

Sky City Convention & Theater: Menjawab Tantangan Urbanisasi Modern Dengan Enjinering Inovatif

Nick Alexander¹, Suryani Mettawana², dan Joe Alexander³

¹ Partner, Davy Sukamta & Partners

² Partner, Davy Sukamta & Partners

³ Structural Engineer, Davy Sukamta & Partners

Abstrak:

Melesatnya proses urbanisasi di Jakarta meningkatkan kebutuhan sarana pendukung, contohnya gedung konvensi dan teater. Proses globalisasi dan modernisasi gaya hidup dalam kota metropolitan tersebut semakin mendorong kebutuhan sarana pendukung yang berkelas internasional. *Sky City Convention & Theater* di Kemayoran merupakan salah satu proyek yang memfasilitasi proses urbanisasi modern tersebut.

Aspek perencanaan dan pelaksanaan yang kompleks dikombinasikan dengan batasan jangka waktu desain dan konstruksi yang singkat, membuat proyek tersebut menjadi suatu pengalaman unik yang menarik untuk dipaparkan. Gedung tersebut di-desain untuk dapat mengakomodir fungsi konvensi dan teater elegan dengan teknologi *state-of-the-art* berskala internasional. Tingginya ekspektasi fungsional bangunan mengharuskan adanya sistem struktur *long-span* dan *transfer* yang kompleks. Keterbatasan standar material dan industri konstruksi lokal menimbulkan tantangan besar dari aspek teknis yang hanya dapat direalisasikan menggunakan pemikiran inovatif dengan mempertimbangkan faktor ekonomi, *building code*, jenis material struktur, metode, dan kecepatan konstruksi. Selain itu, keseluruhan proses perencanaan dan konstruksi yang harus diselesaikan dalam waktu 28 bulan, hanya dapat dipenuhi dengan komitmen dan kompetensi secara profesional dari setiap anggota tim desain, khususnya perencana struktur.

Gedung 7 lantai tersebut, dirancang menggunakan Sistem Pemikul Rangka Momen Khusus (SPRMK) beton bertulang dengan sistem struktur lantai dari *frame* baja komposit. Khusus untuk mengakomodir bentang panjang dan sistem transfer, digunakan *truss* baja komposit dengan kisaran bentang antara 17 sampai 53 m. Perilaku material baja dinilai lebih unggul dalam mengatasi pengaruh *long-term* dari segi layan. Berbagai aspek perancangan, termasuk ketentuan peraturan gempa, *load path*, dan detail sambungan harus dikaji secara mendalam agar dapat menghasilkan suatu rancangan yang efisien dan aman. Dengan pertimbangan waktu dan efektifitas segi pelaksanaan, metode *heavy-lifting* dipakai untuk mengangkat *truss* baja yang sudah dirangkai di level *ground* sampai ke level lantai yang direncanakan.

Makalah ini memaparkan secara mendalam aspek desain dan konstruksi yang unik dalam proyek ini. Proyek ini memberikan contoh kasus bagaimana para pelaku bidang konstruksi di Indonesia dapat menjawab tantangan ke depan dengan komitmen, kompetensi, dan kreativitas.

Kata Kunci: *transfer system, long-span, complex structures, seismic load path, nonstructural components, convention, theater*

Sky City Convention & Theater: Menjawab Tantangan Urbanisasi Modern Dengan Enjinering Inovatif

Nick Alexander¹, Suryani Mettawana², dan Joe Alexander³

¹ Partner, Davy Sukamta & Partners

² Partner, Davy Sukamta & Partners

³ Structural Engineer, Davy Sukamta & Partners

Latar Belakang

Melesatnya proses urbanisasi di Jakarta meningkatkan kebutuhan sarana pendukung, contohnya gedung konvensi dan teater. Proses globalisasi dan modernisasi gaya hidup dalam kota metropolitan tersebut semakin mendorong kebutuhan sarana pendukung yang berkelas internasional. *Sky City Convention & Theater* di Kemayoran, Jakarta, merupakan salah satu proyek yang memfasilitasi proses urbanisasi modern tersebut. Gedung 7-lantai dengan luasan total sebesar 37,200 m² tersebut menyediakan kapasitas *theater seating* sebanyak 2,434 dan ballroom megah berukuran 36 m x 80 m secara denah.

Aspek perencanaan dan pelaksanaan yang kompleks dikombinasikan dengan batasan jangka waktu desain dan konstruksi yang singkat, membuat proyek tersebut menjadi suatu pengalaman unik yang menarik untuk dipaparkan. Gedung tersebut di-desain untuk dapat mengakomodir fungsi konvensi dan teater elegan dengan teknologi *state-of-the-art* berskala internasional. Tingginya ekspektasi fungsional bangunan mengharuskan adanya sistem struktur *long-span* dan *transfer* yang kompleks. Keterbatasan standar material dan industri konstruksi lokal menimbulkan tantangan besar dari aspek teknis yang hanya dapat direalisasikan menggunakan pemikiran inovatif dengan mempertimbangkan faktor ekonomi, *building code*, jenis material struktur, metode, dan kecepatan konstruksi. Selain itu, keseluruhan proses perencanaan dan konstruksi yang harus diselesaikan dalam waktu 28 bulan, hanya dapat dipenuhi dengan komitmen dan kompetensi secara profesional dari setiap anggota tim desain, khususnya perencana struktur.

Makalah ini mengupas berbagai aspek teknis dan nonteknis yang ditemui dalam proyek ini. Melalui contoh kasus proyek yang dipaparkan, makalah ini bertujuan mengajak para enjiner di Indonesia menjadikan tantangan fenomena urbanisme sebagai motivasi untuk pengembangan watak dan kompetensi secara profesional.

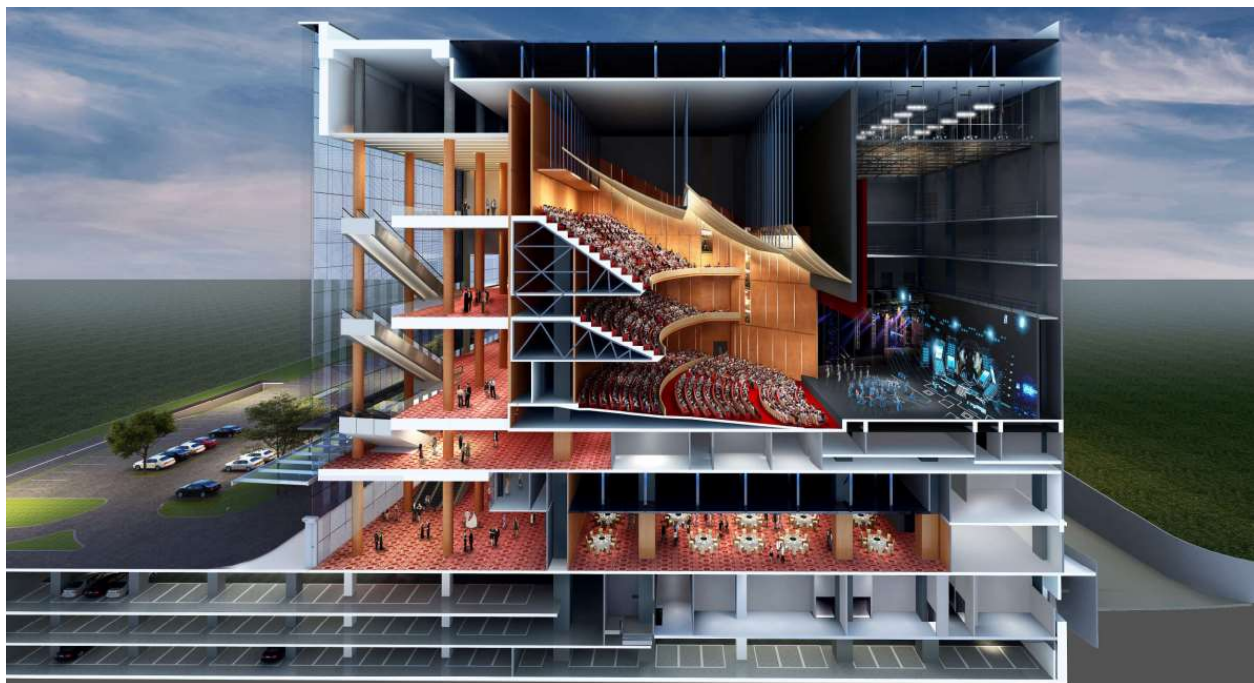
Deskripsi Geometri dan Fungsi Bangunan

Gedung 7-lantai tersebut, secara prinsip memiliki bentuk geometri kotak dengan *floor plate area* 88 m x 64 m dengan ketinggian 52 m di atas level jalan (Gambar 1). Gedung tersebut memiliki 1 lapis besmen sehingga dasar pelat gedung tertanam 6 m di bawah level permukaan jalan. Bangunan multi-fungsi tersebut di-desain untuk dapat mengakomodir banyak fungsi, termasuk fungsi konvensi, ballroom, dan teater. Berdasarkan pertimbangan operasional, berbagai fungsi ruang tersebut disusun secara bertingkat sebagai berikut: konvensi disisipkan pada level dasar, ballroom ditempatkan di level 3, teater diposisikan pada level 4, dan meeting room disusun berjejer pada level 5 dan 6 (Gambar 2). Fungsi ballroom dan teater membutuhkan tata ruang yang lapang tanpa adanya kolom-kolom interior dengan tinggi ruang bersih yang memadai.

Ketentuan tersebut mengakibatkan adanya bukaan-bukaan besar pada pelat lantai level 2, 4, 5 dan 6, yang mengharuskan adanya sistem transfer dengan bentangan struktural yang sangat panjang pada level 3. Ruang teater juga dilengkapi dengan komponen-komponen teater dan akustik yang sangat mutakhir untuk dapat memfasilitasi pertunjukan dengan efek memukau.



Gambar 1. *Rendering* arsitektural gedung Sky City



Gambar 2. Potongan arsitektural yang menunjukkan berbagai fungsi dalam gedung Sky City

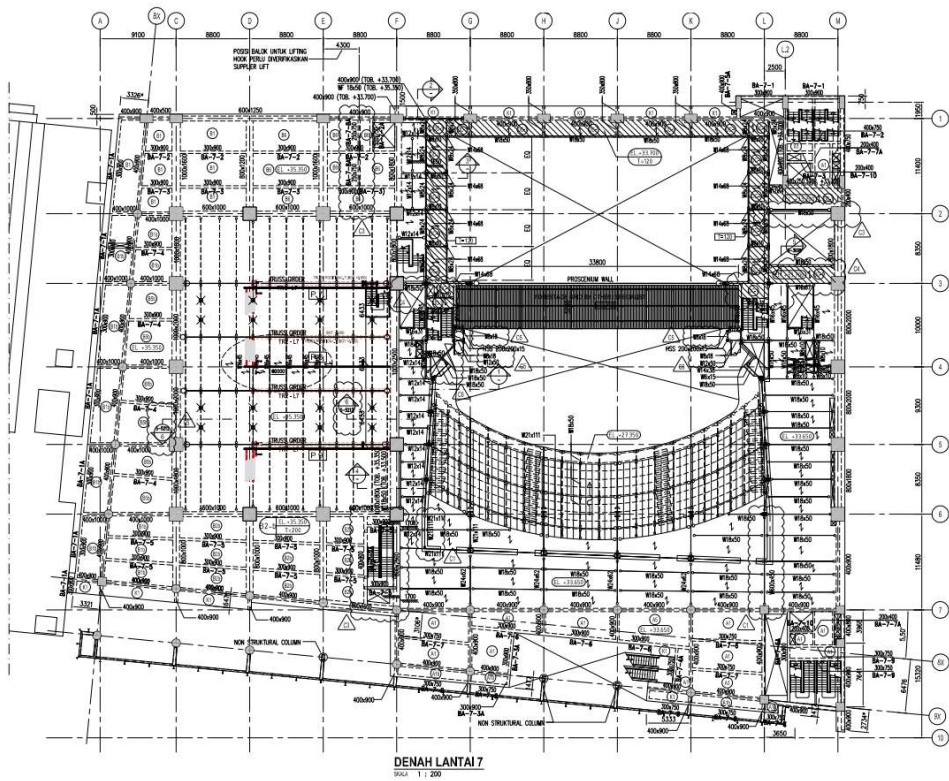
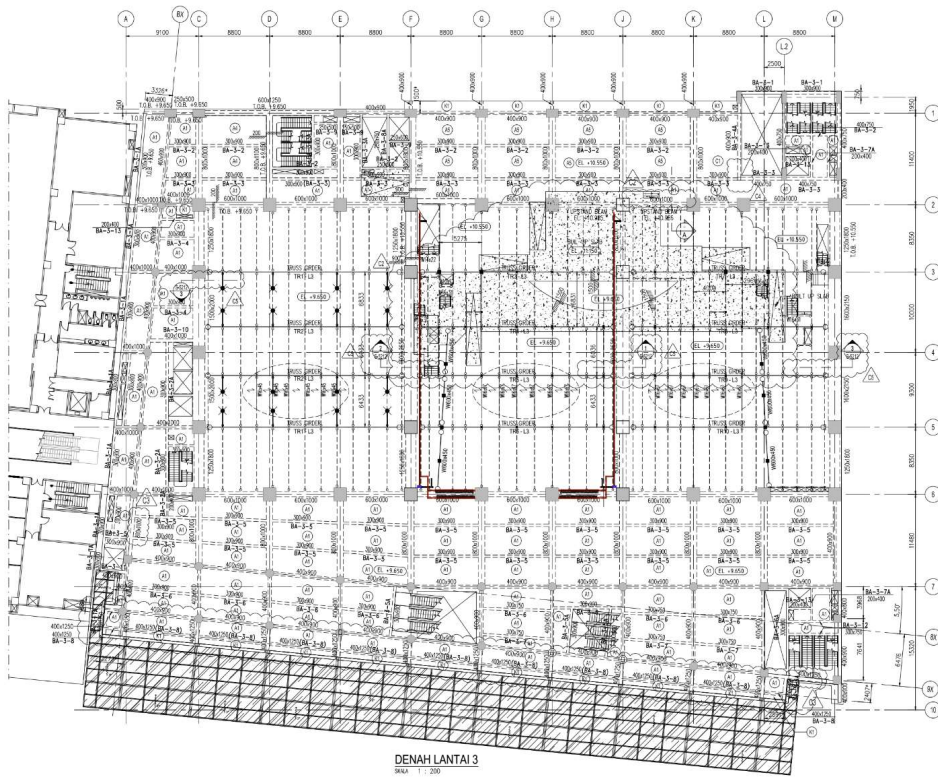
Berbagai Tantangan Perancangan

Tantangan utama perancangan gedung Sky City bersumber pada sistem struktur *long-span* dan *transfer* masif dan komplikasinya dengan berbagai aspek perancangan. Berbagai komponen teater dan akustik juga meningkatkan kompleksitas dari segi perancangan. Meskipun berkategori nonstruktural, namun komponen-komponen tersebut memiliki pengaruh sangat signifikan terhadap struktur utama. Tantangan juga muncul dengan adanya keterbatasan standar material, praktik, metode konstruksi lokal, dan batasan waktu 28 bulan untuk keseluruhan proses perencanaan dan konstruksi. Suatu pola pemikiran yang komprehensif dan inovatif dibutuhkan untuk dapat merealisasikan suatu rancangan yang efektif dan efisien dalam mengatasi berbagai tantangan di atas, dengan memperhatikan faktor ekonomi, *building code*, *load path*, jenis material struktur, metode, dan kecepatan konstruksi. Pendekatan desain yang hanya mengandalkan pengetahuan konvensional tentunya tidak akan dapat menghasilkan solusi engineering yang memadai. Dengan demikian, berbeda dengan proyek-proyek pada umumnya, solusi engineering dalam proyek unik semacam ini harus dicapai dengan fokus dan perhatian khusus yang pastinya menyerap lebih banyak waktu dan tenaga kreatif.

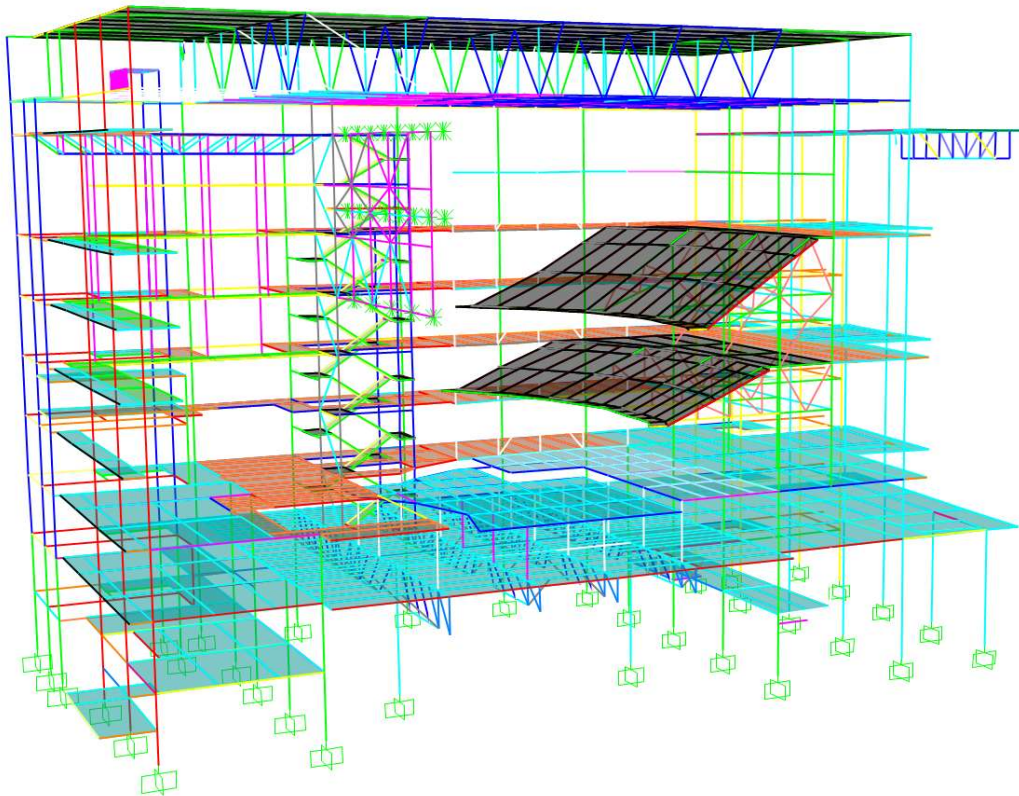
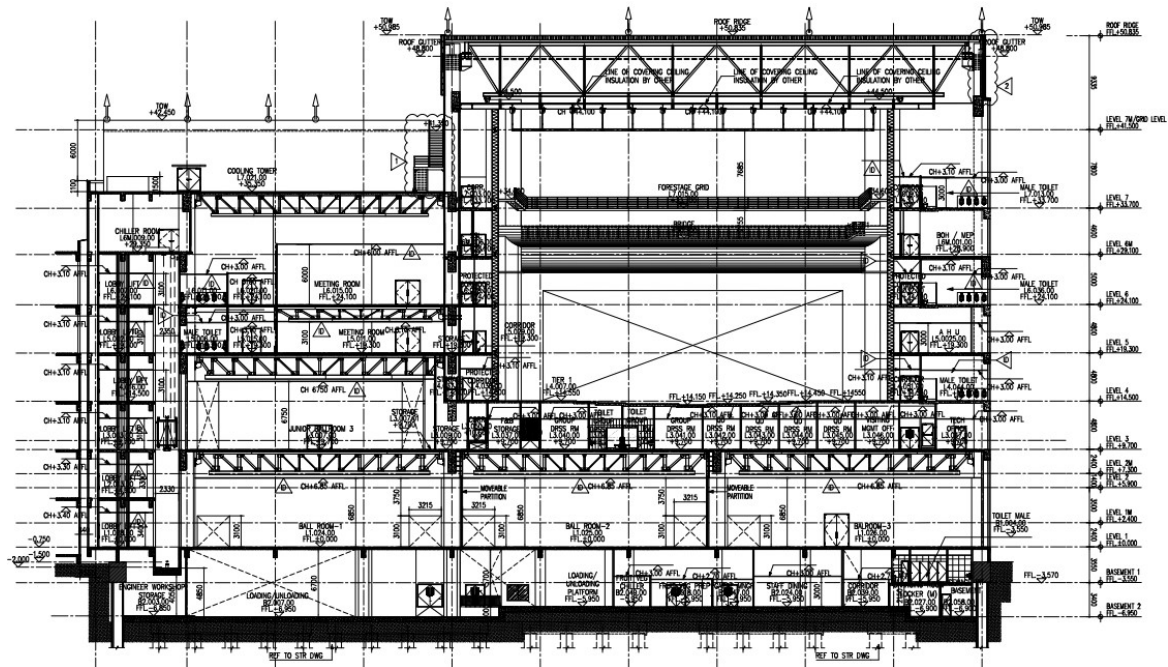
Sistem Struktur

Langkah awal yang perlu diambil dalam proses perancangan adalah menentukan jenis sistem dan material struktur yang akan digunakan. Keputusan ini perlu ditimbang secara matang karena akan mempengaruhi efisiensi dan efektivitas rancangan final yang dihasilkan. Dengan pertimbangan praktik konstruksi yang lazim digunakan di Indonesia, ketinggian gedung setinggi 7 lantai, dan persyaratan peraturan gempa SNI 1726: 2012, dipilih Sistem Pemikul Rangka Momen Khusus (SPRMK) beton bertulang sebagai sistem lateral struktur. SPRMK disediakan di sekeliling perimeter bangunan untuk menghasilkan layout struktur yang reguler dan memiliki ketahanan yang baik terhadap pengaruh torsi. Komposisi geometri SPRMK secara denah, diolah dengan strategis untuk dapat menghasilkan suatu sistem yang memenuhi ketentuan iregularitas dan redundansi yang tercantum dalam peraturan gempa baru SNI 1726: 2012 (Gambar 3). Dimensi balok yang menjadi bagian dari sistem rangka pemikul momen adalah sekitar 1000 mm x 2000 mm sementara dimensi kolom berkisar antara 1000 mm x 1000 mm sampai 1600 mm x 1600 mm. Proporsi penampang komponen struktur tersebut dipilih untuk memberikan kekakuan lateral yang memadai sehingga dapat membatasi deformasi struktur akibat pengaruh gempa.

Untuk sistem struktur lantai dengan bentangan panjang, dengan kisaran bentang antara 26 m sampai 53 m serta sistem transfer yang terjadi pada level 3, dipilih sistem *truss* baja (Gambar 4). Sistem tersebut dipilih berdasarkan pertimbangan kecepatan konstruksi dan keunggulan perilaku material baja dalam mengatasi pengaruh *long-term* pada deformasi struktural. Sistem struktur lantai pada area yang memiliki bentangan normal, yaitu jarak grid 9 m, mengandalkan kombinasi sistem pelat & balok beton bertulang konvensional dengan frame baja komposit. Frame baja komposit digunakan pada area tertentu, untuk mengakomodir kebutuhan detailing sambungan ke *truss* baja dan secara strategis mengurangi beban yang harus ditopang oleh sistem transfer tersebut.



Gambar 3. Denah struktur lantai 3 dan 7 yang menunjukkan layout struktural gedung Sky City



Gambar 4. Tampak potongan dan model analisis struktur 3D yang memberikan gambaran sistem struktur utama gedung Sky City

Komponen Teater dan Akustik

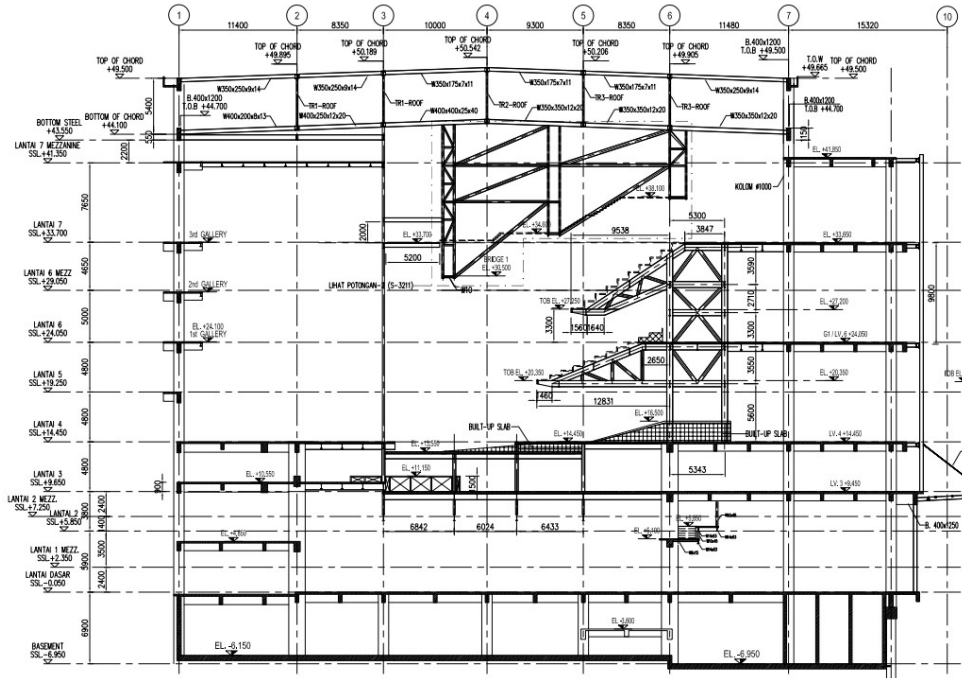
Salah satu kondisi unik yang berlaku dalam perancangan gedung Sky City, adalah kompleksitas komponen nonstruktural dan pengaruhnya yang sangat signifikan terhadap struktur utama. Komponen-komponen nonstruktural yang memiliki fungsi teater dan akustik tersebut mencakup *lighting bridge*; *proscenium wall* yang membingkai panggung teater; *flying gallery* yang berfungsi sebagai platform untuk memfasilitasi pertunjukan; *operable wall* yang dapat mengatur visibilitas tepi panggung; *curtain rigging system* untuk menurunkan dan menaikkan tirai teater; *3-tiered theater seating*; dan *acoustical panels* yang memiliki permukaan melengkung mengelilingi ruang teater dari sisi atas dan samping (Gambar 5).

Oleh karena berbagai komponen tersebut memiliki bobot yang cukup signifikan dengan titik berat yang eksentris terhadap bidang sistem struktur utama, diperlukan suatu evaluasi khusus yang mengkaji *load path* yang terjadi saat komponen tersebut mengalami eksitasi gempa dan juga implikasinya terhadap struktur penopang utama.

Sebagai salah satu contoh, selain pertimbangan stabilitas gravitasi untuk panel akustik yang menggantung dari struktur *truss* baja di level atap, pertimbangan stabilitas lateral komponen nonstruktural tersebut juga perlu dikaji, khususnya akibat pengaruh eksitasi gempa. Eksitasi gempa akan memicu gaya inersia lateral pada titik berat komponen panel akustik tersebut. Oleh karena posisi geometrisnya yang eksentris relatif terhadap bidang sistem struktur utama, perlu disediakan *load path* yang lengkap dari komponen tersebut sampai ke struktur penopang utama. Untuk panel akustik teater, *load path* tersebut diakomodir dengan menggunakan sistem 3D *bracing* baja (Gambar 6). Komponen-komponen 3D *bracing* baja dan sambungannya dirancang untuk menyalurkan gaya-gaya akibat pengaruh gempa. Secara global, gaya-gaya yang disalurkan melalui komponen 3D *bracing* tersebut akan menimbulkan reaksi vertikal, horizontal / geser, dan momen guling terhadap struktur penopang utama, yaitu *truss* baja pada level atap. Dengan demikian, *truss* baja tersebut, harus juga dirancang untuk mengakomodir gaya-gaya tambahan akibat gaya inersia dari komponen panel akustik.

Untuk perancangan, gaya inersia untuk komponen nonstruktural ditentukan menggunakan rumus yang tercantum dalam SNI 1726:2012 pasal 9.2.1. Secara prinsip, rumus tersebut merupakan fungsi dari percepatan lantai pada elevasi komponen yang ditinjau dan juga tingkat daktilitas dari sistem penopang komponen nonstruktural. Nilai percepatan lantai dapat dihitung mempertimbangkan nilai parameter respons percepatan terpetakan untuk perioda pendek, S_{DS} dan elevasi komponen. Faktor-faktor yang merepresentasikan daktilitas sistem penopang komponen nonstruktural dapat diambil dari tabel 18 dan 19 pada SNI 1726: 2012.

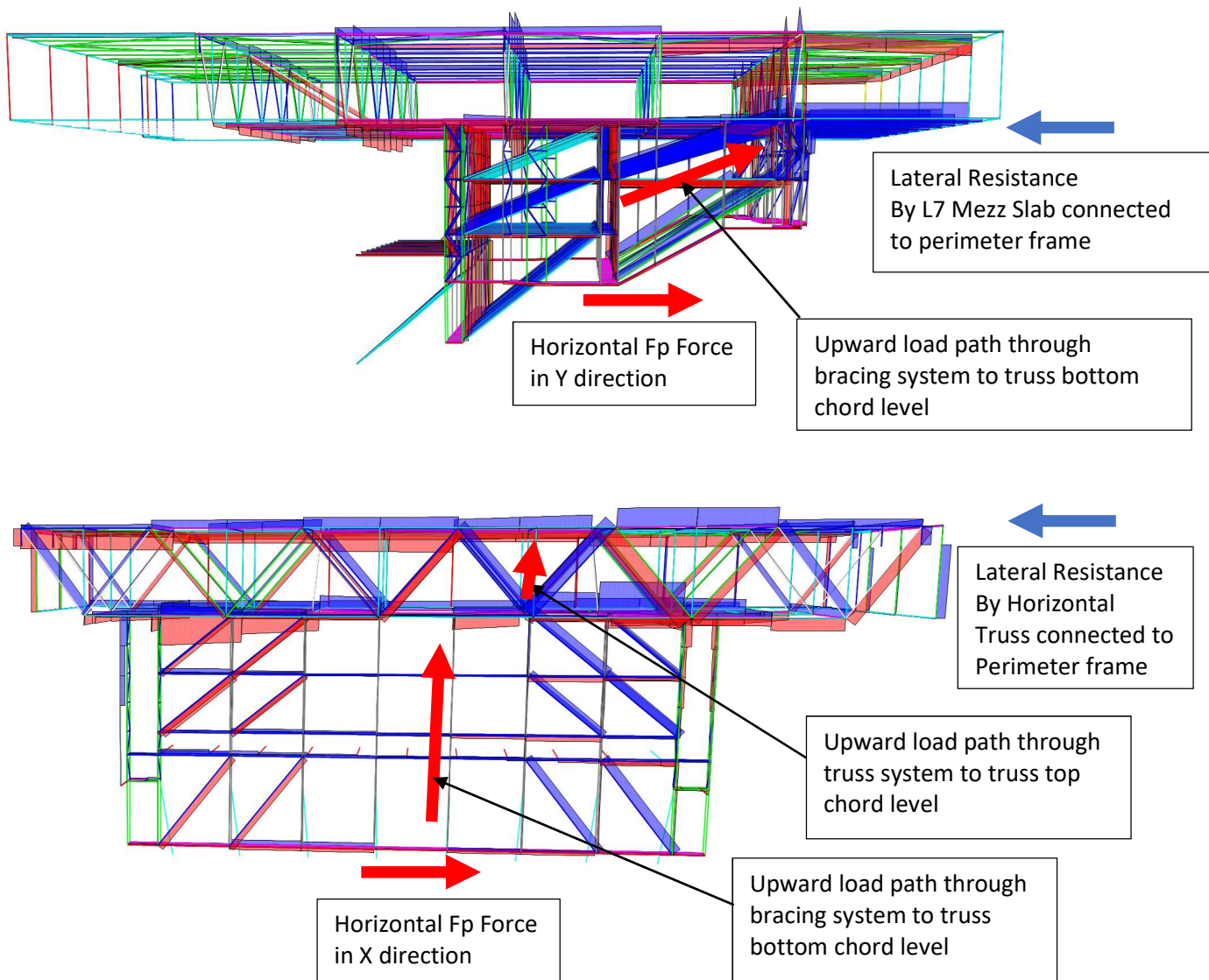
Kajian serupa dilakukan untuk setiap komponen nonstruktural, sehingga terbentuk rangkaian *load path* yang lengkap untuk semua komponen, yang terintegrasi secara menyeluruh dengan sistem struktur gedung.



Gambar 5. Potongan struktur yang menunjukkan komponen *acoustical panel* dan *3-tiered theater seating*

Complete Load Path

Pada proses perancangan pada umumnya, yang selalu menjadi perhatian utama adalah sistem penahan lateral utama. Sementara sistem struktur lantai yang berfungsi sebagai diafragma, jarang sekali ditinjau secara khusus. Padahal pada kenyataannya, sistem struktur diafragma memiliki peran yang signifikan terhadap perilaku struktural dari bangunan yang dirancang. Struktur diafragma berperan penting mengikat dan menghubungkan seluruh sistem struktur penahan lateral utama yang terdapat pada suatu bangunan. Oleh karena itu, kekakuan struktur dalam bidang diafragma memiliki pengaruh besar terhadap distribusi gaya lateral pada masing-masing sistem struktur penahan lateral utama. Tanpa adanya struktur diafragma yang memiliki kapasitas untuk menyalurkan dan mendistribusi gaya ke sistem penahan lateral utama sesuai asumsi desain, maka perancangan sistem penahan lateral tersebut menjadi tidak valid. Beberapa ketentuan dalam peraturan gempa yang baru, yaitu ketentuan diafragma dan iregularitas, berusaha menyoroti pentingnya peranan diafragma sebagai bagian dari sistem struktur keseluruhan sebagai sarana penyedia *load path* yang lengkap.



Gambar 6. Load path gempa arah Y dan X untuk komponen *acoustical panel* teater diakomodir dengan sistem bracing baja

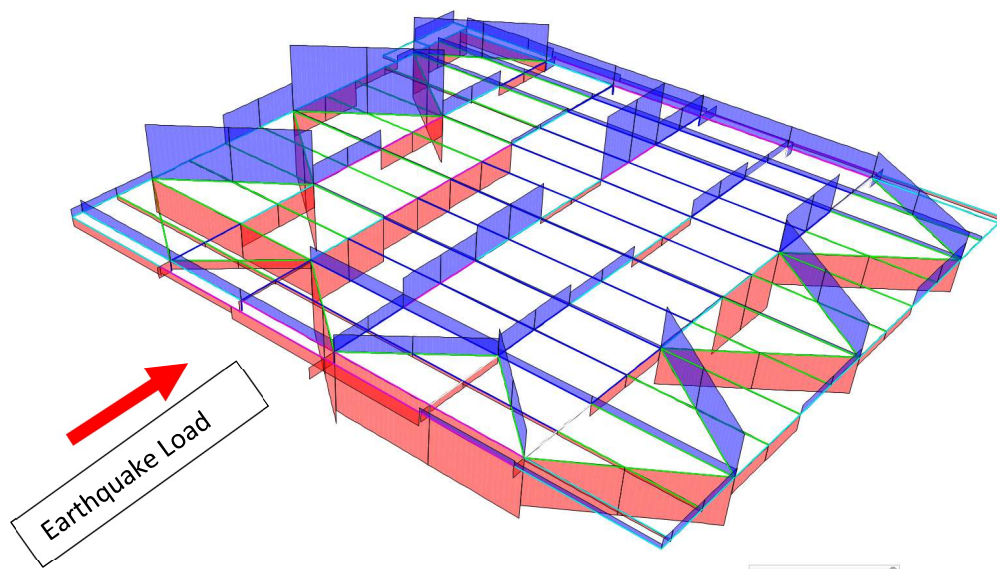
Pada level lantai gedung Sky City, sistem struktur pelat beton bertulang dikombinasikan dengan balok beton, balok baja, atau pun *truss* baja, berfungsi sebagai struktur diafragma. Komponen-komponen diafragma dapat diidentifikasi lebih mendalam menjadi pelat diafragma, komponen kord, dan komponen kolektor. Peninjauan kekuatan struktur diafragma mencakup pemeriksaan tegangan geser pada pelat diafragma dan gaya aksial tekan tarik pada komponen kord dan kolektor. Sambungan antara masing-masing komponen diafragma tersebut dan juga sambungan dengan sistem penahan lateral utama, juga dikaji satu persatu dan dirancang untuk

mengakomodir gaya diafragma yang terjadi. Mengacu pada NIST NEHRP *Seismic Design Technical Brief* no. 3 dan 5.

Pada level atap, disediakan suatu sistem *braced frame* baja yang membentuk “*truss* horisontal” dalam bidang atap gedung Sky City, yang juga berfungsi sebagai struktur diafragma untuk mengikat, menyalurkan, dan mendistribusikan gaya lateral ke sistem penahan lateral utama. Setiap komponen baja yang membentuk “*horizontal*” *truss* tersebut dengan semua sambungan yang terkait, dirancang untuk menahan gaya diafragma yang terjadi (Gambar 7).

Uraian di atas menggambarkan bahwa kunci dari perancangan bangunan yang tepat adalah memastikan tersedianya *load path* yang lengkap dengan mempertimbangkan gaya inersia dan gaya transfer mulai dari satu titik massa sampai ke sistem fundasi.

Sesuai pembahasan sebelumnya, *load path* untuk komponen-komponen teater dan akustik juga ditelusuri dan dikaji secara khusus. Struktur *braced frame* 3 dimensi disediakan dan dirancang untuk menjaga stabilitas lateral dan menyalurkan gaya lateral yang muncul akibat pengaruh gempa. Gaya lateral pada komponen nonstruktur tersebut menghasilkan reaksi vertikal, horizontal / geser, dan momen guling terhadap struktur utama bangunan yang tentunya dipertimbangkan saat melakukan perancangan. Sebagai contoh, struktur *truss* atap dirancang untuk menahan gaya-gaya inersia dan transfer yang muncul akibat pengaruh gempa pada komponen panel akustik yang menggantung di bawah struktur *truss* tersebut.



Gambar 7. Distribusi gaya dalam pada sistem *truss* horisontal, yang berfungsi menyediakan *load path* untuk beban inersia dan transfer pada level atap

Truss Baja

Sistem *truss* baja dipilih sebagai sistem yang tepat untuk mengakomodir bentang panjang dan sistem transfer pada gedung Sky City karena berbagai pertimbangan dari aspek perancangan dan pembangunan yang sudah diuraikan sebelumnya, yaitu atas dasar pertimbangan kecepatan konstruksi dan keunggulan perilaku material baja dalam mengatasi pengaruh *long-*

term pada deformasi struktural. Oleh karena sistem struktur bentang panjang tersebut dibutuhkan pada elevasi yang tinggi, dengan ketinggian maksimum 53 m di atas level jalan, penggunaan sistem alternatif seperti beton prategang dinilai tidak tepat untuk proyek Sky City berdasarkan pertimbangan kebutuhan *temporary propping* untuk formwork yang terlalu eksessif, yang tentunya akan sangat menghambat laju proses konstruksi.

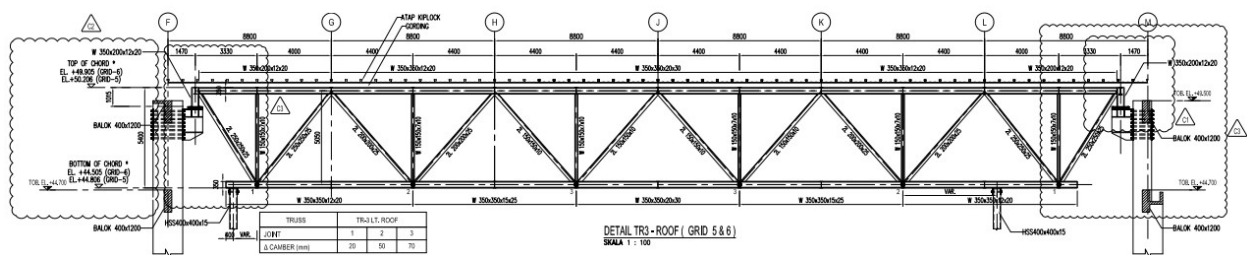
Bentangan *truss* baja pada gedung Sky City berkisar antara 26 m sampai 53 m dengan kedalaman *truss* antara 2.5 m sampai 5.5 m. Variasi beban dan bentangan struktur yang beragam, menghasilkan variasi bobot *truss* yang juga beragam dan berkisar antara 25 tonf sampai 43 tonf. *Truss* jenis "Pratt" yang terdiri dari *top chord* dan *bottom chord* parallel dengan *web member* vertikal dan diagonal (Gambar 8). Orientasi member diagonal dipilih agar member tersebut berperilaku sebagai komponen tarik untuk pembebanan gravitasi, sehingga dapat menghasilkan rancangan *truss* yang lebih optimal. Profil *Wide Flange* (WF) digunakan untuk komponen *top & bottom chord*, sementara profil *double angle*, *double channel*, dan *hollow square section* (HSS) dipakai untuk *web member* vertikal dan diagonal, yang dipilih berdasarkan basis optimasi dalam perancangan. Pemilihan jenis profil yang tepat untuk komponen-komponen *truss* tersebut juga dapat menghasilkan sambungan *truss joint* yang ekonomis, mudah dilaksanakan, dan lebih terjamin kualitas pengerjaannya. Dalam proyek Sky City, sambungan *joint* pada *truss* terdiri dari *gusset plate* dengan las jenis *fillet* pada kedua sisinya, yang disambung langsung ke komponen-komponen *truss* (Gambar 9). Perhatian khusus diberikan kepada komponen *web* vertikal yang merupakan komponen tekan dalam sistem *truss*, khususnya untuk *web member* vertikal yang menggunakan profil *double angle* dan *double channel*. Untuk komponen-komponen tersebut, kebutuhan *intermediate connector* sesuai ketentuan AISC dihitung dan diaplikasikan dalam pelaksanaan untuk memastikan perilaku tekuk *built-up* yang memadai dari profil *double angle* atau *double channel* tersebut. Selain itu, *lateral bracing* juga disediakan pada kedua ujung atas dan bawah komponen *web* vertikal yang berperilaku sebagai kolom. Pada ujung atas (bidang *top chord*), *lateral bracing* sudah disediakan dengan sendirinya oleh struktur lantai. Pada ujung bawah (bidang *bottom chord*), *lateral bracing* perlu ditambahkan dalam bentuk sistem *braced frame* mengikuti AISC 360-10 *appendix 6* yang membahas ketentuan *stability bracing* untuk komponen tekan.

Perancangan *truss* harus mempertimbangkan seluruh kondisi pembebanan, baik gravitasi maupun gempa. Sebagai bagian dari sistem transfer, reaksi vertikal yang timbul akibat pengaruh gravitasi dan gempa pada lantai transfer tentunya pengaruh signifikan pada desain *truss*. Sebagai bagian dari sistem diafragma, komponen-komponen *truss* dan juga sambungan *truss* dengan sistem struktur yang berkaitan, ditelusuri satu persatu dengan seksama untuk memastikan *load path* yang lengkap dapat terfasilitasi. Selain itu, struktur *truss* juga berperan sebagai tumpuan untuk komponen teater dan akustik yang sudah dibahas sebelumnya. Dengan demikian, *truss* juga dirancang untuk mengatasi reaksi vertikal, horizontal / geser, dan momen guling yang timbul dari pengaruh gravitasi dan gempa pada komponen-komponen nonstruktural tersebut.

Kriteria perancangan mengacu pada batasan kekuatan dan layan. Evaluasi kriteria kekuatan dilakukan dengan mengacu pada standar AISC 360-10, yang tentunya mencakup pemeriksaan seluruh komponen *truss* dan sambungannya. Sementara evaluasi kriteria layan mencakup pemeriksaan lendutan dan vibrasi lantai yang dinilai masih dapat memenuhi batas toleransi persepsi pengguna gedung. Batasan untuk lendutan mengikuti referensi *International Building Code* (IBC) sementara pemeriksaan vibrasi lantai mengikuti ketentuan AISC *Design Guide 11*.

Upward camber juga diterapkan sesuai kebutuhan pada struktur *truss* baja untuk dapat memitigasi lendutan yang eksekif akibat bentangan yang besar. Untuk memenuhi ketentuan ketahanan api, seluruh komponen *truss* dan sambungannya disemprot dengan fire-proofing tipe cement-based sprayed-vermiculite, yang memiliki nilai ekonomis dengan ketahanan api yang memadai, yaitu mencapai rating 2 jam.

Pertimbangan desain khusus untuk *truss* pada level atap. Oleh karena bentangan *truss* atap yang sangat panjang (mencapai 53 m), sambungan *pot-bearing* diterapkan pada salah satu ujung *truss* untuk mengakomodir pergerakan dan menghindari *build-up* tegangan aksial pada komponen-komponen *truss* yang disebabkan pengaruh thermal dan beban eksternal lainnya. Oleh karena bentangan yang begitu besar tersebut, pemeriksaan lendutan akibat *self-weight* dan pengaruh air hujan secara khusus diperhatikan agar dapat menghindari efek *ponding* yang dapat mengakibatkan kegagalan pada struktur *truss*.



Gambar 8. Potongan *truss* masif dengan bentangan 53 m pada level atap



Gambar 9. Foto sambungan-sambungan *truss* baja gedung Sky City

Aspek Konstruksi

Gedung Sky City tidak akan terealisasi tanpa pertimbangan aspek konstruksi dalam perancangan, yang secara khusus mengkaji metode perangkaian dan pemasangan komponen-komponen struktur truss baja yang begitu masif dan rumit dengan bentangan yang sangat besar. Selain itu, berbagai batasan segi pelaksanaan, termasuk waktu konstruksi yang sangat sempit dan kapasitas *tower crane* yang kurang memadai, semakin memenuhi daftar tantangan yang perlu diselesaikan. Untuk mengatasi tantangan tersebut, digunakan solusi inovatif yang memanfaatkan konsep modulasi dari elemen-elemen struktur yang dirangkai pada level ground dan diangkat mencapai elevasi final menggunakan metode *heavy-lifting*.

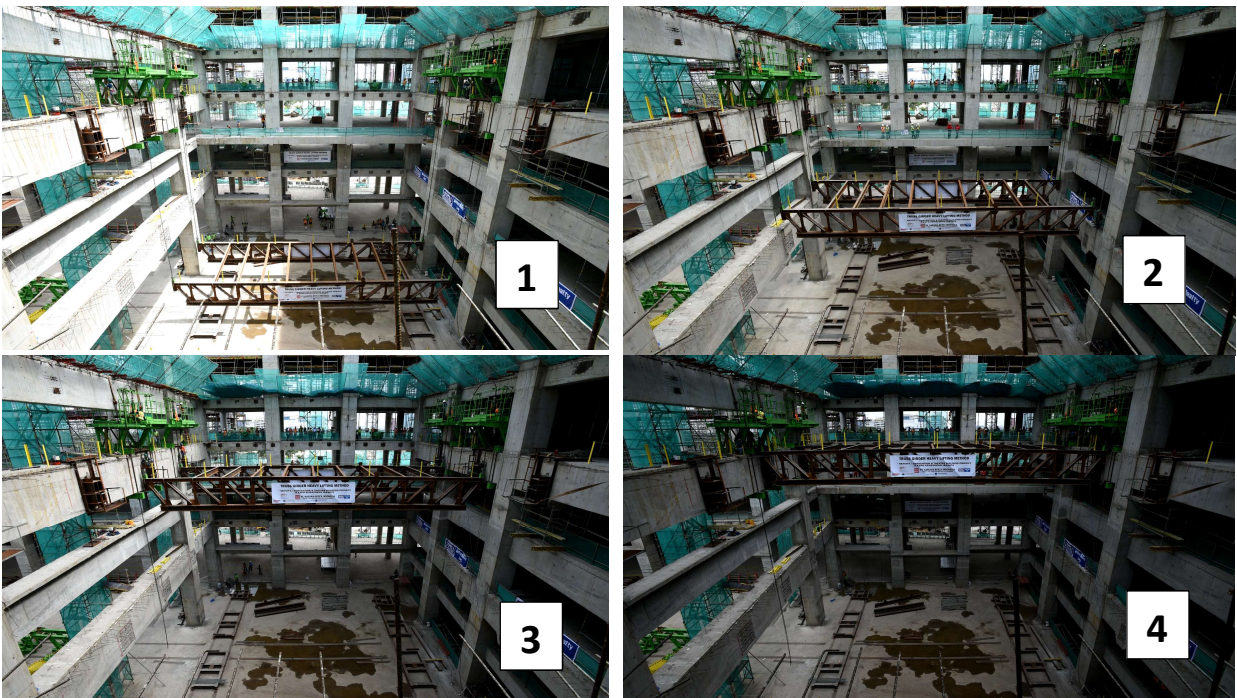
Secara sederhana, mekanisme *heavy-lifting* dapat diuraikan sebagai berikut. Untuk setiap proses *lifting*, dua buah pasang truss baja dirangkai menggunakan *cross-frame bracing* menjadi satu unit modul. Pengangkatan dua buah *truss* secara simultan tersebut, memberikan keuntungan besar karena dapat menyediakan stabilitas luar-bidang masing-masing *truss* selama proses *lifting* dan juga menghemat waktu konstruksi. Bobot satu rangkaian unit modul yang terberat, termasuk 2 *truss* baja dengan bentangan 53 m dan *cross-frame bracing* mencapai 140 tonf (Gambar 10). Empat buah *lifting jack* diposisikan pada keempat sudut jalur *lifting*, tepat di atas elevasi final *truss* baja. Masing-masing *lifting jack* memiliki kapasitas mencapai 35 tonf dan dilengkapi dengan gulungan *lifting cable* untuk mengangkat maupun menurunkan unit modul *truss* baja. *Lifting jack* tersebut diletakkan di atas sebuah *lifting frame*, yang harus diangkur ke suatu *temporary support* selama proses *lifting*. Melalui dialog antara tim perencana dengan tim kontraktor, diputuskan untuk memanfaatkan sistem struktur utama gedung Skycity, yaitu rangka pemikul momen beton bertulang pada perimeter bangunan, sebagai *temporary support* untuk *lifting frame*, yang dijepit ke balok perimeter menggunakan prestressing bar. Dengan demikian, struktur *perimeter frame* harus diselesaikan lebih dulu, sebelum adanya suatu sistem struktur lantai yang seharusnya dapat memberikan *support* lateral terhadap perimeter frame pada kondisi final. Sebelum proses *lifting* dilakukan, jalur *lifting* harus dipastikan steril dari benda apa pun yang dapat menginterupsi proses pengangkatan *truss*. Ketentuan ini mendikte tahapan pengangkatan *truss* yang harus dimulai dari *truss* pada elevasi tertinggi dan secara bertahap dilanjutkan dengan pengangkatan *truss* pada level-level lantai di bawahnya. Selain itu, ketentuan ini juga mengharuskan penarikan *lifting cable* dilakukan dari sisi balok perimeter, yang mengakibatkan kondisi pembebanan eksentris. Proses *lifting* dilakukan dengan seksama memanfaatkan *multi-point control*, yaitu dengan mengukur dan memonitor elevasi vertikal pada setiap titik *lifting*. Prosedur penting ini dapat memastikan terjadinya nilai reaksi yang konsisten dan seimbang pada keempat titik *lifting*. Saat unit modul *truss* sudah mencapai elevasi final, suatu mekanisme hidrolik tambahan diaktifkan untuk menggeser *lifting jack* secara horisontal dan meletakkan *truss* pada *corbel* yang sudah disediakan (Gambar 11). Pada gedung Sky City, proses *heavy-lifting* yang tertinggi mencapai ketinggian 53 m, yaitu untuk pengangkatan *truss* level atap.

Proses *lifting* tersebut akan mengakibatkan gaya-gaya tambahan pada balok dan kolom *perimeter frame* yang harus dipertimbangkan dalam perancangan. Gaya yang dimaksud termasuk gaya geser dan torsi tambahan pada balok *perimeter frame* serta gaya aksial dan momen pada kolom perimeter. Tanpa adanya *lateral support* dari struktur lantai selama proses *lifting*, kolom perimeter berperilaku sebagai struktur kantilever setinggi 53 m, yang harus dievaluasi dengan pertimbangan efek kelangsingan dan P-Delta (Gambar 12). Kolom perimeter

beton bertulang tersebut dievaluasi mengikuti peraturan SNI 2847: 2013, menggunakan analisis orde kedua untuk mempertimbangkan pengaruh kelangsingan pada komponen tekan.



Gambar 10. Foto *truss* baja yang sudah dirangkai di lapangan



Gambar 11. Foto *time-lapse* proses *heavy-lifting* *truss* baja level atap



Gambar 12. Perimeter *frame* dengan kondisi kolom kantilever sebelum proses *heavy-lifting truss*

Kesimpulan

Urbanisasi vertikal selalu berjalan serta merta dengan globalisasi dan modernisasi, yang akan meningkatkan ekspektasi dan tuntutan dalam setiap proyek. Artinya, proyek-proyek yang rumit dengan skala kesulitan yang tinggi akan semakin sering dijumpai dan mewarnai industri konstruksi di berbagai pusat kota di Indonesia. Fenomena ini tentunya memiliki dampak terhadap daya saing para enjiner di Indonesia dalam konteks ekonomi persaingan bebas dan menghadirkan suatu tantangan besar untuk para pelaku bidang konstruksi di Indonesia.

Uraian dalam makalah ini menunjukkan bagaimana kompleksitas dan tantangan yang muncul dalam proyek Sky city menuntut adanya pemahaman lebih mendalam mengenai load path, building code, dan perancangan inovatif menggunakan berbagai material struktur dengan memperhatikan keterbatasan praktik konstruksi lokal. Makalah ini juga menyoroti adanya keterkaitan yang erat antara proses perancangan struktur dengan perancangan disiplin lain dan juga dengan metode konstruksi. Oleh karena itu, untuk menjawab tantangan fenomena urbanisme secara tepat, upaya peningkatan kompetensi teknis harus berjalan paralel dengan pembentukan sikap proaktif dalam rangka membentuk interaksi yang produktif antara perencana struktur dengan pihak-pihak lain yang mempunyai peranan penting dalam proyek. Makalah ini mengajak para pelaku bidang konstruksi di Indonesia untuk mendorong pencapaian kedua upaya tersebut dengan komitmen, kompetensi, dan kreativitas, demi keamanan dan kesejahteraan bersama masyarakat modern di Indonesia.

Daftar Pustaka

AISC 360. (2010) *Specifications for Structural Steel Buildings* (AISC 360-10), American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.

ASCE 7. (2010) *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures* (ASCE/SEI 7-10), American Society of Civil Engineers, Reston, VA.

NIST-NEHRP. (2010) *Seismic Design of Cast-in-Place Concrete Diaphragms, Chords, and Collectors* (NIST-NEHRP) *National Institute of Standards and Technology and National Earthquake Hazards Reduction Program*, Gaithersburg, MD

NIST-NEHRP. (2011) *Seismic Design of Composite Steel Deck and Concrete-filled Diaphragms* (NIST-NEHRP) *National Institute of Standards and Technology and National Earthquake Hazards Reduction Program*, Gaithersburg, MD

SNI 03-1726. (2012) *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung* (SNI 03-1726:2012), Badan Standarisasi Nasional, Indonesia