



UNIVERSITAS INDONESIA

**DAMPAK BENTUK *TWIST* DALAM ARSITEKTUR
KHUSUSNYA DITINJAU DARI ASPEK STRUKTUR
BANGUNAN BERTINGKAT TINGGI**

SKRIPSI

**ADIPRADANA KOUWAGAM
0405050029**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI ARSITEKTUR
DEPOK
JUNI 2009**



UNIVERSITAS INDONESIA

**DAMPAK BENTUK *TWIST* DALAM ARSITEKTUR
KHUSUSNYA DITINJAU DARI ASPEK STRUKTUR
BANGUNAN BERTINGKAT TINGGI**

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Arsitektur Fakultas Teknik Universitas Indonesia

SKRIPSI

**ADIPRADANA KOUWAGAM
0405050029**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI ARSITEKTUR
DEPOK
JUNI 2009**

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul

**DAMPAK BENTUK *TWIST* DALAM ARSITEKTUR
KHUSUSNYA DITINJAU DARI ASPEK STRUKTUR
BANGUNAN BERTINGKAT TINGGI**

yang disusun untuk melengkapi persyaratan menjadi Sarjana Arsitektur Fakultas Teknik Universitas Indonesia, adalah hasil karya saya sendiri, bukan tiruan ataupun duplikasi dari skripsi yang telah dipublikasikan di lingkungan Universitas Indonesia maupun Perguruan Tinggi atau Instansi manapun, kecuali bagian yang dikutip maupun dirujuk yang sumber informasinya telah saya nyatakan dengan benar

Nama : Adipradana Kouwagam

NPM : 0405050029

Tanda Tangan :

Tanggal : 06 Juli 2009

LEMBAR PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Adipradana Kouwagam

NPM : 0405050029

Program Studi : Arsitektur

Judul Skripsi : Dampak Bentuk *Twist* dalam Arsitektur Khususnya Ditinjau dari Aspek Struktur Bangunan Bertingkat Tinggi

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 : **Prof. Ir. Triatno Judho Hardjoko MSc., Ph.D.**

Penguji : **Ir. Achmad Hery Fuad, M. Eng.**

Penguji : **Dita Trisnawan, S.T., M. Arch. STD**

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 06 Juli 2009

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yesus Kristus, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik 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) Prof. Ir. Triatno Judho Hardjoko, M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini. Sungguh luar biasa kontribusi yang telah Bapak berikan kepada saya. Terima kasih Pak.
- (2) Dewan penguji, yang terdiri dari Ir. Achmad Hery Fuad, M. Eng., dan Dita Trisnawan, S.T., M. Arch. STD. Tanpa persetujuan Bapak berdua, saya tidak akan pernah bisa lulus dari Departemen Arsitektur pada saat ini. Terima kasih banyak Pak.
- (3) Ir. Toga H. Panjaitan A.A.Grad.Dipl., Ir. Evawani Ellisa M.Eng., Ph.D., dan Ir. Boyke Siagian, S.T., yang telah memberi saya kesempatan untuk mencicipi sepenggal rasa dunia kerja, dan juga tak lupa mencicipi manisnya podium kemenangan. Terima kasih banyak.
- (4) Ayahanda dan ibunda tercinta. Dahulu waktu awal psikotes untuk menentukan jurusan mana yang tepat, penguji memberi saya pertanyaan, “Mana yang lebih kamu sayang, ayah kamu atau ibu kamu?” Saya hanya terdiam, dan menolak untuk menjawab. Ketika dia memaksakan saya untuk menjawab, saya mengambil kertas itu, dan menuliskan “*My Parents*”. Luar biasa kasih sayang ayah dan ibu kepada saya, sehingga mungkin, tidak, **pasti**,

saya adalah putra yang paling berbahagia yang hidup di dunia ini. Terima kasih.

- (5) Buat *big bro*, istrinya, dan Aldiansyah Dickypratama Kouwagam yang baru lahir! Dilema perpolitikan sungguh menakjubkan. Taiko monyet kalah, dan Shogun boneka Ashikaga kembali berjaya. Tetapi meskipun panggung perpolitikanMU kemudian memperkenalkan nama-nama baru seperti Kazuma Kiryu ataupun Old Snake, persaudaraan kita akan selalu abadi dan tetap tidak akan tersentuh oleh apapun, dan siapapun. Terima kasih.
- (6) Buat *big sis* dan *soon-to-be-her-husband* Albert “Abe”. Diam tidak berarti acuh, diam tidak berarti benci, dan diam tidak berarti jengkel. Begitu banyak arti diam yang ada di dunia ini, tapi diam di antara kita adalah persaudaraan yang sebegitu dalamnya dan tak akan pernah bisa dilukiskan dengan kata-kata. Tapi, kalau dipikir kedua kali, sepertinya kita tidak diam sebanyak itu juga sih,, hm2,, nanti saya ganti kata pengantarnya yah,, ok2! =D
- (7) Buat *lil sis*, dan semua teman yang menelponnya setiap malam. Sindiran itu tidak pernah berarti untuk buat kau marah, untuk buat kau jengkel, dan untuk buat kau kesal. Tapi sindiran itu adalah satu-satunya cara yang bisa saya ungkapkan untuk bilang kalau saya sayang sama *my lil sis*. Sory yaa,, hehehe,, (Boleh donk cari pembenaran,, hahahahaa!)
- (8) Buat *Dota-ers*, dan *Pes-ers* Arsitektur 05 yang membuat hidup perkuliahan menjadi begitu indah. Terima kasih atas masukan dan kritikan yang telah membangun dan terkadang menjatuhkan hingga skripsi ini bisa terselesaikan. Untuk kita semua, cuma dua kata yang bisa saya sebutkan. Luar biasa.
- (9) Para *Gosipers* wanita Arsitektur 05 yang terlalu lucu buat diceritakan kembali di sini. Terima kasih. Apalagi yang telah membantu saya dalam menyusun skripsi ini ketika selesai. Biarlah nama-nama itu tidak disebutkan disini, tetapi tetap tersimpan di hati saya. Terima kasih.

- (10) Buat Arsitektur 06, yang telah mentahbiskan saya menjadi “*Kakak Terbawel*” pada acara SA Awards 06, terima kasih. Saya sangat BANGGA, (tolong dibaca dengan benar) akan *award* itu. Gwahahahahaha! Terima kasih!
- (11) Buat Arsitektur 07, yang telah membuktikan dirinya sebagai *debaters* terbaik di FTUI, terima kasih. Saya saat ini sedang menimbang-nimbang, itu boleh masuk CV apa gak ya? Hehehehehe,, Terima kasih!
- (12) Buat Arsitektur 08 juga tentunya, yang sungguh sangat cerdas dalam mengerjakan MK Pengantar Arsitektur, sehingga abang yang satu ini harus banyak begadang. Zaman kita-kita dulu, *log book* pengars itu hanya 3 atau 4 halaman, dan itu sudah dapat A. Tapiiiii,, zaman-zaman sekarang itu,, aduh2,, sampai 30 halaman coy,, sadis,, btw, terima kasih!
- (13) Buat tetangga-tetangga, yang tepatnya berjumlah 4 orang. RIVS. (diurutkan sesuai dengan urutan perkenalan pertama kali). Kalau di Makassar, ada istilah orang *okkots*, dimana mereka tidak bisa menyebutkan huruf [f], [v], dan [s]. Jadinya itu dibaca RIP. Ahahahahaha. Becanda-becanda.
- Ngomong-ngomong, kemarin saya memutuskan untuk mengelompokkan masa lalu saya ke dalam berbagai macam *chapter*. Ketika saya lahir pertama kali di dunia, judulnya “*That cute boy finally came to the world!*”. Waktu saya mendapatkan juara 1 di olimpiade sains, judulnya “*The day where I made my parents proud!*”. Ketika saya kemudian harus sakit di setiap bulan januari semenjak kuliah, judulnya adalah “*Forget it, and move on!*”. Dan perpisahan kali ini, diantara kita berempat, meninggalkan suatu *chapter* tersendiri di hati saya. “*The lesson of friendship that will last forever and ever in my heart..*”.
- Thanks.. This is the greatest chapter in my life.. And I will never forget it.. Forever..*
- (14) Buat anak-anak aksel yang begitu luar biasa. Persahabatan kita tidak akan pernah padam. Saya yakin itu, dan saya pastikan itu akan selalu begitu.
- (15) Buat anak-anak *chara* yang telah membuat masa lalu saya menjadi begitu indah dan berarti. Terima kasih.

- (16) Buat Manchester United, tim terbaik yang pernah ada sepanjang masa. (Itu dikutip dari Wikipedia.org. jadi gak boleh protes). Memang Man Utd yang terbaik, dan terima kasih telah memberi saya senyum dan tawa sepanjang musim 2008/2009, meskipun harus dikalahkan oleh Barcelona, yang memang tim kedua terbaik di dunia. Mari kita rebut kembali piala Champions dan mempertahankan gelar liga Inggris tahun ini!
- (17) Buat mas *cooly* dan mas *neewy*, yang telah membantu menamatkan berbagai macam game *prestigious* seperti GTA 4, [prototype], Last Remnants, The Sims 3, The Godfather 2, Assassin Creed, Fallout 3, Red Alert 3, *and still counting!* Thanks yaaa,, (waduh, lupa sebutin skripsi! = p)
- (18) *The last, but not least..* Dia yang namanya tidak boleh disebut ataupun yang lupa disebutkan (baca: *He/She/It*). Dirimu pasti sedang bermain dengan senang di sana, tetap tersenyum, dan tetap semangat. Ok!

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

Depok, 26 Juni 2009

Adipradana Kouwagam

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

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

Nama : Adipradana Kouwagam

NPM : 0405050029

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 karya ilmiah saya yang berjudul :

**Dampak Bentuk *Twist* dalam Arsitektur Khususnya Ditinjau dari Aspek
Struktur Bangunan Bertingkat Tinggi**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia / formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan mempublikasikan 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 : 6 Juli 2009

Yang menyatakan

Adipradana Kouwagam

ABSTRAK

Nama : Adipradana Kouwagam
Program Studi : Arsitektur
Judul Skripsi : Dampak Bentuk *Twist* dalam Arsitektur Khususnya Ditinjau dari Aspek Struktur Bangunan Bertingkat Tinggi

Fokus utama skripsi ini adalah mengenai dampak bentuk *twist* dalam arsitektur, khususnya dari aspek struktur bangunan bertingkat tinggi. Dalam menciptakan sebuah bangunan bertingkat tinggi, ada berbagai macam sistem struktur yang dapat diaplikasikan. Namun, dengan kompleksitas bentuk *twist*, arsitek perlu menentukan sistem struktur apa yang tepat dan baik untuk mewujudkannya. Metode penelitian yang digunakan adalah kajian teori dan literatur dari berbagai media, dan studi kasus menggunakan metode kualitatif dalam menganalisis. Hasil penelitian menyimpulkan bahwa setelah membandingkan dengan produk *twist* dari alam, pemenuhan bentuk *twist* sebaiknya tidak hanya bertindak sebagai wajah dan hanya menjadi beban, namun menjadi terintegrasi antara bentuk dan struktur.

Kata kunci: *twist*, struktur bangunan bertingkat tinggi, *masking*

ABSTRACT

Name : Adipradana Kouwagam
Study Program : Architecture
Judul Skripsi : The Effect of Twisted Form in Architecture, particularly in High-Rise Building Structure

The main focus of this mini-thesis is about the effect of twisted form in architecture, particularly in high-rise building structure. In creating a high-rise building, there are various structural systems that can be used. However, with the complexity of twisted form, architects need to decide what structural system that would suit best to realize it. The research method is by studying theory and literature from various media, and using the qualitative method in analyzing the case studies. After comparing with twisted product from nature, the realization of twisted form shouldn't act as a 'mask' but should integrate with the structure.

Key words: twist, high-rise building structure, masking

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	viii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	x
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR ISTILAH	xii
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Tujuan Penulisan	3
1.4 Lingkup Pembahasan	3
1.5 Metode Penulisan	3
1.6 Urutan Penulisan	4
2. LANDASAN TEORI	6
2.1 <i>Twist</i>	6
2.1.1 Definisi <i>Twist</i>	6
2.1.2 Sejarah <i>Twisted Surface</i>	8
2.1.3 Pengklasifikasian <i>Twisted Surface</i>	13
2.1.3.1 <i>Twisters</i>	15
2.1.3.2 <i>Roto-Twisters</i>	15
2.2 <i>Shell</i>	16
2.2.1 Dasar Bentuk <i>Shell</i>	16
2.2.1.1 <i>Shell</i> dari kelas <i>Mollusca</i>	17
3. SISTEM STRUKTUR BANGUNAN BERTINGKAT TINGGI	21
3.1 Definisi dan Pembagian Struktur	21

3.1.1	Struktur Funikular	21
3.2	Definisi Struktur Bangunan Bertingkat Tinggi	22
3.3	Aksi Beban pada Bangunan Bertingkat Tinggi	23
3.4	Klasifikasi Struktur Bangunan Bertingkat Tinggi	24
3.4.1	<i>Moment Resistant Frame</i>	25
3.4.2	<i>Braced Frame</i>	25
3.4.3	<i>Shear Wall</i>	26
3.4.4	Sistem Tabung	26
3.4.4.1	<i>Framed Tube</i>	27
3.4.4.2	<i>Trussed Tube</i>	28
3.5	Uji Coba Terhadap Sistem Tubular dengan <i>Trussed Tube</i>	29
4.	ANALISIS DAN STUDI KASUS	33
4.1	Struktur <i>Shell</i>	33
4.2	Aksi Beban pada Struktur <i>Shell</i>	34
4.2.1	Beban Vertikal	34
4.2.2	Beban Lateral	35
4.3	Analisis Perilaku Struktur <i>Shell</i>	36
4.4	Studi Kasus I : The Gherkin, 30 St Mary Axe, Norman Foster	37
4.4.1	Analisis	38
4.4.1.1	The Gherkin sebagai Bangunan <i>Twist</i>	39
4.4.1.2	Diagrid	40
4.4.1.3	Beban Vertikal	42
4.4.1.4	Beban Lateral	43
4.4.2	Kesimpulan	44
4.5	Studi Kasus II : Turning Torso, Santiago Calatrava	44
4.5.1	Analisis	46
4.5.1.1	Turning Torso sebagai Bangunan <i>Twist</i>	48
4.5.1.2	Beban Vertikal	48
4.5.1.3	Beban Lateral	50
4.5.2	Kesimpulan	51
4.6	Analisa Studi Kasus dengan Perilaku Struktur <i>Shell</i>	51
5.	KESIMPULAN	53
	DAFTAR PUSTAKA	55

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Objek yang ter- <i>Twist</i>	6
Gambar 2.2. Bentuk-bentuk <i>conical</i> yang tidak masuk dalam kategori <i>twisted surface</i>	7
Gambar 2.3. Deskripsi <i>twisted surface</i>	8
Gambar 2.4. Contoh bangunan yang memiliki <i>twisted surface</i> pada tahun 1500-an	10
Gambar 2.5. <i>Twisted Surface</i> pada masa <i>art nouveau</i> dan <i>jugendstil</i>	11
Gambar 2.6. <i>Twisted Surface</i> pada hiperboloid	12
Gambar 2.7. <i>Twisted Surface</i> pada tahun zaman sekarang	13
Gambar 2.8. Pengklasifikasikan <i>twisted surface</i> menurut Karel Vollers	14
Gambar 2.9. Bangunan kategori <i>twisters</i>	15
Gambar 2.10. Bangunan kategori <i>roto-twisters</i>	16
Gambar 2.11. Berbagai macam bentuk <i>shell</i>	17
Gambar 2.12. Analisa <i>twisted surface</i> pada <i>shell</i>	18
Gambar 2.13. <i>Nautilus Pompilius</i>	19
Gambar 3.1. Berbagai bangunan yang menggunakan struktur tubular disertai dengan tipe facadenya	26
Gambar 3.2. perbedaan antara <i>framed tube</i> dan <i>trussed tube</i>	28
Gambar 3.3. pengaliran gaya <i>trussed tube</i> yang juga menyangga beban gravitasi	29
Gambar 3.4. Objek uji coba	30
Gambar 3.5. Kondisi objek ketika diberi beban vertikal serta perubahannya	30
Gambar 3.6. Analisa penyebaran gaya ketika diberi beban vertikal	31
Gambar 3.7. Kondisi objek ketika diberi beban lateral	31
Gambar 3.8. Analisa penyebaran gaya ketika diberi beban lateral	32
Gambar 4.1. Analisa penyebaran gaya ketika <i>shell</i> diberi beban vertikal	35
Gambar 4.2. Analisa penyebaran gaya ketika <i>shell</i> diberi beban lateral	36
Gambar 4.3. The Gherkin	38
Gambar 4.4. Perbandingan denah The Gherkin dari lantai dasar hingga lantai puncak	39
Gambar 4.5. The Gherkin tanpa facade	40
Gambar 4.6. Diagrid pada The Gherkin	41
Gambar 4.7. Tampak depan The Gherkin dan analisa penyaluran gaya vertikal	42
Gambar 4.8. Tampak depan The Gherkin dan analisa penyaluran gaya lateral	43
Gambar 4.9. Turning Torso	45
Gambar 4.10. Konsep Turning Torso	46
Gambar 4.11. Denah Turning Torso	46
Gambar 4.12. Denah Turning Torso beserta analisa	47
Gambar 4.13. Tampak depan Turning Torso dan kondisi Turning Torso ketika denahnya ditumpuk	48

Gambar 4.14. Potongan Turning Torso beserta analisa penyebaran gaya vertikal	49
Gambar 4.15. Potongan Turning Torso beserta analisa penyebaran gaya lateral	50

DAFTAR ISTILAH

- Art Nouveau : Gaya seni, arsitektur dan dekorasi pada akhir abad 19 dan awal abad 20 yang merpresentasikan daun dan bunga serta garis yang mengalir.
- Axis : Garis lurus yang melalui suatu badan atau benda yang memenuhi kriteia tertentu
- Conical : Berbentuk seperti kerucut
- Free Geometry : Geometri bebas, tanpa batasan apapun
- Hiperboloid : Sebuah bentuk 3-D dengan merotasi bentuk hiperbola kepada axis utamanya
- Jugendstil : Sebuah gaya arsitektur dan dekoratif yang mirip dengan *art nouveau*, dan terkenal di negara-negara yang menggunakan bahasa Jerman pada akhir abad 19

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Teknologi membawa dampak yang luar biasa ke dalam arsitektur. Bentuk-bentuk baru maupun teknologi konstruksi dengan sistem struktural dan material yang baru menjadi salah satu yang memberi warna terhadap perkembangan arsitektur kontemporer. Bentuk-bentuk baru tersebut kemudian membawa gerakan-gerakan arsitektur baru, seperti arsitektur *blob*, arsitektur organik, hingga arsitektur yang *ter-twist*. Perkembangan struktur juga berjalan begitu pesatnya. Kini, dengan sistem struktur yang baru, bangunan-bangunan pencakar langit yang memiliki ketinggian di atas 2600 kaki bukan lagi menjadi mimpi. Sistem struktur lama yang menggunakan batu-batu berat sehingga bangunan dapat bertahan terhadap angin, telah diganti dengan sistem struktur yang kuat dan efisien seperti sistem struktur tubular.

Seiring dengan berjalannya waktu, manusia mulai merasa bosan dengan bentuk-bentuk yang ada. Bentuk-bentuk yang kaku kini diganti dengan bentuk-bentuk kontemporer yang terlihat lebih dinamis. Hal ini sejalan dengan arsitektur kontemporer. Ketika dahulu bangunan bertingkat tinggi semuanya adalah kotak, atau seolah-olah denah yang di-*extrude* ke atas, maka kini bangunan bertingkat tinggi mulai mencoba melakukan inovasi bentuk yang membuat bangunan itu menjadi terlihat lebih dinamis. Salah satu contoh bentuk itu adalah bangunan yang *ter-twist*.

Bangunan yang *ter-twist* sendiri memiliki cakupan yang sangat luas. Tidak hanya ketika bangunan mengalami perubahan bentuk akibat rotasi pada axis tertentu maka bangunan tersebut dapat dikategorikan sebagai *twist*, tapi ketika suatu bangunan memiliki unsur yang *ter-twist* di dalamnya, maka bangunan tersebut sudah dapat dikategorikan dalam bangunan yang *ter-twist*. Bangunan-bangunan tersebut misalnya bangunan pada masa *art nouveau* yang berekspresi mengikuti bentuk alam, hingga bangunan yang mengikuti paham brutalisme seperti Guggenheim Museum di Bilbao.

Yang menjadi menarik adalah ketika kita mencoba membahas dampak dari bentuk-bentuk yang kompleks tersebut terhadap sistem struktural. Seperti yang dikatakan oleh Fazlur Khan (1981), bahwa dengan begitu banyaknya metode struktur yang dapat digunakan, sangat sulit untuk menemukan suatu sistem struktur yang tepat untuk bangunan tertentu. Ketika bentuk menjadi semakin ekspresif dan berani, maka sebagai seorang arsitek, sudah tentu harus dapat menemukan konsep struktur yang tepat, efisien, dan mampu mengakomodasi bentuk tersebut sehingga bentuk tersebut dapat direalisasikan dalam kehidupan nyata.

1.2 Permasalahan

Bentuk *twist* pada bangunan memang sudah ditemukan sejak tahun 1500-an. Namun, baru di awal abad ke-21 ini kita dapat menemukan bangunan bertingkat tinggi dengan elemen *twist* di dalamnya. Pengaplikasian elemen *twist* di dalam bangunan ini seolah-olah kemudian membuka pintu untuk arsitek lain membuat bangunan dengan elemen *twist* di dalamnya.

Sejalan dengan perkembangan bentuk *twist* dan bentuk-bentuk lainnya, arsitek ditantang untuk dapat menemukan sistem struktur yang mampu mengakomodasi bentuk yang dia buat, sehingga bentuk itu dapat terbangun.

Kemudian pernyataan penelitian yang muncul antara lain: bagaimana suatu bangunan sebenarnya dapat dikategorikan sebagai bangunan yang *twist*? Bagaimana sistem struktur bangunan tingkat tinggi yang ada sekarang ini? Bagaimana dampak dari bentuk *twist* tersebut terhadap arsitektur, khususnya struktur? Bagaimana sebenarnya sistem struktur yang seharusnya untuk bangunan *twist* apabila kita melihat contoh dari alam?

1.3 Tujuan Penulisan

Tujuan dari penulisan skripsi ini adalah untuk pertama-tama membahas bagaimana suatu bangunan dapat dikategorikan sebagai bangunan yang *ter-twist*. Lebih lanjut, dengan meneliti sistem struktural untuk bangunan tingkat tinggi yang ada sekarang ini, skripsi ini diharapkan dapat mengupas bagaimana dampak bentuk *twist* tersebut terhadap arsitektur, khususnya ditinjau dari struktur bangunan bertingkat tinggi. Skripsi ini juga akan membahas bentuk *twist* yang telah ada di alam, dan kemudian mencoba membandingkannya dengan studi kasus yang diambil. Studi kasus pada skripsi ini ditujukan untuk melihat lebih langsung keadaan sistem struktur untuk bangunan yang *ter-twist* yang digunakan saat ini. Skripsi ini saya harapkan dapat member sumbangsih ide mengenai bagaimana seharusnya bentuk itu dilihat secara arsitektural, khususnya dari segi struktural.

1.4 Lingkup Pembahasan

Lingkup pembahasan skripsi ini berkisar pada upaya identifikasi bagaimana sebuah bangunan dapat dikategorikan sebagai *twist*, dan bagaimana struktur bangunan bertingkat tinggi yang ada sekarang ini. Pembahasan kemudian dilanjutkan pada dampak dari bentuk *twist* terhadap struktur bangunan bertingkat tinggi, dengan melihat contoh yang telah diberi oleh alam.

1.5 Metode Penulisan

Metode yang digunakan dalam penulisan skripsi ini adalah metode deskriptif, yaitu kajian teori dan literatur dari berbagai media, seperti buku, internet, jurnal online, forum diskusi, dan lain-lain. Untuk studi kasus bangunan, penulis menggunakan metode kualitatif dalam menganalisis. Data yang digunakan adalah data kepustakaan, mengingat kasusnya berada di luar Indonesia.

1.6 Urutan Penulisan

Penulisan skripsi ini terbagi ke dalam lima bab, antara lain sebagai berikut:

BAB 1: Pendahuluan

Membahas mengenai latar belakang, permasalahan, tujuan penulisan, lingkup pembahasan, metode penulisan, dan urutan penulisan yang digunakan.

BAB 2: Landasan Teori

Bab ini berisi kajian dari studi literatur yang akan digunakan sebagai dasar untuk menganalisis permasalahan. Isinya meliputi pengertian *twist*, sejarah perkembangan bangunan yang *ter-twist*, serta klasifikasi bangunan yang *ter-twist*. Selain itu, isu mengenai *twist* yang berada di alam diangkat dalam bab ini, dan diharapkan dapat dijadikan pegangan dalam melihat kasus dampak bentuk *twist* terhadap struktur bangunan bertingkat tinggi yang telah terbangun.

BAB 3: Sistem Struktur Bangunan Bertingkat Tinggi

Bab ini berisi tentang pengertian struktur, macam-macam struktur, dan struktur bangunan bertingkat tinggi. Struktur bangunan bertingkat tinggi kemudian dijabarkan sehingga dapat terlihat prinsip-prinsip dasar dalam membangun bangunan bertingkat tinggi. Penelitian terhadap salah satu sistem struktur bangunan bertingkat tinggi dilakukan dengan alasan untuk mengetahui lebih lanjut bagaimana penyebaran gaya yang terjadi, dan untuk mempermudah analisis struktur pada studi kasus.

BAB 4: Analisis dan Studi Kasus

Bab ini berisi analisis struktural kepada contoh kasus *twist* dari alam, yaitu *shell*. Dua buah studi kasus bangunan kemudian coba dibahas dari segi *twist* dan struktural. Poin-poin pentingnya kemudian diambil dan dibandingkan dengan hasil analisis struktural *shell*, untuk kemudian diambil kesimpulan bagaimana dampak dari bentuk tersebut secara arsitektural.

BAB 5 : Kesimpulan

Bab ini berisi kesimpulan secara umum yang ditarik dari keseluruhan penulisan skripsi ini. Kesimpulannya berupa jawaban-jawaban atas pertanyaan skripsi, dan terutama dampak dari bentuk *twist* terhadap arsitektur, khususnya jika ditinjau dari segi struktur bangunan bertingkat tinggi.

BAB 2

LANDASAN TEORI

2.1 *Twist*

2.1.1 Definisi *Twist*

Sebelum membicarakan jauh mengenai sesuatu yang dipelintir (*twist*), sebaiknya jika saya mulai dengan mendefinisikan pelintir itu sendiri. Dalam arsitektur, sudah tentu kita tidak membahas apa itu “pelintir” (meskipun tetap masuk dalam pertimbangan), tetapi yang dibahas adalah “sesuatu yang dipelintir”, dimana dalam hal ini adalah permukaan atau yang disebut *twisted surface*.

Twist sendiri jika diambil dari Microsoft Encarta (2008), “***Make ends turn in opposite directions: to make one part or end of something turn in opposite direction from the other, or turn in this way***”



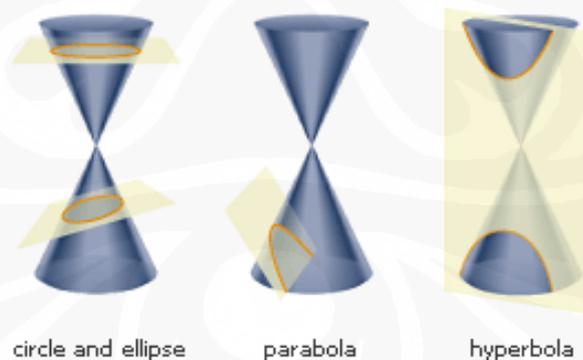
Gambar 2.1. Objek yang ter-*Twist*
Sumber: *Twist&Build*, hal. 19

Untuk memperjelas pembahasan di atas, maka harap perhatikan gambar objek yang ter-*twisted* di atas. Bagian bawah, kita definisikan sebagai permukaan awal, memiliki perbedaan dengan bagian atas, yakni yang disebut sebagai permukaan akhir. Permukaan atas dan permukaan akhir tersebut berada pada arah yang berbeda, dan dengan demikian bentuk tersebut dapat dikategorikan sebagai *twist*.

Untuk definisi yang kedua, saya mencoba lebih spesifik dan lebih arsitektural, yakni permukaan yang dipelintir (*Twisted Surface*). *Twisted surface*, seperti yang ditulis oleh Vollers (2001) dalam bukunya *Twist&Build*, menurut *conventional definition* adalah,

“It is a surface composed of straight lines, where adjacent lines are not parallel (in that case it would be planar or a single-curved surface), nor do they intersect (then it would be a planar or a conical surface)”.

Untuk memperjelas definisi tersebut, maka saya akan coba untuk mengurai satu per satu dari definisi tersebut. *Twisted surface* merupakan sebuah permukaan yang terdiri dari garis-garis lurus, dimana garis-garis tersebut tidak paralel (karena akan menghasilkan bidang biasa), dan tidak juga bersilangan (karena akan menghasilkan bentuk conical [lihat gambar di bawah]). *Twisted surface* kemudian yang akan membentuk *twisted building*, ketika salah satu bagian dari bangunan ini memuat *twisted surface*.



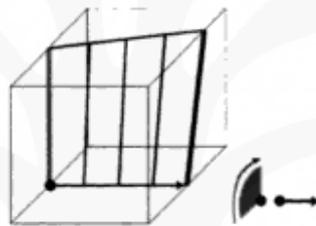
Gambar 2.2. Bentuk-bentuk *conical* yang tidak masuk dalam kategori *twisted surface*

Sumber: http://encarta.msn.com/encyclopedia_762505266/conic_sections.html

Universitas Indonesia

Selain itu, definisi lain mengenai *twisted surface* yang ditulis oleh Vollers (2001), “*it is a surface built up from lines by shifting and rotation, whereby one component of the rotation direction is perpendicular to the shifting direction.*”

Untuk memperjelas definisi tersebut, harap perhatikan gambar berikut. Seperti yang didefinisikan oleh Vollers, bahwa yang dibahas adalah sebuah bidang, dimana bidang itu tersusun dari garis-garis yang bergerak dan berotasi, dan arah rotasinya sangat kecil (*perpendicular*) dan searah dengan arah pergerakan garis.



Gambar 2.3. Deskripsi *twisted surface*

Sumber: Twist&Build, hal. 20

Saya berpendapat bahwa ketiga definisi ini masih sangat relevan dengan dunia modern ini, dan terlebih lagi dengan maksud dari *twist* yang akan saya gunakan sepanjang penulisan skripsi ini.

2.1.2 Sejarah *Twisted Surface*

Untuk lebih mengenal dan lebih sadar tentang bangunan-bangunan yang tergolong dalam *twist*, saya akan mencoba untuk memberikan gambaran melalui sejarah perkembangan bangunan *twist*.

Secara geometris, istilah *twist* tidak terbatas pada satu jenis bentukan saja, seperti bangunan bertingkat tinggi yang denahnya berotasi 90° pada lantai 1 dan lantai paling

puncak. Bab ini akan memberikan beberapa gambaran mengenai perkembangan bangunan *twist* dan contoh-contohnya.

Seperti yang telah dijelaskan pada bab 2.1.1, dimana *twisted surface*, atau permukaan yang dipelintir, adalah merupakan elemen dasar untuk suatu bangunan disebutkan sebagai sebuah *twisted building*. Meski Vollers (2001) tidak menyebutkan secara spesifik setelah berapa banyak suatu bangunan memuat *twisted surface* untuk kemudian dapat dikategorikan menjadi *twisted building*, dia tetap mengkategorikan berbagai jenis bangunan yang memuat *twisted surface* dan kemudian mengkategorikannya ke dalam beberapa jenis *twisted building*. Bab ini akan mencoba untuk membahas lebih kepada perkembangan *twisted surface*, dan pengklasifikasian *twisted building* akan dibahas pada bab setelah ini.

Menurut Vollers (2001), *Twisted surface* bukanlah merupakan sebuah transformasi yang baru ditemukan di akhir abad 20. *Twisted surface* sudah dipakai sejak zaman dahulu untuk kepentingan fungsional, seperti yang terdapat pada tangga spiral, dimana ketika permukaan lantai 2 agak sedikit dipelintir (*di-twist*) agar kepala tidak terpukul di permukaan lantai 2 ketika berada di anak tangga bagian atas.

Selain secara fungsional, *twisted surface* juga sudah ditemukan pada beberapa jenis pagar atau pembatas, dan juga mesin. Hal ini biasanya diaplikasikan untuk alasan struktural, namun juga karena nilai ornamentalnya. Ornamental yang memuat *twisted surface* juga sudah banyak ditemukan di perangkat rumah tangga, logam-logam dan biasanya terbuat dari kayu atau logam. Biasanya juga bagian dari pahatan patung (*sculpture*) *di-twisted*.

Sebuah contoh awal mengenai *twisted surface* dapat dilihat pada sistem penulangan batu pada sebuah tangga di Hradrany Castle di Praha. Ini merupakan sebuah karya pada zaman gothic akhir yang dibuat sekitar tahun 1500. *Twist* dari penulangannya sendiri merupakan sebuah konsekuensi terhadap pertemuan dari bidang-bidang yang kompleks. Contoh lainnya adalah pembuatan sebuah gereja yang memiliki atap yang *di-twist*. (Tahun pembuatan tidak diketahui secara pasti).



Gambar 2.4. Contoh bangunan yang memiliki *twisted surface* pada tahun 1500-an

Sumber: Twist&Build, hal. 21 dan 22

Lebih lanjut, dituliskan bahwa setelah masa klasik, pada sekitar tahun 1900 sebuah ambisi dengan memandang *free geometry* muncul, yang secara khusus dalam bentuk dari tren *art nouveau* dan *jugendstil*. Kurva-kurva terinspirasi dari perkembangan di alam, seperti yang dapat dilihat pada rumah dari arsitek Victor Horta, dimana bagian dari penopang atapnya dibuat menjadi sebuah kolom yang menyerupai sebuah tumbuhan menjalar. Namun, Horta sebenarnya tidak mengejar pangaplikasian dari sebuah jenis *twisted surface*, namun lebih kepada dia ingin menunjukkan bagaimana bentuk yang betul-betul tumbuh.

Sejalan dengan tren *art nouveau* dan *jugendstil*, di Barcelona terdapat sekelompok arsitek yang dipimpin oleh Antonio Gaudi, memperkenalkan sebuah *style* yang mana kurva menjadi elemen penting dari desainnya. Mulai tahun 1884 dan seterusnya dia mempelajari dan menggunakan *twisted surface*. Berlawanan dari banyak arsitek yang bertipikal fungsionalis, dia sering memperkenalkan variasi-variasi dari bentuk utama bangunan, yang lebih menonjolkan ekspresi simbolis dibandingkan elemen struktural. Sebagai contoh, dalam crypt of the Colonia Guell, *twisted surface*-nya mungkin tidak akan menonjol apabila Gaudi tidak mempermainkan warna di balok yang bertemu. Untuk Balkon dari Casa Battlo, dia membuat berbagai komponen

Universitas Indonesia

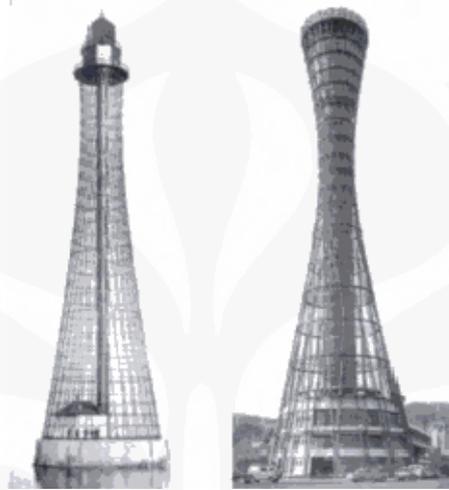
menjadi suatu kesatuan secara keseluruhan, dengan membuat elemen-elemen itu bertipikal mirip.



Gambar 2.5. *Twisted Surface* pada masa *art nouveau* dan *jugendstil*.

Sumber: Twist&Build, hal. 22

Setelah ditemukannya bentuk hiperboloid, terjadi perkembangan yang sangat besar dari segi bentuk. Insinyur Rusia Suchov dan Arsitek Spanyol Antonio Gaudi secara sendiri-sendiri mempelajari potensi dari bentuk *twisted surface* pada akhir abad 19. Mereka berdua menggunakan bentukan hiperboloid dalam konstruksinya. Suchov sadar bahwa bentukan hiperboloid menawarkan sebuah solusi yang baik untuk bangunan yang seperti menara. Pada tahun 1896, dia membuat menara pertamanya, yakni sebuah menara air dengan ketinggian 25,6 m dan sebuah kontainer yang mampu menampung hingga 10 m^3 , dengan bentuk hiperboloid di Russian Exhibition yang terletak di Nizni Novgorod. Pada tahun-tahun berikutnya, bentuk hiperboloid ini digunakan untuk konstruksi ratusan menara air, *lighthouse*, dan menara listrik bertegangan tinggi di Rusia.



Gambar 2.6. *Twisted Surface* pada hiperboloid

Sumber: Twist&Build, hal.23

Kesuksesan Suchov kemudian dilanjutkan untuk membuat sebuah bangunan yang mampu menampung beban yang lebih besar. Salah satunya adalah The Port of Kobe Tower (Kobe, Jepang), yang kurang lebih memiliki ketinggian 100 m.

Dengan Guggenheim Museum di Bilbao pada tahun 1991-1997, Frank Gehry menarik perhatian dunia dengan bentukan kurva. Secara dasar, bangunan ini dibentuk dari volume yang ditransformasikan. Berbagai tipe permukaan pada façade menyatu bersama dengan halus. Meskipun beberapa bagiannya hanya rata dan kurva, tapi beberapa bagian pada kaca dan titanium yang berada di permukaan sebenarnya di-*twist*.

Perkembangannya kemudian terus hingga zaman sekarang. *Twisted surface* semakin banyak diaplikasikan pada bangunan bertingkat tinggi karena mengikuti tren yang berkembang. Chicago Spire (Santiago Calatrava), Turning Torso (Santiago Calatrava), The Gherkin (Norman Foster), dan beberapa karya di belahan dunia lain seperti di Dubai dan San Fransisco kemudian melengkapi berbagai macam bentukan *twisted building* yang telah dikembangkan sejak dahulu.



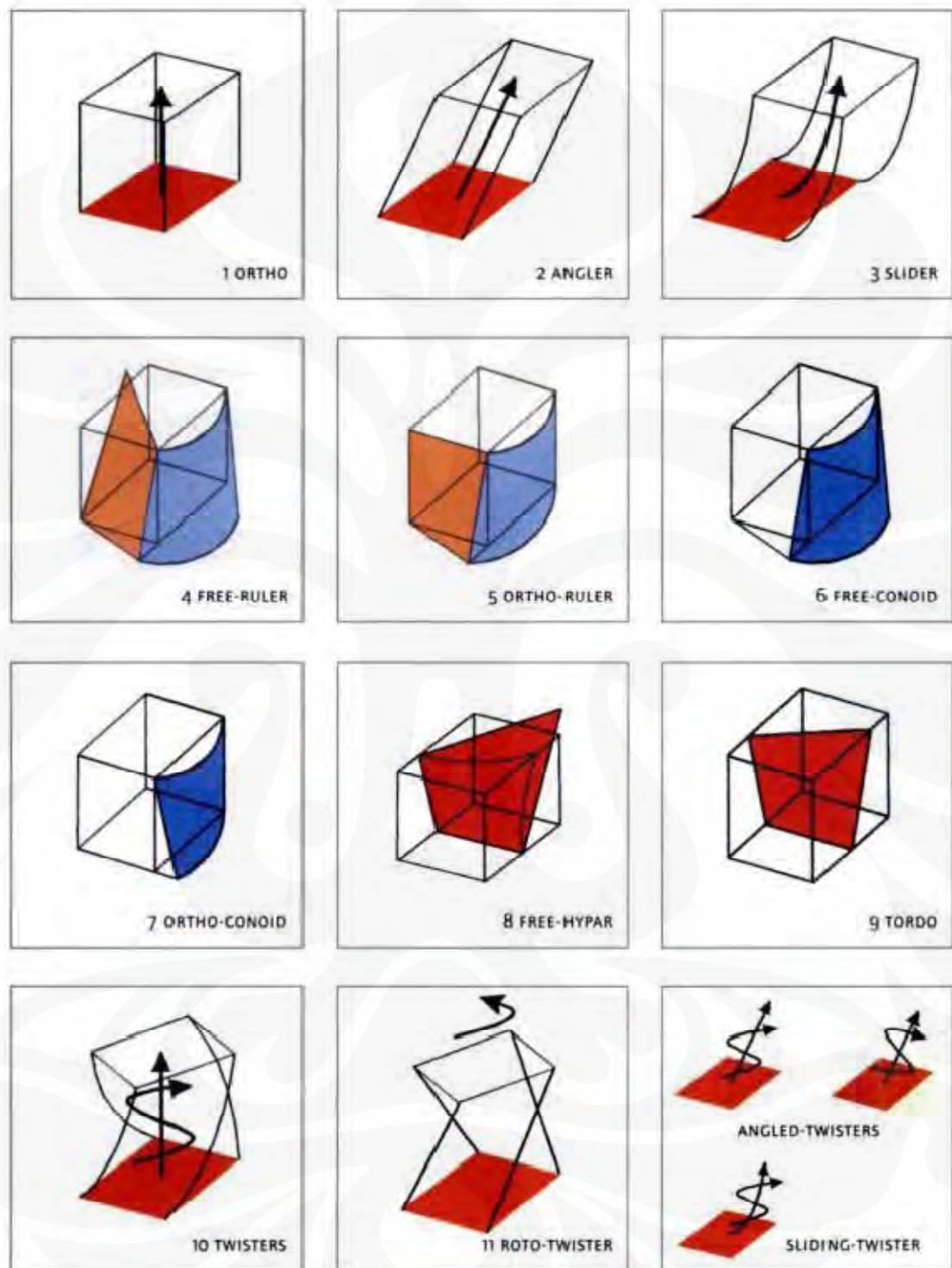
Gambar 2.7. *Twisted Surface* pada tahun zaman sekarang

Sumber: <http://benjaminwey2000.files.wordpress.com/2008/02/hsb-turning-torso.jpg>

http://www.mezhopking.com/images/photosets/architecture/swiss-re-tower_gherkin/t/CRW_8564.jpg

2.1.3 Pengklasifikasian *Twisted Surface*

Vollers (2001) mengklasifikasikan berbagai bentuk *twisted surface* berdasarkan bentuk geometrinya. Beberapa desain terlihat sangat teknis karena bentuknya yang memang ditujukan untuk mengoptimalkan struktur dan material.



Gambar 2.8. Pengklasifikasikan *twisted surface* menurut Karel Vollers

Sumber: Twist&Build, hal. 53

Universitas Indonesia

Pada bagian ini, akan lebih dikhususkan kepada *Twisters* dan *Roto-Twisters*, sebab kedua kategori ini yang akan digunakan untuk membahas studi kasus.

2.1.3.1 *Twisters*

Modelnya merupakan sebuah rotasi, yang mana denah lantai dasarnya akan dirotasi pada sebuah axis tertentu. Model ini menonjolkan elemen-elemen yang bermunculan kembali. Contoh-contohnya seperti Tower yang dibuat oleh S. L de Bever di Amsterdam, yang memiliki 70° *twist*. Selain itu, sebuah menara di Finland setinggi 186 m, Turning Torso masuk dalam kategori ini.



Gambar 2.9. Bangunan kategori *twisters*

Sumber: *Twist&Build*, hal. 69

2.1.3.2 *Roto-Twisters*

Model ini menonjolkan repetisi dari elemen yang ter-*twist* pada facade dalam sebuah satu lantai horizontal. Mereka tidak mempunyai repetisi pada rotasi axisnya, kecuali

Universitas Indonesia

elemennya diulang pada ketinggian berbeda. Contoh-contohnya seperti reaktor karya Philip Johnson dengan G. Liv., dan The Gherkin, sebuah perkantoran di London, Inggris.



Gambar 2.10. Bangunan kategori *roto-twisters*

Sumber: Twist&Build, hal. 70 dan 71

2.2 *Shell*

2.2.1 Dasar Bentuk *Shell*

Jauh sebelum manusia membuat bentuk *twist*, seperti yang terjadi pada *art nouveau* maupun arsitektur modern, alam telah memperkenalkan bentuk yang ter-*twist* melalui *mollusca*, atau salah satu kelas invertebrata yang memiliki tubuh yang lembut dan tidak bersegmentasi, dan biasanya diproteksi dengan sebuah *shell*, atau bahkan lebih dari satu. Sel sendiri bersifat berongga, dengan kata lain didalamnya kosong, dan diisi dengan hewan kelas *mollusca* yang juga dapat dengan mudah keluar dan masuk dari *shell* tersebut. Bentuk *twist* yang dimaksudkan di atas terletak pada bentuk dari *shell*.



Gambar 2.11. Berbagai macam bentuk *shell*

Sumber: <http://static.howstuffworks.com/gif/willow/shell-info0.gif>

D'Arcy Thompson (1961) menjabarkan secara luas bagaimana sehingga bentuk ini bisa terjadi. Dia percaya bahwa bentuk dan tumbuh suatu organisme bukanlah sesuatu yang tidak dapat terdefiniskan, melainkan fenomena-fenomena ini bisa dituliskan dalam sebuah ekspresi matematika. Semuanya ini berdasar pada kepercayaan Thompson (1961) terhadap fakta bahwa *force* (gaya) sangat mempengaruhi bentuk dan tumbuhnya suatu organisme. Dia memberi contoh, misalnya bentuk dan pertumbuhan sangat dipengaruhi oleh kecepatan, bagaimana organisme itu mendapat panas dan membuang panas, dan lain sebagainya.

Seperti yang saya tulis sebelumnya, bahwa bentuk *twist* yang diperkenalkan oleh alam, yang salah satunya dalam bentuk *shell* dari kelas *mollusca*, telah dipaparkan dengan luas oleh D'Arcy Thompson.

2.2.1.1 *Shell* dari kelas *Mollusca*

Thompson (1961) sebelum memulai tulisannya mengenai pembahasan bentuk ini, membatasi penelitiannya terhadap jenis-jenis *shell*, lebih spesifik lagi, terhadap jenis spiral yang akan dia teliti.

“In general terms, a Spiral is a curve which, starting from a point of origin, continually diminishes in curvature as it recedes from that point; or , in other words, whose radius of curvature continually increases.”

Dengan demikian, dia membatasi pembahasannya kepada bentuk spiral di atas, dan secara efektif men-*exclude* bentuk yang biasa disangka sebagai spiral, yakni bentuk dari paku (*simple screw*), atau *cylindrical helix*, yang mana kurvanya tidak dimulai dari sebuah titik mula (*a point of origin*), dan tidak juga mengubah kekurvaannya selama memanjang.

Dengan pernyataan demikian, maka berimplikasi bahwa teori ini nampaknya tidak bisa dipakai untuk semua kelas *twisted surface*, namun lebih terspesialisasi pada bentuk *twisted surface* yang pada permukaan akhirnya menjadi sebuah titik (*shell*), bukan sebuah bidang (*twisted cube*). Namun, saya melihat bahwa hal ini tidak sepenuhnya menekslusifkan teori ini terhadap bentuk yang demikian.



Gambar 2.12. Analisa *twisted surface* pada *shell*.

Sumber: http://imgcache.allposters.com/images/EDL/7799_cat.jpg. Telah diolah kembali.

Saya berpendapat bahwa mungkin betul bahwa bentuk *twisted cube* tidak serta merta disediakan oleh alam seperti bentuk *twisted* yang menyerupai *shell*. Namun, saya

Universitas Indonesia

berpendapat bahwa bentuk *twisted cube* dapat diambil dengan memotong *twisted* yang menyerupai *shell* pada titik tertentu seperti yang saya perlihatkan pada gambar di atas. Namun tentunya, apabila hal yang ingin dicapai adalah seperti yang dilakukan oleh Thompson, yakni mempelajari hubungan gaya dengan bentuk dan perkembangan terhadap sebuah organisme biologis, cara yang digunakan oleh saya di atas tentunya sangat tidak relevan. Hal ini ditekankan juga oleh Thompson (1961), “... *though mathematically similar, are biologically speaking fundamentally different.*”

Kembali ke penjelasan dari Thompson mengenai *shell*. Thompson (1961) mencoba memaparkan teori-teori dasarnya melalui jenis *shell* dari *Nautilus Pompilius*. Thompson (1961) mengatakan bahwa apabila kita melihat sebuah organisme secara sebagian atau keseluruhan, kita hampir tidak punya alasan untuk membedakan bagian mana yang baru dan bagian mana yang sudah lama (sudah ada terlebih dahulu). Secara berkelanjutan, bagian-bagian atau partikel-partikel yang baru menyatu dengan bagian-bagian atau partikel-partikel yang lama. Dan pembentukan bentuk *outline*-nya benar-benar tergantung dari *force* yang membentuknya menjadi sebuah bentuk sebagai keseluruhan.



Gambar 2.13. *Nautilus Pompilius*

Sumber: <http://imagecache2.allposters.com/images/POE/BM102G.jpg>

Namun kasus ini tidak sama dengan pada *shell mollusca*. Thompson (1961) mengatakan:

“... for in these the presently existing structure is, so to speak, partly old and partly new. It has been conformed by successive and continuous increments; and each successive stage of growth, starting from the origin, remains as an integral and unchanging portion of the growing structure”.

Dengan demikian, struktur dari *shell* ini berarti sangat unik, sebab bagian yang pertama terbentuk akan tetap menjadi bagian yang penting dan tidak terpisahkan, dan terus bertambah, dan mengakibatkan munculnya struktur baru yang berkelanjutan.

Lebih lanjut perkembangan sebuah *shell*, Thompson (1961) mengatakan bahwa sebuah *shell* itu berkembang dari segi ukurannya (*size*), tapi tidak mengubah bentuknya. Dengan demikian, dapat dilihat bahwa bentuk *shell* akan selalu tetap demikian, dan memungkinkan kita untuk menarik benang merah yang menghubungkan bentuk-bentuk *shell* tersebut dalam pernyataan matematis.

Teori yang telah diberikan oleh D'Arcy Thompson dapat kita simpulkan bahwa *shell* dari kelas mollusca berbentuk demikian bukan karena *mollusca* ingin bentuknya menjadi demikian, tetapi karena adanya pertumbuhan, gaya, serta kebutuhannya dalam menjalani hidup dan perkembangan dirinya sendiri yang mengakibatkan dia membutuhkan rumah yang lebih besar. Bentuknya tidak berubah, namun hanya ukurannya yang berubah. Pernyataan tersebut diperkuat dengan pernyataan Thompson (1961) bahwa bentuk yang ada di dunia ini, semuanya dapat dinyatakan dalam persamaan matematis. Dan lebih dari itu, pertumbuhan dan perkembangannya pula tetap dapat dinyatakan dan diprediksi dalam persamaan matematis.

BAB 3

SISTEM STRUKTUR BANGUNAN BERTINGKAT TINGGI

3.1 Definisi dan Pembagian Struktur

Struktur, menurut Schodek (1992), adalah sarana untuk menyalurkan beban dan akibat penggunaan dan atau akibat kehadiran bangunan ke dalam tanah. Lebih lanjut, struktur dapat didefinisikan sebagai suatu entitas fisik yang memiliki sifat keseluruhan yang dapat dipahami sebagai suatu organisasi unsur-unsur pokok yang ditempatkan dalam ruang yang di dalamnya karakter keseluruhan itu mendominasi interelasi bagian-bagiannya.

Dalam struktur dikenal juga hukum aksi-reaksi, yaitu ketika sebuah benda diberi aksi atau beban, maka benda tersebut akan memberikan reaksi yang berupa gaya dalam. Gaya dalam tersebut dapat dibagi menjadi 2, yaitu tekan dan tarik. Apabila sistem gaya eksternal (aksi) benar-benar bekerja secara merata sepanjang benda yang dibebani, maka akan timbul gaya tekan atau tarik merata di dalam benda. Aksi umum gaya-gaya ini yaitu menyebabkan terputusnya atau hancurnya material. Ketika ada gaya tarik dan tekan internal pada penampang yang sama, maka benda itu mengalami momen lentur (*bending*). Kondisi ketika yang terjadi hanyalah gaya tarik atau gaya tekan internal disebut struktur funikular.

3.1.1 Struktur Funikular

Menurut Schodek (1992), struktur-struktur yang hanya berada dalam keadaan tarik atau tekan dan yang dipengaruhi oleh beban, disebut struktur funikular. Struktur funikular juga tidak mengalami lentur. Funikular berasal dari kata latin yaitu *funis*, yang berarti tali. Contoh-contoh dari struktur funikular adalah kabel, *shell*, dan sistem

framing dengan *bracing* diagonal . Suatu balok linear mengalami lentur sedangkan kabel tidak mengalami lentur, tidak bergantung pada material yang digunakan.

Kabel tidak dapat menahan lentur sehingga akan berubah bentuk, bergantung pada beban yang diterimanya. Balok linear kaku dapat menahan lentur sehingga tidak berubah bentuk seperti kabel. Material saja tidak dapat menjelaskan mengapa struktur tertentu dapat berfungsi menahan lentur sedangkan yang lainnya tidak. Misalnya saja, *arch*, yang pada umumnya berada dalam keadaan tekan, sering dibuat dari kayu.

3.2 Definisi Struktur Bangunan Bertingkat Tinggi

Menurut Khan (1981), secara umum sistem struktural pada sebuah bangunan merupakan sebuah penyusunan bidang 3-dimensional yang kompleks dari berbagai macam kombinasi elemen struktural yang saling berhubungan. Fungsi utama dari sebuah sistem struktur adalah untuk dengan efektif dan aman menyalurkan segala beban yang terjadi di bangunan, dan seterusnya meneruskan kepada fondasi bangunan.

Bangunan bertingkat tinggi, menurut Schueller (1977), berkisar antara kurang dari 10 lantai hingga lebih dari 100 lantai. Pembuatan massa bangunan tinggi timbul dari penafsiran seorang perancang terhadap konteks lingkungan dan jawabannya terhadap maksud permasalahan tersebut. Konteks lingkungan yang dimaksud adalah konsentrasi penduduk yang padat, kelangkaan lahan, dan harga lahan yang tinggi.

Struktur bangunan bertingkat tinggi memerlukan sistem penunjang struktur yang rumit di mana gaya-gaya fisik dan lingkungan merupakan penentu rancangan yang utama. Bangunan harus mampu menghadapi gaya-gaya vertikal gravitasi dan gaya-gaya lateral angin di atas tanah serta gaya-gaya gempa di bawah tanah. Kulit bangunan harus menahan perbedaan suhu, tekanan udara, dan kelembaban antara lingkungan luar dan dalam bangunan.

3.3 Aksi Beban pada Bangunan Bertingkat Tinggi

Khan mencoba membagi bagaimana sebuah sistem struktural yang seharusnya. Menurut Khan (1981), sistem struktural harus dapat menahan beban vertikal baik yang bersifat dinamis maupun statis; menahan beban lateral yang timbul akibat angin dan gempa bumi; menahan tekanan yang timbul akibat temperatur dan efek penyusutan; menahan beban ledakan dan tabrakan baik yang eksternal maupun internal; dan menahan getaran pada bangunan. Meskipun demikian, haruslah diingat bahwa secara prinsip sebuah sistem struktur sebaiknya harus dapat secara berkesinambungan aktif dan bekerja bersama dalam menahan segala macam beban. Ini berarti, bahwa bagian struktur yang dirancang utamanya untuk menahan beban lateral (utamanya angin), harus dapat berkontribusi untuk menahan beban vertikal (gravitasi), dan begitu juga sebaliknya.

Menurut Schueller (1977), beban yang bekerja pada suatu struktur ditimbulkan secara langsung oleh gaya-gaya alamiah atau manusia. Dengan demikian, dapat dikategorikan dua sumber dasar beban bangunan, yaitu geofisik dan buatan manusia.

Lebih lanjut, Schueller (1977) memaparkan bahwa gaya-gaya geofisik dihasilkan oleh perubahan-perubahan yang senantiasa berlangsung di alam, seperti gaya-gaya gravitasi, meteorologi dan seismologi. Karena gravitasi, maka struktur dari bangunan itu sendiri akan menghasilkan gaya struktur yang dinamakan beban mati (*dead load*).

Pembebanan yang sumbernya buatan manusia bisa berupa beberapa aksi gaya, seperti pergerakan lift, mesin, perabotan, dan sebagainya. Pembebanan tersebut disebut beban hidup (*live load*).

Selain itu, salah satu gaya yang rentan terhadap bangunan bertingkat tinggi adalah beban angin. Menurut Schueller (1977), bangunan pencakar langit yang pertama tidak rentan terhadap akibat-akibat aksi lateral yang rumit yang disebabkan oleh angin. Berat dinding pendukung batu begitu besarnya sehingga gaya angin tidak dapat mengatasi gaya-gaya gravitasi yang ada pada struktur tersebut. Fasade batu yang

berat dengan bukaan-bukaan kecil, kolom-kolom berjarak rapat, unsur-unsur rangka yang masif dan tersusun berlapis-lapis, demikian pula dengan dinding partisi yang berat masih menghasilkan bobot sehingga aksi angin tidak menjadi masalah yang penting.

Bangunan bertingkat tinggi dengan dinding kaca kemudian diperkenalkan pada tahun 1950-an. Dengan interior ruang terbuka yang optimum serta berat yang relatif kecil adalah yang pertama kali rentan terhadap gaya-gaya angin yang rumit. Lebih lanjut, untuk mengurangi beban mati dan menciptakan ruang yang lebih besar dan fleksibel, dikembangkanlah balok-balok yang membentang lebih panjang dan partisi-partisi interior yang tidak memikul beban yang dapat dipindah-pindahkan dan dinding tirai yang tidak memikul beban. Semua temuan ini telah menghilangkan kekakuan struktur sehingga kini kekakuan lateral suatu bangunan bisa merupakan pertimbangan yang lebih penting dibandingkan daripada kekuatannya.

3.4 Klasifikasi Struktur Bangunan Bertingkat Tinggi

Dalam perancangan struktur bangunan bertingkat tinggi, dikenal berbagai metode dan perilakunya ketika dibebani. Menurut Schueller (1977), metodenya sebagai berikut:

- a. Struktur dinding pendukung
- b. Struktur inti geser
- c. Sistem rangka kaku
- d. Struktur dinding-balok
- e. Sistem bangunan rangka-dinding geser
- f. Sistem bangunan plat rata
- g. Sistem interaksi shear-truss-frame dengan belt truss kaku
- h. Sistem tabung

Untuk gaya-gaya lateral, Khan (1981) mengklasifikasikan menjadi 5 sistem, yaitu

- a. *Moment Resistant Frame*
- b. *Braced Frame*
- c. *Shear Wall*
- d. *Combination System*
- e. *Tube Structure*

Menurut saya, *moment resistant frame*, *braced frame*, dan *shear wall* merupakan prinsip-prinsip dasar dalam sistem struktur bangunan bertingkat tinggi. Hal ini dapat dilihat, bahwa dari klasifikasi yang diberikan oleh Schueller sebenarnya adalah ketiga prinsip itu, dan selain itu merupakan combination system, yang Khan (1981) katakan adalah penggabungan dari ketiga prinsip itu; baik ketiga-tiganya sekaligus, maupun dua diantara tiga prinsip struktur tersebut).

Saya akan mencoba membahas ketiga prinsip dasar itu, dan sistem struktur tubular.

3.4.1 *Moment Resistant Frame*

Moment resistant frame terdiri dari balok-balok yang linear dan horizontal dalam sebuah bidang, yang terhubung dengan kolom-kolom yang kaku. Kekuatan dan kekakuan dari frame berbanding lurus dengan ukuran kolom dan balok, dan berbanding terbalik dengan jumlah lantai bangunan dan jarak antar kolom.

Moment resistant frame bisa bermaterialkan beton, baja dan gabungan (*composite*).

3.4.2 *Braced Frame*

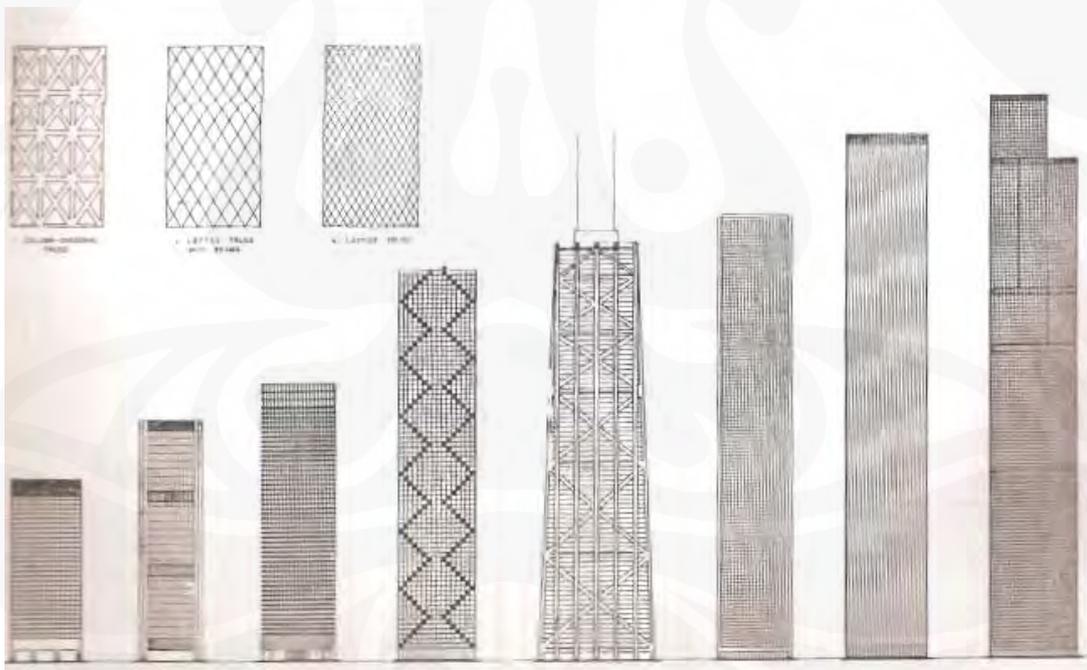
Sebuah *braced frame* terdiri dari susunan balok dan kolom yang juga beranggotakan penguat diagonal (*bracing*). Sistem ini terdiri dari anggota yang linear, dan dikenal karena kefleksibelannya pada pemanjangan dan pemendekan lantai horizontal dan bracing diagonal. Sistem ini diaplikasikan secara luas pada bangunan dengan struktur baja.

Braced frame bisa bermaterialkan baja, dan juga beton atau gabungan (*composite*). Namun, yang bermaterialkan beton sangat jarang ditemukan karena kesulitannya dalam pemasangan.

3.4.3 *Shear Wall*

Shear wall (dinding geser) bisa didefinisikan sebagai elemen vertikal yang planar dan dibedakan oleh ketipisan dan panjangnya. *Shear wall* biasanya diidentifikasi dengan mempunyai beberapa bukaan, karena *shear wall* tidak mempunyai atau hanya mempunyai fleksibilitas yang kecil karena resiko terjadi *bending* atau lentur. *Shear wall* bisa bermaterialkan beton, atau *masonry*.

3.4.4 Sistem Tabung



Gambar 3.1. Berbagai bangunan yang menggunakan struktur tubular disertai dengan tipe facadenya

Sumber: High-rise building structure, hal. 102

Perkembangan struktur kemudian diperkenalkan oleh Fazlur Khan, yaitu tentang sistem struktur tubular. Pada tahun 1977, 4 dari 5 bangunan tertinggi di dunia menggunakan sistem tubular. Saat itu adalah Hancock Building, Sears Building, Standard Oil Building, dan World Trade Centre. Penggunaan sistem struktur tubular sangat efisien, sehingga dalam kasus umum jumlah material struktur yang digunakan per meter persegi hanya kurang lebih sama dengan bangunan konvensional dengan sistem frame, yang ukurannya hanya setengah dari bangunan tubular.

Menurut Schueller (1977), rancangan tabung dianggap bahwa *façade* struktur bertindak untuk menahan beban lateral, dan dianalogikan sebagai suatu kotak kosong tertutup yang terkantilever dari tanah. Karena dinding eksterior menahan seluruh atau hampir seluruh beban angin, maka pengaku diagonal (*bracing*) interior yang mahal ataupun dinding geser (*shear wall*) dapat ditiadakan.

Dinding *tube* terdiri dari kolom-kolom yang sangat berdekatan di keliling bangunan yang diikat dengan *spandrel beams*. Dengan demikian, struktur *façade*-nya terlihat seperti tembok yang berlubang-lubang. Kekakuan dari tembok *façade*-nya bisa ditingkatkan lebih lanjut dengan penambahan penguat diagonal (*bracing*). Kekakuan dari struktur *tube* sangat tinggi sehingga dalam menghadapi gaya lateral dapat disamakan dengan sebuah balok kantilever.

Dalam aplikasinya, struktur tubular terbagi menjadi 2 bagian besar, yaitu didasarkan posisi perletakkannya. Yang pertama adalah exterior bangunan, dan yang terakhir adalah interior bangunan. Dalam skripsi ini, yang akan dijelaskan lebih lanjut adalah struktur tubular pada exterior bangunan, mengingat contoh kasus yang digunakan menggunakan sistem struktur tubular di exterior bangunan.

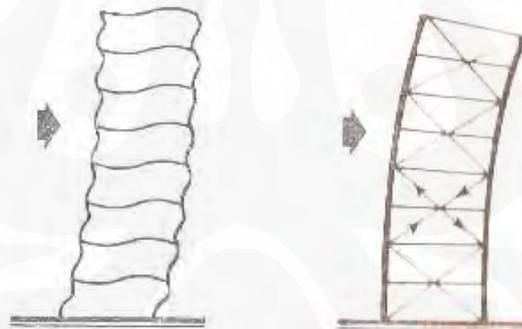
3.4.4.1 Framed Tube

Framed tube, merupakan pengaplikasian paling awal dari konsep struktur tubular, dan pertama kali digunakan pada Dewitt Chestnut Apartment Building di Chicago

yang berlantai 43. Pada sistem ini, terdiri dari grid persegi panjang dari balok-balok dan kolom-kolom yang secara kaku tersambung, dan saling berdekatan. Struktur ini menahan gaya lateral seperti balok kantilever tanpa menggunakan *bracing* interior. Kolom di bagian interiornya diasumsikan hanya menahan gaya gravitasi saja, dan tidak berpengaruh terhadap kekakuan exterior tube. *Framed tube* bekerja dengan menggunakan prinsip struktur lentur.

3.4.4.2 *Trussed Tube*

Kelemahan dari *framed tube* terletak pada kefleksibilitasan dari *spandrel beam*-nya. Kekakuannya bertambah banyak dengan penambahan *bracing* diagonal. Dengan demikian, *shear* (gaya geser) sekarang secara prinsip diserap oleh *bracing* diagonal, bukan oleh *spandrel beam*. Dengan demikian, dengan berkurangnya gaya geser membuat bangunan sudah sangat mendekati dengan perilaku kantilever yang sebenarnya.

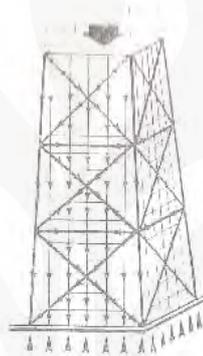


Gambar 3.2. perbedaan antara *framed tube* dan *trussed tube*

Sumber: High-rise building structure, hal. 104

Sistem di atas menggunakan penguat diagonal pada grid persegi panjang dari balok-balok dan kolom-kolom. Elemen diagonal dan *spandrel beam* membuat kekakuan yang seperti tembok terhadap gaya lateral. Dan bukan saja elemen diagonal hanya

menahan beban angin, tapi juga bekerja seperti kolom yang menyangga beban gravitasi.



Gambar 3.3. pengaliran gaya *trussed tube* yang juga menyangga beban gravitasi

Sumber: High-rise building structure, hal. 105

Trussed tube menggunakan prinsip struktur funikular, yang berarti hanya mengalami gaya tekan atau tarik.

3.5 Uji Coba Terhadap Sistem Tubular dengan *Trussed Tube*

Untuk mengetahui lebih dalam mengenai perilaku sistem tubular dengan *trussed tube*, maka saya mencoba membuat sebuah percobaan mengenai perilaku struktur ketika diberi berbagai macam pembebanan.

Objek yang digunakan adalah sebuah keranjang, yang menggunakan struktur dengan sistem *lattice truss*. Pembebanan akan berupa pembebanan vertikal dan pembebanan lateral, dan akan dilakukan dengan pembebanan merata. Pembebanan merata yang dipilih sebab struktur funikular hanya dapat diberi pembebanan secara merata, dan ketika pembebanan menjadi terpusat, maka ada kecenderungan bahwa objek akan rusak, seperti halnya telur yang ketika diberi pembebanan merata tidak mengalami efek rusak, namun ketika diberi efek terpusat akan pecah.



Gambar 3.4. Objek uji coba

Sumber: Dokumentasi pribadi

Pembebanan vertikal secara merata dilakukan dengan meletakkan sejumlah beban dengan luas permukaan yang lebar. Dalam hal ini, yang dipilih adalah buku dan kardus. Tampak tidak terlihat perubahan bentuk yang berarti dari objek keranjang.



Gambar 3.5. Kondisi objek ketika diberi beban vertikal serta perubahannya

Sumber: Dokumentasi pribadi

Penyaluran beban yang terjadi adalah sebagai berikut.



Gambar 3.6. Analisa penyebaran gaya ketika diberi beban vertikal

Sumber: Dokumentasi pribadi

Akibat adanya tekanan dari atas, ketinggian masing-masing belah ketupat kemudian berkurang. Sebagai gantinya, belah ketupat ini menjadi lebar. Ini merupakan aksi-reaksi yang terjadi ketika terjadi pembebanan vertikal secara merata.

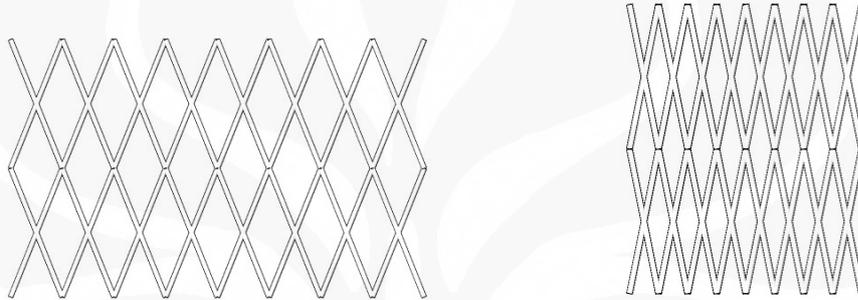
Pembebanan lateral secara merata dilakukan dengan mendorong keranjang ke suatu objek datar. Yang diharapkan adalah kondisi seolah-olah objek sebenarnya berdiri diam, namun ada tekanan dari lateral yang mendorong ke dalam.



Gambar 3.7. Kondisi objek ketika diberi beban lateral

Sumber: Dokumentasi pribadi

Penyaluran beban yang terjadi adalah sebagai berikut.



Gambar 3.8. Analisa penyebaran gaya ketika diberi beban lateral

Sumber: Dokumentasi pribadi

Yang terjadi adalah pada titik tekanan, struktur menjadi menjorok ke dalam. Ini nampaknya karena cara pembebanan merata yang kurang sempurna. Namun, yang bisa saya ambil adalah perilaku yang terjadi pada bagian samping keranjang. Belah ketupat mengalami penambahan ketinggian, tetapi efeknya adalah pengurangan lebar. Hal ini juga menurut saya adalah aksi-reaksi ketika benda diberikan beban lateral.

BAB 4

ANALISIS DAN STUDI KASUS

4.1 Struktur *Shell*

Bagi binatang di kelas *mollusca*, *shell* merupakan suatu bagian yang amat penting bagi mereka. Karena karakter tubuh mereka yang empuk, membuat mereka menjadi lebih rentan untuk rusak atau dihancurkan (*fragile*). Selain itu, *shell* juga membantu mereka agar tidak terjadi dehidrasi. Dengan tuntutan *shell* yang menjadi sedemikian vital terhadap binatang di kelas *mollusca*, *shell* menjadi sebuah sistem struktural yang unik dan patut untuk dibahas.

Menurut Siegel (1962) *shell* adalah bentuk struktural tiga dimensional yang kaku dan tipis yang mempunyai permukaan lengkung. Dalam pengaplikasian struktur *shell* di dunia nyata, harus didirikan dari material yang dapat dilengkungkan seperti beton bertulang, kayu, logam, bata, batu, atau plastik.

Lebih lanjut, Siegel (1962) menyatakan bahwa cara yang baik untuk mempelajari perilaku permukaan *shell* yang dibebani adalah dengan memandangnya sebagai analogi dari membran, yaitu elemen permukaan yang sedemikian tipisnya hingga hanya gaya tarik yang timbul padanya. Membran yang memikul beban tegak lurus dari permukaannya akan berdeformasi secara tiga dimensional disertai adanya gaya tarik pada permukaan membran. Yang terpenting adalah adanya dua kumpulan gaya internal pada permukaan membran yang mempunyai arah saling tegak lurus. Hal yang juga penting adalah adanya tegangan geser tangensial pada permukaan membran yang juga berfungsi memikul beban. *Shell* sendiri menurut pengarang buku sangat unik, sebab dapat bekerja secara funicular untuk banyak jenis beban yang berbeda meskipun bentuknya tidak benar-benar funicular.

Selain sistem penyaluran gaya yang telah dipaparkan, salah satu yang juga berpengaruh terhadap kekuatan *shell* adalah material pembentuk struktur *shell* itu

sendiri yang terdiri dari protein dan kitin, dan diperkuat dengan kalsium karbonat. Jika digabungkan dengan paparan mengenai penyaluran gaya, maka dapat didapatkan kesimpulan bahwa *shell* itu mempunyai struktur yang keras yang melindunginya dari keretakan bahkan pecah dari arah-arrah tertentu. Tapi di lain pihak, menurut Reigenstein (1999), ketukan kecil di arah tertentu akan membuat *shell* menjadi pecah. Ini merupakan sifat dari struktur funikular, dimana struktur tersebut hanya mampu bertahan terhadap beban merata, namun tidak terhadap beban terpusat.

4.2 Aksi Beban pada Struktur *Shell*

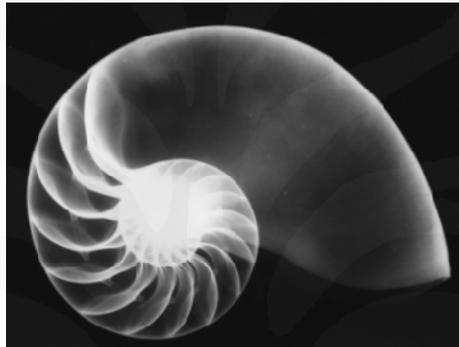
Berdasarkan perkataan Thompson (1961), ada dua kesimpulan mengenai *shell* yang bisa saya ambil dan tuliskan kembali disini. Yang pertama adalah bahwa *shell* memiliki bentuk sedemikian bukan karena dia menginginkan bentuknya demikian, tetapi lebih kepada pertumbuhan dan perkembangannya yang bisa diekspresikan dan diprediksi dengan persamaan matematis. Yang kedua adalah bahwa struktur *shell* dibuat sedemikian rupa, sehingga *shell* menggunakan prinsip funikular, dan menyalurkan gaya melalui kulit dari *shell* tersebut.

Dalam melihat keefektifan suatu struktur, Khan (1981) mencoba untuk menyederhanakan permasalahan dengan melihat dan memisahkan bagaimana struktur tersebut bertahan terhadap gaya lateral dan gaya vertikal. Saya akan mencoba untuk melihat dari sudut pandang demikian terhadap struktur *shell*.

4.2.1 Beban Vertikal

Pembebanan vertikal terhadap *shell* terjadi ketika adanya benda eksternal yang diletakkan di *shell*. Karena prinsipnya yang merupakan struktur funikular, maka ketika *shell* mengalami pembebanan terpusat, *shell* akan pecah. Ini sejalan dengan pernyataan Reigenstein (1999) yang telah dicantumkan sebelumnya. Pembebanan

yang dapat diterima oleh *shell* adalah pembebanan merata. Bila kita mengambil contoh dari *shell Nautilus Pompilius*, maka persebaran gayanya adalah sebagai berikut.



Gambar 4.1. Analisa penyebaran gaya ketika *shell* diberi beban vertikal

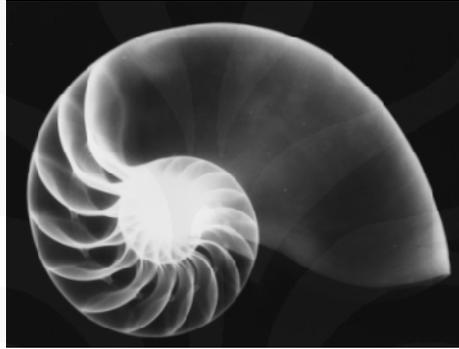
Sumber: <://imagecache2.allposters.com/images/POE/BM102G.jpg>. Telah diolah kembali

Gaya yang diterima oleh *shell* akan disalurkan melalui seluruh permukaan *shell* ke tanah. Selain itu, dengan adanya sekat-sekat diantara rongga di dalam tubuh *shell* juga berpengaruh terhadap penyaluran beban menuju ke tanah. Hal ini sejalan dengan pernyataan Thompson (1961) bahwa bagian-bagian yang pertama kali terbentuk akan tetap tidak terpisahkan dan terus bertambah, dan mengakibatkan munculnya struktur baru yang berkelanjutan.

4.2.2 Beban Lateral

Dalam penanggulangan beban lateral, yang paling dominan tentunya adalah gaya angin atau beban eksternal. Yang paling berpengaruh terhadap ketahanan dari *mollusca* sendiri adalah dirinya, sebab apabila dirinya tidak kuat mencengkram tanah, makanya dirinya akan terbawa oleh angin. Namun, *shell*-nya sendiri dibuat

sedemikian rupa sehingga penyaluran gaya lateral tetap menuju ke tanah melalui permukaan *shell*.



Gambar 4.2. Analisa penyebaran gaya ketika *shell* diberi beban lateral.

Sumber: <://imagecache2.allposters.com/images/POE/BM102G.jpg>. Telah diolah kembali

4.3 Analisis Perilaku Struktur *Shell*

Jika kita membandingkan dengan sistem struktur bangunan bertingkat tinggi yang telah dipaparkan di bab 3, maka sebenarnya yang paling dekat dengan yang digunakan oleh *shell* adalah sistem tubular dengan sistem *trussed tube*. Sistem tubular berasumsi bahwa seluruh gaya lateral ditahan oleh permukaan bangunan, dengan demikian permukaan bangunan menjadi bagian yang tidak terpisahkan dari struktur core bangunan. Sama halnya dengan *shell*, ketika permukaan *shell* dihilangkan, maka praktis penyaluran gaya vertikal dan lateral menjadi jauh berkurang kemampuannya dibandingkan dengan kondisi sebelumnya.

Perilaku sistem *shell* sendiri yang hanya menerima gaya tarik membuat *shell* dapat digolongkan ke dalam struktur funikular. Hal ini sejalan dengan sistem *trussed tube* dalam sistem tubular yang memanfaatkan prinsip funikular. Beban disalurkan sedemikian rupa dengan gabungan antara grid persegi panjang antara balok dan

kolom serta pengaku segitiga, sehingga praktis gaya yang terjadi adalah hanya gaya tekan atau tarik.

Sebagai kesimpulan, sistem tubular dengan *trussed tube* memiliki perilaku facade yang diasumsikan menahan gaya lateral, dan berfungsi sebagai kolom dalam menahan gaya vertikal. Hal ini sejalan dengan *shell*, dimana bentuk “facade” dari *shell* berperan utama dalam menyalurkan gaya lateral dan vertikal. Artinya, bentuk dari *shell* tersebut adalah struktur dari *shell* itu; struktur dari *shell* adalah sama dengan bentuk dirinya. Bentuknya merepresentasikan strukturnya, dan setiap lekukan dan putaran pada *shell* berperan aktif dalam menahan beban yang diterima oleh *shell*. Bentuk dari *shell* itu tidak semu, atau tidak hanya sekedar “wajah” atau *masking*, dan merupakan bagian integral dari penyaluran beban.

4.4 Studi Kasus I : The Gherkin, 30 St Mary Axe, Norman Foster

The Gherkin karya Norman Foster merupakan sebuah bangunan yang terletak di London, Inggris. Bangunan ini mengalami proses desain dari tahun 1997 hingga 2000, dan selesai dibangun pada tahun 2004. Bangunan ini dikhususkan untuk perkantoran, dan memiliki tinggi sekitar 180 meter, dengan 40 lantai.

Lokasinya dahulu merupakan sebuah tempat untuk *Baltic Exchange*, yaitu sebuah pusat perdagangan maritim yang dibom pada tahun 1992. Norman Foster memenangkan kompetisi untuk mengembangkan kembali tempat ini dengan sebuah bangunan *Millenium Tower* setinggi 385m. Pada 1997, *Swiss Reinsurance Company* membeli tanah di tempat ini, dan meminta desain yang lain oleh Norman Foster.



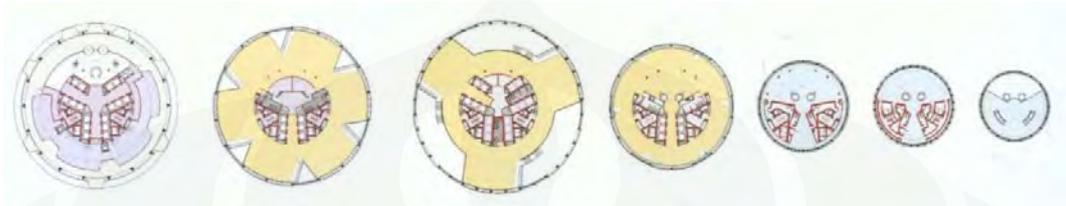
Gambar 4.3. The Gherkin

Sumber: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/51/30-St-Mary-Axe.jpg/350px-30-St-Mary-Axe.jpg>

The Gherkin secara prinsip merupakan sebuah bangunan silindris, dengan luas bangunan 42.000 m^2 untuk kantor dengan diameter yang berbeda-beda. Bentuknya ini sangat optimum dalam menahan gaya-gaya angin yang berlaku di bangunan ini, dan didapatkan dari simulasi program 3D.

4.4.1 Analisis

Menurut Norderson (2003), tidak seperti bangunan tradisional yang menggunakan *vertical support*, The Gherkin didesain agar secara prinsip, sistem strukturalnya adalah sebuah core baja, dan “diagrid” sebuah elemen struktur berbentuk segitiga yang disusun sedemikian rupa sehingga berakhir pada bagian apex (puncak) bangunan. Bentuknya yang didesain aerodinamis membantu mengurangi tabrakan yang terjadi antara angin dan bangunan.



Gambar 4.4. Perbandingan denah The Gherkin dari lantai dasar hingga lantai puncak

Sumber: Tall Buildings, hal. 74

Tanpa kebutuhan kolom diantara core baja dan diagrid, ruang perkantoran menjadi benar-benar terbuka. 6 buah *light-well* yang terletak secara simetris dapat terlihat di denah, kemudian menambahkan intensitas masuknya cahaya, dan dapat berkomunikasi antara lantai. Setiap lantai itu kemudian diputar untuk setiap lantai berikutnya sehingga lubang yang tercipta tidak lah lurus. Lubang ini ditandai dengan kaca yang berwarna hitam yang dapat terlihat di façade bangunan.

4.4.1.1 The Gherkin sebagai Bangunan *Twist*

Vollers (2001) mengelompokkan The Gherkin sebagai bangunan dengan kategori roto-twister. Menurut dia, kelompok yang termasuk di roto-twister memiliki ciri-ciri melakukan repetisi terhadap elemen yang ter-*twist* pada facade dalam sebuah lantai horizontal atau lantai yang sama.

Jika saya perhatikan, the Gherkin sebenarnya adalah bangunan yang dapat juga dikategorikan sebagai *twister* apabila tidak memakai facade kaca. Keadaan 6 buah *light-well* yang di setiap lantai dimiringkan agar lubang yang tercipta tidak lurus membuat bangunan ini seolah-olah memiliki denah lantai dasar yang di rotasi pada sebuah axis tertentu, meskipun sebenarnya ukuran *light-well* semakin mengecil seiring dengan tinggi bangunan. Namun ketika facade-nya dipasang, maka bentuk bangunan menjadi tergolong dalam kategori *roto-twister*, dimana facade-nya

mengalami *twisted surface*, sehingga bangunan ini dikategorikan sebagai bangunan *twist*.



Gambar 4.5. The Gherkin tanpa facade
Sumber: Tall Buildings, hal. 75

4.4.1.2 Diagrid

Salah satu yang paling menarik dari bangunan ini adalah kehadiran diagrid. Menurut Ian McCain (n.d.), diagrid (Diagonal Grid), merupakan sebuah desain untuk membangun sebuah bangunan besar dengan baja yang membuat struktur segitiga dengan dukungan *diagonal beams*.



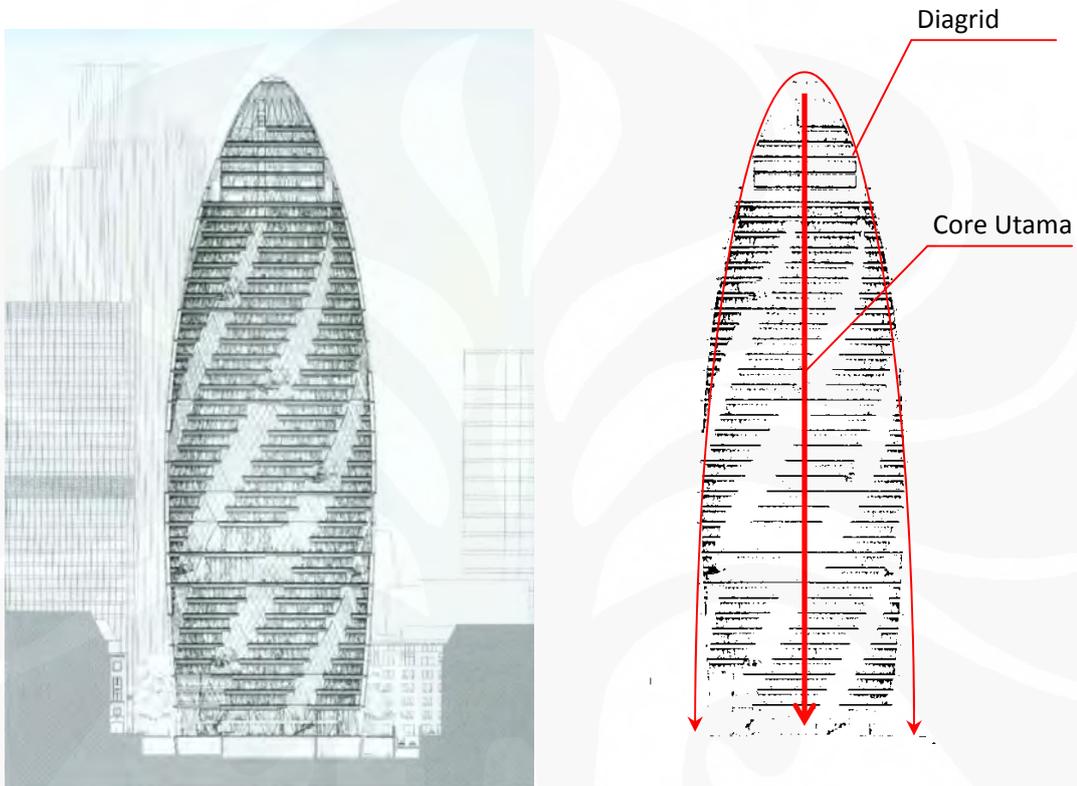
Gambar 4.6. Diagrid pada The Gherkin

Sumber: DiaGrid: Structural efficiency & increasing popularity, hal. 4

Pada gambar diatas, diagrid digambarkan dengan tiang-tiang segitiga yang berwarna putih. Menurut McCain (n.d.), diagrid berfungsi sebagai *shell* yang sangat kaku, dan untuk keperluan struktural dianggap sebagai “*very thin, deep beam*”. Diagrid merupakan struktur yang berdiri sendiri, sehingga core yang ada hanya memiliki efek yang sangat kecil kepada diagrid. Beban lateral diasumsikan tertahan dan disalurkan oleh tanah oleh diagrid dan hampir tidak mempunyai efek kepada core bangunan, meskipun pada kenyataannya plat lantai dan core tetap berpengaruh dalam penahanan gaya lateral, tetapi jauh lebih kecil jika dibandingkan bangunan tidak memiliki diagrid.

Prinsip penggunaan diagrid juga sebenarnya kurang lebih sama dengan percobaan yang dilakukan pada bab 3. Hanya saja, diagrid menutupi kekurangan yang ada pada bentuk belah ketupat dari keranjang, menjadi 2 buah segitiga dan dengan demikian struktur ini menjadi sangat kaku dan kuat.

4.4.1.3 Beban Vertikal



Gambar 4.7. Tampak depan The Gherkin dan analisa penyaluran gaya vertikal

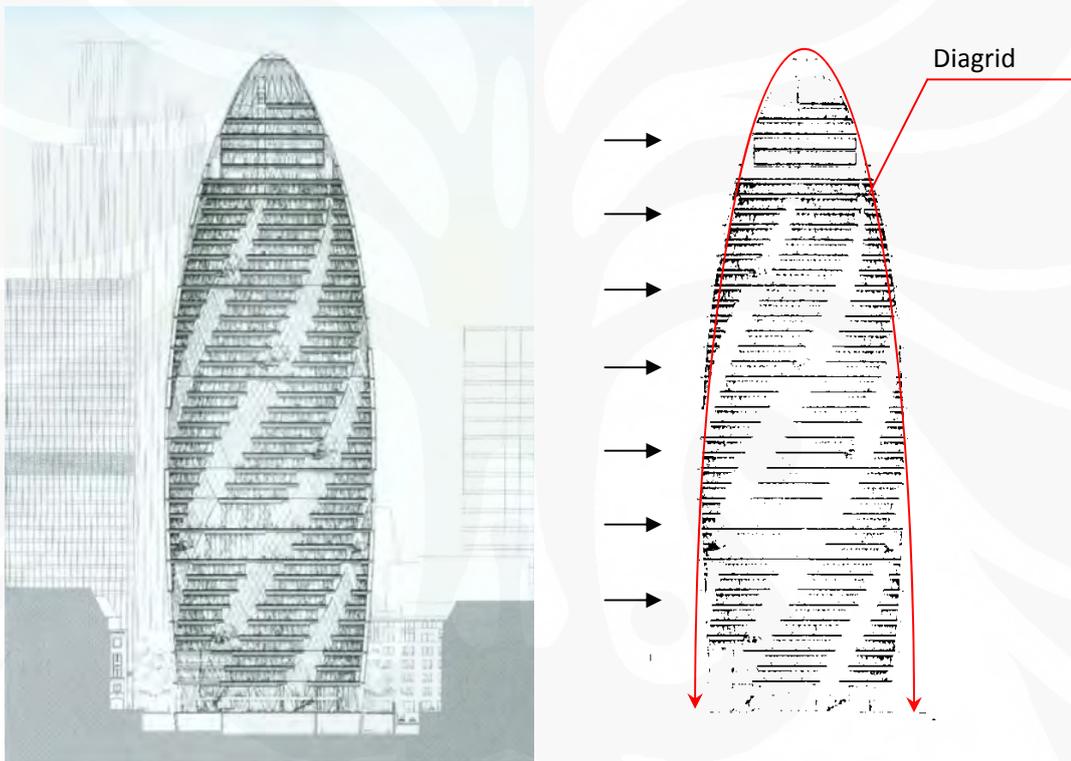
Sumber: Tall Buildings, hal. 74. Telah diolah kembali

Secara prinsip, beban vertikal yang dialami oleh bangunan ini akan disalurkan melalui core yang berada di tengah, dan diagrid yang berada di façade bangunan. Diagrid memberikan sebuah "load path" untuk beban gravitasi dengan mengikuti tiang-tiang yang disusun secara segitiga hingga ke tanah.

Penyaluran gaya yang telah terjadi secara vertikal mengikuti percobaan yang telah dilakukan pada bab 3. Namun, meskipun telah melakukan percobaan tersebut, efek yang sama tidak berlaku sepenuhnya pada diagrid. Apabila pada percobaan yang terjadi adalah perubahan bentuk pada belah ketupat, menurut saya untuk studi kasus The Gherkin maka perubahan bentuk akan jauh lebih kecil dibandingkan dengan

percobaan pada bab 3. Hal ini disebabkan pada bentuk dari diagrid sendiri, yang jauh lebih stabil akibat penambahan elemen diagonal yang membagi belah ketupat menjadi 2 buah segitiga.

4.4.1.4 Beban Lateral



Gambar 4.8. Tampak depan The Gherkin dan analisa penyaluran gaya lateral

Sumber: Tall Buildings, hal. 74. Telah diolah kembali

Secara keseluruhan, The Gherkin dapat disimpulkan menggunakan sistem struktur tubular dengan *trussed tube*. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, sistem struktur tubular memanfaatkan façade sebagai penahan gaya lateral, dan dengan demikian core yang besar menjadi dibuat seefisien mungkin untuk menahan gaya vertikal saja. Kehadiran diagrid, menurut McCain (n.d.), membuat seluruh gaya

lateral diasumsikan tertahan di diagrid, meskipun pada kenyataannya core bangunan dan plat lantai turut membantu menyalurkan gaya lateral. Namun, memang jika dibandingkan dengan hadirnya diagrid, gaya lateral yang perlu ditahan oleh bangunan menjadi jauh berkurang dibandingkan dengan tidak adanya diagrid.

Prinsip penyaluran gaya lateral yang diasumsikan ditahan oleh diagrid juga mengikuti pola penyaluran gaya pada percobaan di bab 3. Namun, hal yang sama persis tidak dapat kita harapkan terjadi pada diagrid, karena mengingat bentuk diagrid yang lebih stabil dan kaku dibandingkan pada objek percobaan.

4.4.2 Kesimpulan

Dengan kehadiran elemen diagrid pada façade The Gherkin, tidak saja membuat bangunan menjadi unik, tetapi secara struktural berarti menggunakan prinsip tubular. Ketika diagrid dihilangkan, core sendiri tidak akan mampu dalam menahan segala gaya yang terjadi, dan begitu juga sebaliknya. Dengan demikian, antara core dan diagrid terjadi suatu hubungan timbal balik yang tidak dapat terpisahkan.

4.5 Studi Kasus II : Turning Torso, Santiago Calatrava

Turning Torso karya Santiago Calatrava merupakan sebuah bangunan yang terletak di Malmo, Swedia. Bangunan ini mengalami proses desain dari tahun 1999 hingga 2001, dan selesai dibangun pada tahun 2005. Bangunan ini dikhususkan untuk apartemen dan perkantoran, dan memiliki tinggi sekitar 190 meter, dengan 54 lantai. Wright (2008), menyatakan bahwa Turning Torso merupakan bangunan tingkat tinggi pertama yang memiliki bentuk baru, yaitu bangunan dengan *twist*.

Turning Torso sendiri terletak di daerah pelabuhan sebelah barat daerah Malmo, yang sebelumnya didominasi dengan kehadiran salah satu struktur *mobile* terbesar dunia, yaitu Kockums Crane. Derek ini dulu memiliki ketinggian 138 meter, dan mampu

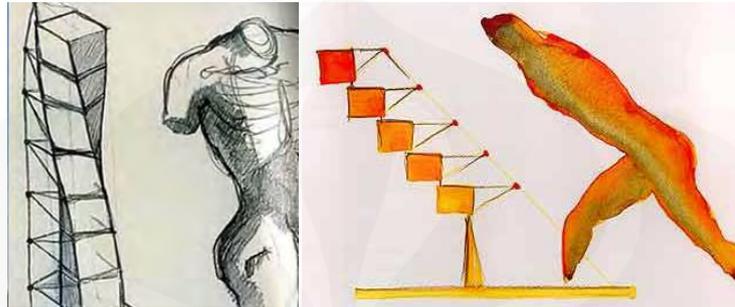
mengangkat kargo hingga 1650 ton. Saat Derek ini dilepas dan dibawa ke Korea Selatan pada 2002, dermaga ini mengalami penurunan tajam, dan direncanakan untuk pengembangan yang *sustainable*.



Gambar 4.9. Turning Torso

Sumber: http://pieknemiejsca.files.wordpress.com/2009/01/392_turning-torso.jpg

Pada tahun 1999, muncullah ide untuk membuat sebuah bangunan untuk residensial dengan bentuk yang persis sama dengan pahatan *Twisting Torso* oleh Calatrava, yang didasari oleh bentuk seorang penari.

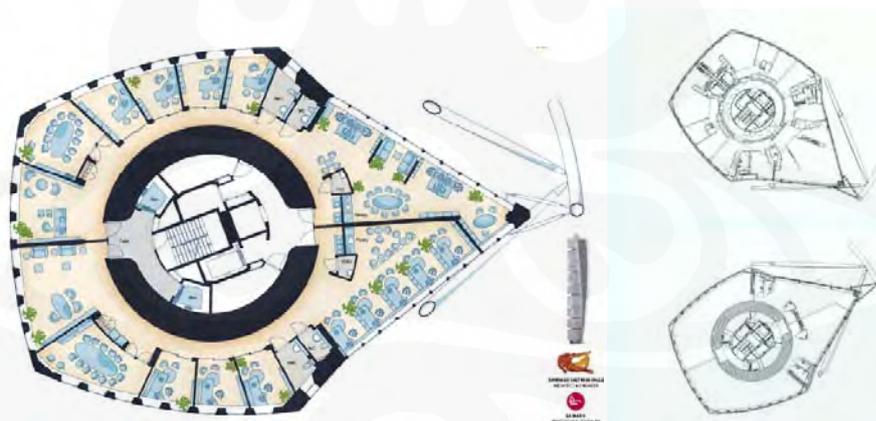


Gambar 4.10. Konsep Turning Torso

Sumber: Santiago Calatrava ve turning torso, hal. 17

Wright (2008) mengatakan bahwa Turning Torso terdiri dari 9 buah 'kubus' yang masing-masing terdiri dari 5 lantai, yang menggantung pada sebuah core utama dan juga disupport oleh sebuah *steel spine*. Setiap lantai dirotasi kurang dari 2° dari lantai yang berada dibawahnya, sehingga secara total bangunan ini ter-*twist* sebesar 90° dari lantai dasar hingga ke puncak. 2 buah kubus yang paling bawah digunakan sebagai *house offices*, dan ada 147 buah unit apartemen di 7 kubus sisanya.

4.5.1 Analisis

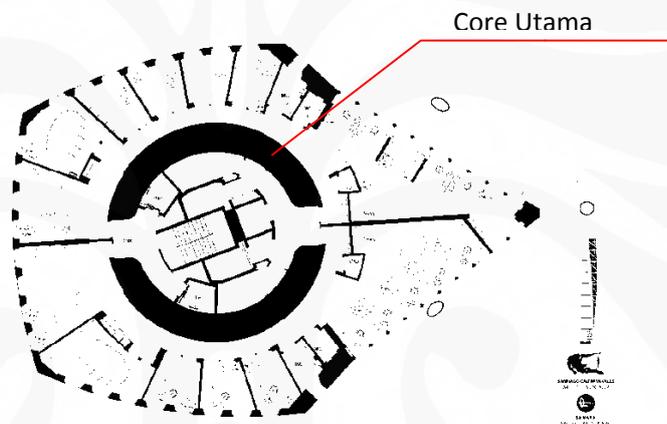


Gambar 4.11. Denah Turning Torso

Sumber: Santiago Calatrava ve turning torso, hal. 45

Secara struktural, fondasi dari Turning Torso ditancap sedalam 15 meter, dan bangunan ini sendiri berdiri pada sebuah 7 meter beton rakit (*concrete raft*). Core beton mengangkut 5 buah lift dan ketebalan dindingnya sekitar 2,5 meter pada lantai dasar, dan 40 cm pada puncaknya. Ini dikarenakan bentuk bangunan yang memang mengecil hingga di lantai paling atas.

Semua lantai adalah beton, dan pada bagian bawah dari setiap “cube”, terdapat sebuah *conical slab*, yang keluar dari core utama. Sebuah *steel spine* juga membantu mereduksi beban lateral yang diterima dari bangunan ini.



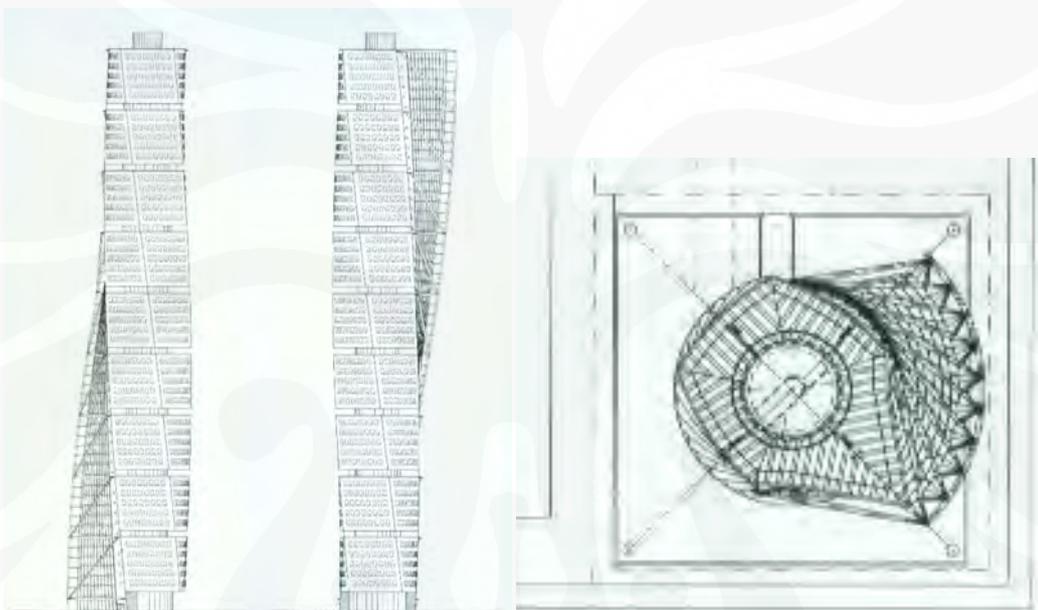
Gambar 4.12. Denah Turning Torso beserta analisa

Sumber: Santiago Calatrava ve turning torso, hal. 45. Telah diolah kembali

Pada denah di atas, core merupakan struktur penahan utama, dimana bagian struktur ini sangat berperan terhadap gaya-gaya lateral dan vertikal yang berlaku di bangunan ini. Core menggunakan prinsip *shear wall*. Titik-titik tebal yang berada mengitari denah merupakan sistem struktur yang menurut saya lebih dikhususkan untuk menahan façade bangunan itu sendiri. Mungkin saja struktur yang mengitari denah ini berperan terhadap gaya lateral, namun menurut saya, dengan melihat prinsip *shear core structure* yang memang ditujukan untuk menyerap gaya lateral dan vertikal, maka kecil peranan dari struktur yang berada mengitari bangunan. Dengan kata lain, ketika struktur ini dihilangkan, bangunan akan tetap dapat berdiri dengan kokoh.

4.5.1.1 Turning Torso sebagai Bangunan *Twist*

Vollers (2001) mengelompokkan Turning Torso sebagai bangunan dengan kategori *twister*. Dalam kategori *twister*, model mengalami denah lantai dasar yang dirotasi pada axis tertentu, dengan sudut tertentu pula. Jika kita melihat pada Turning Torso, maka nampaknya axis rotasinya terletak pada titik tengah bangunan, dan dirotasi sebanyak 2° dari lantai yang berada di bawahnya.

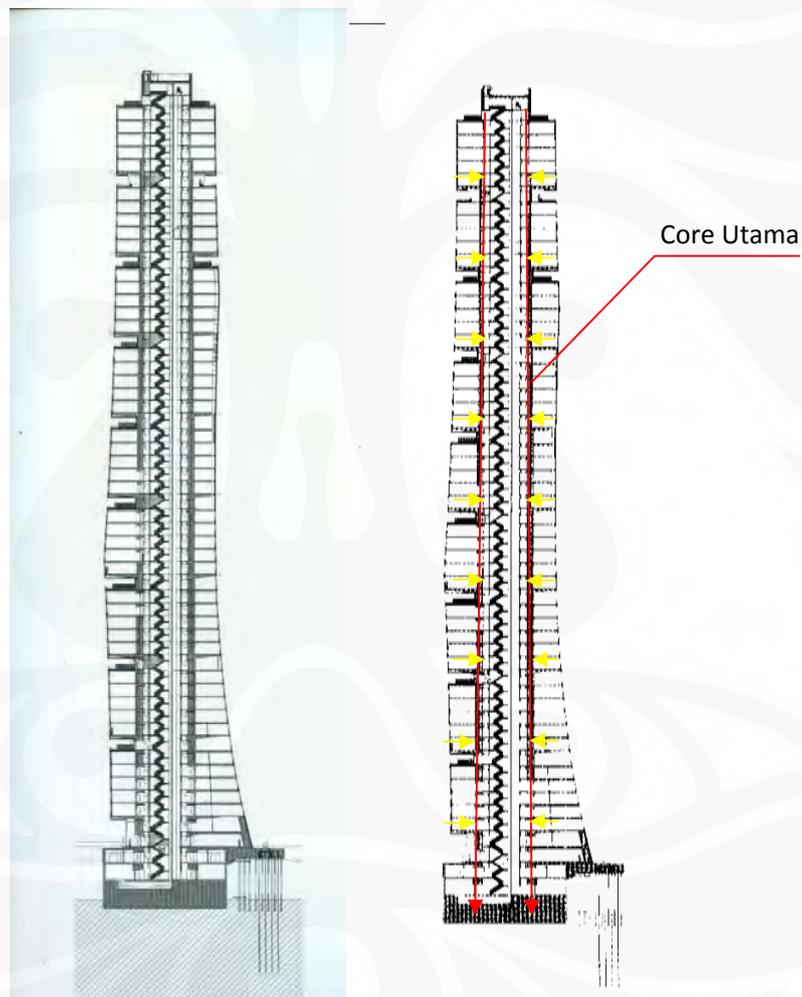


Gambar 4.13. Tampak depan Turning Torso dan kondisi Turning Torso ketika denahnya ditumpuk
Sumber: Tall Buildings, hal. 88

4.5.1.2 Beban Vertikal

Pada gambar diatas, dapat dilihat bahwa sesuai dengan apa yang dinyatakan sebelumnya oleh Wright (2008), Turning Torso ini tersusun dari 9 buah “kubus”. Dari gambar potongan dapat terlihat bahwa setiap kubus pada sebelah kiri core, tidak semuanya saling terhubung, dan dengan demikian setiap berakhirnya 1 kubus, ada sebuah lantai yang kosong. Konsekuensinya, pada bagian façade bangunan ini, tidak terjadi penyaluran gaya vertikal secara langsung. Artinya, setiap beban yang diterima

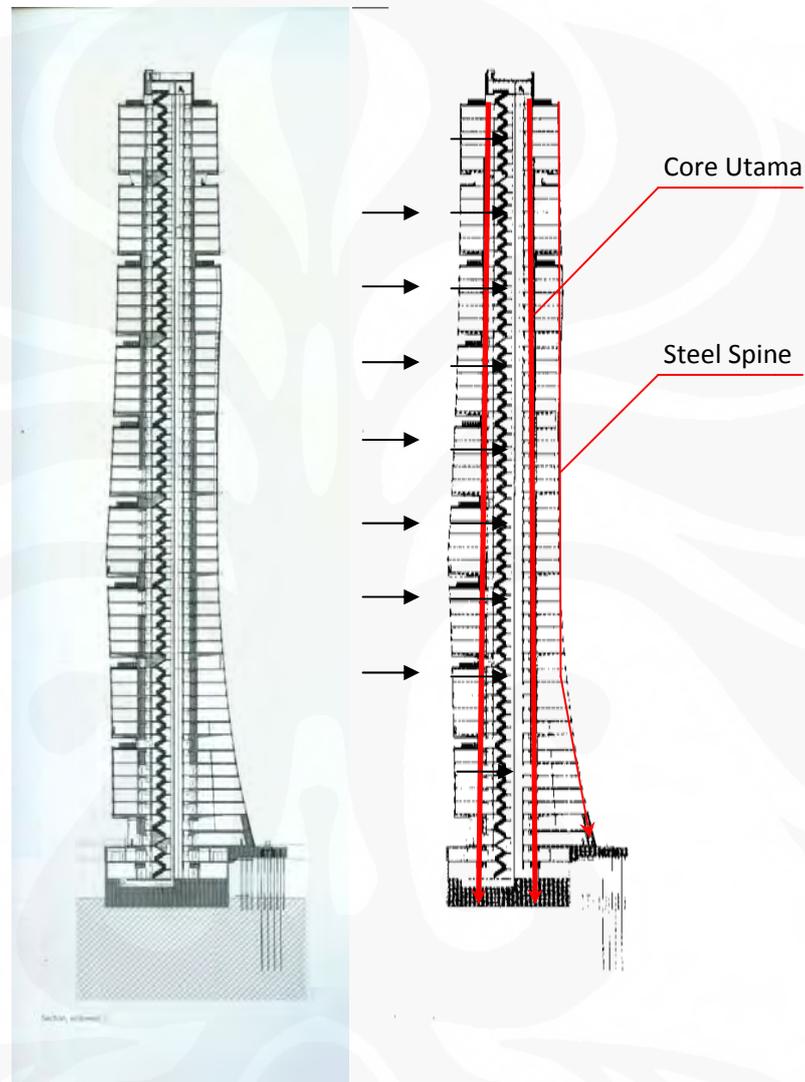
oleh daerah ini harus tersalurkan ke core utama. Hal yang agak berbeda pada bagian sebelah kanan core. Dapat terlihat bahwa struktur dapat tersambung hingga ke lantai dasar. Namun, pada gambar terlihat bahwa tidak ada struktur tebal di bagian tersebut. Menurut saya, hal ini terjadi karena 2 hal, yang pertama adalah bagian façade tidak tegak lurus dengan tanah, yang berarti kalau dipaksakan maka akan menambah biaya konstruksi. Yang kedua adalah apabila dipaksakan adanya struktur yang tegak lurus dengan tanah, maka ruang yang tercipta mungkin akan berkurang akibat adanya struktur di dekat jendela.



Gambar 4.14. Potongan Turning Torso beserta analisa penyebaran gaya vertikal

Sumber: Tall Buildings, hal. 89. Telah diolah kembali

4.5.1.3 Beban Lateral



Gambar 4.15. Potongan Turning Torso beserta analisa penyebaran gaya lateral

Sumber: Tall Buildings, hal. 89. Telah diolah kembali

Untuk beban lateral, secara prinsip yang bertanggung jawab adalah core utama. Bagian façade hanya akan menahan beban lateral untuk dirinya sendiri, atau untuk keberdiriannya sendiri, namun yang bertanggung jawab untuk keseluruhan bangunan adalah core utama. Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, Turning Torso juga

memperkenalkan sebuah elemen bantuan yang bertindak sebagai *exoskeleton*, yaitu sebuah *steel spine*. Menurut Nordenson (2003), *steel spine* disini berfungsi untuk membantu menahan gaya lateral.

4.5.2 Kesimpulan

Dari analisa yang diberikan diatas, dapat dilihat bahwa core berperan dominan dalam segala macam beban yang terjadi pada gedung ini. Beban vertikal semuanya pada akhirnya akan disalurkan menuju core utama, dan beban lateral merupakan tanggung jawab penuh dari core utama. Lantai-lantai yang tercipta seolah-olah keluar secara kantilever dari core utama. Artinya, ketika *façade* dihilangkan, maka bangunan ini tetap dapat berdiri dengan kokoh.

4.6 Analisa Studi Kasus dengan Perilaku Struktur *Shell*

2 contoh kasus yang telah dijabarkan sebelumnya, yakni The Gherkin dan Turning Torso merepresentasikan 2 buah bangunan *twist* dengan konsep struktur yang berbeda. Mereka memunculkan keistimewaan bentuk *twist* mereka dengan pengaplikasian struktur yang berbeda. Pada The Gherkin karya Norman Foster, disitu terlihat bahwa bangunan ini menggunakan prinsip struktur tubular, dimana bagian *facade* pun ikut dalam menahan beban dalam jumlah besar. Seperti yang telah dijelaskan, sistem tubular berasumsi bahwa beban lateral ditahan oleh *facade* bangunan, sehingga core utama diasumsikan tidak menahan beban lateral, dan dengan demikian tidak perlu terlalu besar.

Ketika Norman Foster berasumsi bahwa struktur *diagrid* yang menjadi *facade* bangunan akan menahan gaya lateral, maka dia dapat membuat sebuah ruangan yang jauh lebih luas dan tanpa kolom, dan tentunya core yang lebih kecil.

Turning Torso sendiri dalam mengaplikasikan konsepnya, membuat sebuah struktur utama dengan *shear core structure*, dibantu dengan *steel spine* yang menurut Nordenson (2003), dia gunakan dalam menambah aksen sehingga bangunan itu terlihat seolah-olah memiliki tulang belakang. Konsekuensi penggunaan *shear core structure*, ditambah lagi dengan model bangunan yang pada salah satu sisinya tidak menerus hingga ke bawah, core utama menjadi sangat penting, karena asumsinya adalah semua struktur “keluar” dari core. Analoginya adalah seperti struktur pohon, dimana terdapat sebuah batang besar, tempat bertumpunya ranting-ranting dan daun-daun.

Bila kita melihat kembali perilaku struktur pada *shell*, dimana bentuknya merepresentasikan strukturnya, karena bentuknya itu adalah strukturnya, maka kita bisa melihat bahwa ada perbedaan mendasar pada The Gherkin dan Turning Torso. The Gherkin, mencoba mengikuti prinsip dari *shell*, dimana bentuknya itu adalah strukturnya. *Twist* yang terbentuk merupakan perwujudan dari bentuk dan strukturnya. Hal ini berbeda dengan Turning Torso, yang seolah-olah memakai “topeng”, atau *masking* dalam memunculkan facade *twist*-nya. Bentuk *twist* yang dimilikinya seolah-olah hanya semu saja, sebab ketika bagian itu dihilangkan, bangunan ini masih tetap dapat berdiri dengan kokoh.

Kesimpulan yang dapat saya ambil adalah bahwa ketika suatu bangunan ingin memunculkan karakter bentuk dirinya yang tidak semu, atau sekedar *masking*, maka sistem struktural yang paling tepat adalah struktur tubular. Struktur tubular memberikan peluang agar bagian “wajah” bangunan tidak hanya berperan sebagai “wajah” saja. Dengan menggunakan sistem tubular, kita dapat mengikuti keunikan *shell*, dimana bentuk dirinya adalah strukturnya, karena bentuknya adalah strukturnya.

BAB 5

KESIMPULAN

Bangunan bertingkat tinggi dengan facade *twist* merupakan suatu bangunan dengan tingkat kompleksitas yang tinggi ketika ingin diwujudkan secara nyata. Bentuknya yang terkadang melengkung, membuat pemilihan material serta sistem struktural menjadi lebih kompleks dibandingkan dengan bangunan bertingkat tinggi biasa yang cenderung berbentuk kotak. Karena tingkat kompleksitasnya tersebut, maka efek dari bentuknya tadi menjadi problematika tersendiri yang patut untuk diangkat dan dibahas.

Melihat kepada kedua contoh kasus yang telah dibahas, yakni The Gherkin dan Turning Torso, kita dapat melihat secara langsung efek dari kompleksitas bentuk *twist*. Untuk merealisasikan bentuk *twist* tersebut, The Gherkin menerapkan sistem tubular dengan *trussed tube*. Elemen diagrid kemudian diperkenalkan untuk memperkuat struktur tersebut. Efeknya secara langsung terhadap penerapan sistem tubular adalah bahwa core yang berada di pusat bangunan dapat dicecilkan secara signifikan, sebab pada sistem tubular, facade diasumsikan menahan gaya lateral. Hal ini telah dibuktikan dengan percobaan yang dilakukan pada bab 3. Konsekuensi positif dari pemilihan sistem strukturalnya adalah ruangan yang dapat diolah untuk sesuai dengan fungsinya (dalam hal ini perkantoran) dapat dioptimalkan sehingga menjadi lebih besar.

Melihat contoh kasus Turning Torso, Santiago Calatrava mencoba menerapkan sistem yang berbeda dalam merealisasikan bentuk *twist* tersebut. Calatrava memilih menggunakan sistem *shear core structure* yang berfungsi untuk menyerap gaya lateral dan vertikal. Pengaplikasian sistem ini membuat bangunan ini seolah-olah seperti pohon besar, dimana plat lantainya merupakan beban yang dapat dianalogikan sebagai ranting ataupun daun, yang keluar secara kantilever dari inti core bangunan. Karena fungsinya yang menahan gaya lateral dan vertikal, core dibuat menjadi

sedemikian besar, agar mampu berdiri sesuai ekspektasi dasarnya tersebut. Untuk membantu menahan gaya lateral, digunakan juga sebatang *steel spine* yang diharapkan dapat membantu menahan gaya lateral, sekaligus lebih memunculkan konsep awal bangunan.

Ketika saya melihat kembali bagaimana sebuah *shell*, contoh *twist* yang diberikan oleh alam, dapat berdiri dengan kokoh dan dengan efektif menyalurkan gaya yang diterimanya, saya melihat bahwa sudah sebaiknya struktur *twist* meniru *shell* tersebut. Bentuk *twist* dari *shell*, adalah struktur dari *shell* tersebut; atau dengan kata lain, bentuknya adalah strukturnya.

Jika kita membandingkan dengan struktur The Gherkin dan Turning Torso, kita dapat melihat bahwa The Gherkin mengikuti jejak dari *shell* tersebut. The Gherkin mencoba membuat bentuk *twist* tidak menjadi sebuah beban yang harus dipenuhi, namun The Gherkin memanfaatkan bentuk *twist* tersebut untuk menjadi bentuk dasar dari strukturnya. Hal ini sangat kontras dengan Turning Torso, dimana akhirnya bentuk *twist* yang terjadi merupakan sebuah beban yang harus ditanggung oleh Turning Torso itu sendiri. Bentuk *twist* yang terjadi sebenarnya hanyalah semu, atau *masking*, dan ketika facade yang membentuk wajah *twist* itu ditarik, bangunan itu malah dapat berdiri lebih kokoh karena terjadi kehilangan beban.

Sebagai kesimpulan, dampak dari bentuk *twist* terhadap arsitektur, khususnya pada struktur bangunan bertingkat tinggi, menurut saya janganlah dijadikan sebuah beban. Sudah seharusnya kita melihat kembali *shell*, contoh *twist* yang diberikan oleh alam. Bentuknya tidak menjadi beban. Pertumbuhan, gaya serta kebutuhannya dalam menjalani hidup dan perkembangan dirinya sendiri kemudian membentuk *shell* menjadi sedemikian rupa. *Shell* tersebut lebih lanjut hidup dalam keadaan bentuk yang demikian, dan secara baik dan efisien menjadi penahan segala gaya yang terjadi pada *shell* tersebut. Sudah seharusnya bangunan dengan bentuk *twist* mengikuti pelajaran yang diberikan oleh *shell*, dimana bentuk *twist* itu tidak menjadi kelemahan, namun menjadi kekuatan tersendiri, baik secara konseptual maupun struktural.

DAFTAR PUSTAKA

- Allison, Kenneth. (2008). *The architects of London*. Oxford: Elsevier Ltd.
- Fedun, Bill. (n.d.). *30st Mary Axe London*. Juni 9, 2009.
http://www.daap.space.daap.uc.edu/~larsongr/Larsonline/SkyCaseStu_files/SwissRe.pdf
- Khan, Fazlur & Rankine, John. (1981). *Tall building systems and concepts (Monograph on planning and design of tall buildings)*. New York: ASCE.
- Kotan, Salih, et al. (n.d.). *Santiago Calatrava ve turning torso*. Juni 3, 2009.
<http://www.insaatmuhendisligi.net/index.php/topic,4725.0/wap.html>
- McCain, Ian. (n.d.). *DiaGrid: Structural efficiency & increasing popularity*. Juni 9, 2009.
http://www.daap.space.daap.uc.edu/~larsongr/Larsonline/SkyCaseStu_files/Diagrid.pdf
- Microsoft Corporation. (2008). *Microsoft Encarta 2008* [Computer Software]. Washington: Microsoft Corporation.
- Nordenson, Guy. (2003). *Tall buildings*. New York : The Museum of Modern Art
- Regenstein, Joe. (1999, Februari 23). "What is the molecular structure of a chicken eggshell – what make it so strong?" online posting. Physics Forum. Mei 12, 2009.
<http://www.physicsforums.com/archive/index.php/t-40911.html>
- Schodek, Daniel L. (1992). *Structures* (2nd ed.). New Jersey: Prentice Hall.
- Schueller, Wolfgang. (1977). *High-rise building structure*. Canada: John Wiley & Sons, Inc.

Siegel, Curt. (1962). *Structure and form in modern architecture*. London: Corsby Lockwood.

Thompson, D'Arcy. (1961). *On growth and form*. Cambridge: Cambridge University Press.

Vollers, Karel. (2001). *Twist&Build creating non-orthogonal architecture*. Rotterdam: 010 Publishers.

Wright, Herbert. (2008). *Skyscrapers: Reaching for the sky*. Bath: Parragon.