMAX Keong Mas berupa sistem suara digital

⁶¹ Teater IMAX Keong Mas. <http://mediasonline.com/readnews.php?id=1267&menu=berita&kategori=Hiburan> (02 Juni 2010)

⁶² Ibid

⁶³ Teater IMAX Keong Mas. http://perfilman.pnri.go.id/kliping_artikel.php (02 Juni 2010)

⁶⁴ Ibid

berkekuatan 12000 watt dengan 6 buah pengeras suara sehingga menghasilkan kualitas suara yang sangat jernih. Teknologi itu diyakini mampu membawa penonton masuk dan terlibat dalam setiap adegan film yang sedang diputar.

Teater IMAX Keong Mas dibangun diatas lahan seluas 4,4 ha. Areal seluas 4,4 ha ini terdiri dari⁶⁵

1. Bangunan

- a. Gedung teater
- b. Gedung kantor
- c. Gedung Toilet Umum
- d. Gedung (untuk Ruang makan dan Musholah) karyawan
- e. Power House

2. Areal Parkir Kendaraan, berkapasitas

- a. 235 kendaraan sedan/minibus
- b. 24 kendaraan bus/microbus

3. Taman, meliputi :

- a. Taman bagian depan, sebagai penunjang keindahan
- b. Taman bagian samping dan belakang, berupa tanaman keras (pohon) sebagai perindang



Gambar 4.16. Areal Teater Keong Mas TMII
Sumber: Dokumentasi Keong Mas TMII

⁶⁵ Keong Mas. <http://www.keongemas.com/selayang.htm> (08 Juni 2010)

4.2.3 ANALISIS BENTUK BANGUNAN

Bentuk Teater Keong Mas diadaptasi dari bentuk cangkang hewan keong. Inspirasi dasar bentuk teater ini berasal dari cerita rakyat Indonesia yang sangat terkenal yaitu legenda keong mas. Secara kasat mata, teater keong mas ini akan nampak seperti bentuk cangkang keong yang melingkar membentuk kerucut dengan pusat sumbu spiral. Dilihat dari arah lingkaran cangkang, bentuk melingkar cangkang teater keong mas TMII menyerupai bentuk spiral cangkang keong berjenis *sinitral shell* karena bentuk cangkang keong mas TMII ini memiliki bentuk cangkang (spiral cangkang) yang memutar ke arah kiri.



Gambar 4.17. Jenis struktur cangkang Keong Mas TMIII serupa keong berjenis cangkang *sinitral*

Sumber: Dokumentasi Keong Mas TMII

Namun, tidak seperti bentuk lingkaran spiral cangkang hewan keong yang membentuk ruang bagi tempat berdiam tubuh lunak keong, bentuk spiral teater keong mas ini hanya sebagai elemen estetika. Bentuk spiral yang terdapat di keong mas hanya sebagai elemen penambah pada bagian luar cangkang agar bentuk cangkang teater keong mas menyerupai bentuk cangkang hewan keong yang hidup di alam. Bentuk spiral cangkang teater ini tidak membentuk ruang pada bagian dalam teater. Hanya cangkang yang berbentuk seperti kubah yang membentuk ruang pada bagian dalam teater.

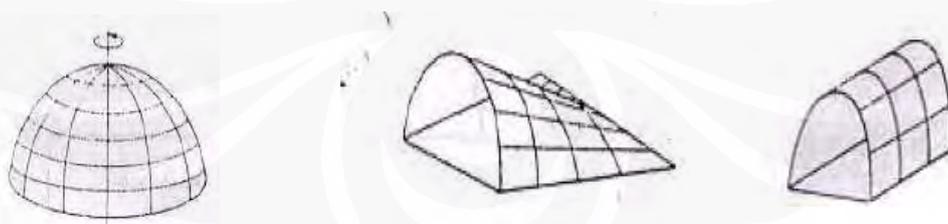


Gambar 4.18. Perbedaan bagian dalam cangkang Keong Mas TMII dengan cangkang keong alami
 Sumber: Dokumentasi Keong Mas TMII dan http://en.wikipedia.org/wiki/Gastropod_shell

Untuk menambah kemiripan bentuk cangkang teater keong Mas dengan cangkang keong yang hidup di alam maka dibuat suatu ruang tambahan di bagian depan gedung yang berbentuk seperti kepala keong. Ruang ini berfungsi sebagai tempat menyambut pengunjung teater. Pemberian warna emas pada bagian luar cangkang juga bertujuan untuk memperoleh kemiripan bangunan dengan hewan keong mas.

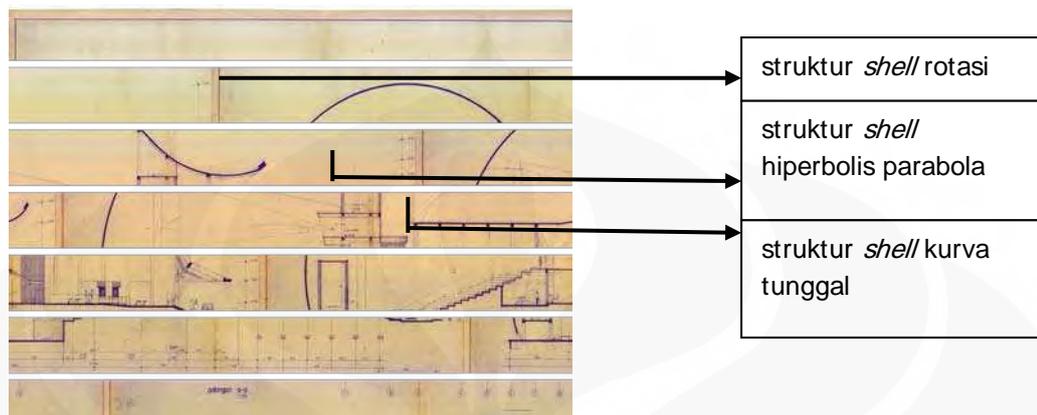
4.2.4 ANALISIS STRUKTUR BANGUNAN

Bangunan teater Keong Mas TMII memiliki tiga macam sistem struktur *shell* pembentuk bangunannya. Ketiga macam sistem struktur *shell* tersebut meliputi, struktur *shell* rotasi (*rotational surface shell*), struktur *shell* hiperbolis parabola (*hyperbolic paraboloid shell*) dan struktur *shell* kurva tunggal (*single curved shell*). Struktur *shell* rotasi digunakan pada bagian utama bangunan yaitu ruang nonton teater, struktur *shell* hiperbolis parabola digunakan pada bagian kanopi ruang utama sedangkan struktur *shell* kurva tunggal digunakan pada bagian lobi bangunan.



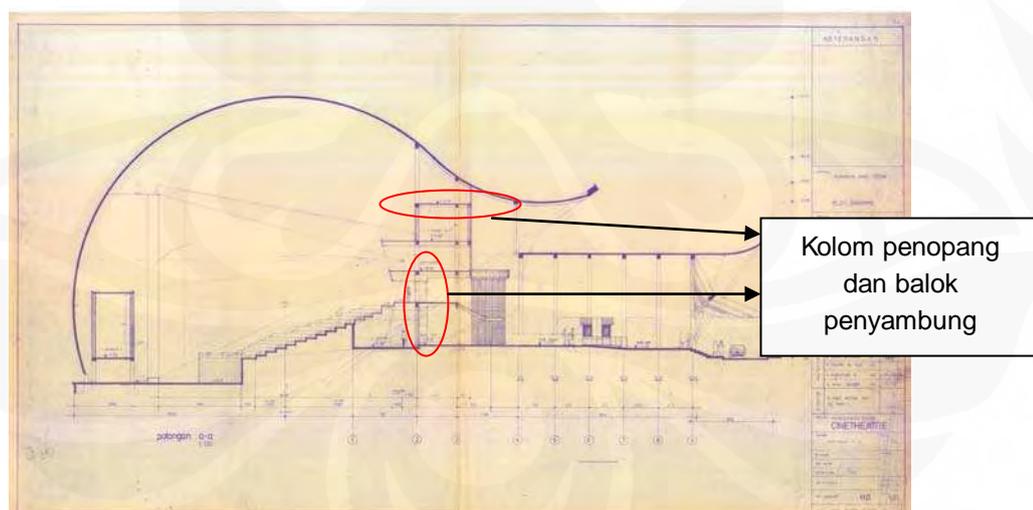
Gambar 4.19. Jenis-jenis struktur *shell* (a) struktur *shell* rotasi, (b) struktur *shell* hiperbolis. (c) struktur *shell* kurva tunggal

Sumber: http://eprints.undip.ac.id/1620/1/struktur_shell_pada_opera_house.pdf



Gambar 4.20. Jenis-jenis struktur *shell* yang ada pada struktur cangkang Keong Mas TMII
Sumber: Dokumentasi Keong Mas TMII

Bangunan utama teater keong mas TMII yang berbentuk kubah menggunakan sistem struktur *shell* rotasi dengan diameter 46 m dan ketebalan 20 cm untuk bagian bawah serta 15 cm untuk bagian atasnya. Bangunan ini menggunakan pondasi tiang pancang dari beton prategang yang ditancapkan sampai kedalaman rata-rata 18 m. dan dihubungkan oleh ring, sehingga sangat cocok untuk menahan gempa. Material yang digunakan untuk menyusun struktur *shell* merupakan material beton bertulang yang dibentuk menyerupai busur. Terdapat kolom penopang tambahan serta balok-balok penyambung kolom pada teater utama sebagai penopang ruang mesin, ruang proyektor dan pintu masuk.



Gambar 4.21. Gambar potongan Keong Mas TMII
Sumber: Dokumentasi Keong Mas TMII

Sistem struktur kanopi kubah menggunakan sistem struktur *shell* hiperbolis parabola dengan konstruksi beton tekan tiga dimensi yang menggunakan rib baja tarik serta pengisi bidang kaca khusus. Menurut penjelasan pekerja setempat pernah terjadi keretakan antara sambungan struktur *shell* rotasi dengan struktur *shell* hiperbolis parabola. Hal ini disebabkan karena ikatan antara kedua struktur tersebut terlalu kaku sehingga tidak memberikan ruang gerak ketika terjadi gerakan antara struktur pada saat menerima bebabn dinamis. Walaupun telah pernah terjadi keretakan pada bagian sambungan struktur *shell* dengan struktur *shell* hiperbolis parabola, bangunan teater keong mas ini dapat tetap berdiri dengan kokoh hingga sekarang. Kekokohan dan kekuatan struktur bangunan keong mas ini sudah pernah diuji sebelumnya dengan beban berupa kumpulan batu sebesar 300 ton. Beban sebesar 300 ton diletakkan pada bagian atap struktur *shell* rotasi dan lengkungan yang terjadi hanya sebesar 3 mm. Selain uji kekokohan dan kekuatan. Kestabilan dan kekakuan struktur bangunan teater keong mas ini juga telah pernah diuji melalui uji gaya lateral. Struktur bangunan didorong dengan beban sebesar 400 kg dan tidak mengalami pergeseran sedikit pun.



Gambar 4.22. Tes pembebanan pada bangunan Keong Mas TMII
Sumber: Dokumentasi Keong Mas TMII



Gambar 4.23. Konstruksi bangunan Keong Mas TMII
Sumber: Dokumentasi Keong Mas TMII

Bagian lobi bangunan menggunakan struktur *shell* kurva tunggal. Material utama penyusun struktur *shell* kurva tunggal sama dengan material utama penyusun teater utama bangunan dan kanopi teater utama yaitu beton bertulang. Pada bagian depan lobi terdapat kanopi dari baja dan kaca yang diikatkan pada struktur *shell* kurva tunggal tersebut. Pada bagian lobi terdapat beberapa kolom penopang yang berfungsi untuk menopang bagian *shell* yang tidak menyentuh tanah sehingga gaya-gaya dari beban statis maupun dinamis dapat tetap disalurkan ke tanah.



Gambar 4.24, 4.25, dan 4.26. Beton penyusun struktur shell dan baja pada kanopi lobi
Sumber: Dokumentasi pribadi

4.2.5 ANALISIS STRUKTUR CANGKANG KEONG MAS TMII DENGAN CANGKANG KEONG ALAMI

Pada umumnya, konsep bentuk struktur cangkang Keong Mas TMII sama dengan bentuk struktur cangkang keong alami yaitu mempunyai permukaan lengkung. Garis lengkung yang menyusun permukaan cangkang keong alami dapat kita lihat pada gambar dibawah. Garis lengkung pada permukaan cangkang tersebut menjadi ide dasar bentuk lengkung struktur cangkang (*shell structure*).

Garis lengkung pada struktur cangkang keong alami ditampakkan melalui bentuk lengkung beton penyusunnya.



Gambar 4.27, 4.28, dan 4.29. Garis lengkung pada struktur cangkang keong alami dan struktur cangkang Keong Mas TMII
Sumber: Dokumentasi pribadi

Permukaan struktur cangkang keong alami yang bersifat tipis, kaku dan kuat juga menjadi sifat dasar dari struktur cangkang Keong Mas TMII. Ketipisan struktur cangkang Keong Mas TMII dapat dilihat melalui perbandingan ukuran beton yang menyusun permukaannya dengan luas lantai bangunan. Jika dibandingkan dengan luas teater utama Keong Mas TMII sebesar 2116 m², dengan tebal beton penyusun permukaan lengkung cangkang yang hanya memiliki ketebalan 15-20 cm maka tebal permukaan lengkung cangkang hanya 1/105.8 m² dari luas teater utama. Ukuran perbandingan tersebut dapat membuktikan bahwa struktur cangkang Keong Mas TMII memiliki sifat tipis.

Sifat kekakuan dan kekutan struktur cangkang Keong Mas TMII juga telah dijelaskan sebelumnya. Walaupun sudah diberi beban tekan sebesar 300 ton dan beban lateral sebesar 400 kg, struktur cangkang Keong Mas TMII tidak mengalami pergerakan dan hanya mengalami pembengkokan sebesar 3 mm. Struktur cangkang Keong Mas TMII tersebut tetap berdiri stabil di tempatnya. Beban tekan sebesar 300 ton tersebut disebarkan secara melingkar pada permukaan lengkung cangkang. Sifat kekakuan dan kekuatan struktur cangkang Keong Mas TMII tersebut dicontoh dari sifat kekuatan dan kekakuan struktur cangkang keong yang hidup di alam. Cangkang keong alami tidak mudah dipecahkan oleh capit tajam kepiting. Diperlukan waktu yang cukup lama untuk memecahkan cangkang keong tersebut. Ketika energi dari gaya (beban) capit

kepiting sampai ke cangkang keong maka gaya tersebut akan disebarkan secara merata di lapisan pertama cangkang keong dan retakan-retakan kecil akan dihasilkan oleh lapisan pertama cangkang keong untuk menghindari perpindahan beban energi ke bagian cangkang yang lebih dalam. Proses penyebaran gaya inilah yang juga menjadi ide dasar struktur *shell* pada umumnya dan struktur cangkang Keong Mas TMII pada khususnya

Walaupun bentuk dari struktur cangkang keong alami sangat menyerupai struktur cangkang Keong Mas TMII serta sifat-sifat struktur cangkang keong alami juga menyerupai struktur cangkang Keong Mas TMII, sebenarnya juga terdapat perbedaan mendasar di antara kedua struktur tersebut. Hal mendasar yang membedakan struktur cangkang keong dengan struktur cangkang Keong Mas TMII adalah pertumbuhan. Struktur cangkang Keong Mas TMII tidak mengalami pertumbuhan seperti yang dialami oleh struktur cangkang keong alami sehingga beban struktur cangkang Keong Mas TMII yang berasal dari berat dirinya dan atap yang ditopangnya akan selalu sama. Berbeda dengan struktur cangkang keong alami yang terus mengalami pertumbuhan sehingga beban statis yang diterima akan selalu mengalami perubahan. Kolom-kolom penopang dan balok-balok penyambung yang terdapat pada cangkang Keong Mas TMII juga menjadi salah satu perbedaan antara struktur cangkang Keong Mas TMII dengan struktur cangkang keong alami. Namun, perbedaan kolom penopang dan balok penyambung ini bukanlah menjadi perbedaan mendasar yang membedakan struktur cangkang Keong Mas TMII dengan struktur cangkang keong alami sebab kolom penopang dan balok penyambung tersebut hanyalah konstruksi tambahan untuk menopang ruang-ruang kecil seperti ruang mesin dan ruang proyektor. Perbedaan-perbedaan yang ada ini bukanlah menjadi tolak ukur penerapan struktur cangkang keong alami ke desain struktur cangkang keong mas TMII. Prinsip-prinsip lain seperti kelengkungan, ketipisan, kekakuan dan kekuatan tetap menjadi hal-hal mendasar yang dicontoh oleh struktur cangkang keong mas TMII dari struktur cangkang keong alami.

4.2.6 KESIMPULAN

Secara garis besar, karakteristik struktural dari struktur cangkang keong mas TMII sama dengan struktur cangkang keong alami. Karakteristik struktural berupa lengkung, tipis, kaku dan kuat yang dimiliki oleh struktur cangkang keong alami juga dimiliki oleh struktur cangkang Keong Mas TMII. Walaupun terdapat perbedaan mendasar di antara kedua struktur tersebut yaitu pertumbuhan dan adanya penambahan kolom-kolom penopang serta balok-balok penyambung, struktur cangkang Keong Mas TMII tetap dapat dikatakan serupa dengan struktur cangkang keong alami. Perbedaan yang ada ini bukanlah menjadi tolak ukur penerapan struktur cangkang keong alami ke desain struktur cangkang Keong Mas TMII sebab perbedaan ini merupakan suatu prinsip dasar yang dimiliki oleh makhluk hidup dan umumnya tidak mungkin diterapkan oleh struktur suatu bangunan. Secara jelasnya, karakteristik struktur cangkang keong alami sudah diterapkan ke dalam struktur cangkang Keong Mas TMII.

4.3 HASIL ANALISIS

**Tabel Kesimpulan Perbandingan Struktur Pohon Alami
Dengan Kolom Pohon Baja Bandara Stuttgart**

	Struktur Pohon Alami	Kolom Pohon Baja Terminal Bandara Stuttgart
Pertumbuhan	Mengalami pertumbuhan	Tidak mengalami pertumbuhan
Daun	Memiliki daun untuk mencegah kepatahan ranting	Tidak memiliki daun
Cabang dan ranting	Fleksibel (dapat berayun-ayun)	Kaku (tidak dapat berayun-ayun)
Batang (penopang)	Kaku, kuat, keras, ringan	Kaku, kuat, keras, ringan
Akar (Pondasi)	Melebar sejauh lebar mahkota pohon	Tidak melebar sejauh mahkota pohon (telah dirancang sedemikian rupa sehingga lebar tidak perlu sejauh mahkota pohon)
Kesimpulan: Sifat struktural kolom pohon baja tidak serupa dengan sifat struktural pohon alami. Kolom pohon baja tidak dapat dianalogikan dengan struktur pohon alami		

Tabel 4.1. Perbandingan struktur pohon alami dengan kolom pohon baja

**Tabel Kesimpulan Perbandingan Struktur Cangkang Keong
Alami Dengan Struktur Cangkang Keong Mas TMII**

	Struktur Cangkang Keong Alami	Struktur Cangkang Keong Mas TMII
Pertumbuhan	Mengalami pertumbuhan	Tidak mengalami pertumbuhan
Kelengkungan	Memiliki bentuk lengkung (Kelengkungan ditunjukkan dengan adanya garis-garis lengkung pada permukaan cangkang)	Memiliki bentuk lengkung (Kelengkungan ditunjukkan dengan adanya beton-beton yang berbentuk lengkung)
Ketipisan	Memiliki cangkang yang tipis (salah satu sifat dasar cangkang keong)	Memiliki cangkang yang tipis (Perbandingan luas bangunan dengan tebal beton lengkung pembentuk cangkang adalah $1/105,8 \text{ m}^2$)
Kekuatan dan Kekakuan	Kuat dan kaku (Mampu menahan energi dari pukulan capit kepiting dalam waktu yang cukup lama)	Kuat dan kaku (Telah dilakukan tes pembebanan sebesar 300 ton pada bagian atas cangkang. Lendutan yang terjadi hanya sebesar 3mm)
Penyebaran gaya	Gaya pada permukaan cangkang disebar terlebih dahulu	Gaya pada permukaan cangkang disebar terlebih dahulu
Kesimpulan: Sifat struktural cangkang keong alami cukup serupa dengan sifat struktural cangkang Keong Mas TMII. Cangkang Keong Mas TMII cukup dapat dianalogikan dengan cangkang keong alami		

Tabel 4.2. Perbandingan cangkang keong alami dengan cangkang Keong Mas TMII

BAB V

KESIMPULAN

Melalui analisis tentang struktur makhluk hidup yang ada di alam terbukti bahwa struktur makhluk hidup di alam memiliki karakteristik yang baik sebagai suatu struktur. Struktur yang ada pada tiap makhluk hidup yang ada di alam ini memiliki kestabilan, kekokohan dan kekuatan dalam menopang berat tubuh mereka. Kestabilan, kekokohan dan kekuatan itu terbentuk karena struktur makhluk hidup yang ada di alam ini telah mengalami evolusi dalam kurun waktu yang sangat lama dan mampu melewati rintangan berupa penerimaan beban statis dan dinamis. Karena alasan tersebutlah maka banyak perancang yang mendesain struktur bangunannya seperti struktur makhluk hidup.

Namun di dalam perancangannya tidak semua karakteristik struktur makhluk hidup di alam diterapkan ke dalam karakteristik struktur bangunan. Jika diterapkan ke dalam struktur bangunan terdapat beberapa sifat struktural makhluk hidup yang tidak cocok untuk diterapkan. Seperti halnya penerapan struktur pohon alami pada kolom pohon baja bandara Stuttgart. Struktur pohon alami tidak cocok diterapkan ke dalam kolom pohon baja sebab struktur pohon alami memiliki beberapa karakteristik yang tidak dapat diterapkan pada kolom pohon baja. Hanya karakteristik yang dianggap penting yang diterapkan oleh perancang ke dalam struktur bangunannya. Karakteristik kaku dan kuatnya struktur batang pada pohon secara khusus dan struktur pohon secara keseluruhan merupakan karakteristik yang diterapkan ke dalam kolom pohon baja. Karakteristik dasar struktur pohon alami seperti bertumbuh tidaklah digunakan pada kolom pohon baja. Karakteristik cabang dan ranting pohon yang fleksibel juga tidak diterapkan pada struktur baja pohon. Begitu juga dengan penerapan struktur cangkang keong alami ke dalam struktur cangkang keong Mas TMII. Karakteristik struktural berupa lengkung, tipis, kaku dan kuat yang dimiliki oleh struktur cangkang keong alami merupakan karakteristik yang diterapkan ke dalam struktur cangkang Keong Mas TMII. Karakteristik tumbuh dan berkembang yang dimiliki oleh struktur cangkang keong alami tidak diterapkan pada struktur cangkang Keong

Mas TMII. Hal-hal ini dilakukan agar struktur bangunan yang diadaptasi dari struktur makhluk hidup tersebut tidak mengalami kegagalan di dalam menahan dan menopang beban-beban yang mengenainya dirinya baik itu beban stabil maupun dinamis.

Oleh karena itu, di dalam menerapkan struktur makhluk hidup ke dalam struktur bangunan, struktur bangunan hanya menerapkan beberapa karakteristik struktur makhluk hidup dan melakukan penyesuaian sehingga struktur bangunan dapat berdiri dengan tegak, seimbang, stabil, kaku dan kuat. Dari perbandingan struktur pohon alami dengan kolom pohon baja serta struktur cangkang alami dengan struktur cangkang Keong Mas TMII, hanya struktur cangkang Keong Mas TMII yang memiliki sifat hampir serupa dengan struktur cangkang keong alami.

Walapun salah satu struktur makhluk hidup yang telah dibahas tidak cocok diterapkan ke dalam struktur bangunan, keuntungan-keuntungan penerapan dapat tetap diperoleh. Dengan adanya penerapan struktur makhluk hidup, bentuk-bentuk arsitektural suatu bangunan akan menjadi lebih bervariasi dan kreatif.

DAFTAR REFERENSI

- Charleson, Andrew W. (2005). *Structure As Architecture*. Oxford: Elsevier.
- Collingwood, RG. (1945). *The Idea of Nature*. Oxford: Clarendon Press.
- Gorden, J E. *Structures : Or Why Things Don't Fall Down*. Penguin Books.
- Levy, Matthys & Mario Salvadori. (1994). *Why Buildings Fall Down : How Structures Fail*. New York: W W Norton Company.
- Macdonal, Angus J. (1994). *Structure and Architecture* (2nd ed). Oxford: Reed Educational and Professional Publishing Ltd.
- Muench, David dan Donald G. Pike. (1975). *Anasazi: Ancient People of the Rock*. California: American West Publishing Company.
- Norman, Crowe. (1995). *Nature and the idea of a man-made world*. Cambridge: MIT Press.
- S D Waller. (2006). *Mechanics Of Novel Compression Structures*. Cambridge: University Press.
- Schulitz, Sobek, Habermann. (2000). *Steel Construction Manual*. Munich: Institut Fur Internationale Architektur.
- Thomas, Peter. (2004), *Tree : Their Natural History*. Cambridge: University Press.
- Tsui, Eugene. (1997). *Evolutionary Architecture: Nature As A Basis For Design*. Kanada: John Wiley & Sons.
- James, Ken. (2003). Dynamic loading of tress by Ken James. *Journal of Arboriculture* <http://www.treelink.org/joa/2003/may/06James.pdf>

Arsip Data Kantor Keong Mas TMII

Wikipedia. *Structural Loads*. http://en.wikipedia.org/wiki/Structural_Loads (28 April 2010)

Wikipedia. Akar. <http://id.wikipedia.org/wiki/Akar> (20 April 2010)

Wikipedia. *Gastropod Shell*. <http://en.wikipedia.org/wiki/GastropodShell> (16 Mei 2010)

Ennos, Roland. (2010). *Trees: Magnificent Structures*.
<http://www.nhm.ac.uk/nature-online/life/plants-fungi/magnificent-trees/session3/index.html> (10 Mei 2010)

Wahyono, Budi. Struktur dan Fungsi Bagian Tumbuhan.
http://www.crayonpedia.org/mw/Struktur_dan_fungsi_bagian_tumbuhan (5 Mei 2010)

Gastropoda.
http://www.manandmollusc.net/advanced_introduction/moll101gastropoda.html
(Mei 2010)

Shell. <http://www.applesnail.net/content/anatomy/shell.php> (16 Mei 2010)

Young, Ed. *Three layered shell of deep sea snail could inspire next gen*.
http://scienceblogs.com/notrocketscience/2010/01/three-layered_shell_of_deep-sea_snail_could_inspire_next-gen.php (10 Mei 2010)

Secrets in the shell. <http://www.americanscientist.org/issues/page2/secrets-in-the-shell> (Mei 2010)

Teater IMAX Keong Mas.
<http://mediasonline.com/readnews.php?id=1267&menu=berita&kategori=Hiburan>
(02 Juni 2010)

Teater IMAX Keong Mas. http://perfilman.pnri.go.id/kliping_artikel.php (02 Juni 2010)