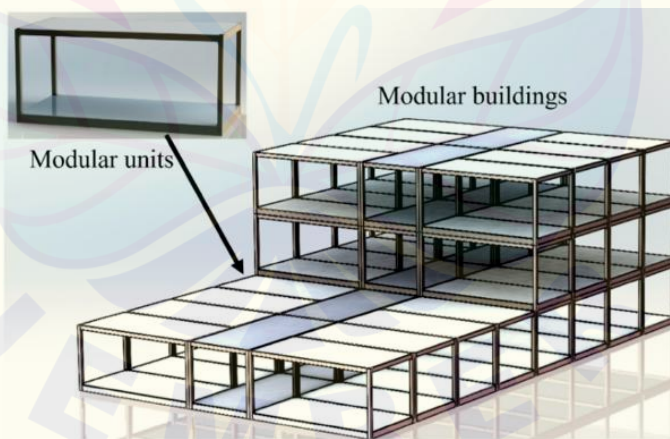


BAB 2 LANDASAN TEORI

2.1 Konstruksi Prefabrikasi Modular Box

Konstruksi modular prefabrikasi merupakan metode inovatif dalam industri bangunan yang melibatkan produksi komponen struktural di pabrik secara terintegrasi, kemudian dirakit di lokasi proyek menjadi struktur utuh. Metode ini memanfaatkan pendekatan *off-site fabrication* untuk memaksimalkan efisiensi waktu, biaya, limbah, serta tenaga kerja, dimana hal ini berbeda dengan konstruksi konvensional yang sangat mengandalkan proses *on-site*. Konstruksi modular box umumnya menggunakan satu atau beberapa jenis elemen fabrikasi (sistem hibrida), menurut jurnal Ginigaddara dkk., (2019) mengklasifikasikan elemen fabrikasi menjadi tiga kategori:

1. **Volumetrik:** Modul utuh (seperti *ModBox* atau *ModHouse*) diproduksi sebagai unit 3D lengkap dengan instalasi listrik dan plumbing.
2. **Panelized:** Komponen struktural (dinding, lantai, atap) diproduksi sebagai panel terpisah dan dirakit di lokasi.
3. **Hybrid:** Kombinasi antara modul utuh (3D) dan panel (2D), memungkinkan fleksibilitas desain yang lebih tinggi.



Gambar 2.1 Modular Buildings Box

Sumber: Ma dkk., (2021)

Secara sederhana modul-modul diproduksi secara utuh di pabrik lalu dibawa ke lokasi proyek untuk dipasang saja, menurut (Abdelmageed dkk., 2020) hal ini

menyebabkan MiC (*Modular Integrated Constructions*) dapat menghilangkan hampir 80% aktivitas di lokasi proyek, sehingga menghilangkan penundaan besar akibat manajemen sumber daya, masalah cuaca, biaya dan limbah.

Disamping itu, terdapat tantangan-tantangan dalam pengaplikasian konstruksi modular prefabrikasi diantaranya yaitu jumlah tenaga ahli yang masih sedikit, serta banyak kontraktor dan tenaga kerja lokal mungkin tidak berpengalaman dalam produksi serta pemasangan MiC karena konstruksi modular prefabrikasi ini masih sangat asing di dunia konstruksi Indonesia. Bahkan dalam jurnal yang diteliti oleh Tsz Wai dkk., (2023) menyebutkan bahwa tantangan ini juga terjadi di Hong Kong, China, saat mengerjakan proyek asrama mahasiswa di Wong Chuk Hang Site harus menggunakan jasa tenaga ahli dari negara asing karena tidak adanya tenaga ahli lokal yang memahami konstruksi bangunan modular prefabrikasi dari sisi perencanaan dan perakitan *on-site*. Beberapa tantangan lain disebutkan pada jurnal penelitian Ma dkk., (2021) bahwa perkembangan bangunan modular prefabrikasi bertingkat belum memiliki pedoman desain dan sistem sambungan yang terjamin.

2.2 Struktur Rangka Baja

2.2.1 Sifat Material Baja

Perilaku material baja secara umum terdiri dari daktilitas, daerah elastis, daerah leleh, dan daerah plastis. Pada daerah elastis, hubungan tegangan dan regangan bersifat linier dan material akan kembali ke bentuk semula setelah beban dilepas. Setelah mencapai tegangan leleh, baja akan mengalami deformasi plastis yang signifikan tanpa peningkatan tegangan yang besar. Karakteristik daktilitas inilah yang menjadikan baja sangat sesuai untuk struktur tahan gempa.

1. Daktilitas Baja

Daktilitas adalah kemampuan baja untuk mengalami deformasi plastis besar sebelum putus. Baja sebagai material struktur umumnya bersifat daktil, sehingga bisa menyerap energi besar dan menunjukkan deformasi jelas sebelum kegagalan yang sangat penting dalam desain tahan gempa dan rangka struktur untuk memberikan peringatan sebelum runtuh. Daktilitas memiliki beberapa parameter khusus yaitu, *Elongasi* (EL %): perubahan panjang relatif pada saat

putus dan *Reduction in Area* (RA %): perubahan area penampang. Jika nilai kedua ini tinggi maka daktilitas suatu rangka baja juga besar. Hal ini juga mengatur fungsi rangka baja untuk menjamin redistribusi tegangan antar elemen saat terjadi plastifikasi dan memberikan peringatan deformasi sebelum keruntuhan total terjadi.

2. Perilaku Elastis dan Plastis

Pada tahap awal pembebanan, baja berperilaku elastis, yaitu saat dimana tegangan dan regangan berbanding lurus. Hal ini dinyatakan oleh Hukum Hooke:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Dimana:

- σ = Tegangan (*stress*)
- ε = Regangan (*strain*)
- E = Modulus elastisitas

Perubahan bentuk bersifat sementara, kembali ke keadaan awal ketika beban dilepas. Setelah tegangan mencapai titik batas luluh (*yield strength*), baja mulai berubah bentuk secara permanen, yaitu perilaku plastis. Baja setelah mencapai batas elastisnya akan memperlihatkan regangan tanpa peningkatan tegangan proporsional.

3. Kurva Tegangan dan Regangan

Kurva tegangan–regangan sendiri perlu dibedakan menjadi engineering dan true. Pada engineering stress–strain, tegangan dan regangan dihitung dari dimensi awal spesimen:

$$\sigma_e = F/A_0 \text{ dan } \varepsilon_e = \Delta L/L_0.$$

Dimana,

- F = gaya tarik
- A_0 = luas penampang awal
- ΔL = perubahan panjang
- L_0 = panjang awal

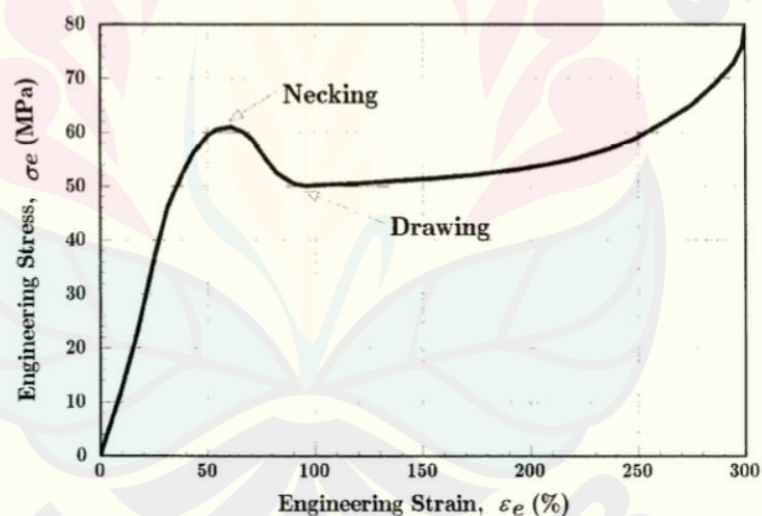
Sementara pada true stress–strain, tegangan memakai luas penampang sesaat dan regangan memakai definisi logaritmik:

$$\sigma_t = F/A \text{ dan } \varepsilon_t = \ln(L/L_0).$$

Dimana:

- F = gaya tarik
- A = luas penampang sesaat
- L = panjang saat ini
- L_0 = panjang awal

Sebelum terjadi *necking* (pengecilan lokal), konversi yang umum dipakai berbeda dengan setelah *necking*, konversi langsung dari data engineering menjadi true tidak lagi valid tanpa pendekatan tambahan (misalnya identifikasi kurva pasca-necking berbasis pengujian + analisis elemen hingga). Hal ini penting karena pemodelan numerik plastisitas dan fraktur baja untuk kebutuhan rekayasa (mis. simulasi kerusakan/retrofitting) membutuhkan representasi true stress–true strain yang akurat hingga regangan besar seperti yang disusun oleh (Roylance, 2026).



Gambar 2.2 Kurva Tegangan Regangan

Sumber: (Roylance, 2026)

2.2.2 Jenis-Jenis Profil Baja

1. Baja Canai Panas

Baja canai panas (*hot-rolled steel*) dibentuk pada temperatur tinggi (di atas temperatur rekristalisasi), lalu digulung menjadi profil seperti I/WF, H, kanal,

siku, plat. Karena dibentuk pada kondisi panas, pengaruh *cold work* relatif kecil, dan sifat material lebih “seragam” pada ketebalan penampang yang besar. Pendekatan desain struktur baja bangunan secara umum (LRFD/ASD) banyak mengacu pada (AISC, 2022) 360-22. Baja tipe ini memiliki elemen yang tebal, menyebabkan *buckling* lokal pelat biasanya lebih terkendali (tergantung kelangsingan elemen). Mode kegagalan umum: *yielding*, *buckling* global (tekuk kolom), lateral *torsional buckling* pada balok, kegagalan sambungan. Konstruktabilitas *hot-rolled steel* yaitu unggul pada elemen berat dan proyek bentang besar/industrial, serta lazim untuk sambungan *welded/bolted connection* kapasitas besar; detail sambungan sering menjadi bagian kritis yang dapat membantu daktilitas sistem gempa.

2. Baja Canai Dingin

Baja canai dingin (*cold-formed steel*) dibentuk pada temperatur ruang dari lembaran/strip/plat tipis melalui roll-forming atau press-brake. Proses ini menimbulkan *cold-work* yang meningkatkan tegangan luluh lokal (terutama di area sudut/tekukan) dan menghasilkan tegangan sisa serta kepekaan terhadap ketidaksempurnaan awal. Desainnya dirangkum dalam ANSI/SDI (AISI S100, 2024) (spesifikasi utama CFS di Amerika Utara) dan juga standar lain seperti AS/NZS 4600:2018. Baja tipe ini memiliki elemen tipis, sehingga sangat mempengaruhi kelangsingan elemen pelat demi memunculkan mode kegagalan *local buckling* (tekuk lokal sayap/web tipis), *distortional buckling* (distorsi bibir/tepi lipped channel), *global buckling* (tekuk kolom/tekuk lentur-torsi). Konstruktabilitas *cold-rolled steel* yaitu unggul pada produksi massal yang presisi untuk rangka ringan/panelisasi, serta lazim untuk *self-drilling screw*, bolt kecil, *rivet*, atau las tipis tertentu; kontrol sobek (*tear-out*), *bearing*, dan *lokal buckling* di sekitar sambungan lebih penting.

2.2.3 Hollow Structural Section (HSS) Steel

Hollow Structural Section (HSS) adalah profil baja struktural dengan penampang tertutup (berongga) yang memiliki berbagai macam bentuk, yaitu CHS (*Circular*), SHS (*Square*), dan RHS (*Rectangular*). Karena penampangnya tertutup,

HSS banyak dipakai sebagai kolom, batang rangka (*truss*), bracing, elemen arsitektural-ekspose, serta aplikasi yang memerlukan kekakuan torsi dan tampilan rapi. HSS dapat diproduksi melalui proses *formed-and-welded* dan tersedia dalam standar material tertentu. Untuk konteks Internasional, HSS paling umum mengacu pada ASTM A500 (umum). Struktur HSS memiliki beberapa keunggulan, di antara lain yaitu kekakuan torsi tinggi & stabilitas lateral baik, rasio kekuatan–berat yang baik, perhatian lebih pada detailing sambungan. Dalam jurnal (Elhadary dkk., 2025) menyebutkan tentang performa mekanik sambungan HSS dan teknik penguatan (*stiffener*, *concrete filling*, kombinasi), menjadikan HSS dengan material *hot-rolled* kombinasi yang cocok untuk modular box. Analisis awal (*pra-desain*) HSS, parameter geometri yang sering muncul yaitu luas penampang (A) untuk tarik/tekan (tegangan ijin/ sesuai standar), momen inersia (I) untuk lentur, dan rasio kelangsingan untuk menentukan apakah elemen tergolong “kompak/non-kompak/langsing” menurut kriteria standar.

ASTM SPECIFICATIONS FOR TUBES							
	HSS SPECS				NON-HSS SPECS		
	A500	A1065	A1085	A847	A252	A53	A513
Structural Specification	✓	✓	✓	✓	-	-	-
Mechanical Specification	-	-	-	-	-	✓	✓
Foundation Piles	-	-	-	-	✓	-	-
Reduced Design Thickness	✓	-	-	✓	✓	✓	-
Full Nominal Design Thickness	-	✓	✓	-	-	-	✓
Weathering Steel Available *	-	✓	-	✓	-	-	-

Gambar 2.3 Spesifikasi ASTM

Sumber: SteelTubeInstitute.org

2.2.4 Perilaku Kegagalan Struktur Baja

Perilaku kegagalan struktur baja adalah respons struktur ketika kapasitas elemen atau sistem struktur tidak lagi mampu menahan beban yang bekerja, sehingga terjadi keruntuhan sebagian atau keseluruhan. Kegagalan ini dapat terjadi akibat beban berlebih, ketidakstabilan, degradasi material, detail

sambungan yang tidak memadai, atau kombinasi beberapa faktor. Baja umumnya bersifat daktil, sehingga kegagalan struktur baja idealnya ditandai dengan deformasi plastis yang signifikan sebelum runtuh, memberikan peringatan dini dan peluang redistribusi gaya. Sedangkan untuk analisis sambungan, terdapat beberapa beban tambahan yang dapat di pertimbangkan untuk dianalisis antara lain yaitu:

1. Gaya Geser (*Shear Force*)

Gaya geser akibat beban terfaktor

V_u = gaya geser hasil kombinasi beban

Kapasitas geser nominal sambungan baut menurut SNI 1729:2020:

$$V_n = F_{nv} \cdot A_b \cdot n$$

Kapasitas Desain

$$\phi V_n \geq V_u$$

Keterangan:

- F_{nv} = Tegangan nominal geser baut
- A_b = Luas penampang baut
- n = Jumlah bidang geser
- ϕ = 0,75 (faktor reduksi sambungan baut)

2. Gaya Tarik (*Tension Force*)

Gaya tarik terfaktor

T_u = hasil analisis struktur

Kapasitas tarik nominal baut menurut SNI 1729:2020:

$$T_n = F_{nt} \cdot A_b$$

Kapasitas desain:

$$\phi T_n \geq T_u$$

Keterangan:

- F_{nt} = Tegangan Tarik nominal baut
- A_b = Luas penampang baut
- ϕ = 0,75 (faktor reduksi sambungan baut)

3. Gaya Tekan (*Compression Force*)

Untuk elemen tekan baja menurut SNI 1729:2020 Bab E (Elemen Tekan):

$$P_u \leq \phi P_n$$

Dengan:

$$P_n = F_y \cdot A_g$$

Keterangan:

- P_u = Gaya tekan terfaktor yang bekerja pada sambungan atau elemen tekan (N atau kN), diperoleh dari hasil analisis struktur
- P_n = Kapasitas tekan nominal elemen baja (N atau kN)
- F_y = Tegangan leleh baja (MPa), sesuai spesifikasi material baja struktural
- A_g = Luas penampang bruto elemen tekan (mm²)
- ϕ = Faktor reduksi kekuatan untuk elemen tekan baja, bernilai 0,90

4. Momen Lentur (*Bending Moment*)

Momen terjadi akibat eksentrisitas gaya atau beban lateral (gempa/angin), menurut SNI 1729:2020 Bab F (Elemen Lentur), Bab J (Sambungan).

$$M_u = V_u \cdot e$$

Dengan syarat kekuatan:

$$\phi M_n \geq M_u$$

Keterangan:

- M_u = Momen lentur terfaktor yang bekerja pada sambungan (kN·m)
- V_u = Gaya geser terfaktor yang bekerja pada sambungan (kN)
- e = Eksentrisitas gaya terhadap titik pusat garis netral (m)
- M_n = Kapasitas momen nominal sambungan (kN·m)
- ϕ = Faktor reduksi kekuatan untuk elemen tekan baja, bernilai 0,90

5. Gaya Torsi (*Torsional Force*)

Dengan Acuan SNI 1726:2019, Pasal 7 (Analisis Struktur Gedung terhadap Beban Gempa) dan SNI 1729:2020, Bab J (Sambungan)

$$T_u = V_u \cdot r$$

Keterangan:

- T_u = Momen torsi terfaktor yang bekerja pada sambungan (kN·m)

- V_u = Gaya geser terfaktor yang bekerja pada sambungan (kN)
- r = Eksentrisitas gaya terhadap titik pusat garis netral (m)

2.3 Jenis Sambungan Antar-Modular Baja

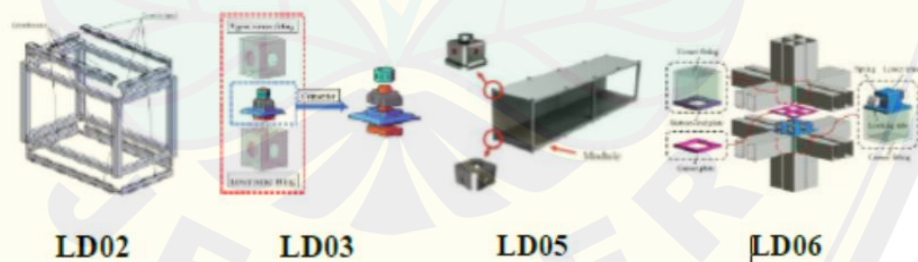
Dalam struktur baja, sambungan (*connections*) merupakan elemen yang menghubungkan anggota-anggota struktural seperti balok, kolom, dan rangka lainnya sehingga seluruh struktur dapat bertindak sebagai satu kesatuan yang mampu menahan beban. Sambungan bukan hanya menggabungkan anggota, tetapi juga menjadi jalur utama transmisi gaya internal (aksial, geser, momen) dan sangat memengaruhi kinerja keseluruhan sistem termasuk kekuatan, daktilitas, dan stabilitas struktur. Pengetahuan mengenai sambungan adalah bagian penting dalam desain struktur baja yang aman dan efisien.

2.3.1 Sambungan Berdasarkan Pengikat Utama

Pada penelitian lain oleh Daniel Tsavdaridis & Corfar., (2022) menyebutkan bahwa, secara umum sambungan antar-modular dikasifikasikan berdasarkan metode pengikat utama nya menjadi tiga, diantaranya yaitu:

1. Perangkat Pengunci (*Locking Devices*)

Sambungan ini menggunakan mekanisme yang digerakkan oleh alat/gaya gravitasi. Seperti; kunci putar, *interlocking grooves*, mur dan baut, *torque-activated pin device*, dan *self-locking spring-activated tabs*.



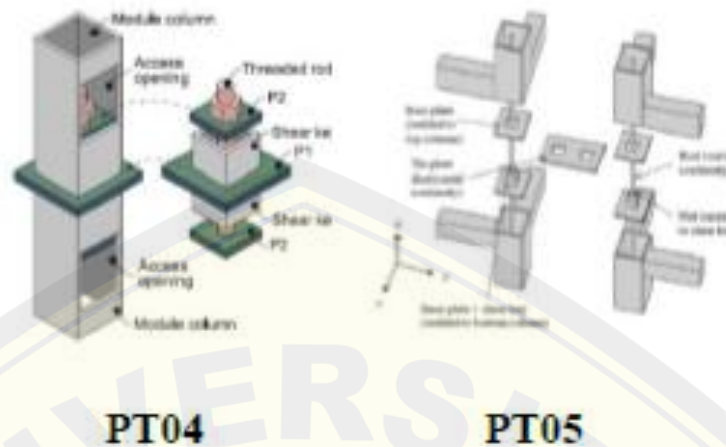
Gambar 2.4 Macam-macam Sambungan Kategori Locking Devices

Sumber: Daniel Tsavdaridis & Corfar., (2022)

2. Pasca-tegangan (*Post Tensioned*)

Sambungan ini terdiri dari batang baja yang dimasukkan pada bagian berongga sepanjang seluruh kolom. Dapat ditambahkan kopler atau mur ke pelat

penghubung agar transfer gaya geser meningkat. Seperti; Rods SHS coloumns, *Rods coupled through shear keys*.



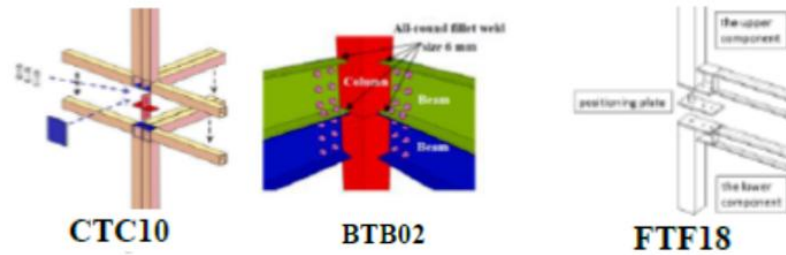
PT04 **PT05**
Gambar 2.5 Macam-macam Sambungan Kategori Post Tensioned

Sumber: Daniel Tsavdaridis & Corfar., (2022)

3. Sambungan Baut (*Bolted*)

Sambungan ini merupakan jenis yang paling beragam karena menggunakan komponen baja yang mudah diproduksi, seperti sambungan sudut, pelat, baut, sekrup, mur, ring, dan komponen lain seperti pin, tenon, soket, spigot. Berdasarkan lokasi, sambungan baut ini pun terbagi menjadi tiga, yaitu:

- a) Sambungan antar kolom: Merupakan sambungan sambatan klasik pada bagian tubular, dengan pelat yang dilas ke ujung yang berongga dan dijepit dengan baut.
- b) Sambungan antar balok: Sambungan ini berada diantara balok lantai dan langit-langit, digunakan untuk menutup ruang celah antara tiap lantai dan langit-langit.
- c) Sambungan antar sudut: Sambungan ini mengikat antar modul bagian tepi sudut.

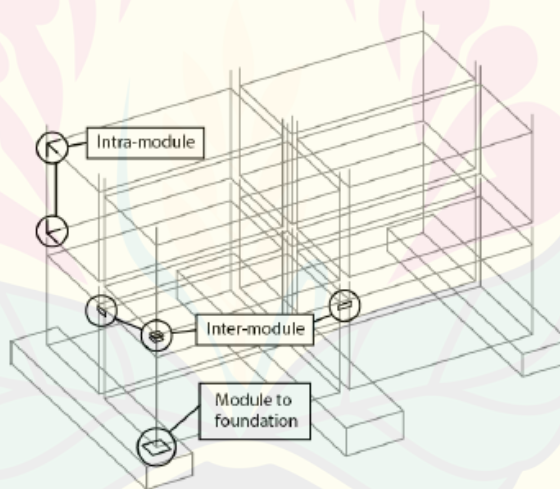


Gambar 2.6 Macam-macam Sambungan Kategori Bolted

Sumber: Daniel Tsavdaridis & Corfar., (2022)

2.3.2 Sambungan Berdasarkan Perletakkannya

Di samping itu, terdapat klasifikasi jenis sambungan berdasarkan perletakkannya. Dalam penelitian terkait sambungan oleh Deng dkk., (2017) menyebutkan bahwa sambungan dikelompokkan menjadi tiga jenis: a) antar-modul, b) intra-modul, c) modul ke pondasi.



Gambar 2.7 Perletakkan Sambungan Antar-Modular

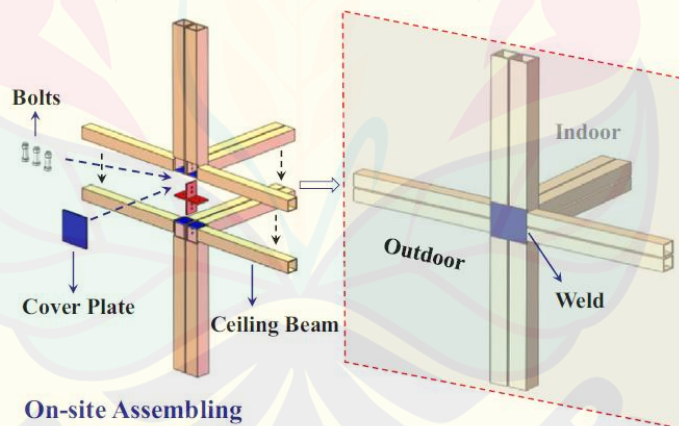
Sumber: Daniel Tsavdaridis & Corfar., (2022)

Setiap perletakkan juga memiliki sub-tipe masing-masing, yang paling umum digunakan adalah las, baut, dan pelat. Tiap masing masing sub-tipe perletakkan memiliki kekurangan dan kelebihan masing-masing, seperti contohnya tipe inter-modul dengan sub tipe baut memiliki kelebihan dapat di bongkar pasang dengan lebih mudah daripada las, namun memiliki kekurangan

yaitu akses perawatan yang sulit karena terletak didalam antar modul. Dengan ini juga dapat diartikan bahwa sambungan menurut perletakkannya juga dibagi menjadi tiga, diantara nya yaitu: a) Sambungan tunggal, b) Sambungan Ganda, dan c) Sambungan Kuartet.

2.4 Inovasi Sambungan Modular (*Innovative Cruciform Bolted*)

Sambungan merupakan elemen kunci dalam sistem bangunan modular baja karena menentukan jalur transfer gaya antar modul serta kinerja struktur secara keseluruhan, khususnya terhadap beban gempa. Sambungan konvensional pada bangunan modular umumnya bersifat sendi dan tidak mampu menahan momen lentur, sehingga membatasi penerapan bangunan modular pada wilayah non-seismik. Sebagai upaya mengatasi keterbatasan tersebut, E. F. Deng dkk., (2018) mengusulkan sambungan *innovative cruciform bolted module-to-module* yang dirancang khusus untuk bangunan modular baja. Sambungan ini memanfaatkan hollow structural section (HSS) pada kolom dan balok, yang dikenal memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi serta perilaku seismik yang baik.



Gambar 2.8 Sambungan Cruciform Bolted

Sumber: E. F. Deng dkk., (2018)

Sambungan ini menggunakan pelat gusset berbentuk salib yang dihubungkan dengan baut mutu tinggi serta dilengkapi pelat penutup las. Konfigurasi tersebut memungkinkan perakitan sambungan dilakukan dari luar modul, sehingga tidak mengganggu finishing interior yang telah diselesaikan di pabrik.

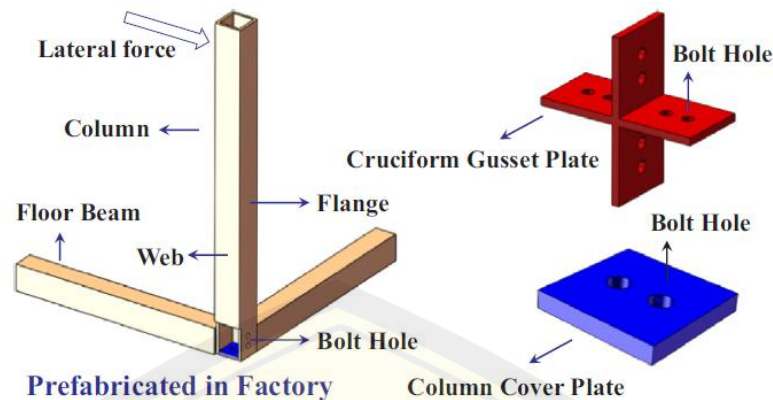
2.4.1 Konfigurasi Sambungan

Berdasarkan pada jurnal E. F. Deng dkk., (2018), beberapa komponen utama dalam modular box baja dengan sambungan *cruciform bolted*, terdiri dari:

1. Kolom Modular (*HSS Column*)
2. Balok Lantai dan Balok Langit-langit (*Twin Beams*)
3. Pelat Buhul Berbentuk Salib (*Cruciform Gusset Plate*)
4. Pelat Penutup Kolom (*Column Cover Plate*)
5. Baut Mutu Tinggi (A325)

2.4.2 Alur Instalasi

1. Tahap prefabrikasi di pabrik, antaranya meliputi:
 - 1) Pemotongan sebagian web kolom luar untuk menyediakan ruang pemasangan sambungan.
 - 2) Pengelasan pelat penutup kolom pada bagian bawah kolom modul.
 - 3) Pengeboran lubang baut pada pelat penutup kolom dan flange kolom luar.
 - 4) Fabrikasi pelat buhul berbentuk salib dengan pola lubang baut yang sesuai.
 - 5) Pengelasan balok lantai dan balok langit-langit ke kolom.
2. Tahap perakitan di lapangan dilakukan dengan urutan sebagai berikut:
 - 1) Pelat buhul berbentuk salib dimasukkan ke celah di antara modul-modul bawah.
 - 2) Modul atas diangkat menggunakan crane dan ditempatkan di atas modul bawah.
 - 3) Modul-modul dihubungkan dengan memasang baut mutu tinggi dari bagian luar bangunan.
 - 4) Setelah baut terpasang dan dikencangkan, pelat penutup tambahan dilas untuk menutup kembali bagian kolom yang sebelumnya dipotong.



Gambar 2.9 Konfigurasi Innovative Cruciform Bolted

Sumber: E. F. Deng dkk., (2018)

Dengan demikian, inovasi sambungan *cruciform* berpengaku yang dikembangkan oleh E. Deng dkk.,(2018b). memberikan kontribusi penting dalam pengembangan *novel connection* pada bangunan modular, khususnya dalam meningkatkan ketahanan lateral, kapasitas momen, kekakuan rotasi, daktilitas, dan keandalan struktur di daerah rawan gempa. Konsep ini relevan sebagai rujukan utama dalam pengembangan sambungan inovatif pada bangunan modular box di Indonesia, dan hal yang menjadi faktor kunci model ini terletak pada komponen penampang yang dirakit menjadi satu. Dari penelitian Ma dkk., (2021) disebutkan bahwa kombinasi komponen ini meningkatkan sifat mekanis sambungan dan mengalami defromasi lebih sedikit dibawah gaya tekanan, dengan mempertimbangkan kesalahan konstruksi yang diizinkan dari deformasi sebelum menyebabkan “*slip*” pada kurva momen rotasi.

2.5 Gaya dan Perilaku yang Terjadi

2.5.1 Beban Aksial pada Kolom

Kolom umumnya menerima beban aksial tekan yang berasal dari kombinasi beban mati, beban hidup, serta beban tambahan dari elemen struktural lainnya. Kinerja kolom terhadap beban aksial sangat dipengaruhi oleh sifat mekanik material, geometri penampang, kelangsingan kolom. Beban aksial pada kolom menjadi gaya tekan P atau N yang bekerja searah sumbu memanjang kolom.

Pada kondisi ideal konsentris (gaya tepat melalui pusat berat penampang), kolom terutama mengalami tekan murni. Namun pada praktiknya, beban aksial hampir selalu disertai eksentrisitas kecil, sehingga kolom cenderung mengalami kombinasi tekan–lentur dan efek orde-dua ($P-\Delta$). (Feng dkk., 2023) menunjukkan bahwa kolom baja mutu tinggi dengan penampang H yang dilas mengalami kegagalan berupa tekuk global ketika dibebani tekan aksial, terutama pada kolom dengan nilai kelangsingan menengah hingga tinggi. Fenomena ini menegaskan bahwa kapasitas kolom baja tidak hanya ditentukan oleh kuat leleh material, tetapi juga oleh stabilitas struktur secara keseluruhan.

Sesuai dengan SNI 1727:2020 tentang beban desain minimum, pembebanan di jabarkan sebagai beban vertikal (gravitasi) yang meliputi, beban mati (*dead load*), beban hidup (*live load*), dan beban angin (*wind load*). SNI 1726:2019 tentang perencanaan ketahanan gempa menjabarkan beban lateral (*horizontal*) yaitu beban gempa (*seismic load*) yang ditentukan menurut lokasi pembangunan. Semua pembebanan ini dirangkai menjadi beban kombinasi (*load combinations*) sebagai berikut:

Tabel 2.1 Kombinasi Pembebanan

1. Beban Mati Saja	1.4D			
2. Mati + Hidup + Hujan	1.2D	1.6L	0.5Lr	
3. Mati + Hidup + Angin	1.2D	1.6L	0.5W	
4. Mati + Hidup + Angin + Hujan	1.2D	1.0L	1.0W	0.5Lr
5. Mati + Hidup + Gempa	1.35D	1.0L	1.0E	

2.5.2 Beban Lateral Sambungan Kolom Balok

Beban lateral/siklik adalah beban yang bekerja berulang dan bolak-balik terhadap waktu, dengan arah dan besar gaya yang berubah secara periodik. Pada struktur baja, beban lateral paling kritis terjadi akibat gempa bumi, tetapi juga dapat disebabkan oleh angin berulang, beban mesin, atau getaran operasional. Sambungan kolom–balok merupakan elemen kunci dalam sistem rangka baja, khususnya pada:

- Steel Moment Resisting Frame (SMRF / SRPM)

- b. Special Moment Frame (SMF)
- c. Intermediate Moment Frame (IMF)

Dalam sistem tersebut, sambungan tidak hanya mentransfer gaya, tetapi juga berfungsi sebagai sumber disipasi energi gempa. Untuk mengendalikan perilaku sambungan di bawah beban siklik, digunakan beberapa pendekatan:

- a. Capacity Design: Balok direncanakan luluh lebih dahulu, kolom dan sambungan dirancang lebih kuat.
- b. Detail Sambungan Khusus: Reduced Beam Section (RBS / dogbone), bolted flange-welded web, stiffener dan continuity plate.
- c. Material dan Las Berkualitas Tinggi: Kontrol ketangguhan baja, Pengujian NDT pada las kritis.

Beban siklik pada sambungan kolom-balok menyebabkan respons nonlinier berupa plastifikasi berulang, degradasi kekakuan, dan potensi kegagalan lelah atau getas. Oleh karena itu, sambungan harus dirancang dengan daktilitas tinggi, detail tahan siklik, serta mekanisme kegagalan yang terkendali, terutama pada struktur baja tahan gempa.

2.5.3 Gaya mempengaruhi Kegagalan

Kegagalan dalam struktur adalah hal krusial yang diperhatikan. (El-Sisi dkk., 2022) menyebutkan beberapa mode kegagalan khas yang dapat terjadi pada struktur dan sambungannya, antara lain:

1. Kegagalan Luluh (*Yielding Failure*)

Kegagalan luluh terjadi ketika tegangan pada elemen baja melampaui tegangan luluh (f_y), sehingga material mengalami deformasi plastis berlebihan. Karakteristik kejadiannya, yaitu bersifat daktil, ditandai oleh regangan besar, umumnya diinginkan dalam desain karena tidak bersifat tiba-tiba.

2. Kegagalan Tekuk (*Buckling Failure*)

Tekuk merupakan kegagalan ketidakstabilan geometrik, bukan kegagalan material. Buckling dibedakan menjadi tiga, yaitu a) Tekuk Global (terjadi pada kolom panjang, dipengaruhi oleh rasio kelangsingan, terjadi sebelum material mencapai tegangan luluh); b) Tekuk Lokal (terjadi pada

elemen pelat tipis, umum pada profil berdingding tipis dan *cold-formed steel*);

c. Tekuk Distorsional (kombinasi perubahan bentuk lokal dan global, umum pada profil *cold-formed*).

3. Kegagalan Sambungan

Kegagalan sambungan dapat bersifat getas jika tidak dirancang dengan kapasitas dan daktilitas yang memadai, terutama pada struktur tahan gempa. Mode kegagalan sambungan meliputi geser baut, tarik baut, sobek pelat (*tear-out*), plastifikasi pelat, retak las, *punching shear* (khusus HSS).

4. Kegagalan Getas (*Brittle Fracture*)

Kegagalan getas ditandai oleh keruntuhan tiba-tiba tanpa deformasi plastis signifikan. Faktor penyebabnya, antara lain yaitu temperatur rendah, tegangan triaksial tinggi, cacat material atau las, baja dengan ketangguhan rendah.

5. Kegagalan Lelah (*Fatigue Failure*)

Kegagalan lelah terjadi akibat beban berulang (*cyclic loading*) meskipun tegangan berada di bawah batas luluh. Umum terjadi pada jembatan baja, struktur lepas Pantai, sambungan las, crane dan struktur industri.

Maka dari itu, pertimbangan gaya menurut (SNI 1727:2020 tentang beban) dan (SNI 1726: 2019 tentang gempa) setiap struktur harus dianalisis untuk pengaruh keamanan dan kestabilan bangunan gedung. Berbagai jenis perilaku sambungan struktural yang menerima pembebanan dapat mengalami perubahan seiring waktu, yang pada umumnya mengakibatkan kegagalan struktur (fraktur).

2.6 Metode Elemen Hingga (*FEA/FEM*)

Metode elemen hingga adalah metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan teknik dan matematis dari suatu gejala fisik yang di antaranya adalah tegangan, regangan, kekuatan, dan analisa getaran (Hamzah, 2021). Metode elemen hingga inilah yang dapat membandingkan antara perhitungan dengan menggunakan *software* dan dengan menggunakan perhitungan secara manual. Metode inilah yang akan digunakan pada analisis sambungan yang akan digunakan.

Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method* atau *FEM*) adalah suatu pendekatan numerik yang digunakan untuk menganalisis dan memecahkan masalah teknik dan ilmu pengetahuan alam yang melibatkan pemodelan struktur kompleks dalam bentuk elemen-elemen kecil. Secara prinsip, metode ini memecah struktur kompleks menjadi elemen-elemen yang lebih sederhana, menggambarkan hubungan antara elemen-elemen tersebut, dan kemudian melakukan simulasi numerik untuk menghitung perilaku keseluruhan struktur atau sistem.

Dalam pengaplikasiannya menggunakan *software*, penggunaan metode elemen hingga melibatkan beberapa langkah umum, yaitu:

1. Pemodelan Geometri: Pemodelan geometri dari objek atau struktur yang akan dianalisis. Ini melibatkan pembuatan bentuk geometris dalam bentuk elemen-elemen sederhana seperti segiempat atau segitiga.
2. Pembagian Elemen: Objek atau struktur dibagi menjadi elemen-elemen yang lebih kecil dan lebih sederhana. Setiap elemen diberikan sifat material dan geometri tertentu.
3. *Meshing* (Pembentukan Jaringan): Membuat jaringan elemen (*mesh*) pada model untuk memecah model menjadi elemen-elemen kecil demi analisis yang lebih akurat. Proses ini menggunakan berbagai jenis mesh, seperti tetrahedral, hexahedral, atau lainnya.
4. Pemberian Batas Kondisi (*Boundary Condition*): Mengidentifikasi komponen atau permukaan di model yang perlu diberi batasan kondisi. Ini bisa berupa penguncian (*Fixed*) untuk mencegah gerakan pada semua arah, penguncian pada arah tertentu untuk mengizinkan gerakan terbatas, atau tautan (*Bonded*) untuk mengikat dua permukaan bersama-sama agar tidak dapat bergerak relatif.
5. Pemberian Pembebanan: Pemberian pembebanan seperti gaya, tekanan, atau momen pada model. Pembebanan ini akan mewakili lingkungan beban yang akan mempengaruhi struktur.
6. Penyelesaian Persamaan: Sistem persamaan diselesaikan secara numerik menggunakan metode iteratif atau eksak.

7. Analisis Hasil: Hasil numerik digunakan untuk menginterpretasikan respons struktur terhadap beban tertentu, seperti deformasi, tegangan, atau perpindahan.

Pada penelitian ini metode elemen hingga digunakan untuk menganalisis perilaku pada sambungan salib baut. Sehingga, aplikasi yang menyediakan fitur tersebut diantaranya yaitu IDEA StatiCa, ANSYS, atau ABAQUS.

2.7 Standar dan Panduan Desain

Desain sambungan pada bangunan modular prefabrikasi, khususnya dalam merespons gaya *vertikal* dan gaya *horizontal*, wajib mematuhi standar konstruksi nasional dan internasional. Di Indonesia, Standar Nasional Indonesia (SNI) menjadi acuan utama, SNI 1727:2020 (tentang pembebanan) dan SNI 1726:2019 (tentang gempa) menjadi pedoman untuk memastikan sistem rangka struktur (seperti struktur beton atau baja) mampu menahan gaya-gaya tersebut, SNI 2847:2019 mengatur persyaratan kekuatan dan durabilitas beton struktural, termasuk sambungan antar elemen pracetak. Untuk struktur baja, SNI 1729:2020 dan SNI 8458:2017 menjadi dasar perancangan sambungan mekanis (baut/las), mencakup kriteria kekuatan tarik, geser, serta ketahanan fatik. Khusus wilayah rawan gempa, SNI 1726:2019 menekankan kemampuan sambungan modular dalam menyerap dan mendistribusikan energi seismik guna mencegah deformasi lateral berlebihan.

Selain SNI, standar internasional seperti AISC 360-16 (untuk struktur baja) dan Eurocode 3 relevan sebagai referensi tambahan, terutama dalam mengevaluasi kekakuan dan kapasitas disipasi energi sambungan inovatif. Untuk sambungan beton modular, PCI Design Handbook merekomendasikan desain sambungan *grouted sleeve*, *bolted connections*, dan sistem *interlocking* yang dapat diadaptasi pada bangunan modular box. Sementara itu, dalam literatur seperti "*Modular Construction Handbook*" oleh Hough & Lawson, (2019) memperkenalkan prinsip *design for manufacture and assembly* (DfMA) yang menitikberatkan efisiensi instalasi dan kompatibilitas antar modul.