

BANGUNAN TINGGI AERODINAMIS DALAM TINJAUAN STRUKTUR DAN KETERPADUAN DESAIN

Fibria Conytin Nugrahini^{1*}

¹Arsitektur Universitas Muhammadiyah Surabaya, Jl Sutorejo no 59 Surabaya, Indonesia

* Email korespondensi: fibriaconytinugrahini@um-surabaya.ac.id

Received: May 2024; Accepted: June 2024; Published: July 2024

ABSTRAK

Bangunan tinggi yang mempunyai ciri *aerodinamis* adalah bangunan tinggi yang dapat merespon terhadap aliran angin dan beban lateral yang terjadi pada struktur atas bangunan. Kendala pemahaman sistem struktur pada bangunan tinggi seringkali menjadi hambatan bagi mahasiswa arsitektur sehingga tidak tercapai keterpaduan desain khususnya pada bangunan tinggi dengan bentuk *aerodinamis*. Oleh karena itu perlu dianalisa bagaimana pola struktur yang membentuk bangunan *aerodinamis* itu dapat terwujud dengan studi kasus di Indonesia dan di luar negeri. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah *literature review* dan analisa dengan tinjauan desain dan struktur bangunan *aerodinamis* pada tiga studi kasus bangunan di Indonesia dan luar negeri. Diharapkan dengan memahami sistem struktur bangunan *aerodinamis*, mahasiswa akan dapat memadukan kreativitas dengan sistem strukturnya. Atau sebaliknya pemahaman sistem struktur dapat menghasilkan kreativitas desain sehingga tercipta keterpaduan desain dan sistem struktur. Dari *literature review* dan analisa didapatkan bahwa bangunan tinggi *aerodinamis* mempunyai sistem struktur yang didapatkan dari pengolahan bentuk *twister* dengan sistem struktur komposit dan sistem *core*. Serta sistem *diagrid* yang biasa menggunakan sistem struktur *diagrid* baja dan sistem struktur *core*. Sistem *core* masih tetap menjadi acuan utama karena pemakaiannya lebih efisien dalam segi biaya dan metode pengerjaan.

Kata-kunci: bangunan *aerodinamis*; bangunan tinggi; keterpaduan desain dan struktur; struktur bangunan tinggi

AERODYNAMIC HIGH-RISE BUILDING IN STRUCTURAL REVIEW AND DESIGN INTEGRATION

ABSTRACT

Tall buildings that have aerodynamic characteristics are tall buildings that can respond to wind flow and lateral loads that occur on the upper structure of the building. Obstacles in understanding the structural systems in tall buildings often become obstacles for architecture students so design integration cannot be achieved, especially in tall buildings with aerodynamic shapes. Therefore, it is necessary to analyze how the structural patterns that form aerodynamic buildings can be realized using case studies in Indonesia and abroad. The method used in this research is a literature review and analysis with a review of aerodynamic building designs and structures in three building case studies in Indonesia and abroad. It is hoped that by understanding aerodynamic building structural systems, students will be able to combine creativity with their structural systems. Conversely, understanding the structural system can produce design creativity to create an integration of the design and structural system. From the literature review and analysis, it is found that aerodynamic tall buildings have a structural system obtained from twister-shape processing with a composite structural system and a core system. As well as the diagrid system which usually uses a steel diagrid structure system and a core structure system. The core system is still the main reference because its use is more efficient in terms of costs and work methods.

Keywords: *aerodynamic buildings; tall buildings; design and structure integration; tall building structures*

PENDAHULUAN

Secara modern bangunan tinggi banyak diminati karena alasan kelangkaan lahan perkotaan, kemajuan teknologi, inovasi sistem struktur yang berkembang, signifikan dalam budaya dan *prestige* serta perkembangan ekonomi dan ambisi manusia. (Rana & Rana, 2014). Bangunan tinggi *aerodinamis* merupakan bangunan yang dapat menarik perhatian karena bentuknya yang dirancang secara ikonik sekaligus sebagai bangunan yang memiliki respon yang baik terhadap beban angin. Bangunan seperti ini tentu harus dipahami bagaimana strukturnya karena secara kasat mata tidak terlihat sistem strukturnya. Studi literatur yang mendalam bagaimana pengolahan bentuk dan denah bangunan mengikuti atau sesuai dengan logika berpikir struktur. Arsitek dalam mendesain khususnya bangunan tinggi tentu membutuhkan banyak referensi dalam membuat desain yang memadukan ide dengan kerangka berpikir secara struktural. Kreatifitas bentuk yang diolah seringkali bagi mahasiswa yang masih dalam masa studi ataupun arsitek yang belum terjun ke dunia bangunan tinggi serta masih sedikit pengalaman tentu membutuhkan gambaran bagaimana sistem struktur bangunannya. Dengan mendalami pola struktur berbagai bangunan unik seperti bangunan *aerodinamis* akan dapat memperkaya kerangka berpikir secara struktural dan memudahkan dalam proses desain khususnya pada bangunan tinggi. Hal ini baik dalam keterpaduan desain dan struktur secara komprehensif.

Beberapa bangunan menunjukkan bentuk *aerodinamis* disebabkan pertimbangan akan efek angin, dengan adanya bentuk yang mengikuti tekanan angin, maka bentuk bangunan dibuat dinamis. Dalam mencapai bentuk yang dinamis, tren terkini dalam praktik desain bangunan bertingkat tinggi adalah meningkatkan sifat *aerodinamis* dari keseluruhan bentuk, sehingga beban angin yang akan berdampak pada struktur dapat dihindari (Alkhatib et al., 2022). Pada saat proses konseptual desain, pertimbangan struktur dan teknologi metode pelaksanaan harus menjadi pertimbangan yang besar. Biaya yang besar dalam penggunaan material serta sistem struktur yang dapat menanggulangi beban lateral yang ada. Dalam hal ini bisa saja untuk sistem strukturnya lebih besar dari rata-rata biaya sistem strukturnya sebesar 30%. Bentuk yang dinamis dari bangunan bertingkat tinggi berdampak positif pada sifat *aerodinamis*, sehingga mencegah angin membentuk pusaran yang terorganisir, yang dapat menyebabkan masalah getaran yang serius (Aminmansour & Moon, 2010). Efisiensi optimasi bentuk *aerodinamis* serta kemampuan alat komputasi diharapkan dapat mendorong arsitek dan insinyur untuk menggunakannya (Alkhatib et al., 2022). Dalam proses desain, tantangan dalam bangunan yang unik dan bentuk yang dinamis dan konvensional membutuhkan perpaduan pada fase desain dan struktur dapat didorong secara bersamaan dengan adanya teknologi yang semakin maju sehingga interaksi akan dengan mudah dengan teknologi informasi bangunan yang semakin maju. Sehingga pengolahan bentuk tidak terpisah dengan pemilihan struktur seperti yang terjadi pada masa lampau. Integrasi arsitektur dan desain struktur memiliki banyak manfaat, seperti menyediakan efisiensi tertinggi dalam desain struktural, serta penciptaan bentuk ikonik apa pun yang dibayangkan sang arsitek. (Sev & Tuğrul, 2014).

Beberapa bangunan tinggi dengan bentuk dinamis yang berprinsip *aerodinamis* masih terbatas diulas tentang pola tatanan strukturnya dan bagaimana struktur tersebut dipakai sebagai acuan dalam mendesain. Selain bentuk *aerodinamis*, pertimbangan desain yang ikonik dan unik tentu menjadi pertimbangan desain yang sangat penting apalagi untuk

bangunan tinggi yang biasanya digunakan untuk komersial. Bagaimana kerangka desain yang terpadu antara desain dan struktur akan memudahkan seorang arsitek untuk menghasilkan desain-desain *aerodinamis* yang berkembang serta bagaimana keterpaduan tersebut menciptakan efisiensi desain. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisa dan menampilkan desain dan struktur yang menjadi acuan dalam desain *aerodinamis* bangunan tinggi sehingga diharapkan tercapai keterpaduan dan efisiensi dalam pemahaman pola sistem struktur.

METODE

Metode penelitian yang digunakan adalah penelitian *literature review* dan analisa. Dimana data literatur yang didapat dianalisa dan diolah lagi berdasarkan teori serta diperjelas dengan gambar yang menunjang. Data didapatkan dari beberapa artikel dalam jurnal bereputasi dan majalah desain serta beberapa sumber web online. Bangunan tinggi yang akan dianalisa yaitu bangunan Avian Tower yang ada di Indonesia, serta bangunan tinggi *aerodinamis* Albidda Tower Qatar serta Swiss Re Tower London. Ketiga bangunan menjadi perwakilan sistem struktur *twist* dan penggunaan sistem struktur *diagrid*. Kedua sistem tersebut merupakan dua sistem struktur yang paling umum dengan bentuk *aerodinamis*. Data diolah dan dianalisa berdasarkan tipologi *layout* denah serta perletakan pola strukturnya, serta material yang digunakan untuk menunjang sistem struktur tersebut. Kemudian hasil yang didapatkan dari ketiga studi kasus diambil pola struktur yang sama dan perbedaannya sehingga didapatkan kesimpulan. Studi kasus kedua jenis bangunan tersebut dipaparkan untuk memberikan referensi secara jelas bagaimana tinjauan struktur dapat memberikan gambaran dan acuan yang sangat baik dalam proses desain dan keterpaduan desain.

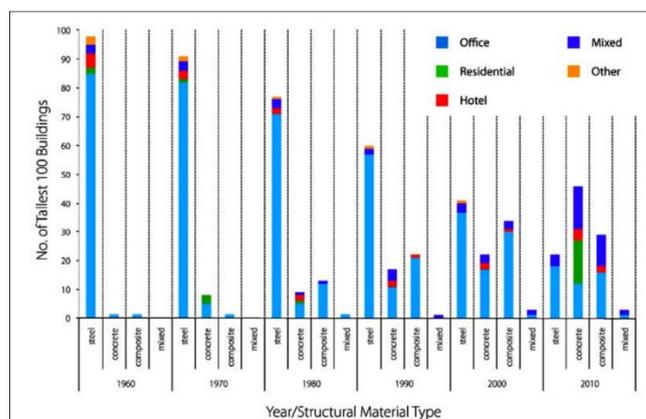
HASIL DAN DISKUSI

Untuk memahami sistem struktur bangunan, berdasarkan material dapat dibedakan sebagai berikut yaitu : (1) Bangunan tinggi dengan struktur baja jika struktur vertikal, lateral dan lantai menggunakan material baja, (2) Bangunan tinggi dengan struktur beton jika struktur vertikal, lateral dan lantai menggunakan material beton bertulang, (3) Bangunan tinggi dengan struktur komposit jika struktur vertikal, lateral dan lantai menggunakan material baja dan beton komposit, termasuk jika perpaduan baja dan dinding *corenya* dari beton bertulang, dan ke (4) Bangunan tinggi dengan struktur campuran jika memakai sistem struktur yang berbeda diatas dan bawah serta sebaliknya.

Dari Gambar 1 terlihat tren pemakaian material dalam struktur bangunan tinggi menunjukkan banyaknya bangunan tinggi yang masih menggunakan beton bertulang sebagai yang paling banyak digunakan. Sedangkan yang kedua adalah penggunaan beton komposit (baja dan beton) dalam struktur bangunan berdasarkan material yang digunakan.

Sistem Struktur Bangunan Tinggi

Ber macam bentuk sistem struktur yang diadopsi pada bangunan tinggi dengan berbagai ketinggian ditampilkan pada Gambar 2. Berbagai macam sistem bangunan tinggi



Gambar 1. Tren dalam pemakaian material struktur bangunan tinggi
Sumber : CTBUH, 2012

ditentukan seberapa efektif kekakuan lateral yang dihasilkan. Sistem struktur pada bangunan tinggi juga ditentukan oleh jumlah lantai supaya dicapai sistem struktur yang efektif dan efisien.

Desain Bangunan Tinggi Aerodinamis

Respon struktur terhadap beban angin merupakan pertimbangan penting dalam desain (Hou & Jafari, 2020). Kecepatan angin secara eksponensial meningkat seiring dengan ketinggian sehingga mengakibatkan beban angin yang lebih besar pada lantai yang lebih tinggi serta semakin mengalami turbulensi yang bergejolak dan kompleks (Gambar 3). Dampak yang disebabkan angin tersebut membutuhkan pendekatan desain yang inovatif yang dapat meningkatkan ketahanan bangunan tinggi dalam menghadapinya. (Jafari & Alipour, 2021). Oleh karena itu peningkatan kekakuan lateral terhadap beban angin akan bermanfaat bagi pertanggungjawaban struktur, serta memberikan kenyamanan bagi penghuninya. Untuk mencapai tugas ini, tren terkini dalam praktik desain bangunan bertingkat tinggi adalah meningkatkan sifat *aerodinamis* dari keseluruhan bentuk (Ilgin & Gunel, 2007). Dalam hal konsep ini sejalan dengan bangunan yang berkelanjutan, integrasi elemen yang terinspirasi alam ke dalam bangunan tinggi maka desain memiliki efek positif pada fisik dan mental kesejahteraan penghuninya. Contoh-contohnya bersifat alami yaitu diaplikasikan pada bentuk, serta belajar dari alam seperti mengumpulkan air hujan, membuat bentuk bangunan yang responsif terhadap beban angin dan gempa dengan bentuk yang sesuai (Aslı Yildiz, Güneş Mutlu Avinç, 2024).

Bangunan Tinggi Aerodinamis Prinsip Memutar /Melintir/ *Twist*

Pada Gambar 4 terlihat proses desain serta hasil dengan menggunakan desain parametrik. Dengan bertambahnya pengetahuan mengenai hal ini, bangunan tinggi dapat dirancang untuk dapat menahan beban angin secara lebih sehingga menghasilkan kota yang berketahanan dan berkelanjutan. Arsitek dan insinyur struktur umumnya berkolaborasi pada tahap awal desain bangunan tinggi. Owner biasanya menginginkan cara yang paling murah untuk menemukan bangunan yang bagus serta biaya yang efisien. Hal ini dapat dilakukan dengan studi rekayasa nilai dan konsultan biaya yang menganalisis biaya serta

Lateral Steel Structural Sytem	Number of Stories													
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	
Rigid frame	██████████													
Braced frame	██████████													
Staggered trussed system	██████████													
Eccentric braced system	██████████													
Braced system and rigid frame	██████████													
Outrigger and belt truss system	██████████													
Frame tube	██████████													
Trussed tube	██████████													
Bundled tube	██████████													
Composite frame with steel floor framing	██████████													

Gambar 2. Berbagai macam jenis struktur bangunan tinggi
Sumber: Taranath, 2005

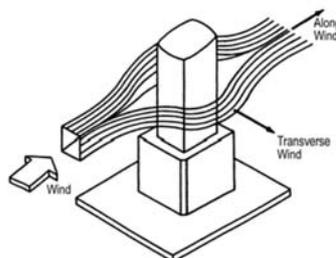
mencari penyempurnaan desain yang efisien (M. Ali & Armstrong, 2010).

Contoh bentuk bangunan tinggi yang diputar atau *twist* mempunyai popularitas yang semakin banyak meningkat karena dengan memutar pada bangunan tinggi memiliki kinerja *aerodinamis* yang lebih baik karena beban angin dibandingkan dengan struktur primastik (Günel & Ilgin, 2014).

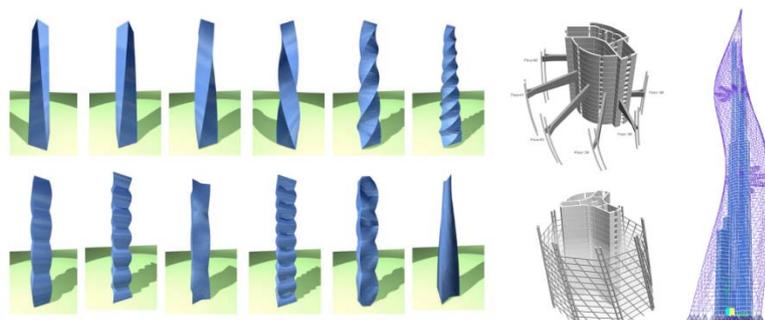
Bangunan tinggi yang memutar telah diteliti dan memiliki kinerja baik dalam hal *aerodinamis* atau respon terhadap angin. (Tanaka et al., 2013). Tren desain arsitektur kontemporer yang “*out-of-the-box*”, seperti bentuk *aerodinamis* dan memutar, yang secara langsung atau tidak langsung mempengaruhi kinerja struktural gedung-gedung tinggi. (M. M. Ali & Moon, 2007).

Bentuk memutar pada bangunan bertingkat tinggi dapat didefinisikan sebagai bentuk yang tercipta dari kombinasi fasad yang bengkok/memutar. Dengan kata lain, karena lantai bertambah banyak ke atas sepanjang sumbu, jika rotasi ditambahkan ke lantai, maka bentuk yang dihasilkan adalah angin puting beliung. Saat menerapkan rotasi konstan di sekitar sumbu vertikal, semua lantai akan identik dan fasadnya juga akan diulang. Vollers (2005) mengklasifikasikan bangunan dengan permukaan melintir atau memutar menjadi dua kelompok, yaitu *Tordos* dan *Twister* (Gambar 5).

Tordo adalah bangunan dengan satu atau lebih fasad yang memutar terhubung ke superstruktur ortogonal dan lantai pada dasarnya diulang dalam arah vertikal, dengan dinding bagian dalam dan kolom sejajar. Fasad *Tordo* yang memutar di satu atau lebih sisi menghasilkan ujung lantai yang tidak sejajar dengan kisi-kisi *orthogonal* bangunan. Semua elemen dalam arah tegak dan horizontal pada fasad *Tordo* yang bengkok berbeda. *Twister* sebagai bangunan dengan lantai yang terletak secara horisontal dan diputar mengelilingi



Gambar 3. Aliran Angin pada bidang horizontal
Sumber: Taranath, 2005



Gambar 4. Proses Desain dengan Parametrik Desain
Sumber: Kim & Shin, 2011

sumbu vertikal. Sumbu ini biasanya terletak di tengah denah. Anggota struktural, tiang tiang dan kontur semuanya melingkar secara heliks ke atas di sekitar sumbu rotasi, menghasilkan superstruktur non-*orthogonal*. Dalam *Twister* sederhana semua lantainya identik. Tipe 1 (*Tordo*) struktur yang dipelintir yaitu pusat dari sistem struktur dipasang di inti dan fasad atau lantai diputar. Tipe-2 (*Twister*) adalah sistem struktur luar berputar sedangkan inti dalam berputar tetap. (Voller, 2015 & Taskin, 2019)

Tordo adalah bangunan dengan satu atau lebih fasad yang memutar terhubung ke superstruktur ortogonal dan lantai pada dasarnya diulang dalam arah vertikal, dengan dinding bagian dalam dan kolom sejajar. Fasad *Tordo* yang memutar di satu atau lebih sisi menghasilkan ujung lantai yang tidak sejajar dengan kisi-kisi *orthogonal* bangunan. Semua elemen dalam arah tegak dan horizontal pada fasad *Tordo* yang bengkok berbeda. *Twister* sebagai bangunan dengan lantai yang terletak secara horisontal dan diputar mengelilingi sumbu vertikal. Sumbu ini biasanya terletak di tengah denah. Anggota struktural, tiang tiang dan kontur semuanya melingkar secara heliks ke atas di sekitar sumbu rotasi, menghasilkan superstruktur non-*orthogonal*. Dalam *Twister* sederhana semua lantainya identik. Tipe 1 (*Tordo*) struktur yang dipelintir yaitu pusat dari sistem struktur dipasang di inti dan fasad atau lantai diputar. Tipe-2 (*Twister*) adalah sistem struktur luar berputar sedangkan inti dalam berputar tetap. (Voller, 2015 & Taskin, 2019).

Tinjauan Struktur dan Keterpaduan Proses Desain

Studi yang cermat terhadap tren fitur arsitektur dan desain struktural gedung-gedung tinggi serta pendekatan terpadu yang mempertimbangkan berbagai persyaratan desain dapat menjadi metode yang efektif dalam merancang gedung-gedung tinggi generasi masa depan (Megahed & Ghoneim, 2020). Kemajuan teknologi digital menawarkan berbagai bentuk yang menawarkan berbagai manfaat dan perubahan desain gedung tinggi dengan bantuan desain parametrik yang fleksibel (Kim & Shin, 2011). Pentingnya pengaruh teknologi komputer dan TI terus mengubah praktik desain arsitektur dengan meningkatkan kompleksitas dan meningkatkan imajinasi kita mengenai bangunan-bangunan tinggi. Penggunaan teknologi BIM juga sangat menunjang efisiensi dalam hal tersebut. Meskipun Tantangan yang harus dihadapi untuk beradaptasi menggunakan BIM dalam dunia praktis antara lain skala proyek, teknologi hanya bisa diakses secara terbatas (Irvansyah dkk, 2022). Dengan memahami keterpaduan desain dengan pemahaman struktur yang kaya akan dapat menghasilkan desain yang terpadu serta menghasilkan efisiensi waktu dan biaya.



Gambar 4. Tipe (1) Tordo: Shanghai Tower, China, Tipe (2) Twister: Al Bidda Tower, Qatar
Sumber: (Sev & Tuğrul, 2014)

Avian Tower Surabaya Indonesia

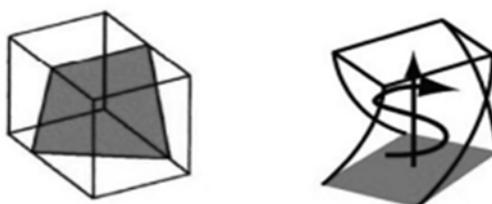
Jenis bangunan dengan sistem memutar atau memuntir atau *twist* adalah Avian Tower dibangun pada tahun 2014-2018 di Surabaya. Bangunan tinggi dengan jumlah lantai sebanyak 20 lantai terlihat pada Gambar 5 menggunakan sistem struktur *rigid frame* serta penggunaan dinding geser pada inti bangunan.

Layout dan Bentuk

Layout bangunan Avian Tower ini mempunyai bentuk keseluruhan berupa geometris oval pada denah tipikal serta podiumnya. Bangunan ini menerapkan prinsip *twister* pada bangunan memutar atau melintir yang *aerodinamis*. Pada Gambar 6 terlihat bangunan denah lantai 1 pada sisi kanan mengalami pelintiran atau perputaran sebesar 60 derajat dari lantai paling bawah tetap pada poros tengahnya dengan perputaran denah tiap lantai sebesar 3 derajat terlihat pada Gambar 7. Pelintiran ini pada sisi luar atau eksterior bangunan terlihat jelas pada fasad atau eksterior bangunan.

Sistem Struktur Bangunan

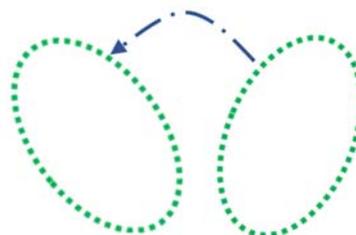
Secara umum, struktur pada gedung Avian Tower merupakan struktur yang dibagi 2 yaitu inti utama bangunan/ *core* dengan menggunakan dinding geser dan pola kolom yang meradial yang lurus dari bawah ke atas, serta pada bagian luar terdapat 4 kolom beton komposit yang ikut terpuntir mengikuti puntiran sebesar 60 derajat, lihat Gambar 8.



Gambar 5. Tordo (di sebelah kiri) dan Twister (di sebelah kanan)
Sumber: (Vollers, 2008)

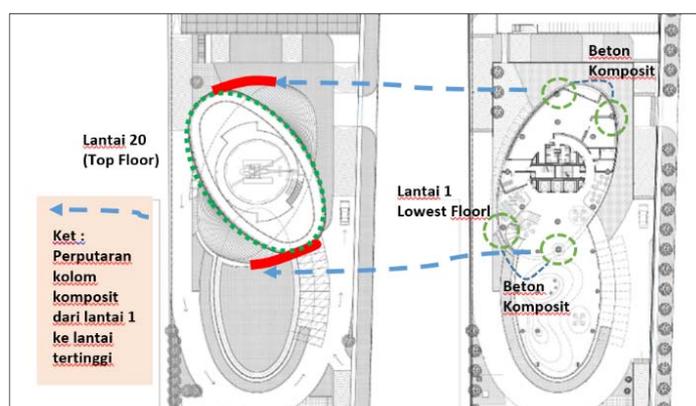


Gambar 5. Perspektif Avian Tower
Sumber: Constructionasiaplus.com



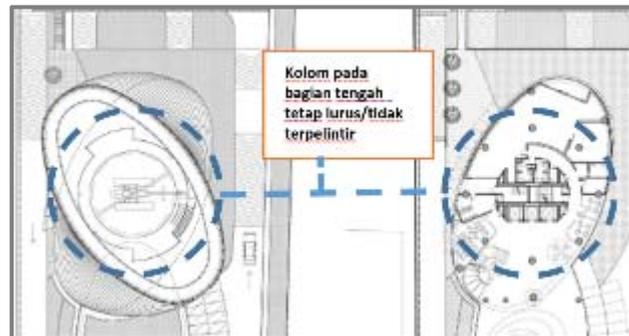
Gambar 6. *Layout* bangunan yang berputar sebesar 60 derajat
Sumber: Penulis, 2024

Pada Gambar 8 merupakan sistem struktur core yaitu kolom dengan kolom yang lurus tidak mengalami puntiran. Sehingga efisiensi tercapai dengan penggunaan kolom balok yang lurus atau tidak terpuntir, selain material lebih efisien. Perputaran atau puntiran struktur kolom komposit (baja dan beton terjadi pada 4 kolom yang terletak di luar formasi kolom yang lurus. Terlihat pada Gambar 4 merupakan area formasi kolom yang tetap lurus menerus. Sedangkan pada Gambar 9 terlihat penggunaan beton komposit yang mengalami puntiran mengikuti rotasi lantai yaitu sebesar 60 derajat. Penggunaan struktur yang seperti ini membuat efisiensi dalam penggunaan material khususnya penggunaan beton komposit yang tahan terhadap lentur, geser dan mempunyai kekakuan yang besar. Baja juga mempunyai karakter kekuatan tinggi, serta mempunyai kekakuan yang tinggi sehingga relatif aman terhadap gempa. Tanda merah pada Gambar 9 menunjukkan puntiran beton pada kolom kiri atas pada gambar tersebut.



Gambar 7. Kolom yang berputar/ melintir/twist dari lantai 1 ke lantai tertinggi. Garis merah menunjukkan pelintiran kolom komposit.

Sumber: Sketsa Grafis Penulis, 2024



Gambar 8. Kolom yang tetap lurus pada bagian tengah dengan pola susunan kolom yang melingkar.
Sumber: Sketsa Grafis Penulis, 2024

Struktur sebagai elemen non arsitektural dan struktur sebagai elemen arsitektural eksterior bangunan Avian Tower menunjukkan citra struktur yang tidak tampak dalam fasad bangunan. Hal ini senada dengan bangunan post modern dimana unsur struktur berusaha untuk disembunyikan. Sedangkan pada arsitektur klasik sering ditonjolkan pengaruh struktur secara jelas dalam bentuk dan desain bangunan. (Kim & Shin, 2011). Sehingga yang tampak adalah tampilan bangunan yang berputar seperti sedang menari *twist*. Struktur tidak tampak pada eksterior dengan penutupan finishing kaca menggunakan *double glazing low energy* dengan modul-modul kaca datar bukan kaca cembung atau cekung.

Al Bidda Tower Qatar

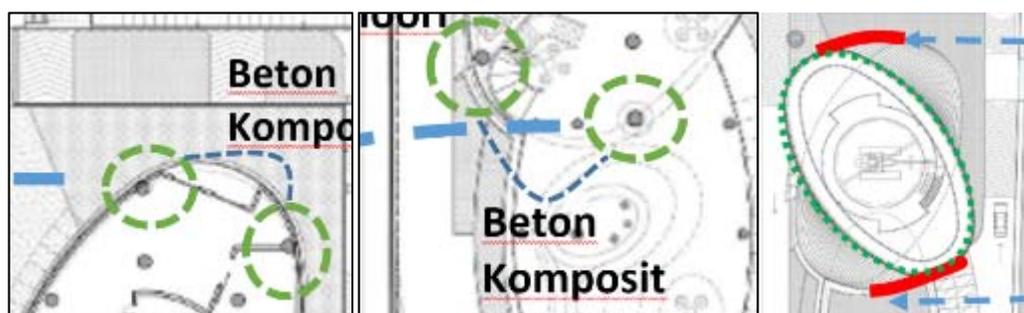
Bangunan Al Bidda Tower di Qatar ini merupakan bentuk bangunan *aerodinamis* dengan bentuk bangunan *twister*. Sama dengan Avian Tower yaitu bentuk bangunan dengan prinsip memutar. Melintir atau *twist* terjadi pada kolom-kolom diluar dan sedangkan kolom pada bangunan inti yang berbentuk melingkar tetap lurus. Secara umum penjelasan bangunan Al Bidda Tower ini sama dengan Avian Tower untuk prinsip sistem struktur bangunannya. Bangunan dibangun pada tahun 2006 dan selesai pada tahun 2009. Jumlah lantai pada bangunan berjumlah 43 lantai

Layout dan Bentuk

Layout dan bentuk dari bangunan menggunakan sistem *twist* atau *twister*, dengan denah bangunan yang tipikal atau sama persis kemudian dilakukan pemuntiran atau perputaran bentuk.

Sistem Struktur

Penggunaan sistem strukturnya sama persis dengan bangunan Avian Tower yaitu menggunakan sistem *core* dengan penggunaan kolom dengan pola radial pada bagian tengah bangunan dan



Gambar 9. Kolom yang melintir pada bangunan mengikuti denah bangunan.
Sumber: Sketsa Grafis Penulis, 2024

dinding geser di area inti. Untuk menunjang *twist* pada fasad maka digunakan sistem komposit beton dan baja di luar / fasad yang relatif tahan terhadap tekan dan tarik serta geser dari pergerakan bangunan pada struktur atasnya.

Bangunan Tinggi Aerodinamis dengan Sistem Tabung Diagrid

Diagrid dikenal sebagai struktur grid yang bagian eksterior bangunannya berbentuk diagonalisasi, hal ini sebagai salah satu pendekatan paling inovatif dan mudah beradaptasi dan berevolusi ke penggunaannya untuk gedung tinggi. Keuntungan dari sistem ini bahkan lebih besar daripada kerugiannya yang secara khusus kompleksitas dalam desain, konstruksi sambungan join dan biaya tinggi dari struktur. (Saputra & Tua Naibaho, 2019). Karena kolom miring, sistem struktur *diagrid* untuk gedung tinggi menghasilkan gaya aksial sepanjang arah kolom di bawah beban horisontal, yang memiliki keunggulan dalam menahan beban angin horisontal dan beban gempa serta memberikan kebebasan lebih pada desain arsitektur, sehingga sistem struktur *diagrid* untuk gedung tinggi menjadi gaya struktur baru yang efektif untuk gedung tinggi dan super tinggi. (Liu et al., 2018). Struktur tabung *diagrid* bertingkat tinggi banyak digunakan pada gedung bertingkat karena kekakuan lateralnya yang kuat dan susunan tata letak bidang yang fleksibel. (Liu & Ma, 2017). *Diagrid* dapat dibuat dari baja atau beton bertulang. Swiss Re Tower di London (2004), Guangzhou International Finance Center di Guangzhou (2010), Gedung O-14 di Dubai (2010), Capital Gate di Abu Dhabi (2011), Phare Tower di Paris (sedang dibangun), Aspire Tower di Doha (2007), Menara Aldar di Abu Dhabi (2010) dan Haluan di Calgary (2012), semuanya memiliki ketinggian *non-orthogonal* bangunan bertingkat yang didukung oleh sistem *diagrid*. (Sev, A., Eren, Ö., 2010).

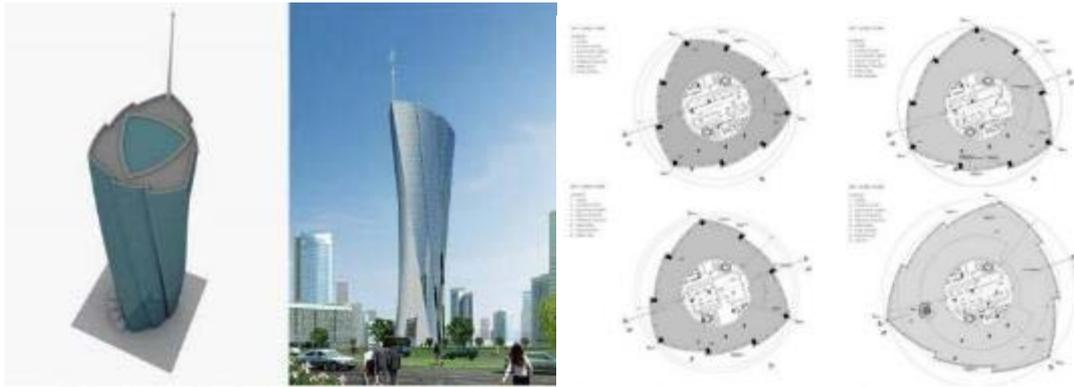
Pada bangunan menara Swiss Re Tower tersebut digunakan sistem *diagrid*, yang merupakan sistem yang sangat efisien untuk bangunan super tinggi, terutama dengan bentuk yang tidak *orthogonal* dan kompleks. *Diagrid* dapat dibuat dari baja atau beton bertulang. Sistem *diagrid* mempunyai potensi besar untuk menjadi menarik secara estetis selain efisiensi struktural. (Aminmansour & Moon, 2010).

Swiss Re Tower London

Bangunan Swiss Re Tower adalah bangunan menggunakan sistem tabung *diagrid* dengan jumlah lantai sebanyak 40 lantai. Desain bangunan menggunakan desain parametrik dengan detail yang dapat dihasilkan secara matematis.



Gambar 10. (1) Balok Beton komposit yang terdiri dari baja yang tertutup beton, (2) beton komposit yang mengikuti puntiran, (3) Balok baja ekspos/bukan komposit pada perbalokan yang ada di pola utama radial, (4) Kolom beton yang tetap lurus membentuk pola radial. Sumber: Sketsa Grafis Penulis, 2024



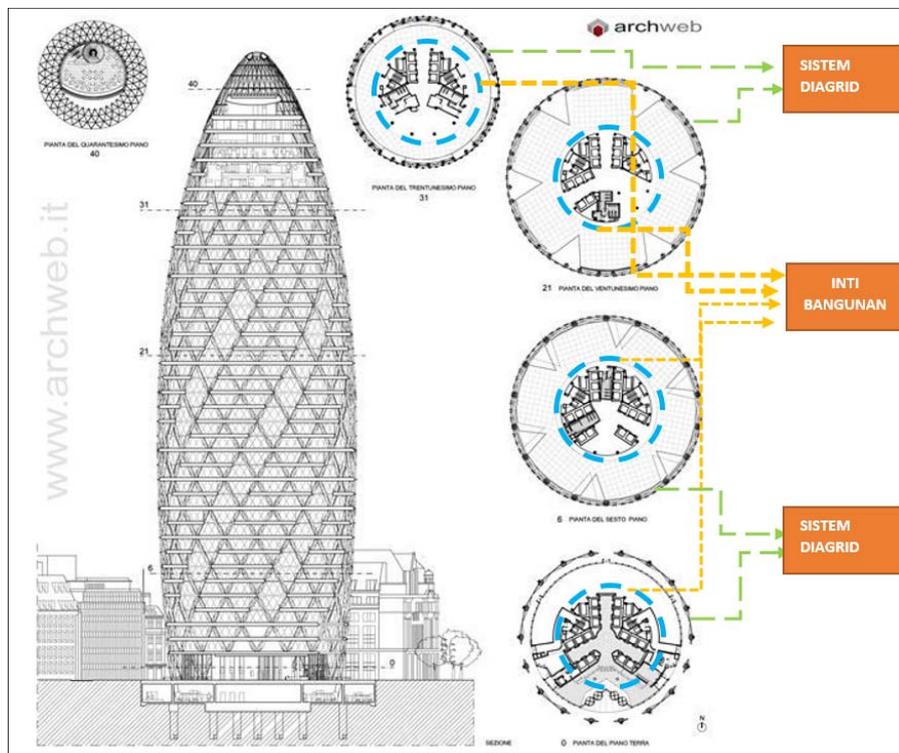
Gambar 11. Perspektif dan *Layout* Bangunan
 Sumber: Pinterest.com

Layout Bangunan

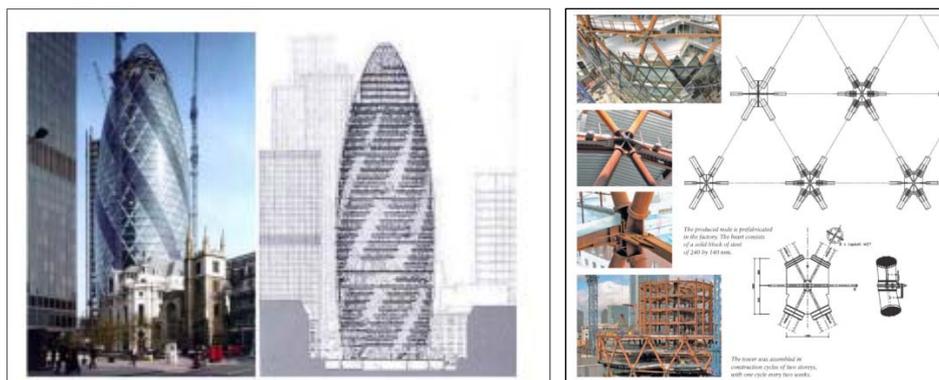
Layout atau denah bangunan dari lantai 1 ke lantai berikutnya atau secara dinamis mengikuti bentuk yang mirip peluru tersebut. Namun inti bangunan tetap bentuk dan besaran radialnya, ruangan yang mirip kantilever di luar inti bentuknya mengikuti bentuk keseluruhan bangunan.

Struktur Bangunan

Menggunakan struktur baja. Inti bangunan/ sistem *core* dengan susunan pola kolom yang radial dan susunan dinding geser didalamnya serta sistem *diagrid* di bagian luar bangunan untuk menunjang kantilever di luar dengan adanya kolom baja yang bersilangan berpotongan secara spiral lihat Gambar 12.



Gambar 12. Tampak dan Layour Swiss Re Tower.
 Sumber: www.archiweb.it

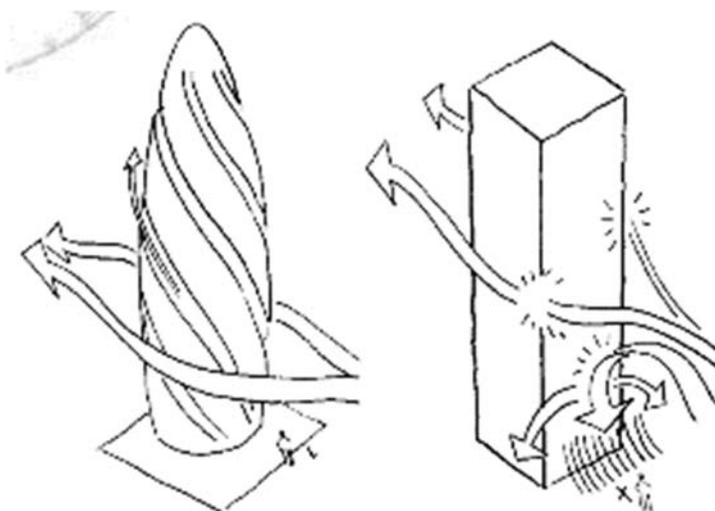


Gambar 13. Menara Swiss Reinsurance Headquarters 2004 London dan Diagrid System
Sumber: Sev, 2014 & Hyeong-II Kim, 2011

Diagrid berfungsi sebagai cangkang segitiga yang sangat kaku dan memberikan stabilitas yang baik untuk menara. Manfaat dari sarana *diagrid* ini bahwa inti tidak perlu menahan angin, beban pondasi juga berkurang dibandingkan dengan bangunan yang distabilkan oleh inti. Pada atas sendiri terdapat struktur kubah baja dengan diameter 30 m dan ketinggian 22m. Pekerjaan baja kubah adalah kisi-kisi yang dilas penuh dari profil segitiga secara fabrikasi yang berpotongan. Efisiensi penataan struktur ini menghasilkan elemen baja yang sangat minim hanya berukuran 110mm x 150mm, lihat Gambar 13.

Konsep Aerodinamis

Menara Swiss Re di London (Gambar 14) merupakan bentuk bangunan *aerodinamis* yang luar biasa dengan bentuk seperti peluru yang dimaksudkan untuk mengurangi gerakan bangunan. Sistem struktur bertugas untuk memberikan keseimbangan, stabilitas, kekuatan, kekakuan, keuletan, kenyamanan penghuni, dan kemampuan konstruksi yang diperlukan untuk menjamin struktur yang kokoh. Struktur juga harus dirancang hati-hati agar sesuai dengan antusiasme arsiteknya. (Sev & Tuğrul, 2014). Bentuk bangunan Swiss Re Tower *aerodinamis* merupakan bentuk yang dipengaruhi oleh lingkungan fisik bangunan.



Gambar 14. Angin yang lembut melalui bangunan merupakan pertimbangan yang penting.
Sumber: Dominic Munro, 2004

KESIMPULAN

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa analisa studi kasus pada bangunan tinggi *aerodinamis* dengan sistem *twist* dan *diagrid* menunjukkan persamaan pada penggunaan sistem *core* nya. Sistem *core* atau inti ini merupakan struktur utama bangunan yang cukup efisien sehingga tidak perlu menggunakan seluruhnya struktur komposit baja dan beton, atau dalam hal ini penggunaan beton bertulang dapat digunakan pada penggunaan struktur *core*nya saja. Sedangkan struktur *twist* atau melintirnya menggunakan struktur beton komposit dengan beton dan baja yang lebih mahal dari segi biaya. Dengan adanya kekakuan sistem *core* dan kekakuan sistem luar fasad struktur komposit maka pemutaran bentuk dapat dengan mudah dilakukan untuk menghadapi tekanan angin serta adanya fasad bangunan yang *smooth*. Sehingga keterpaduan desain dengan penggunaan kekakuan diluar dan didalam tidak perlu menjadi masalah yang berarti dengan adanya pemahaman sistem struktur ini. Sama halnya dengan *diagrid*, karena sistem ini lebih mahal dan untuk bangunan lebih tinggi maka *diagrid* ini menjadi cukup efektif untuk bangunan lebih dari 40 lantai. Dan sistem *core* atau inti didalamnya untuk menunjang lantai menjadi lebih ringan kinerjanya dalam menopang beban angin, karena sudah ditopang secara utama dengan kekakuan sistem *diagrid* nya. Penelitian ke depan diharapkan dapat menganalisa dan menyajikan lebih banyak studi kasus serta macam jenis sistem struktur untuk bangunan tinggi aerodinamis.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, M., & Armstrong, P. J. (2010). The role of systems integration in the design of sustainable skyscrapers. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 1(2). <https://doi.org/10.5390/SUSB.2010.1.2.095>
- Ali, M. M., & Moon, K. S. (2007). Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects. *Architectural Science Review*, 50(3), 205–223. <https://doi.org/10.3763/asre.2007.5027>
- Alkhatib, F., Kasim, N., Goh, W. I., Shafiq, N., Amran, M., Kotov, E. V., & Albaom, M. A. (2022). Computational Aerodynamic Optimization of Wind-Sensitive Irregular Tall Buildings. *Buildings*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/buildings12070939>
- Aminmansour, A., & Moon, K. S. (2010). Integrated Design and Construction of Tall Buildings. *Journal of Architectural Engineering*, 16(2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1076-0431\(2010\)16:2\(47\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1076-0431(2010)16:2(47))
- Aslı Yildiz, Güneş Mutlu Avinç, 2024. Nature Inspired Practices In Super Tall Building Designs: Similarities Of Form. Black Sea Journal of Engineering and Science.
- Bungale S Taranath, 2005. Wind and Earthquake Resistant Buildings: Structural Analysis and Design. CRC/Taylor & Francis.
- Dominic Munro, 2004. Swiss Re Building London.
- Günel, M. H., & Ilgin, H. E. (2014). Tall building: Structural systems and aerodynamic form. In *Tall Buildings: Structural Systems and Aerodynamic Form*. <https://doi.org/10.4324/9781315776521>
- Hou, F., & Jafari, M. (2020). Investigation approaches to quantify wind-induced load and response of tall buildings: A review. In *Sustainable Cities and Society* (Vol. 62). <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102376>
- Ilgin, H. E., & Gunel, M. H. (2007). The Role of Aerodynamic Modifications in the Form of Tall Buildings Against Wind Excitation. *Metu Jfa*, 2(24).
- Irvansyah, Muchlis, N., Krisdianto J., Suryawan WA. (2022). Analisis Kemampuan Siswa

- SMK Bangunan Jawa Timur Untuk Beradaptasi Pada Penerapan BIM. *Jurnal Border*, 4(2). <https://doi.org/10.33005/border.v4i2.122>
- Jafari, M., & Alipour, A. (2021). Review of approaches, opportunities, and future directions for improving aerodynamics of tall buildings with smart facades. *Sustainable Cities and Society*, 72. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102979>
- Kim, H. Il, & Shin, S. (2011). A study on innovation in technology and design variation for super tall buildings. In *Journal of Asian Architecture and Building Engineering* (Vol. 10, Issue 1, pp. 61–68). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.3130/jaabe.10.61>
- Liu, C., Li, Q., Lu, Z., & Wu, H. (2018). A review of the diagrid structural system for tall buildings. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 27(4). <https://doi.org/10.1002/tal.1445>
- Liu, C., & Ma, K. (2017). Calculation model of the lateral stiffness of high-rise diagrid tube structures based on the modular method. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 26(4). <https://doi.org/10.1002/tal.1333>
- Megahed, N. A., & Ghoneim, E. M. (2020). Antivirus-built environment: Lessons learned from Covid-19 pandemic. *Sustainable Cities and Society*. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102350>
- Rana, N., & Rana, S. (2014). Structural Forms Systems for Tall Building Structures. *International Journal of Civil Engineering*, 1(4), 33–36. <https://doi.org/10.14445/23488352/ijce-v1i4p106>
- Saputra, D. H. saputra, & Tua Naibaho, P. R. (2019). A Studi Sistem Struktur Baja Diagrid Pada Bangunan Tinggi. *Jurnal Infrastruktur*, 5(2). <https://doi.org/10.35814/infrastruktur.v5i2.758>
- Sev, A., Eren, Ö 2010. Diagrid structures as a sustainable strategy for tall buildings, Proceedings of International Sustainable Buildings Symposium, 26–28 May 2010, Ankara, 232–237.
- Sev, A., & Tuğrul, F. (2014). Integration of Architectural Design with Structural Form in Non-Orthogonal High-Rise Buildings. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, 7(2). <https://doi.org/10.5755/j01.sace.7.2.7046>
- Tanaka, H., Tamura, Y., Ohtake, K., Nakai, M., Chul Kim, Y., & Kumar Bandi, E. (2013). High-Rise Buildings Aerodynamic and Flow Characteristics of Tall Buildings with Various Unconventional Configurations. In *International Journal of High-Rise* (Vol. 2, Issue 3).
- Taşkın, G.N. (2019). A Comparative Study in Alternative Structural System Layouts of Twisted Tall Buildings, Master Thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University. <http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12623410/index.pdf>
- Vollers, K. J. 2005. High-rise buildings with twisted façades. CTBUH Proceedings of CTBUH (Council on Tall Buildings and Urban Habitat) 7 World Congress: Renewing the Urban Landscape, New York, 16–19 October. Available at: <http://technicalpapers.ctbuh.org> (accessed 01.MArch.2014).
- Vollers, K.J. (2015). High-rise buildings with twisted facades, 7th World Congress: Renewing the Urban Landscape, New York. <https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/1755-high-rise-buildings-with-twistedfacades.pdf>