

MORFOLOGI STRUKTUR

Bentuk, Struktur, dan Material

DUMMY

MORFOLOGI STRUKTUR

Bentuk, Struktur, dan Material

Bisatya W. Maer
Agus Dwi Hariyanto



RAJAWALI PERS

Divisi Buku Perguruan Tinggi

PT RajaGrafindo Persada

DEPOK

Hak cipta 2025, pada penulis

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh isi buku ini dengan cara apa pun,
termasuk dengan cara penggunaan mesin fotokopi, tanpa izin sah dari penerbit

01.2025.00012.00.02.001

Bisatya W. Maer

Agus Dwi Hariyanto

MORFOLOGI STRUKTUR

Bentuk, Struktur, dan Material

x, 284 hlm., 23 cm

ISBN 978-623-08-1437-2

Cetakan ke-1, Februari 2025

Hak penerbitan pada Rajawali Pers, Depok

Editor : Elvina S. Wijaya
Copy Editor : Dhea Aprilyani
Setter : Jamaludin
Desain cover : Elvina S. Wijaya

Dicetak di Rajawali Printing

RAJAWALI PERS

PT RAJAGRAFINDO PERSADA

Anggota IKAPI

Kantor Pusat:

Jl. Raya Leuwinanggung, No.112, Kel. Leuwinanggung, Kec. Tapos, Kota Depok 16456

Telepon : (021) 84311162

E-mail : rajapers@rajagrafindo.co.id <http://www.rajagrafindo.co.id>

Perwakilan:

Jakarta-16456 Jl. Raya Leuwinanggung No. 112, Kel. Leuwinanggung, Kec. Tapos, Depok, Telp. (021) 84311162. **Bandung**-40243, Jl. H. Kurdi Timur No. 8 Komplek Kurdi, Telp. 022-5206202. **Yogyakarta**-Perum. Pondok Soragan Indah Blok A1, Jl. Soragan, Ngestiharjo, Kasihan, Bantul, Telp. 0274-625093. **Surabaya**-60118, Jl. Rungkut Harapan Blok A No. 09, Telp. 031-8700819. **Palembang**-30137, Jl. Macan Kumbang III No. 10/4459 RT 78 Kel. Demang Lebar Daun, Telp. 0711-445062. **Pekanbaru**-28294, Perum De' Diandra Land Blok C 1 No. 1, Jl. Kartama Marpoyan Damai, Telp. 0761-65807. **Medan**-20144, Jl. Eka Rasmi Gg. Eka Rossa No. 3A Blok A Komplek Johor Residence Kec. Medan Johor, Telp. 061-7871546. **Makassar**-90221, Jl. Sultan Alauddin Komp. Bumi Permata Hijau Bumi 14 Blok A14 No. 3, Telp. 0411-861618. **Banjarmasin**-70114, Jl. Bali No. 31 Rt 05, Telp. 0511-3352060. **Bali**, Jl. Imam Bonjol Gg 100/V No. 2, Denpasar Telp. (0361) 8607995. **Bandar Lampung**-35115, Perum. Bilabong Jaya Blok B8 No. 3 Susunan Baru, Langkapura, Hp. 081299047094.

PRAKATA

Tidak sedikit mahasiswa arsitektur yang menganggap struktur bangunan adalah bidang keahlian milik teknik sipil/perancang struktur saja, sehingga ketika mereka mendesain bangunan, sering kali struktur bangunan dipikirkan belakangan setelah tata ruang dan bentuk bangunannya sudah jadi.

Buku *Morfologi Struktur: Bentuk, Struktur, dan Material* ini ditulis berdasarkan materi kuliah Bentuk, Struktur, dan Material (BSM) yang merupakan salah satu mata kuliah di Program Studi Arsitektur yang mulai dijadikan mata kuliah wajib pada tahun 2010. Buku ini memberikan pemahaman bahwa struktur bangunan merupakan bagian dari arsitektur, karena struktur di dalam arsitektur dipersepsikan sebagai objek spasial dan objek fisik. Suatu ruang atau rangkaian ruang yang selalu didesain dengan bentuk tertentu yang dilingkupi lantai, dinding, dan atap, yang membutuhkan struktur agar dapat berdiri dengan kokoh, sedangkan struktur dapat didirikan kalau ada materialnya. Kesatuan dan keterkaitan/hubungan timbal balik antara: bentuk, sistem struktur, dan material struktural disertai dengan dasar-dasar statika untuk mempertajam pemahaman merupakan fokus bahasan dalam buku ini.

Kami ucapkan terima kasih kepada semua pihak yang terlibat dalam terbitnya buku ini. Semoga buku ini dapat memberikan inspirasi bagi para arsitek dan mahasiswa arsitektur dalam mengerjakan desain arsitekturnya.

Surabaya,

Bisatya W. Maer
Agus Dwi Haryanto

DAFTAR ISI

PRAKATA	v
DAFTAR ISI	vii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
A. Belajar dari Alam	4
B. Hasil Karya Manusia	5
C. Arsitek	9
BAB 2 MATERIAL DAN BENTUK STRUKTUR	11
A. Klasifikasi Material Berdasarkan Aspek Struktural	12
B. Klasifikasi Material Berdasarkan Aspek Teknologi	13
C. Klasifikasi Material Berdasarkan Aspek Geometrik	15
D. Bentuk Struktur	17
E. Sifat Mekanis vs. Bentuk Struktur	22

BAB 3	GAYA, BEBAN, DAN MOMEN	23
	A. Gaya dan Massa	23
	B. Beban	24
	C. Momen	28
BAB 4	TUMPUAN DAN JOIN	33
	A. Tumpuan	33
	B. Join	36
BAB 5	BALOK SEDERHANA	39
	A. Karakteristik Balok Sederhana	43
	B. Karakteristik Balok Kantilever	44
	C. Tegangan pada Balok Sederhana	45
	D. Garis Isostatik	48
	E. Model Eksperimen Balok Sederhana	50
BAB 6	STATIKA BALOK SEDERHANA DAN KANTILEVER	53
	A. Beban Terpusat	56
	B. Beban Merata	61
	C. Kekuatan	72
	D. Kekakuan	73
BAB 7	BATANG TARIK-TEKAN	81
	A. Kolom Tarik (Batang Tarik)	81
	B. Kolom Tekan Gemuk	83
	C. Kolom Baja	88
	D. Kolom Kayu	94
BAB 8	STRUKTUR RANGKA BATANG	99
	A. Rangka Batang	99
	B. Statika Rangka Batang	109
BAB 9	STRUKTUR KABEL	115
	A. Geometri vs. Pola Pembebanan	117
	B. Katenari dan Parabola	118

	C. Kinerja Struktur Kabel Parabola	119
	E. Statika Struktur Kabel	134
	F. Gaya dalam Struktur Kabel	135
BAB 10	STRUKTUR MEMBRAN FLEKSIBEL	139
	A. Struktur Membran	139
	B. Struktur Membran Antiklastik	142
	C. Struktur Membran Sinklastik	145
BAB 11	STRUKTUR BUSUR	149
	A. Tipe Busur Menurut Kelangsingannya	150
	B. Tiga Tipe Busur Langsing	156
	C. Statika Busur Langsing	157
	D. Statika Busur Parabola	159
	E. Perhitungan Dimensi	161
BAB 12	STRUKTUR PELAT LIPAT	167
	A. Kinerja Struktur Pelat Lipat	168
	B. Beberapa Cara Memperkaku Pelat Lipat	171
BAB 13	STRUKTUR SHELL	175
	A. <i>Shell</i> Lengkung Satu Arah	176
	B. Struktur <i>Barrel Shell</i>	179
	C. <i>Shell</i> Lengkung Dua Arah	184
	D. <i>Dome Shell (Spherical)</i>	185
	E. <i>Shell</i> Paraboloida Hiperbolik (<i>Hypar</i>)	187
	F. <i>Grid Shell</i>	191
BAB 14	MATERIAL DALAM KONSTRUKSI BANGUNAN	195
	A. Kayu	195
	B. Teknologi Kayu dalam Konstruksi Bangunan	197
	C. <i>Cross Laminated Timber (CLT)</i>	215
	D. Baja	220
	E. Macam-macam Baja	222

G. Beton	233
H. Baja Tulangan	240
I. Pelaksanaan Konstruksi Beton Bertulang	240
BAB 15 EFISIENSI DAN BENTUK STRUKTUR	253
A. Efisiensi Struktural	254
B. Efisiensi dari Segi Teknologi	277
DAFTAR PUSTAKA	281
BIODATA PENULIS	283

BAB 1

PENDAHULUAN

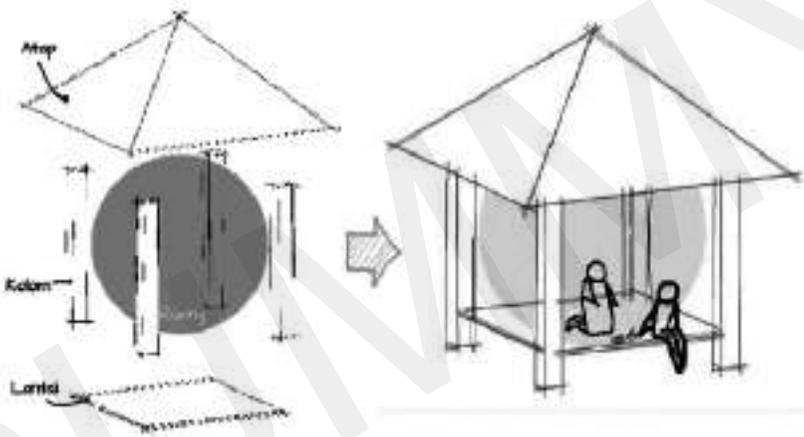
Bentuk, struktur, dan material melekat dalam dunia arsitektur, serta termasuk dalam kelompok ilmu struktur–arsitektur (*architectural–structure*). Keilmuan struktur–arsitektur dapat ditilik dari berbagai sudut pandang, termasuk perancang arsitektural serta perancang struktur, yang kebanyakan memiliki latar belakang teknik sipil. Walaupun bidang keilmuan yang dipandang sama, namun dapat terjadi perbedaan cara pandang terhadap struktur itu sendiri.

Bellington (1985) merumuskan 3S dalam dimensi desain struktur. Dimensi *pertama* adalah saintifik, yaitu bagian yang menjelaskan bagaimana struktur dapat bekerja memenuhi fungsinya. Dimensi *kedua* adalah dimensi sosial–ekonomi, yaitu bagaimana pembiayaan untuk pengadaan sebuah struktur dibandingkan dengan kontribusi sebuah karya struktur tersebut pada komunitas–sosial. Dimensi ini juga menyinggung tuntutan masyarakat untuk mendapatkan bangunan yang efisien dan ekonomis. Dimensi terakhir adalah simbolis, yaitu bagaimana sebuah struktur itu dirasakan.

Dalam hal ini, cara pandang perancang sipil akan lebih terfokus pada poin saintifik dan sosial–ekonomi, sedangkan seorang arsitek dituntut

untuk menekankan keterkaitan antara ketiga dimensi struktur tersebut dalam desain rancangannya.

Selain itu, keberadaan sebuah struktur tidak hanya terdiri dari objek fisik yang berfungsi secara struktural saja. Jika dilihat lebih jauh, keberadaan tatanan objek struktural akan ‘menciptakan’ ruang. Sebagai ilustrasinya, sebuah gazebo dapat terbentuk dari empat kolom di atas lantai yang menopang atap. Dengan keberadaan elemen-elemen tersebut, manusia dapat melakukan aktivitas di ‘dalam’ keempat kolom tersebut, di bawah atap, dan di atas lantai gazebo. Dalam hal ini, keberadaan elemen struktural dapat dipandang sebagai objek yang memungkinkan terbentuknya ruang yang dapat menaungi suatu fungsi.



Gambar 1.1 Objek Struktural Gazebo Membentuk Ruang Aktivitas

Sumber: Penulis

Pembahasan dalam buku ini berfokus pada keberadaan struktur sebagai sebuah objek, yang harus memenuhi fungsinya secara mekanis, yaitu menerima dan menyalurkan beban.

Lebih lanjut, untuk dapat memenuhi fungsi mekanisnya, seorang arsitek dapat mengkaji elemen struktural dari aspek sains maupun teknologinya. Aspek sains meliputi sistem struktur, statika, dan ilmu kekuatan-kekakuannya. Dari aspek teknologi, terdapat teknologi material atau bahan, serta teknologi konstruksi bangunan. Masing-masing material konstruksi memiliki sifat struktural dan geometrisnya

sendiri-sendiri, yang menuntut teknologi pengolahan satu material bahan baku hingga menjadi material konstruksi dapat berbeda-beda.

Kombinasi dari ketiga aspek tersebut (sains, teknologi, dan material), akan memengaruhi bentuk rancangan yang akan tercipta. Bentuk yang terjadi selanjutnya dapat dinilai berdasarkan tingkat efisiensi strukturnya.

Definisi bentuk sendiri dapat ditarik ke ranah yang lebih filosofis. Plato menyatakan bahwa bentuk yang tampak adalah refleksi samar dari bentuk nyata, maka bentuk adalah dasar esensi sesuatu.

Filsuf ternama lainnya, Aristoteles, mengaitkan bentuk yang merupakan perwujudan dari material tertentu. Namun, pandangan secara filosofis ini juga bukan merupakan fokus pembahasan buku ini. Buku ini hendak membahas bagaimana karakteristik material struktural dapat memberi pengaruh terhadap bentuk, sesuai kecenderungan sifat yang material tersebut.



Gambar 1.2 Hubungan Bentuk – Struktur – Material dan Efisiensi

Sumber: Penulis

Pandangan tentang pengaruh material dalam desain arsitektur terbagi dalam kedua kutub. Sebagian berpendapat bahwa material merupakan bagian dari ekspresi arsitektural, sedang pada kutub lain, tidak mengaitkan material sama sekali dengan ekspresi arsitektur. Di antara kedua sisi yang berlawanan tersebut, ada gradasi pemahaman dan pemanfaatan material dalam karya arsitektural:

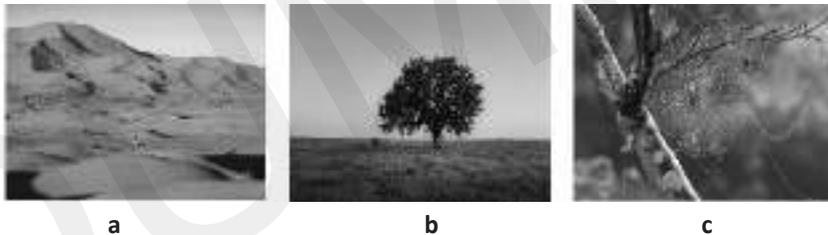
- Arsitek yang mengambil karakter visual atau tampilan material, seperti warna dan tekstur, sebagai pemberi ekspresi karyanya. Sikap ini dapat ditemukan, misalnya pada karya-karya Frank Lloyd Wright.

- Arsitek yang memperhatikan hubungan antara karakteristik mekanis material (kemampuan material menahan gaya), dengan bentuk yang dimungkinkan terjadi oleh material dan penyaluran gaya tersebut. Beberapa arsitek ternama yang mengambil sikap desain, seperti ini misalnya Pier Luigi Nervi, Eduardi Torroja, Félix Candella, serta Santiago Calatrava.

A. Belajar dari Alam

Hubungan antara struktur, bentuk, dan material sesungguhnya dapat kita pelajari dari benda-benda alami, karena contoh-contoh yang telah diberikan alam sangatlah sempurna, salah satunya adalah timbunan pasir di padang pasir. Bentuk komposisi gelombang pasir di gurun pasir merupakan perpaduan antara: sifat material pasir yang kekuatan tekannya tinggi dan non-kohefif, dengan gaya gravitasi dan perilaku tiupan angin.

Oleh karena sifat non-kohefif pasir, maka bentuk/konfigurasi pasir tersebut berubah-ubah sesuai dengan perilaku angin, menghasilkan bentuk dan struktur tertentu.



Gambar 1.3 (a) Padang Pasir, (b) Pohon, (c) Sarang Laba-laba

Sumber: Photo by Taryn Elliott from Pexels; Photo by Taylor Hunt from Pexels

Pohon menjulang ke atas secara alami dan batang-batangnya menjulur ke samping. Batang dan cabang-cabang pohon tersebut dapat bertahan terhadap momen yang terjadi akibat beban gravitasi dan terpaan angin karena sifat kayu tahan terhadap gaya tekan dan tarik.

Sarang laba-laba merupakan struktur tarik berbentuk jaring/*net* yang sangat ringan. Benang-benang jaring membentuk rangkaian sarang yang sangat kuat. Benang-benangannya mempunyai kekuatan tarik yang besar, sehingga sarang laba-laba mampu bertahan terhadap berat laba-laba dan mangsanya, serta terpaan angin.

Salah satu bentukan alam alami yang dapat kita amati karakternya adalah busur batu alami di Utah, Amerika. Busur tersebut terbentuk dari bukit batuan alami, yang terbentang sepanjang 87 meter, dengan ketebalan yang sangat tipis. Hal ini disebabkan bentukan busur alami, di mana material bebatuan adalah material yang tahan terhadap gaya tekan, sedangkan berat sendiri busur batu tersebut menghasilkan gaya aksial tekan di dalam busur, sehingga busur tersebut dapat terbentang lebar.



Gambar 1.4 Busur Lanskap Alami di Utah

Sumber: <http://media-cdn.tripadvisor.com/media/photo-s/01/e4/f8/e6/another-view-of-landscape.jpg>

“Keindahan yang terpancar dari benda-benda alami terjadi secara wajar, dan benar menurut hukum-hukum fisika.” (Mangunwijaya, 2013)

“Keindahan tersebut bersifat alami dan belum tersentuh oleh ‘buah bahasa’ manusia, dan belum kebudayaan. Apabila dari material alam tersebut manusia ikut berbicara, ikut menafsir, dan berkreasi, barulah bangunan dapat menunjukkan ada-diri manusia.” (Mangunwijaya, 2013)

B. Hasil Karya Manusia

Salah satu hasil karya manusia yang dapat menunjukkan ekspresi tertentu adalah patung, seperti pada contoh patung di samping.

Pasir basah dapat dibuat menjadi patung A, tetapi tidak bisa dibuat menjadi patung B karena sifat materialnya hanya tahan terhadap tekan dan kohesivitasnya terbatas.



a



b

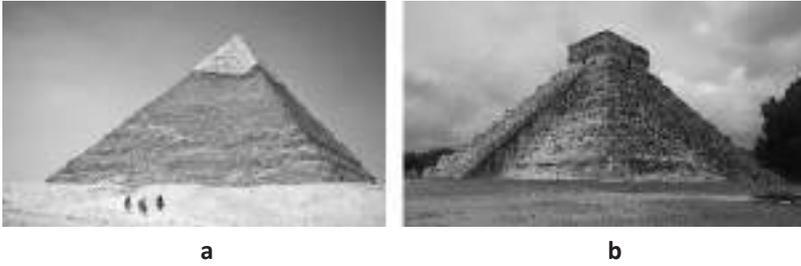
Gambar 1.5 (a) Patung Pasir; (b) Patung Kayu

Sumber: http://entermeus.com/wp-content/uploads/2013/08/best_sand_art_40-640x512.jpg; <http://www.parablesinwood.com/images/skydancehomepage.jpg>

Kayu dapat dibuat menjadi patung B maupun patung A karena sifat materialnya tahan tekan dan tarik. Namun, citra patung A jika dibuat menggunakan material kayu tidak akan sama dengan patung tersebut apabila dibuat dengan material pasir. Dimensi (ukuran) patung kayu terbatas pada dimensi batang pohon, cara pembuatan, tekstur, dan warna. Patung kayu juga berbeda dengan patung pasir.

Karya yang dapat dihasilkan seorang arsitek adalah bangunan-bangunan yang ia rancang. Manusia telah membangun tempat aktivitasnya, bahkan sebelum kata arsitek tercipta. Dari karya bangunan di masa lalu, kita dapat mempelajari bagaimana sedari dahulu, keterkaitan antara material yang ada di suatu daerah dapat memengaruhi sistem struktur yang akhirnya membentuk bentuk dari bangunan itu sendiri.

Sebagai contoh, piramida Giza yang dibangun pada 2560 SM di Giza, Mesir, dibandingkan dengan piramida Chichen Itza di Mexico (800-900 Masehi).

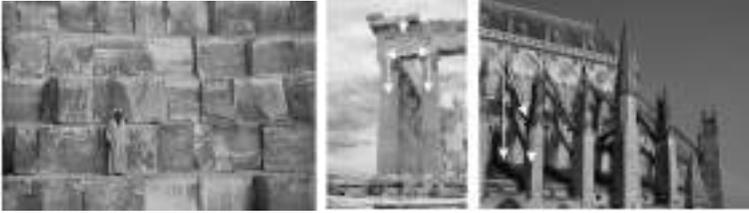


Gambar 1.6 (a) Giza; (b) Chicen Itza

Sumber: Photo by Mouad Mabrouk from Pexels; Photo by Aura López from Pexels

Kedua piramida memiliki bentuk dasar limas segiempat, yang memiliki geometri memuncak (mengecil) ke atas. Kedua piramida didirikan dari bongkahan batu utuh satuan, yang dikonfigurasi sehingga saling membebani dan mengunci. Material batu adalah material yang kuat memikul beban secara tekan, maka dari itu, bentuk piramida dimungkinkan untuk terbentuk, karena selaras dengan pola pembebanan yang dapat dipikul oleh material batu. Perbedaan material yang ada pada kedua piramida disebabkan karena perbedaan jenis batuan yang ada di sekitar lokasi, yang menimbulkan karakter serta ekspresi yang berbeda, meski bentuk dasar bangunan serupa.

Bongkahan batu piramida sendiri harus memenuhi dimensi tertentu, agar dapat berfungsi memikul dan menyalurkan beban, serta memungkinkan proporsi dimensi yang diinginkan perancang. Gambar di samping adalah bongkahan batu piramida Giza yang tingginya sebanding dengan manusia dewasa. Karya piramida Giza tersebut menunjukkan bahwa suatu material dapat berfungsi sebagai elemen struktural, sekaligus sebagai pemberi ekspresi bangunan itu sendiri.



a

b

Gambar 1.7 Piramida Giza

Sumber: <http://3.bp.blogspot.com/-u5nunGz4is0/UtAQ5VghlBI/AAAAAAAAADf4/ISFTFXUgK9I/s1600/firaun.3.jpg>

Gambar 1.8 (a) Kolom-Balok pada Kuil Parthenon; (b) *Flying Buttress* pada Sainte Chapelle, Riom

Sumber: from Pexels, <https://deirdremorgan1.files.wordpress.com/2014/06/flying-buttresses.jpg?w=474&h=355>

Kebutuhan bangunan yang membutuhkan ruang untuk beraktivitas memicu perkembangan teknologi untuk mengatasi kebutuhan tersebut. Sistem struktur *post-lintel* mulai digunakan dengan keterbatasan material batu yang bersifat tekan, seperti pada kuil Parthenon, yaitu menggunakan kolom-balok dari bongkahan batu. Namun, untuk bukaan-bukaan, jarak kolom pada sistem ini sangat berdekatan, karena balok batu memiliki ketebalan yang tinggi saat harus terbentang lebar. Keterbatasan bentang dan besarnya bukaan pada susunan dinding pemikul batu dapat ditingkatkan pada zaman Gothic, dengan menggunakan elemen struktural *buttress* yang ‘melayang’ (*flying buttress*). *Flying buttress* dapat terbentang lebar karena baloknya berbentuk busur lengkung walaupun menggunakan material batu, serta dapat menghilangkan kesan bangunan yang masif dan berat.

Seiring perkembangan zaman, serta ditemukannya teknologi dan material baru, arsitek lebih leluasa menghasilkan bentuk yang dapat mengekspresikan ruang yang diharapkan. Sebagai contoh, bangunan Jubilee Church oleh arsitek Richard Meier. Elemen struktur utama dari bangunan ini adalah beton pra-cetak dan pra-tegang (*post-tension*), yang keseluruhannya membentuk dinding lengkung beton putih, bersama rangka bukaan kaca serta *skylight*, yang memberi gereja ini kesan terang dan ringan. Gambar 1.9 kanan adalah proses perakitan panel beton pra-cetak.



Gambar 1.9 Jubilee Church oleh Richard Meier

Sumber: <https://www.richardmeier.com/?projects=jubilee-church-2>

C. Arsitek

Mengapa seorang arsitek perlu memiliki wawasan dalam bentuk, struktur serta material? Karena bangunan, sebagai karya rancangan arsitek, lekat dengan ruang spasial serta elemen strukturnya. Keberadaan elemen struktural memungkinkan sebuah ruang terbentuk dan berfungsi dengan aman. Elemen struktural tersebut merupakan hasil keterkaitan dari material–sistem struktur tertentu, sehingga dapat mencapai bentuk maupun kualitas ruang yang direncanakan oleh arsitek, sehingga desain yang dihasilkan dapat berupa kesatuan yang utuh antara struktur dan spasial. Sebagai contoh perbandingan sederhana, kualitas ruang yang terbentuk dari tenda berkemah, yang dilingkupi oleh kain terpal, akan berbeda dengan ruang dalam *igloo* dari balok es.

Wawasan tentang keterkaitan tersebut akan dibahas lebih lanjut, beserta ragam material serta sistem struktur, dalam contoh penerapan serta perhitungan statika yang mendukung teori perilaku pembebanan pada masing-masing sistem.

DUMMY

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 2

MATERIAL DAN BENTUK STRUKTUR

Seperti dibahas pada bagian sebelumnya, ada dua kelompok pandangan terhadap material struktural. Kelompok yang pertama menghargai properti dan sifat mekanis material (kekuatan dan kekakuan material) sebagai salah satu unsur pemberi bentuk serta citra arsitektural. Kelompok ini mengintegrasikan sifat material tersebut di dalam desain arsitektur. Berlawanan dengan kelompok pertama, kelompok lainnya tidak menghargai material sebagai pemberi bentuk dan citra arsitektur, serta cenderung memisahkan pemikiran bentuk dan citra arsitektur dari properti serta sifat mekanis material. Pembahasan dalam buku ini dibatasi pada pandangan pertama, di mana material dapat memengaruhi serta memberikan ekspresi pada suatu karya arsitektural.

Material dalam bangunan dapat bersifat struktural dan non-struktural. Material struktural adalah material yang digunakan untuk komponen-komponen yang menahan beban semua unsur bangunan, seperti kolom, balok, dan sebagainya. Maka, perlu dipahami sifat material tersebut, dalam hal kemampuannya untuk mendukung beban.

Material non-struktural adalah material yang digunakan untuk komponen non-struktural, seperti dinding partisi, plafon, fasad bangunan, dan sebagainya. Sifat material non-struktural adalah menopang dan menjadi beban bagi komponen struktural, sehingga pembahasan akan berfokus pada material struktural saja.

Pemilihan material struktural akan membawa konsekuensi pada proses konstruksi yang harus dikerjakan. Selain itu, bentuk struktur memengaruhi tingkat kerumitan pekerjaan konstruksi. Hal ini dapat memengaruhi beberapa aspek lain, seperti skedul proyek, biaya, kebutuhan alat, kebutuhan tenaga kerja/ahli, dan sebagainya.

A. Klasifikasi Material Berdasarkan Aspek Struktural

Untuk dapat mempelajari material dengan lebih detail, maka kita dapat membagi material berdasarkan beberapa aspek, yaitu aspek struktural, teknologi, serta kecenderungan bentuk dari suatu material (geometrik).

Pada suatu material, terkandung kekuatan, kekakuan, serta berat material. Kekuatan dan kekakuan material disebut sebagai properti mekanis suatu material. Berdasarkan properti mekanisnya, suatu material ada yang bersifat *mono-directional* dan *bi-directional*.

Material *mono-directional* adalah material yang mempunyai kemampuan mendukung hanya gaya aksial saja, yaitu: gaya tekan saja, seperti bata, batu alam, maupun beton polos (tanpa tulangan); atau gaya tarik saja seperti kabel baja.

Material *bi-directional*, sebaliknya, selain mendukung gaya aksial juga mempunyai kemampuan mendukung momen lentur (gaya aksial tekan dan tarik dalam arah sumbu yang sama), dan termasuk gaya geser lentur (gaya yang selalu berpasangan dengan momen lentur). Hal yang termasuk material *bi-directional*, antara lain, beton bertulang, baja, kayu, serta bambu.

Jenis gaya internal suatu struktur akan dipengaruhi oleh bentuk struktur dan pola pembebanannya. Dalam hal ini, dalam sebuah elemen struktural, mungkin saja terjadi: gaya aksial tekan, gaya aksial tarik, momen/gaya geser, serta kombinasi momen dengan aksial. Oleh karena masing-masing material memiliki sifat mekanisnya sendiri, maka sifat struktural material akan menentukan bentuk struktur yang dapat diakomodasi olehnya.

B. Klasifikasi Material Berdasarkan Aspek Teknologi

Teknologi mencakup aspek yang luas, seperti budaya, sosial, ekonomi, lingkungan, pendidikan, penelitian, dan pengembangan IPTEK. Teknologi material struktural bangunan dapat dibagi menjadi dua sesuai fasenya, yakni sebagai berikut.

1. Teknologi material berhubungan dengan proses transformasi material menjadi elemen bangunan, dan transformasi elemen bangunan menjadi bangunan.
2. Teknologi konstruksi bangunan berhubungan dengan proses pelaksanaan pembangunan. Hal ini mencakup metode pelaksanaan, peralatan, tenaga ahli, tenaga kerja, manajemen proyek, manajemen kontrol, sumber daya alam, energi, dan lain-lain.

Sumber daya alam setempat berpengaruh pada perkembangan teknologi material dan konstruksi bangunan. Hal tersebut dapat dilihat dari karya arsitektural dari peradaban masa lalu, di mana bangunan di negara-negara Barat didominasi konstruksi bangunan batu, sedangkan di negara-negara Asia didominasi konstruksi bangunan kayu, karena berada pada daerah berhutan.

Pada masa kini, perkembangan teknologi konstruksi bangunan sudah sangat kompleks. Dengan adanya hubungan lintas negara dan kemajuan teknologi informasi, alih teknologi antarnegara sudah menjadi hal yang umum, termasuk juga teknologi material dan teknologi konstruksi bangunan.

Walaupun begitu, kondisi teknologi sangat bergantung pada aspek lain, misalnya masa dan tempat di mana teknologi tersebut berada. Sebagai contoh, Jakarta pada tahun 1950 akan memiliki teknologi yang berbeda dengan Amerika tahun 1950, berbeda pula dengan Jakarta tahun 2024. Selain itu, faktor-faktor yang memengaruhi perkembangan teknologi adalah sebagai berikut.

1. Keadaan dan kemampuan ekonomi (negara/*owner* properti).
2. Ketersediaan material dan sumber daya lain.
3. Kemampuan tenaga kerja.

4. Kombinasi dari beberapa aspek, misalnya pembangunan di pelosok Irian dapat mendatangkan teknologi dan tenaga ahli dari Jakarta, tetapi dari segi ekonomi belum tentu memadai, dan sebagainya.

Selanjutnya, dari aspek teknologi, material juga dapat diklasifikasikan berdasarkan kemungkinan dilaksanakannya (*workability*). *Workability/processing* dalam kajian ini dihubungkan dengan pengaruh dari sifat fisik material terhadap kemungkinan dibangun dan proses pengerjaannya, yang berkaitan dengan masa/kemajuan teknologi. Proses pengerjaan tiap material tidak sama satu dengan yang lain, mengakibatkan potensi untuk menghasilkan bentuk elemen struktur dan bentuk struktur maupun bentuk serta konstruksi sambungan yang berbeda.



Gambar 2.1 (a) *Joint Bolt* Baja dan (b) *Joint Kayu*

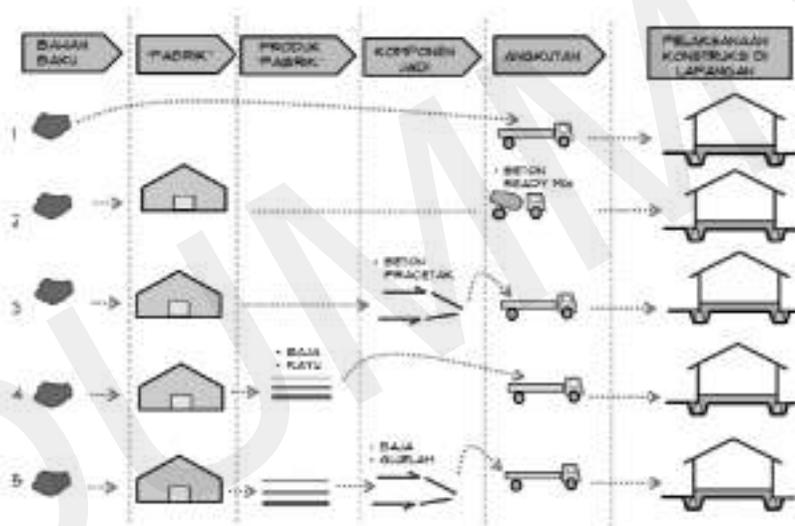
Sumber: https://i.ytimg.com/vi/Hajq_P4q0TY/maxresdefault.jpg; <https://i.pinimg.com/originals/9c/87/66/9c87666fc1ba1ee0fd325ccdc60f64e.jpg>

Selain itu, material dapat dibagi berdasarkan prosesnya untuk menjadi material konstruksi. Terdapat beberapa skenario proses yang mungkin terjadi, yakni sebagai berikut.

1. Skenario 1, bahan baku dibawa ke lapangan, misalnya pasir yang langsung dibawa untuk pelaksanaan konstruksi di lapangan.
2. Skenario 2, beberapa bahan baku dikirim ke pabrik untuk diolah, kemudian baru dibawa ke lapangan, misalnya pasir, kerikil, dan semen dicampur di pabrik (*batching plant*), kemudian diangkut truk *mixer* dalam bentuk beton *ready mix* ke lapangan.
3. Skenario 3, beberapa bahan baku dikirim ke pabrik untuk diproses menjadi komponen konstruksi bangunan, misalnya pasir, kerikil, dan semen yang dicampur serta diproduksi menjadi komponen

beton pra-cetak (dapat berupa balok, kolom, dan dinding beton pra-cetak), yang kemudian diangkut untuk dirangkai di lapangan.

4. Skenario 4, bahan baku dikirim ke pabrik untuk diproses menjadi material siap dikerjakan, misalnya kayu gelondongan dikirim ke tempat gergajian untuk dipotong-potong menjadi balok atau papan dengan dimensi yang umum beredar, kemudian diangkut ke lapangan untuk konstruksi.
5. Skenario 5, bahan baku dikirim ke pabrik, dijadikan bahan siap dikerjakan, kemudian dikirim ke pabrik komponen konstruksi, misalnya pasir besi dan kayu gergajian yang diolah di pabrik untuk mendapatkan dimensi dan profil yang sesuai dengan kebutuhan proyek tertentu, kemudian diangkut ke lapangan untuk dirangkai.



Gambar 2.2 Skenario Proses yang Dialami Material dalam Proses Konstruksi

Sumber: Penulis

C. Klasifikasi Material Berdasarkan Aspek Geometrik

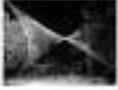
Aspek geometris material meninjau tentang kemampuan material untuk mengakomodasi bentuk struktur ditinjau dari bentuk dan proses materialnya (bukan dari sifat mekanisnya). Bentuk material terjadi karena sifat dan bentuk fisiknya, serta karena proses pembentukannya.

Dalam aspek ini ada beberapa kategori sebagai berikut.

1. Material yang cenderung lebih sesuai dibentuk menjadi elemen garis, misalnya: bambu, kayu, baja profil, dan beton bertulang.
2. Material yang cenderung bisa dibentuk masif menjadi elemen bidang atau massa, misalnya: batu, bata, beton, dan beton bertulang.
3. Material fleksibel yang cenderung bisa dibentuk menjadi elemen garis, misalnya: kabel.
4. Material fleksibel yang cenderung bisa dibentuk menjadi elemen bidang, misalnya: membran.

Elemen garis selain bisa dibentuk menjadi struktur rangka, juga bisa dibentuk untuk struktur bidang, dan struktur bidang rangka (rangka yang bekerja secara bidang) melalui repetisi dan rangkaian elemen-elemen garis tersebut. Beberapa contoh dari material dengan kecenderungan bentuk geometris tertentu dapat dilihat di tabel berikut.

Tabel 2.1 Bentuk Geometris Material

Material	Geometri - Sistem	Contoh Bangunan	Material	Geometri - Sistem	Contoh Bangunan
Baja Profil	Garis-Rangka		Beton Bertulang	Dome	
Kayu	Bidang - Bidang lengkung 2 arah (Shell)		Papan	Dome	
Kayu	Bidang lengkung 2 arah, berbentuk hiperbolis paraboloid (Hiperbolis struktur shell kayu)		Papan	Struktur Mosaik	
Beton bertulang	Bidang lengkung 2 arah - Shell kayu		Kabel (gaya kawat)	Bidang lengkung 2 arah - tensile hyper	
			Bidang	Struktur bidang lengkung 2 arah	

Sumber: Penulis

D. Bentuk Struktur

Klasifikasi bentuk struktur berdasarkan gaya dalam yang bekerja:

1. bentuk struktur aktif (*form-active*);
2. bentuk struktur non-aktif (*non-form active*); dan
3. bentuk struktur semi-aktif (*semi form-active*).

1. *Form-Active*

Struktur *form-active* adalah struktur yang bentuknya sesuai dengan lintasan “natural” gaya internalnya, yang terbentuk karena suatu pola pembebanan tertentu. Struktur *form-active* hanya memikul gaya aksial saja, yaitu: gaya tarik atau gaya tekan.

Lintasan “natural” gaya internal *form-active* disebut garis funikular, bentuk geometri garis tersebut selalu terbentuk karena pola pembebanannya. Ilustrasi tentang bentuk *form-active* dapat dilihat pada beberapa kondisi seperti di bawah.

a. *Form-Active Tarik*

Pada gambar di samping, terlihat bahwa helikopter diangkat oleh *crane*. Helikopter membebani kabel *crane* ke bawah, akibatnya, sepanjang kabel terjadi gaya aksial tarik. Gaya dari kabel yang bekerja di ujung lengan *crane* bekerja sebagai gaya lintang. Maka, pada lengan *crane*, selain bekerja gaya aksial, bekerja pula momen lentur. Dari contoh ini, kabel merupakan struktur *form-active* tarik.

Selanjutnya, saat seseorang berlatih keseimbangan dengan berdiri di kabel yang terbentang pada dua tiang tumpuan. Orang tersebut akan membebani kabel secara terpusat, yaitu pada kakinya. Akibatnya, kabel berubah bentuk menjadi poligon segitiga dan menerima gaya aksial tarik. Komponen horizontal gaya tarik kabel bekerja sebagai gaya lintang pada tiang tumpuan, maka pada tiang tersebut bekerja momen lentur. Kabel pada contoh ini merupakan struktur *form-active*.



Gambar 2.3 *Form-Active* Tarik Berupa Garis Lurus

Sumber: <https://pineriverscranehire.com.au/wp-content/uploads/2016/08/crane-lifting-helicopter-1024x768.jpg>



Gambar 2.4 *Form-Active* Beban Terpusat Berupa Poligon

Sumber: https://c-sf.smule.com/rs-s34/arr/74/83/b3b9c719-4f05-4776-a287-530bb44b7b29_1024.jpg

Pola pembebanan merata pada kabel yang terbentang akan menimbulkan bentuk kurva pembebanan yang berbeda, namun hampir serupa. Beban sendiri sepanjang batang pemikul akan menimbulkan bentuk kurva katenari, dan beban merata sepanjang sumbu horizontal akan menimbulkan kurva parabola.



Gambar 2.5 Kurva Katenari dan Parabola

Sumber: <https://web2.ph.utexas.edu/~coker2/index.files/hangchain.jpg>; <https://constructionheadline.com/wp-content/uploads/2015/03/suspension-bridge.jpg>

b. *Form-Active* Tekan

Pada gambar di atas, berat sendiri pada rantai membentuk kurva katenari, sedang jalan yang terbentang sepanjang jembatan akan membebani kabel, sehingga kabel mengalami tarikan. Bentuk kurva pada kabel adalah kurva parabola.

Keempat contoh kondisi yang telah disebutkan adalah contoh bentukan *form active* akibat gaya tarik. Bentuk sebuah struktur juga bisa terbentuk untuk menahan gaya tekannya.

Beban terpusat pada jembatan antar-*tower* ditopang menggunakan batang kaku, yang menerima gaya aksial tekan. Gaya tekan tersebut disalurkan ke tumpuan, yaitu kolom bangunan utama. Batang tekan tersebut memiliki bentuk batang lurus, yang sesuai dengan garis kerja gaya tekan yang terjadi, maka batang tekan tersebut merupakan struktur *form-active*.



Gambar 2.6 *Form-Active* Tekan Berupa Batang Garis

Sumber: <https://www.virtourist.com/asia/malaysia/kuala-lumpur/imatges/04.jpg>

Beban sendiri pada sebuah busur akan membentuk kurva pembebanan katenari tekan, sama seperti pada kabel, namun dengan arah yang berlawanan (balik cermin). Busur yang memikul jembatan akan memiliki bentuk parabola, akibat beban merata horizontal dari jembatan. Busur pada Gambar 2.7 menghasilkan kurva katenari dan Gambar 2.8 kurva parabola sesuai dengan garis funikularnya, seperti pada contoh kabel. Namun, kurva pada kabel adalah kurva positif (tarik), sedang pada busur kurva negatif (tekan).



Gambar 2.7 Form-Active Katenari Tekan

Sumber: <https://mmaanewsletter.files.wordpress.com/2015/10/19-jpg.jpg>



Gambar 2.8 Form-Active Parabola Tekan

Sumber: <https://www.pexels.com/photo/architecture-autumn-blue-blue-sky-208684/>

2. Non Form-Active

Struktur *non form-active* adalah struktur yang bentuknya tidak mengikuti garis funikular. Pada struktur *non form-active* bekerja momen lentur.



a



b

Gambar 2.9 Bentuk Non Form-Active:

(a) Kolom Balok; (b) Kantilever

Sumber: https://images.adsttc.com/media/images/53cd/2a32/c07a/805e/0800/0328/large_jpg/20130621_Base3Arquitetos_PrataDesign_010.jpg?1405954595; https://www.eichlernetwork.com/sites/default/files/imported/images/front/steel_9_norton.jpg



Gambar 2.10 Kurva Katenari dan Parabola

Sumber: <https://www.bukaka.com/web/businesses/steel-bridge/composite-girder-bridge.html>

Pada Gambar 2.9, balok baja terbentang menerima beban dari konstruksi bangunan di atasnya. Garis funikular beban merata pada balok tersebut adalah parabola, berbeda dengan bentuk balok yang lurus, maka pada balok akan bekerja momen. Begitu pula pada kantilever pada gambar (b). Kantilever yang terbebani memiliki garis funikular penyaluran gaya berupa garis lurus vertikal. Akibatnya, pada kantilever tersebut akan bekerja momen.

Beban merata pada jembatan (Gambar 2.10) memiliki garis lintasan gaya berupa parabola, namun konstruksi jembatan berupa balok lurus horizontal, hal ini menyebabkan bekerjanya momen pada jembatan. Untuk menahan momen tersebut, dibutuhkan dimensi balok pemikul jembatan yang besar.

Terlihat pada ketiga gambar, bentuk struktur tidak mengikuti garis funikular pembebanannya, ketiga contoh ilustrasi tersebut menunjukkan bentukan *non form-active*.

3. *Semi Form-Active*

Bentuk *semi form-active* adalah struktur yang bentuknya tidak mengikuti garis funikular. Pada struktur *semi form-active* bekerja kombinasi momen lentur dan gaya aksial. Ada tiga tipe struktur *semi form-active*, yaitu: momen dan gaya aksial relatif berimbang; momen lebih dominan dibanding gaya aksial; atau sebaliknya, gaya aksial dominan dibanding momen. Bila gaya aksial dominan, bentuk makin mendekati *form-active*.

Pada Gambar 2.11, portal poligon menerima beban dari konstruksi atap. Beban tersebut disalurkan ke tumpuan melalui balok portal, terutama yang membebaninya dengan gaya aksial tekan. Namun, karena bentuk portal adalah poligon, sedangkan garis funikular beban atap (merata) adalah parabola, maka dalam portal tersebut bekerja momen lentur selain gaya aksial tekan.



Gambar 2.11 Bentuk *Semi Form Active* yang Menyerupai Garis Parabola

BAB 3

GAYA, BEBAN, DAN MOMEN

A. Gaya dan Massa

Gaya adalah penyebab benda bermassa mengalami perubahan dalam bentuk gerakan, arah, maupun konstruksi geometris, misalnya, benda diam menjadi bergerak (mengalami percepatan positif), atau benda bergerak menjadi berhenti bergerak (mengalami percepatan negatif). Gaya juga dapat mengakibatkan sebuah benda mengalami perubahan bentuk.



Gambar 3.1 (a) Gaya Tarik Kuda, dan (b) Gaya Tarik Ikan pada Pancing

Sumber: Photo by Kelly Lacy from Pexels; Photo by William McAllister from Pexels

Pada gambar (a), gaya tarik dari kuda akan menarik roda untuk berputar sehingga bergerak ke depan, sesuai arah tarikan. Pada gambar (b), gaya tarik dari ikan yang ingin membebaskan diri akan menarik kail, sehingga bentuknya melengkung. Oleh karena gerakan tersebut memiliki besar gaya, titik tangkap, serta arah, maka gaya dapat digolongkan sebagai besaran vektor.

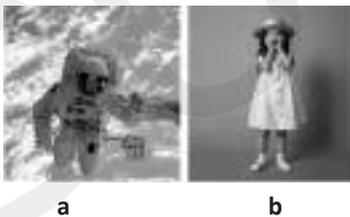
Massa adalah sejumlah besaran material yang menjadi sifat intrinsik suatu benda. Massa tidak mempunyai arah, maka massa tergolong besaran skalar. Berat adalah massa yang mendapat percepatan gravitasi. Berat adalah gaya, karena punya besaran, arah (vertikal ke bumi), dan punya titik tangkap, yaitu pada titik berat benda.

Menurut Newton, berat sebuah benda adalah sebesar massa benda dikalikan besarnya percepatan gravitasi di mana benda tersebut berada, atau jika dinyatakan dalam persamaan:

$$W = m \times g$$

W = berat, dinyatakan dalam Newton \rightarrow N (SI) atau Kilogram force \rightarrow kgf (metrik);
 m = massa (kilogram, gram)
 g = percepatan gravitasi, dinyatakan dalam m/det²

Besar percepatan gravitasi di bumi adalah 9,8 m/det². Di ruang hampa udara tanpa gravitasi ($g = 0$), berapa pun massa bendanya, maka beratnya adalah 0.



Keterangan:

Gambar (a) menunjukkan ruang hampa udara tanpa gravitasi ($g = 0$), jika massa manusia = 75 kg, maka berat $W = 75 \text{ kg} \times 0 = 0 \text{ N}$.

Gambar (b) menunjukkan ruang dengan gravitasi, massa manusia = 10 kg, maka berat $W = 10 \text{ kg} \times 9,8 \text{ m/det}^2 = 98 \text{ N}$. Jika dikonversikan menjadi satuan kgf, maka $W = 98 \times 0,102 = 9,996 \text{ kgf}$, dibulatkan 10 kgf.

Gambar 3.2 (a) Ruang Hampa Tanpa Gravitasi; (b) Ruang dengan Gravitasi

Sumber: Photo by cottonbro from Pexels

B. Beban

Beban (P) adalah gaya berat yang harus dipikul oleh manusia, benda, struktur, dan lain-lain. Beban adalah gaya eksternal. Pada gambar di samping, ranting membebani semut, ditahan semut oleh kedua ‘tangan’

nya. Beban tersebut disalurkan sepanjang badan semut. Batu memberi reaksi pada keempat titik 'kaki' semut. Beban dapat digolongkan menjadi beberapa macam beban, seperti pada tabel di bawah.

Tabel 3.1 Penggolongan Beban



Gambar 3.4 Semut dan beban
Sumber: Photo by cottonbro from Pexels

Jenis Beban		
Arah perambanan	Beban Terpusat  Buku membebani kepala anak secara terpusat	Beban Merata  berat sendiri balok membebani balok secara merata dan membebani kolom dengan gaya aksial tekan
	Beban adalah gaya eksternal. Akibat gaya eksternal tersebut, di dalam tulang/otot anak, serta di kolom-kolom bangunan bekerja gaya normal/aksial tekan internal, sedangkan di balok bekerja momen lentur dan gaya geser lentur.	
Arah perambanan	Vertikal 	Horizontal/Lateral 
	Beban bersudut $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ akan diuraikan menjadi komposisi gaya vertikal dan gaya horizontal	
Sifat	Statis 	Dinamis 
	Beban sendiri struktur tetap dan tidak berubah, namun lenturan bersamaan support tertergolong beban dinamis	

Sumber: Photo by cottonbro from Pexels; penulis

1. Beban Mati dan Beban Hidup

Beban dalam suatu struktur bangunan dapat berupa beban mati maupun beban hidup. Perhitungan pembebanan struktur per komponen telah diatur pada tabel beban dalam Peraturan Pembebanan Indonesia Untuk Gedung 1983 (PPIUG 83).

a. Beban Mati

Beban konstan yang relatif tidak berubah dalam jangka waktu yang lama, misalnya:

- 1) beban sendiri dari setiap komponen struktural dalam bangunan;
 - 2) beban komponen non-struktural yang tidak dapat dipindah, misalnya *ducting* AC; dan
 - 3) beban alat berat yang sangat jarang dipindahkan, seperti genset.
- Beban mati dibagi menjadi bahan dan komponen bangunan.

b. Beban Hidup

Beban yang intensitasnya berubah-ubah (temporer). Misalnya:

- 1) pengguna bangunan (terkait fungsi, waktu);
- 2) furnitur yang dapat dipindah-pindah; dan
- 3) pada daerah sub-tropis, dapat berupa salju yang tertinggal di elemen bangunan.

Beban hidup dibedakan menurut fungsi bangunan yang didesain, dinyatakan dalam beban per luas lantai bangunan. Baik beban mati maupun beban hidup arahnya vertikal.

2. Beban Angin dan Beban Gempa

Beban gempa merupakan beban dinamis, dominan bekerja sebagai gaya dinamis lateral, sedangkan komponen vertikal gaya gempa tetap diperhitungkan pengaruhnya pada bangunan.

Berbeda dengan gempa, beban angin baru diperhitungkan sebagai beban dinamis saat berupa angin ribut atau angin topan. Saat angin berembus dengan kecepatan rendah dan dari arah yang tidak berubah-ubah, maka beban angin masih diperhitungkan sebagai beban statis.



Gambar 3.3 Angin Bergerak Dinamis

Sumber: <https://www.brolliesgalore.co.uk/vented-umbrellas-for-windy-wintery-days-c1200x24940>

3. Beban Khusus

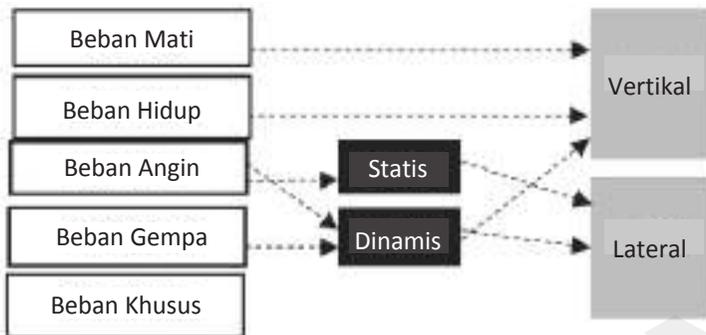
Beban khusus yang dialami elemen struktural terjadi akibat kondisi tertentu yang spesifik, misalnya pada beban muai susut karena termal, atau beban perbedaan penurunan tanah atau fondasi, yang biasanya terjadi pada bangunan baru.



Gambar 3.4 Penurunan Tanah

Sumber: <https://www.geotech.hr/en/differential-settlements/>

Jika diringkas, beban pada struktur dapat dijelaskan dalam skema berikut.



C. Momen

Momen adalah gaya yang menyebabkan benda berotasi (berputar). Rotasi terjadi karena gaya bekerja tegak lurus benda pada jarak tertentu dari tumpuan.



$$M = W \times I$$

M = Momen, dalam kgf.m atau kgf.cm

W = Gaya, dalam kgf

I = Jarak terpendek ke tumpuan, dalam m atau cm

Sumber: <https://thumbs.dreamstime.com/b/rear-view-strong-man-lifting-dumbbell-standing-against-white-background-74154385.jpg>

Momen pada konfigurasi struktur dapat dijumpai, misalnya pada balok kantilever. Balok kantilever ini dapat berupa balkon maupun rangka kanopi seperti terlihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 3.5 Kantilever pada Kanopi

Sumber: <https://www.modlar.com/brands/poligon/covered-cantilevered-walkway/>



Gambar 3.6
Kantilever Vertikal

Sumber: <https://www.mollerarchitects.com/towers>

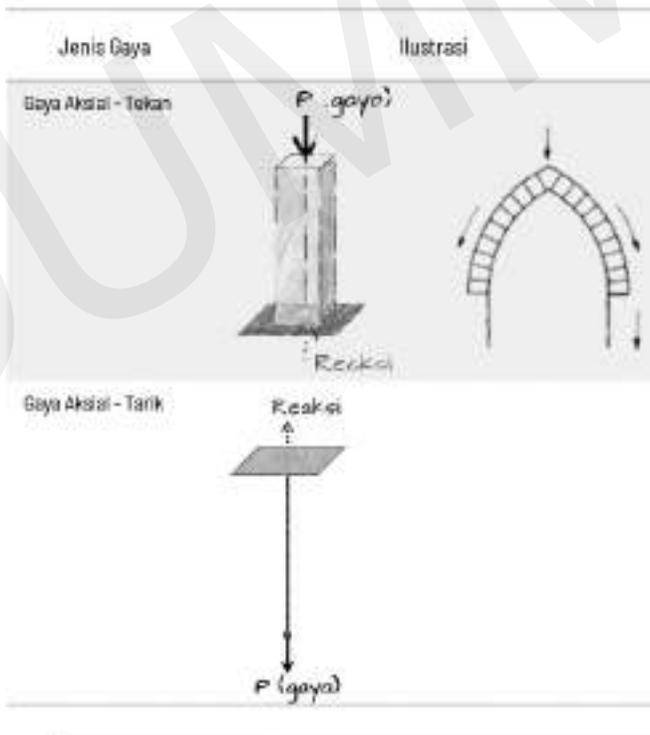
Balok kanopi pada Gambar 3.5 menahan berat beban merata penutup atap dan konstruksinya, selain beratnya sendiri. Kedua beban merata tersebut memiliki resultan beban (W), yang titik beratnya berada di tengah balok kanopi kantilever ini. Jarak antara titik berat beban dengan tumpuan dinyatakan dengan (l). Maka dari itu, pada tumpuan balok kanopi kantilever akan terjadi momen maksimal sebesar $M = W \times l$.

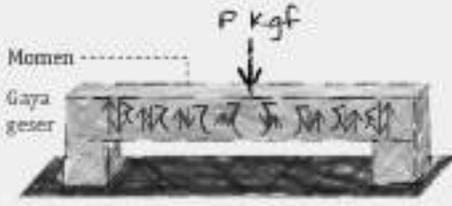
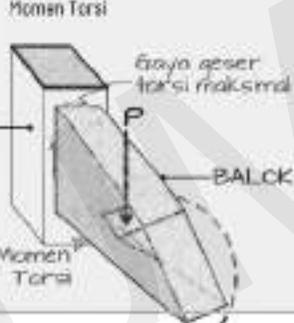
Saat sebuah struktur bangunan menerima beban lateral seperti angin, maka struktur tersebut akan berperilaku seperti kantilever vertikal dengan tumpuan di dasarnya. Beban angin akan diterima selubung bangunan, dan disalurkan ke elemen struktural. Hal ini mengakibatkan momen maksimal di tumpuan, seperti pada M_1 di atas *tower*, dan M_2 di tanah (dasar *tower* keseluruhan, Gambar 3.6).

Maka, gaya-gaya yang bekerja pada struktur dapat diringkas pada skema di halaman selanjutnya.



Perwujudan dari masing-masing gaya beban dapat diilustrasikan sebagai berikut.



Jenis Gaya	Ilustrasi
Gaya Lintang - Terpusat	 <p>Momen</p> <p>Gaya geser</p> <p>$P \text{ kgf}$</p>
Gaya Lintang - Merata	 <p>Momen</p> <p>Gaya geser</p> <p>$q \text{ kgf/m}$</p>
Momen Torsi	 <p>Momen Torsi</p> <p>Gaya geser torsi maksimal</p> <p>BALOK</p> <p>KCOLOM</p> <p>P</p>

DUMMY

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 4

TUMPUAN DAN JOIN

A. Tumpuan

Setiap struktur bangunan harus ditumpu agar dapat berdiri pada posisinya dengan kokoh. Gaya-gaya dari struktur berkumpul di tumpuan dan diteruskan ke fondasi sampai ke tanah. Pada tumpuan tersebut terjadi keseimbangan gaya, seperti:

1. gaya-gaya dari struktur sebagai aksi; dan
2. diimbangi (dilawan) oleh gaya reaksi tumpuan.

Dalam sebuah struktur bangunan, kita dapat menemukan tumpuan, misalnya pada pertemuan kolom dengan fondasi atau *pedestal*, serta pertemuan *girder* (balok induk besar) dengan fondasi/*pedestal* atau kolom besar. Ditinjau dari kinerja terhadap perlawanan gaya, terdapat tiga jenis tumpuan yang akan dibahas lebih lanjut.

1. Tumpuan Rol

Konstruksi tumpuan rol dapat dianalogikan sebagai roda yang bertumpu di atas jalan yang memberi gaya reaksi vertikal, namun roda akan

menggelinding apabila diberi gaya horizontal. Hal ini disebabkan karena tumpuan rol hanya memberikan gaya reaksi tegak lurus terhadap bidang tumpuan.



Gambar 4.1 Analogi Jalan sebagai Tumpuan Roda dan Tumpuan Rol Baja Bawah Jembatan

Sumber: <http://civildigital.com/wp-content/uploads/2013/09/Multiple-Roller-Bearing.jpg>

2. Tumpuan Sendi

Tumpuan sendi dapat memberikan reaksi sejajar dan tegak lurus bidang tumpuan, namun tidak dapat memberikan reaksi melawan momen. Tumpuan sendi pada jembatan baja Gambar 4.2 merupakan sendi murni. Tumpuan sendi untuk konstruksi kayu dapat ditemukan, misalnya pada tumpuan sokoguru seperti pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.3a.

Tumpuan sendi lain yang umum diterapkan dalam konstruksi bangunan adalah seperti dalam Gambar 4.4. Dalam detail konstruksi ini, ada beberapa buah baut yang dapat menerima momen lentur, namun hanya diperhitungkan menahan gaya geser horizontal saja, sedangkan momen di posisi tersebut dianggap nol. Detail konstruksi pada Gambar 4.4 lebih ekonomis dibandingkan Gambar 4.2 dan bisa diterapkan pada bangunan yang tidak mengekspos estetika detail konstruksi. Dalam Gambar 4.4 tersebut ditampilkan bangunan yang runtuh, keruntuhan bangunan ini bukan karena konstruksi sendinya yang salah, namun karena pada proses pelaksanaan tidak dipasang *bracing*, padahal diperlukan *bracing* sementara sebelum struktur membentuk kesatuan yang utuh karena struktur didesain sebagai kesatuan yang utuh.

B. Join

Join merupakan pertemuan antara komponen-komponen struktur. Join terdapat pada:

1. pertemuan kolom dengan balok;
2. pertemuan batang-batang pada struktur rangka batang atau rangka ruang;
3. pertemuan pada sambungan balok dengan balok atau kolom dengan kolom;
4. gaya-gaya dari komponen-komponen struktur berkumpul di join dan saling meniadakan dalam keadaan keseimbangan gaya; serta
5. ditinjau dari kinerja terhadap perlawanan gaya, ada tiga macam join struktural, yaitu join rol, sendi, dan kaku.

1. Join Rol

Join rol hanya memberikan gaya reaksi tegak lurus terhadap bidang tumpuan. Aplikasi dari join ini dapat dilihat, antara lain, di join antara kolom dengan balok pada siar gempa.



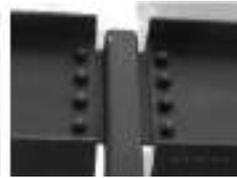
Gambar 4.6 Join pada Siar Gempa

Sumber: Penulis

2. Join Sendi

Join sendi memberikan gaya reaksi tegak lurus dan sejajar bidang tumpuan (dua buah reaksi). Tumpuan sendi secara teoretis tidak bisa melawan momen, namun dalam praktik desain struktur, terdapat:

- sendi murni à tidak melawan momen; dan
- sendi yang bisa menahan momen kecil, tetapi kapasitas ketahanan momennya diabaikan dalam perhitungan; hal ini pada umumnya dipertimbangkan dari segi ekonomis.



Gambar 4.7 Join Sendi yang Tidak Menerima Momen (Dapat Berputar)

Sumber: <http://www.tboake.com/SSEF1/CONNECTIONS/PIN/DSCN-denverairport5683.jpg>

Gambar 4.8 Join Sendi yang Kapasitas Momennya Diabaikan

Sumber: <https://woodarch.files.wordpress.com/2011/08/up-with-steel-030.jpg>

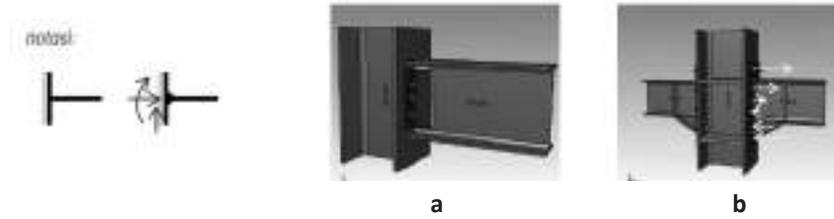
3. Join Kaku

Join kaku memberikan gaya reaksi sejajar dan tegak lurus bidang tumpuan, serta momen. Perbedaan join kaku dengan sendi dapat dilihat dari Gambar 4.9a dan 4.9b. Pada join sendi dalam Gambar 4.9a letak tiga buah baut berkumpul di tengah tinggi web balok dan flens balok tidak menempel pada flens kolom. Pada pertemuan antara flens balok dengan flens kolom tersebut, tidak ada baut yang menahan gaya tarik, dan pada sisi tekan gaya tekan hanya ditahan oleh baut sehingga tidak memberikan kapasitas tekan yang optimal. Sementara itu, join kaku pada Gambar 4.9b di ujung balok diberi *end plate* yang dilas penuh pada flens dan web balok. *End plate* tersebut dimensinya lebih besar daripada dimensi h balok, sehingga dengan konfigurasi tersebut baut di sisi tarik dapat menahan gaya tarik dengan baik, dan di sisi tekan pertemuan bidang muka *end plate* balok yang menempel pada flens kolom memberi perlawanan tekan yang baik.

Join kaku kolom-balok beton bertulang *in situ* pada proses konstruksinya dicor bersamaan dengan rangkaian tulangan sehingga membentuk kesatuan yang monolit, di mana tulangnya didesain untuk menahan gaya tarik yang terjadi karena momen.

Di samping material kolom dan balok yang seragam ada material kolom dan balok yang tidak seragam, misalnya penggunaan kolom beton dengan balok kayu, atau kolom baja dengan balok kayu seperti pada Gambar 4.11, kolom baja dikombinasikan dengan balok kayu, didesain menggunakan join sendi.

Perbedaan material yang digunakan berpengaruh pada desain detail join dan berpeluang ditampilkan secara estetis.



Gambar 4.9 Join Sendi (a) dan Kaku (b) pada Konstruksi Baja

Sumber: <http://www.gsi-eng.eu/images/stories/image/nees%20eikones%20ec%20praxis/2.gif>; <http://www.strutturista.com/wp-content/uploads/2011/09/Rigidezza-collegamenti-4-Onorio-Francesco-Salvatore.gif>



Gambar 4.10 Join Kaku pada Kolom – Balok Beton Bertulang

Sumber: <https://abelizehomeforum.files.wordpress.com/2013/05/20130531-054100.jpg>



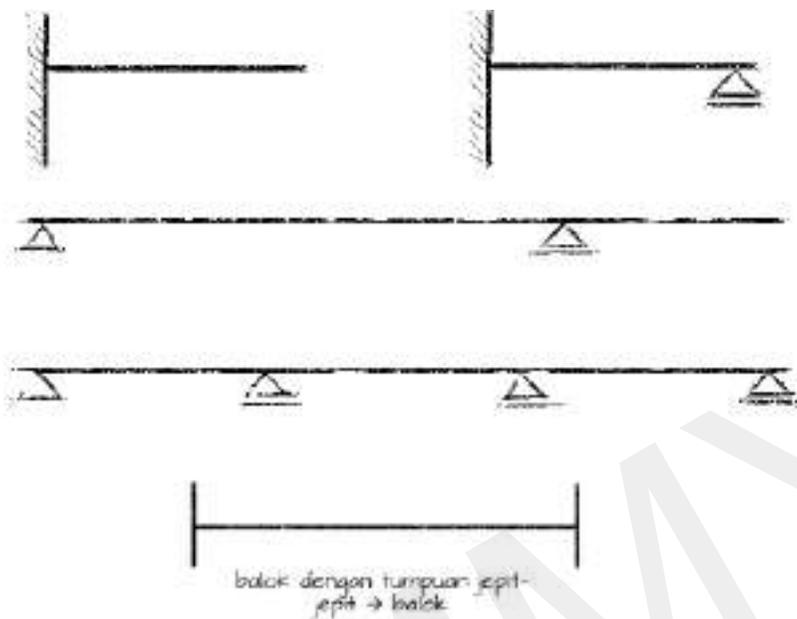
Gambar 4.11 Join Sendi pada Kolom Baja – Balok Kayu

Sumber: <https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/236x/06/c6/f7/06c6f7b6dd39b0ff229faea9b5a56ed5.jpg>

BAB 5

BALOK SEDERHANA

Balok adalah komponen struktur yang terbentang horizontal atau membentuk sudut tertentu ($< 90^\circ$) terhadap garis horizontal. Fungsi balok adalah untuk memikul lantai atau atap. Balok terbentang di antara tumpuan, yang dapat berupa kolom, fondasi, atau dinding pemikul beban. Jumlah dan kondisi tumpuan tergantung dari desain bangunannya, misalnya balok ditumpu 2 buah tumpuan jepit, ditumpu 3 buah tumpuan sendi, atau ditumpu 1 buah sendi dan 3 buah rol.



Gambar 5.1 Macam-macam Balok

Sumber: Penulis

Beban berat sendiri maupun beban hidup membebani balok, sehingga pada balok bekerja momen lentur. Akibatnya, balok akan mengalami deformasi lentur. Bentuk deformasi lentur balok berkaitan dengan arah putaran momen, yang dipengaruhi oleh pola tumpuan (jumlah, posisi, dan karakteristik tumpuan: rol, sendi, jepit), serta pola pembebanannya. Cakupan pembahasan pada buku ini adalah balok sederhana, yaitu balok dengan dua buah tumpuan, di satu sisi tumpuan sendi dan di sisi lain tumpuan rol, serta balok kantilever yang masing-masing dapat diselesaikan dengan statika statis tertentu. Beban yang membebani balok sederhana dan balok kantilever dapat berupa beban terpusat, beban merata, maupun kombinasi.

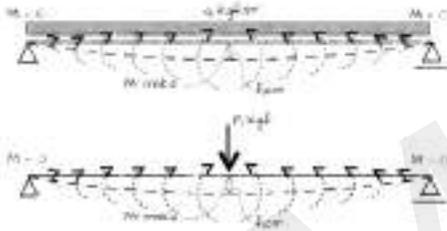
Deformasi lentur balok sederhana menghasilkan momen positif dan diberikan tanda momen + (positif), sedangkan deformasi lentur balok kantilever menghasilkan momen negatif, diberikan tanda momen - (negatif).



Gambar 5.2 Deformasi pada Balok dan Balok Kantilever

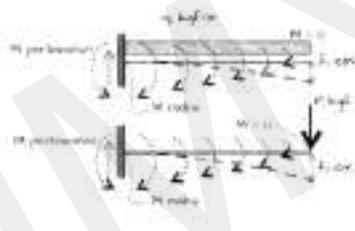
Sumber: Penulis

Konfigurasi balok yang ditumpu pada titik-titik tertentu dapat membentuk deformasi lentur yang berbeda-beda, sesuai dengan jenis tumpuan dan pembebanannya.



Gambar 5.3 Karakteristik Balok Sederhana

Sumber: Penulis



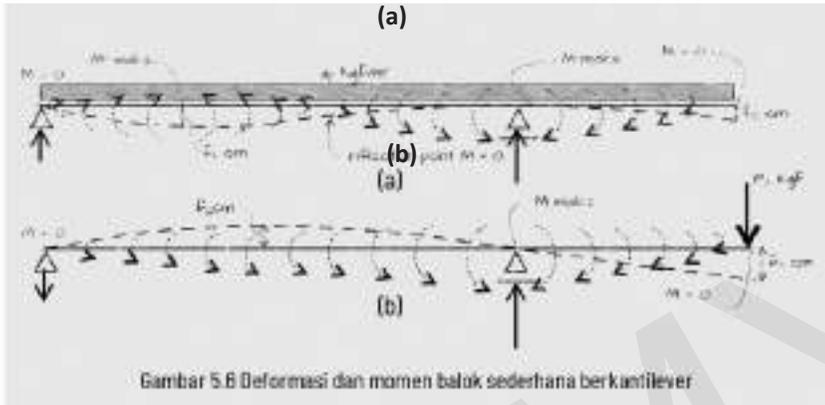
Gambar 5.4 Karakteristik Balok Kantilever

Sumber: Penulis

Balok sederhana yang terbentang antara dua titik dengan tumpuan sendi dan rol pada Gambar 5.4, baik yang diberi beban merata sebesar (q_1) kgf/m, maupun beban terpusat sebesar (P_1) kgf di tengah bentang balok, akan memiliki momen maksimum di tengah bentang, yang bersifat positif ($M_{+ \text{maksimal}}$). Pada titik tersebut, terjadi deformasi maksimum, yang dinyatakan dalam (f) cm. Momen terjadi pada tumpuan adalah 0. Hal yang berbeda dari kedua jenis pembebanan ini, akan dijelaskan lebih lanjut dalam pembahasan statika, di bab selanjutnya.

Berbeda dengan balok sederhana, balok kantilever yang diberikan beban merata sepanjang batang sebesar (q_2) kgf/m, atau beban terpusat sebesar (P_1) kgf akan memiliki momen = 0 di ujung batang kantilevernya, walaupun deformasi terbesar (f_2) atau (f_3) cm terjadi di titik tersebut. Momen negatif maksimal terjadi di tumpuan.

Posisi tumpuan dan pola pembebanan memengaruhi pola deformasi, dan distribusi momen pada seluruh panjang balok seperti contoh pada Gambar 5.5



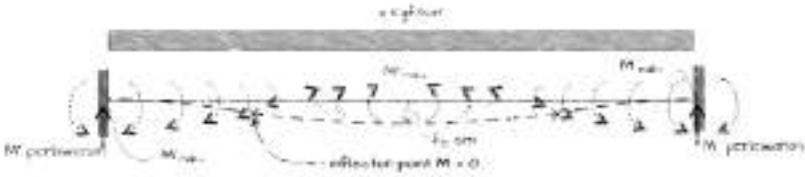
Gambar 5.5 Deformasi dan Momen Balok Sederhana Berkantilever

Sumber: Penulis

Pada Gambar 5.5 kondisi (a), yakni kondisi balok dengan pembebanan merata sebesar (q) kgf/m, pada sisi kanan yang merupakan kantilever, deformasi maksimal terjadi di ujung kantilever dan momen negatif maksimal kantilever terjadi di titik tumpuan rol. Oleh karena rol tidak bisa menahan momen, maka harus ada keseimbangan momen balok di titik tumpuan rol tersebut, yaitu momen negatif kantilever di kanan tumpuan rol diimbangi oleh momen negatif balok di kiri tumpuan rol. Pada bagian balok di sebelah kiri, beban merata menyebabkan bekerjanya momen positif, namun karena pada balok tersebut juga bekerja momen negatif di sebelah kiri tumpuan rol, maka akan terjadi peralihan deformasi dan momen positif ke deformasi serta momen negatif. Titik peralihannya disebut titik belok (*inflection point*). Di *inflection point*, besarnya momen adalah nol, momen positif maksimal terjadi di antara *inflection point* dan tumpuan sendi, sedangkan momen negatif maksimal terjadi di titik tumpuan rol.

Hal yang berbeda akan terjadi pada pembebanan terpusat, seperti pada Gambar 5.5 (b) di mana beban hanya diletakkan di ujung kanan saja, maka momen negatif yang terjadi pada kantilever di titik tumpuan rol tidak ada yang mengimbangi di sebelah kirinya. Hal ini menyebabkan di titik tumpuan tersebut balok berputar mengikuti perputaran

kantilevernya. Oleh karena di ujung kiri ada tumpuan sendi, maka balok mengalami deformasi dan momen negatif seperti pada Gambar 5.6 (b). Dalam hal ini, tumpuan sendi di ujung kiri balok akan memberikan reaksi negatif (gaya reaksi ke arah bawah).



Gambar 5.6 Balok Sederhana dengan Tumpuan Jepit dan Beban Merata

Sumber: Penulis

Pada balok dengan tumpuan jepit sempurna seperti gambar di atas:

$$M_{-maks} > M_{+maks}$$

$$M_{-maks} = 2 M_{+maks} = 1/12 qL^2$$

$$M_{+maks} = 1/24 qL^2$$

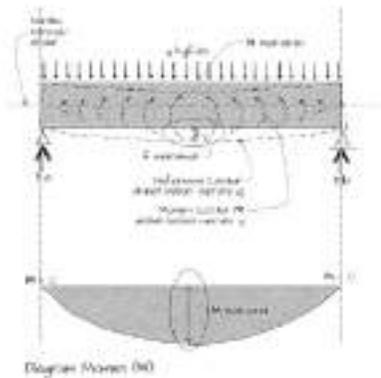
Bila jepit semakin tidak kaku, momen negatif makin kecil. Hal inilah dapat sengaja didesain oleh perancang struktur (teknik sipil), dengan mempertimbangkan optimasi desain, dan tuntunan arsitektural.

A. Karakteristik Balok Sederhana

Balok sederhana adalah balok yang ditumpu dengan sendi di satu ujung dan tumpuan rol di ujung yang lain. Berat sendiri balok maupun beban hidup bekerja sebagai gaya lintang (tegak lurus balok) yang mengakibatkan deformasi lentur (f). Deformasi lentur tersebut mengakibatkan pada balok bekerja momen lentur dan gaya geser lentur. Deformasi lentur maksimal (f_{maks}) pada balok sederhana terjadi di tengah bentang.

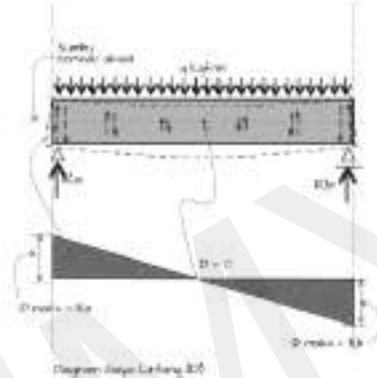
Seperti dijelaskan sebelumnya, momen lentur pada balok sederhana bekerja di seluruh panjang balok dengan besar yang tidak seragam, yaitu di tengah bentang besarnya momen (M) adalah maksimal, makin mengarah ke tumpuan besarnya momen mengecil sampai di tumpuan besarnya momen adalah 0. Sementara itu, gaya geser lentur (D) juga bekerja di seluruh panjang balok dengan besar yang tidak seragam, namun berbalikan dengan momen lentur, justru di tengah bentang

besarnya gaya geser adalah nol dan semakin mengarah ke tumpuan semakin besar sampai di tumpuan besarnya gaya geser adalah maksimal (D_{maks}) yang besarnya sama dengan gaya reaksi tumpuan vertikal. Jadi, pada posisi momen maksimal (M_{maks}) di tengah bentang balok, besarnya gaya geser adalah 0 ($D_{min} = 0$), dan defomasinya maksimal (f_{maks}).



Gambar 5.7 Momen dan Diagram Momen pada Balok Sederhana

Sumber: Penulis

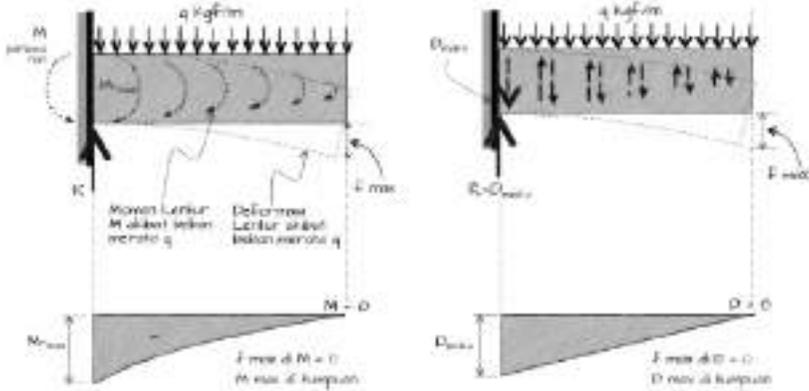


Gambar 5.8 Gaya Geser dan Diagram Gaya Lintang/Gaya Geser pada Balok Sederhana

Sumber: Penulis

B. Karakteristik Balok Kantilever

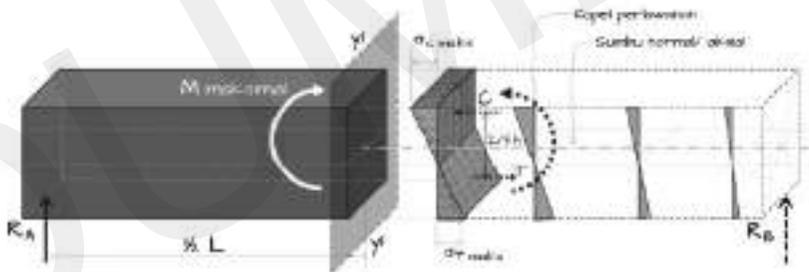
Akibat berat sendiri dan beban hidup, pada balok kantilever terjadi momen lentur (M) dan defomasi (f), serta gaya geser (D). Momen lentur maksimal (M_{maks}) terjadi di tumpuan, sedangkan defomasi maksimum (f_{maks}) terjadi di ujung balok kantilever. Besarnya gaya geser (D) di ujung kantilever adalah 0, sedangkan gaya geser maksimal (D_{maks}) terjadi di tumpuan yang besarnya adalah sebesar gaya reaksi tumpuan. Jadi, pada posisi momen maksimal (M_{maks}) di tumpuan, besarnya gaya geser (D_{maks}) adalah maksimal dan defomasinya adalah 0 (f_{min}), sedangkan f_{maks} terjadi di ujung balok kantilever.



Gambar 5.9 Balok Kantilever dengan Tumpuan Jepit dan Beban Merata
 Sumber: Penulis

C. Tegangan pada Balok Sederhana

Momen lentur mengakibatkan pada setiap penampang transversal balok sederhana, bekerja tegangan lentur (σ_{lt}), yang terdiri dari pasangan tegangan tekan (σ_c) dan tegangan tarik (σ_T).



Gambar 5.10 Potongan Melintang $y_1 - y_1$ Menunjukkan Tegangan Lentur yang Terjadi
 Sumber: Penulis

Gambar 5.10 menjelaskan tentang tegangan lentur (σ_{lt}) pada satu balok sederhana yang dipotong melintang di tengah bentangnya, pada penampang $y_1 - y_1$. Pada bagian atas sumbu normal, terjadi tegangan tekan (σ_c), sedangkan pada bagian balok di bawah sumbu normal, terjadi tegangan tarik (σ_T), dan di sumbu aksial besarnya tegangan

lentur adalah 0. Tegangan lentur maksimal (σ_c dan σ_t) berada di serat paling tepi atas dan bawah.

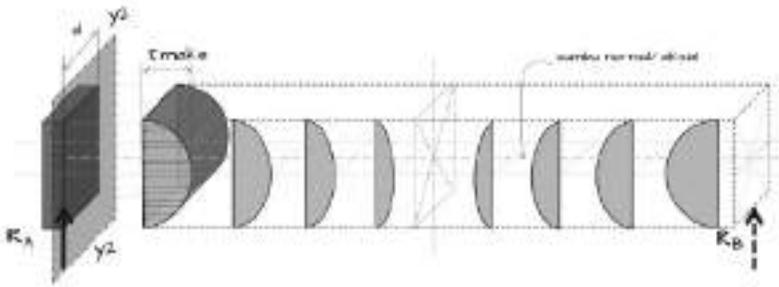
Besarnya gaya resultan tegangan tekan yang terjadi adalah sebesar luas penampang segitiga tekan ($\frac{1}{2} \times \frac{1}{2}$ tinggi balok $\times \sigma_{c \text{ maks}}$), dikalikan lebar balok (d), sedangkan besarnya resultan tegangan tarik yang terjadi, adalah sebesar luas penampang segitiga tarik ($\frac{1}{2} \times \frac{1}{2}$ tinggi balok $\times \sigma_{t \text{ maks}}$), dikalikan lebar balok (d). Gaya resultan dari tegangan tekan dinyatakan dengan C , sedangkan untuk tegangan tarik dinyatakan dengan T . Jarak C terhadap T adalah $2/3$ dari tinggi balok (h), mengakibatkan timbulnya kopel perlawanan, yang melawan momen maksimal yang terjadi di tengah bentang.

Ditinjau dari penampang longitudinal, besarnya tegangan lentur tersebut mengikuti besarnya momen yang bekerja di setiap titik, yaitu di tengah bentang pada posisi momen lentur maksimal besarnya tegangan lentur juga maksimal, dan makin ke arah tumpuan besarnya tegangan lentur makin kecil mengikuti besarnya momen lentur, dan sampai di tumpuan besarnya tegangan lentur adalah 0.

Tegangan lentur maksimum yang terjadi pada sebuah balok sebanding dengan momen maksimum dibagi momen tahanan yang dimiliki balok tersebut. Hal ini dinyatakan dalam persamaan berikut.

$\sigma_{\text{maks}} = M_{\text{maks}} / W_x$	$\sigma_{c \text{ maks}} = \sigma_{T \text{ maks}}$ σ_c = tegangan lentur tekan (<i>compression</i>) σ_t = tegangan lentur tarik (<i>tension</i>) M_{maks} = momen maksimum W_x = momen tahanan sumbu x (sumbu kuat)
--	---

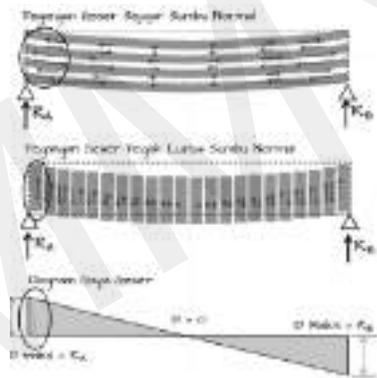
Momen lentur juga mengakibatkan pada balok sederhana bekerja tegangan geser lentur (τ) yang mempunyai komponen tegangan sejajar dan tegak lurus sumbu normal. Di sumbu normal besarnya tegangan geser lentur adalah maksimal (τ_{maks}), sedangkan di serat tepi atas dan bawah besarnya tegangan geser (τ_{min}) lentur adalah 0 seperti pada Gambar 5.12. Ditinjau dari penampang longitudinal, besarnya tegangan geser lentur tersebut mengikuti besarnya gaya geser yang bekerja di setiap titik, yaitu di tengah bentang besarnya tegangan geser lentur adalah 0 dan makin ke arah tumpuan besarnya tegangan geser lentur makin besar, sampai di tumpuan besarnya tegangan geser lentur adalah maksimal.



Gambar 5.11 Potongan Melintang $y_2 - y_2$ Menunjukkan Tegangan Geser Lentur yang Terjadi

Sumber: Penulis

Adanya komponen tegangan geser lentur sejajar dan tegak lurus sumbu aksial dapat dijelaskan dengan Gambar 5.12. Diandaikan balok terdiri dari tumpukan lapisan-lapis papan sejajar sumbu aksial (Gambar 5.12 atas). Apabila balok mengalami lenturan, bidang temu antarpapan saling bergeser; dan apabila bidang temu tersebut saling merekat, akan timbul tegangan geser yang melawan kecenderungan bergeser tersebut. Penjelasan yang sama juga berlaku untuk komponen tegangan geser lentur tegak lurus sumbu aksial (Gambar 5.12 tengah).



Gambar 5.12 Tegangan Geser pada Balok Sederhana

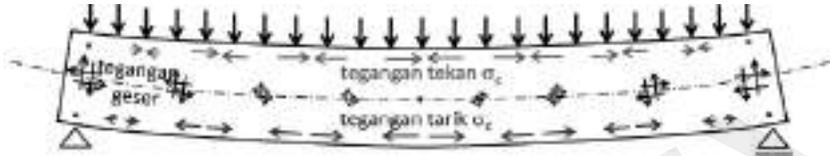
Sumber: Penulis

Besarnya tegangan geser lentur maksimal dinyatakan dalam persamaan berikut.

$$\tau_{\text{maksimal}} = (D.S)/(d.I_x)$$

σ = tegangan geser
 D = gaya lintang
 S = statis momen penampang melintang balok
 d = lebar balok
 I_x = momen inersia penampang melintang balok sumbu x

Tegangan lentur dan tegangan geser lentur pada balok sederhana dapat dirangkum dalam peta tegangan lentur dan tegangan geser lentur pada penampang longitudinal sebagai berikut.

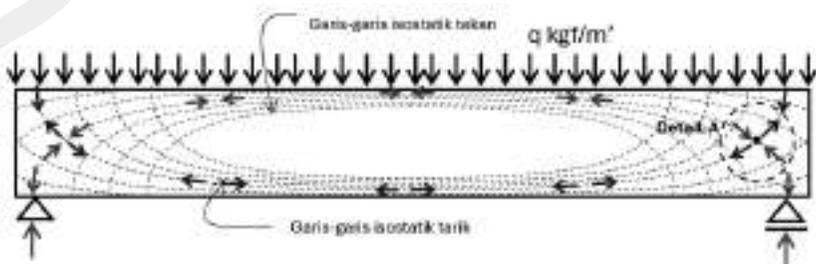


Gambar 5.13 Peta Tegangan Lentur dan Tegangan Geser Lentur pada Balok Sederhana

Sumber: Penulis

D. Garis Isostatik

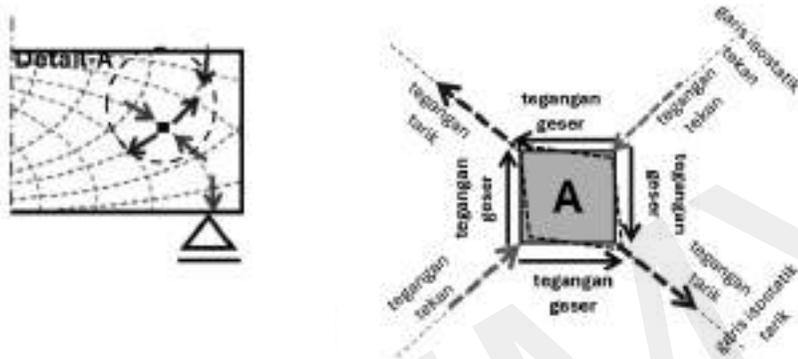
Tegangan lentur dan tegangan geser balok sederhana dan balok kantilever dapat dipelajari juga dari garis isostatiknya ketika menerima beban gravitasi (berat sendiri dan beban hidup). Ketika balok memikul beban gravitasi, di dalam balok tersebut bekerja tegangan-tegangan utama yang bekerja mengikuti garis-garis lintasan tertentu. Garis lintasan tersebut disebut garis isostatik. Di sepanjang garis-garis isostatik bekerja tegangan aksial tekan (berbentuk lengkung busur) dan tegangan aksial tarik (berbentuk lengkung kabel). Ketika menuju ke tumpuan, garis isostatik tekan dan tarik berpotongan saling tegak lurus. Di luar arah garis isostatik tersebut bekerja tegangan geser.



Gambar 5.14 Garis Isostatik Balok Sederhana

Sumber: Penulis

Tegangan tekan dan tegangan tarik berada di garis isostatik paling tepi menuju ke tumpuan. Garis tegangan tekan dan tarik yang tidak jatuh di tumpuan mengakibatkan terjadinya momen di dalam balok. Pada titik pertemuan garis tegangan tarik dan tekan terjadi tegangan geser, sejajar, dan tegak lurus sumbu aksial.



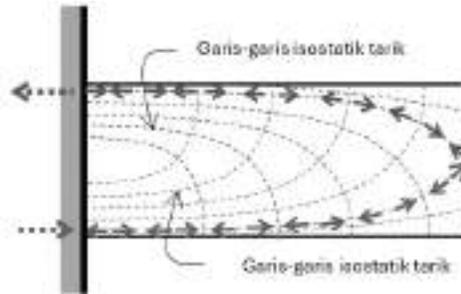
Gambar 5.15 Tegangan-tegangan di Titik A pada Balok Sederhana

Sumber: Penulis

Gambar 5.15 kanan merupakan perbesaran dari titik temu garis isostatik tekan dan garis isostatik tarik di titik A. Kotak kecil A ketika menerima tegangan tarik dan tegangan tekan cenderung berubah bentuk menjadi belah ketupat sehingga memicu terjadi gaya geser (lihat Gambar 5.15 kanan). Tegangan geser terjadi di seluruh panjang badan balok di mana ada persilangan garis isostatik tarik dan tekan. Di tengah bentang balok, garis isostatik tarik dan tekan posisinya sejajar sumbu aksial dan tidak saling bersilangan, maka di tengah bentang tidak ada tegangan geser, dan pada kenyataannya pada balok sederhana besarnya gaya lintang di tengah bentang adalah 0.

Bila ada perubahan kondisi pada balok, akan terjadi perubahan bentuk garis isostatik, misalnya ada lubang baut pada balok. Garis-garis isostatik pada sistem balok yang lain pun akan berbeda “konfigurasinya” dengan garis isostatik balok sederhana.

Posisi garis isostatik pada balok kantilever merupakan kebalikan dari balok sederhana. Di tumpuan, tegangan tarik dan tekan pada garis isostatik yang paling tepi adalah yang paling besar.

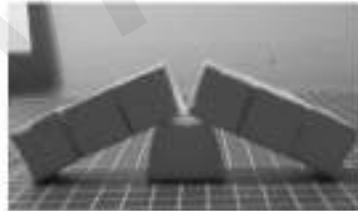


Gambar 5.16 Garis Isostatik pada Balok Kantilever

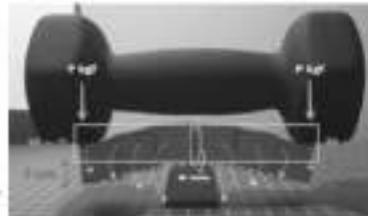
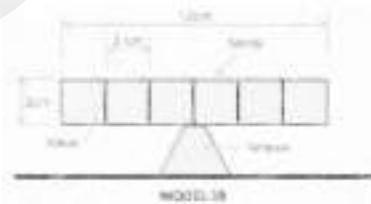
Sumber: Penulis

E. Model Eksperimen Balok Sederhana

Untuk mempelajari secara nyata dan sederhana tentang tegangan tarik dan tekan yang terjadi pada sebuah balok sederhana, dapat dilakukan percobaan pemodelan. Model yang mewakili balok sederhana dibuat dari bahan karton yang dibentuk kubus, diisi dengan pemberat seperti pasir, yang kemudian disusun seperti balok sederhana dengan perekat selotip. Dalam percobaan ini, peletakan selotip dan tumpuan akan dipindah-pindah, untuk mendapatkan perilaku balok yang berbeda-beda.



Model 1-A



Model 1-B

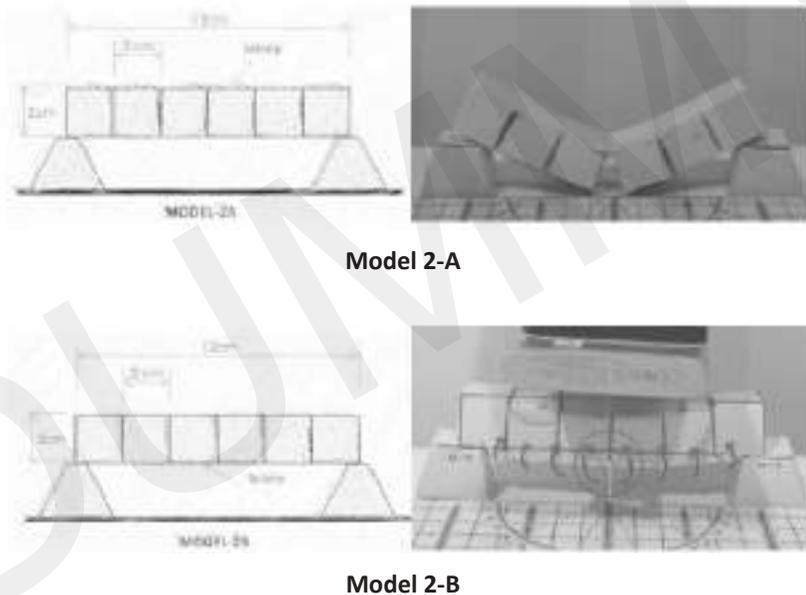
Gambar 5.17 Model 1 Tumpuan di Tengah Balok, Selotip di Sisi Atas dan Bawah Balok

Sumber: Penulis dan Percobaan Mahasiswa

Pada percobaan Model 1-A, tumpuan terletak di tengah bentang balok. Hal ini mengakibatkan pada sisi kanan dan kiri tumpuan, balok akan bekerja sebagai kantilever. Selotip yang menghubungkan semua blok kubus diletakkan di sisi bawah balok. Akibatnya, saat balok diletakkan di tumpuan, balok langsung runtuh.

Pada percobaan Model 1-B, posisi selotip diganti menjadi di atas. Balok dapat mempertahankan posisinya serta memikul beban. Deformasi maksimal terjadi di ujung balok kantilever (f), sedangkan gaya geser dan momen maksimum terjadi di area tumpuan.

Pada percobaan dua, kondisi tumpuan ada di tepi rangkaian kubus yang membentuk balok. Pada kondisi Model 2-A, selotip berada di atas balok, sedang pada Model 2-B di sisi bawah balok.



Gambar 5.18 Model 2 Tumpuan di Tengah Balok, Selotip di Sisi Atas dan Bawah Balok

Sumber: Penulis dan Percobaan Mahasiswa

Terlihat pada kondisi Model 2-A, balok mengalami kegagalan dan tidak dapat terbentang, sedang pada Model 2-B, balok dapat terbentang dan menahan beban.

Dari percobaan ini, kita dapat memahami bahwa selotip mewakili material penahan tarik, sedang kubus menahan tekan. Pada kondisi 1, tegangan tarik ada di bagian atas balok, sehingga posisi selotip yang dapat membuat balok terbentang dan menahan beban adalah di sisi atas, seperti diagram tegangan di balok kantilever. Hal yang sama terjadi pada kondisi 2, yang menyerupai balok sederhana di mana tegangan tarik bekerja di bawah, sehingga posisi selotip yang sesuai adalah di sisi bawah.

Kesimpulan

Bentuk geometri balok sederhana (garis lurus) tidak sama dengan geometri garis lintasan gaya utama/garis funikular untuk beban gravitasi merata. Struktur jenis ini adalah struktur *non form-active*, karena bekerja momen lentur dan gaya geser lentur. Perilaku gaya di dalam struktur *non form-active* bersifat kompleks, karena di dalamnya bekerja kombinasi tegangan lentur dan tegangan geser, serta tegangan aksial apabila gaya bekerja membentuk sudut $< 90^\circ$ terhadap sumbu aksial balok secara simultan.

BAB 6

STATIKA BALOK SEDERHANA DAN KANTILEVER

Balok sederhana dan balok kantilever termasuk struktur yang menerima momen, sehingga masuk dalam kelompok struktur *non form-active*. Selain balok sederhana dan balok kantilever, terdapat pula elemen struktural lain yang bersifat *non form-active*, misalnya kolom kantilever, rangka pemikul momen atau *moment resistant frame* (ada pula yang menyebut rangka kaku atau portal kaku), dinding geser (*shear wall*), dinding penahan (*retaining wall*), plat datar, serta balok rangka batang.

Perhitungan struktur sendiri terbagi dalam dua tahap. Tahap *pertama* adalah analisis struktur. Analisis struktur adalah tahapan yang bertujuan untuk menghitung besarnya momen, gaya geser, dan gaya aksial di dalam struktur ketika menerima beban. Analisis struktur dapat dipecahkan dengan menggunakan teori statika dan dinamika. Pembahasan dalam buku ini terbatas pada teori statika saja.

Setelah analisis struktur telah dilakukan, tahapan selanjutnya adalah desain penampang. Langkah ini bertujuan untuk menghitung atau mengontrol dimensi penampang akibat momen, gaya lintang, dan gaya aksial, yang dapat dipecahkan menggunakan teori kekuatan serta kekakuan struktur (serta daktilitas, namun tidak dibahas pada buku ini).

Untuk mengontrol kekuatan dan kekakuan dari suatu penampang balok, akan membutuhkan teori tentang properti mekanik, yaitu tegangan (σ) dan regangan (ε) material; serta properti penampang komponen struktur, yaitu momen inersia (I), momen tahanan (W), statis momen (S), serta luas penampang (A).

Statika adalah bagian dari ilmu mekanika yang mempelajari keseimbangan. Selain statika, ilmu mekanika juga terdiri dari kinematika (ilmu tentang gerakan) dan dinamika (ilmu tentang penyebab gerakan). Seperti tertera pada judul bab, fokus pembahasan dalam buku ini adalah tentang statika pada balok sederhana dan kantilever.

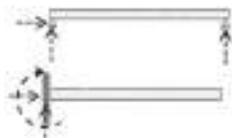
Statika dapat dipecahkan dengan metode analitis, yakni dengan menggunakan perhitungan, serta dengan metode grafis dengan gambar (Kwantes J., 1984). Statika dalam buku ini menggunakan metode analitis dalam pembahasannya.

Seperti telah disebutkan sebelumnya, statika adalah ilmu tentang keseimbangan, maka prinsip statika adalah bahwa di setiap titik, komponen-komponen dan join-join struktur harus terjadi keseimbangan. Keseimbangan ini dinyatakan dalam penjumlahan gaya total di suatu titik yang bernilai 0, baik penjumlahan gaya vertikal (ΣV), horizontal (ΣH), maupun momen (ΣM).

$$\Sigma V = 0; \Sigma H = 0; \Sigma M = 0$$

Penyelesaian problem statika secara analitis tidak selalu menggunakan ketiga persamaan tersebut secara sekaligus, misalnya pada balok sederhana yang diberi beban vertikal saja.

Lebih lanjut, ilmu statika membagi struktur menjadi struktur statis tertentu, dan struktur statis tak tentu. Pada struktur statis tertentu, besarnya gaya reaksi-reaksi tumpuan dapat diselesaikan dengan menggunakan tiga persamaan kesetimbangan: $\Sigma V = 0$, $\Sigma H = 0$, $\Sigma M = 0$, karena jumlah reaksi tumpuan (sebagai bilangan yang tidak diketahui) tidak lebih dari tiga buah.



Gambar 6.1 Struktur Statis Tertentu

Sumber: Penulis

Balok kantilever dengan tumpuan jepit dapat menahan tiga gaya, yakni gaya vertikal, gaya horizontal, dan momen. Balok sederhana, dengan tumpuan sendi dan rol, dapat menahan gaya vertikal di kedua titik tumpuannya, serta gaya horizontal di tumpuan sendi. Maka, pada kedua struktur ini berlaku statika statis tertentu, memiliki tiga reaksi yang perlu dihitung, yang dapat dipecahkan lewat ketiga persamaan kesetimbangan.

Pada struktur statis tak tentu, sebaliknya, besarnya gaya reaksi-reaksi tumpuan, tidak dapat dipecahkan dengan menggunakan tiga persamaan kesetimbangan: $\Sigma V = 0$, $\Sigma H = 0$, $\Sigma M = 0$, karena jumlah reaksi tumpuan (sebagai bilangan tak diketahui) lebih dari tiga buah.

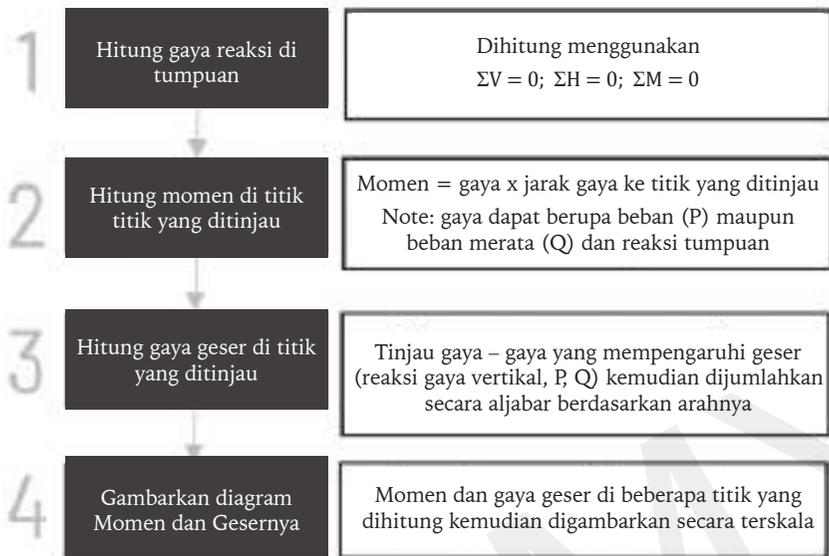


Gambar 6.2 Struktur Statis Tak Tentu

Sumber: Penulis

Pada kondisi balok yang memiliki tumpuan jepit di kedua sisinya, masing-masing tumpuan dapat menahan gaya vertikal, horizontal, dan momen. Ada enam buah reaksi yang harus ditemukan dalam analisis statika balok jepit-jepit. Maka, kondisi ini tergolong statis tak tentu, yang di luar pembahasan buku ini.

Secara garis besar, ada empat langkah yang harus dilakukan untuk melakukan analisis statika statis tertentu, yang tergambar dalam skema di bawah.



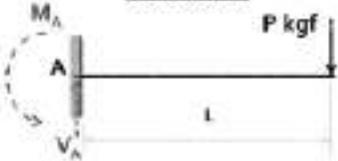
Gambar 6.3 Langkah Pengerjaan Problem Statika Tertentu

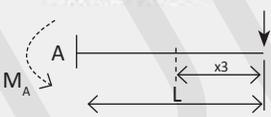
Sumber: Penulis

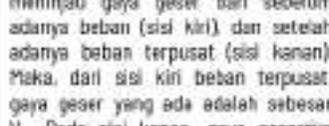
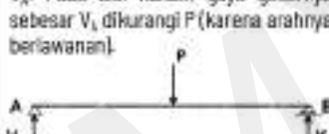
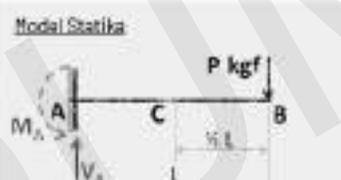
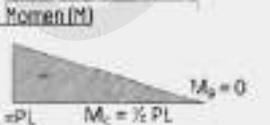
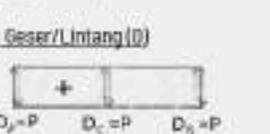
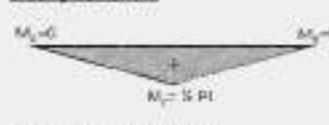
A. Beban Terpusat

Terdapat dua jenis pembebanan, yakni beban terpusat pada satu titik tertentu, serta beban merata, yakni beban yang menduduki area tertentu. Pengaruh beban terpusat pada analisis statikanya dapat terlihat pada tabel berikut.

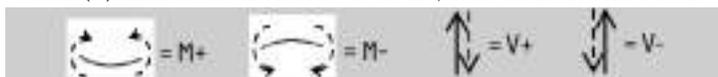
Tabel 6.1 Beban Terpusat pada Kantilever dan Balok Sederhana

Balok Kantilever	Balok Sederhana
<p><u>Ilustrasi pembebanan</u></p> 	<p><u>Ilustrasi pembebanan</u></p> 
<p><u>Model Statika</u></p> 	<p><u>Model Statika</u></p> 
<p><u>Mencari Reaksi Tumpuan</u></p> <p>Pada sumbu vertikal, terdapat satu beban P, yang mengakibatkan gaya reaksi vertikal di tumpuan A. Maka dengan menggunakan persamaan $\Sigma V = 0$, kita dapat menemukan besarnya reaksi vertikal di tumpuan A.</p> $\Sigma V = 0$ $P - V_A = 0$ $V_A = P \text{ (kgf)}$	<p><u>Mencari Reaksi Tumpuan</u></p> <p>Pada sumbu vertikal, terdapat beban P, yang mengakibatkan gaya reaksi vertikal di tumpuan A dan B, sehingga persamaan $\Sigma V = 0$ tidak langsung menghasilkan besar gaya reaksi di titik tumpuan tertentu. Sebaliknya, jika kita memilih ΣM dari satu titik tumpuan, maka akan ditemukan besarnya reaksi vertikal dari titik tumpuan di sisi lainnya, karena reaksi vertikal tsb bekerja sebagai gaya, yang memiliki jarak (lejang momen) dari titik yang kita pilih. Misalkan, titik yang kita pilih adalah B.</p> $\Sigma M_B = 0$ $V_A \cdot L - P \cdot \frac{1}{2}L = 0$ $V_A = \frac{1}{2}P \text{ (kgf)}$ <p>Selanjutnya, menggunakan $\Sigma V = 0$, kita dapat mencari besarnya reaksi vertikal di titik A.</p> $\Sigma V = 0$ $V_A - P + V_B = 0$ $\frac{1}{2}P - P + V_B = 0$ $V_B = \frac{1}{2}P \text{ (kgf)}$

Balok Kantilever	Balok Sederhana
<p><u>Menghitung momen</u></p> <p>Pertama - lama, dicari terlebih dahulu momen di tumpuan. Jika ditilik dari titik tumpuan A, maka gaya yang memiliki jarak dari titik tumpuan adalah beban P, dengan jarak L.</p> $M_A = P \times L$ <p>Titik ujung kantilever tidak mempunyai jarak terhadap P, maka momen di ujung kantilever adalah 0.</p> <p>Jika kita hendak menggambarkan bidang momen (langkah 4), maka besar momen di beberapa titik lain di sepanjang batang juga perlu untuk dicari besarnya. Misalkan, mencari momen di tengah balok kantilever. Kita tinjau segmen balok di sebelah kanan titik tengah. Di sini, besar gaya beban terpusat adalah P, namun jarak dari titik tengah balok adalah $\frac{1}{2}L$.</p> $M_{\text{tengah}} = P \times \frac{1}{2}L$ 	<p><u>Menghitung momen</u></p> <p>Momen di tumpuan adalah 0 (sifat balok sederhana yang ditumpu di dua titik secara sendi dan rol). Sebagai pembuktian, kita akan mencoba menghitung momen di titik A.</p> $M_A = [P \times \frac{1}{2}L] - [V_B \times L]$ $= [\frac{1}{2}PL] - [(\frac{1}{2}P \times L)]$ $= 0$ $M_A = M_B = 0$ <p>Untuk menggambarkan bidang momen, maka dicari besar momen pada tengah bentang balok. Dalam hal ini, peninjauan HANYA dilakukan dari satu sisi, yakni dari gaya - gaya yang berada di sisi kanan titik yang ditinjau, ATAU dari gaya - gaya di sisi kiri. Jika perhitungan benar, besar momen ditinjau dari kanan atau dari kiri, akan menghasilkan angka yang sama, namun salah satunya memberi nilai minus.</p> $M_{\text{tengah-kanan}} = [V_B \times \frac{1}{2}L]$ $= [\frac{1}{2}P \times \frac{1}{2}L]$ $= \frac{1}{4}PL$ $M_{\text{tengah-kiri}} = [V_B \times \frac{1}{2}L]$ $= [\frac{1}{2}P \times \frac{1}{2}L]$ $= \frac{1}{4}PL$
<p><u>Menghitung Gaya Geser</u></p> <p>Untuk menghitung gaya geser, kita harus meninjau batang dari ujung kantilever ke tumpuan, dengan menutup batang dan berjalan mundur.</p> <p>Pada ujung batang, gaya yang bekerja hanyalah beban terpusat, sebesar P. Maka dari itu, besarnya gaya geser di titik ujung kantilever adalah P.</p>	<p><u>Menghitung Gaya Geser</u></p> <p>Untuk menghitung gaya geser, kita meninjau dari tumpuan paling kiri, berjalan mundur ke arah tumpuan di kanan.</p> <p>Pada titik tumpuan A, bekerja gaya reaksi vertikal A, yakni V_A. Maka, pada titik tumpuan A, besarnya gaya geser adalah sebesar V_A. Kemudian kita berjalan mundur ke arah titik B.</p>

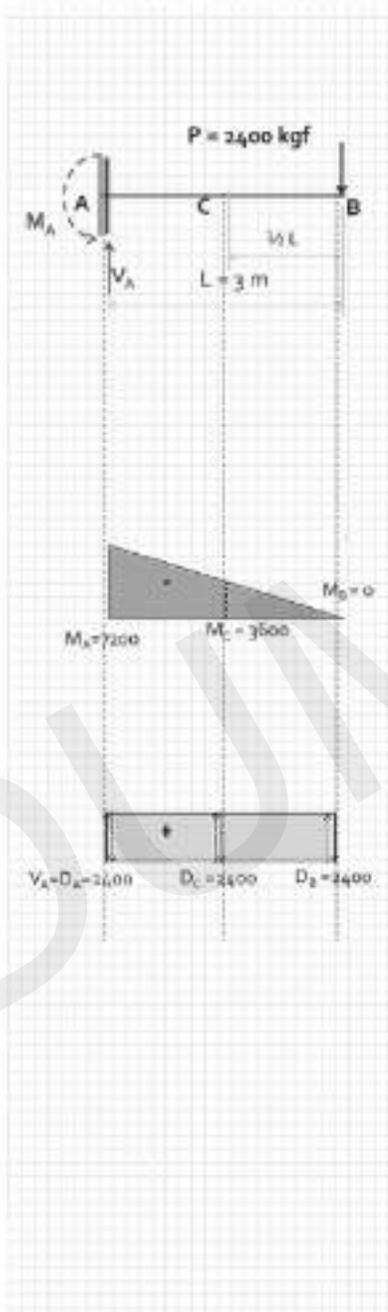
Balok Kantilever	Balok Sederhana
	
<p>Selanjutnya pada tengah kantilever, tidak ada penambahan gaya yang bekerja, maka gaya geser = -P.</p>	<p>Selanjutnya, pada tengah balok, terdapat beban terpusat sebesar P. Saat ada beban terpusat, kita harus meninjau gaya geser dari sebelum adanya beban (sisi kiri) dan setelah adanya beban terpusat (sisi kanan). Maka, dari sisi kiri beban terpusat, gaya geser yang ada adalah sebesar VA. Pada sisi kanan, gaya gesernya sebesar VA dikurangi P (karena arahnya berlawanan).</p>
	
<p>Selanjutnya, dari posisi tumpuan, bekerja gaya reaksi vertikal VA, namun jika ditilik dari ujung kantilever, tidak ada gaya lain yang bekerja, dan besar VA = P.</p>	
<p>Pada titik B terdapat gaya reaksi vertikal VB. Maka dari itu, besar gaya geser di titik B adalah (VA - P). Di sisi kanan tumpuan B sudah tidak terdapat balok, maka tidak ada gaya gesernya.</p>	<p>Pada titik B terdapat gaya reaksi vertikal VB. Maka dari itu, besar gaya geser di titik B adalah (VA - P). Di sisi kanan tumpuan B sudah tidak terdapat balok, maka tidak ada gaya gesernya.</p>
<p>Model Statika</p>  <p>Bidang Momen (M)</p>  <p>$M_A = PL$ $M_C = \frac{1}{2} PL$ $M_B = 0$</p> <p>Bidang Geser/Lintang (D)</p>  <p>$V_A = D_A = -P$ $D_C = P$ $D_B = P$</p>	<p>Model Statika</p>  <p>Bidang Momen (M)</p>  <p>$M_A = 0$ $M_B = 0$ $M_1 = \frac{1}{2} PL$</p> <p>Bidang Geser/Lintang (D)</p>  <p>V_A V_B</p>

Catatan (**): Tanda untuk MENGHITUNG MOMEN, GAYA GESER DI SUATU TITIK:



(Ilustrasi pembebanan terpusat sumber: <https://www.firepotfood.com/blogs/field-notes/to-snowdonia-and-beyond> ; https://share.america.gov/wp-content/uploads/2018/11/AP_18240600121955-1.jpg dan penulis)

Contoh Soal (1) Kantilever + Beban Terpusat



Diketahui:

$$P = 2400 \text{ kgf}$$

$$L = 3 \text{ meter}$$

---[Menghitung Reaksi]-----

Tinjau seluruh panjang:

$$\sum V = 0$$

$$-2400 + V_A = 0$$

$$V_A = 2400 \text{ kgfa}$$

---[Menghitung Momen]-----

Momen di A, C dan B (untuk A dan C tinjau sisi kanan)

$$M_A = -2400 \times 3$$

$$= -7200 \text{ kgf m}$$

$$M_C = -2400 \times 1,5$$

$$= -3600 \text{ kgf m}$$

$$M_B = -2400 \times 0 = 0$$

---[Menghitung Gaya Geser]-----

Gaya geser di A, C dan B (tinjau sisi kanan)

$$D_B = 2400 \text{ kgf}$$

$$D_C = 2400 \text{ kgf}$$

$$V_A = D_A = 2400 \text{ kgf}$$

---[Note]-----



Mengapa pada perhitungan momen ada (-) ?

Momen yang menghasilkan lenturan cembung ke atas atau arah panah ke bawah (lihat catatan tanda di hal.64), seperti pada balok kantilever, adalah momen negatif, maka dalam perhitungan ditambahkan (-)

Contoh Soal (2) Balok Sederhana + Beban Terpusat

Diketahui:

$$P = 12.000 \text{ kgf}$$

$$L = 4 \text{ meter}$$

---[Menghitung Reaksi]-----

Tinjau seluruh panjang:

$$\sum M_B = 0$$

$$(V_A \cdot 4) - (12000 \cdot 2) = 0$$

$$V_A = 6000 \text{ kgf}$$

$$\sum V = 0$$

$$V_A - P + V_B = 0$$

$$6000 - 12000 + V_B = 0$$

$$V_B = 6000 \text{ kgf}$$

---[Menghitung Momen]-----

Momen dihitung dengan meninjau sisi kiri balok.

$$M_A = (V_B \cdot x_4) - (P \cdot x_2) \\ = (6000 \cdot 4) - (12000 \cdot 2) = 0 \text{ kgf m}$$

$$M_C = V_A \cdot x_2 \\ = 6000 \cdot 2 \\ = 12.000 \text{ kgf m}$$

$$M_D = V_A \cdot x_1 = 6000 \text{ kgf m}$$

$$M_E = (V_A \cdot x_3) - (P \cdot x_1) \\ = (6000 \cdot 3) - (12000 \cdot 1) = 6000 \text{ kgf m}$$

$$M_B = (V_A \cdot x_4) - (P \cdot x_2) \\ = (6000 \cdot 4) - (12000 \cdot 2) = 0 \text{ kgf m}$$

---[Menghitung Gaya Geser]-----

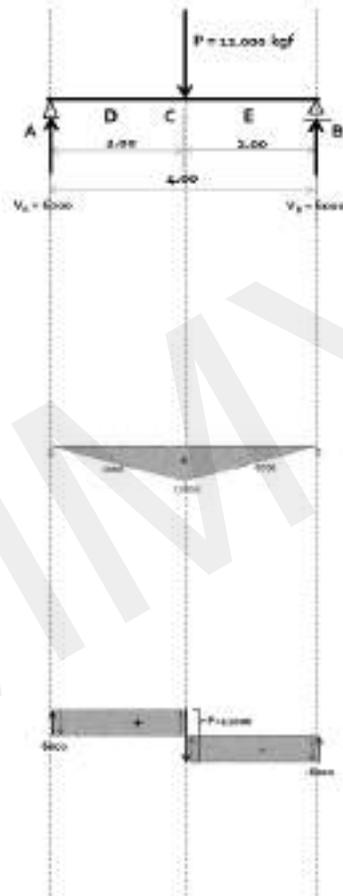
Beban terpusat ada di titik C, maka :

$$D_A \text{ (di kanan A)} = V_A = 6000 \text{ kgf}$$

$$D_C \text{ (di sisi kiri)} = V_A = 6000 \text{ kgf}$$

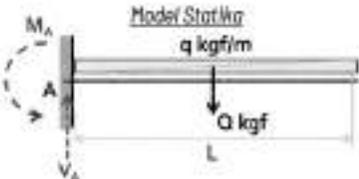
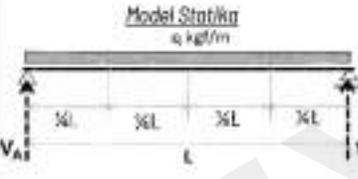
$$D_C \text{ (di sisi kanan)} = V_A - P = -6000 \text{ kgf}$$

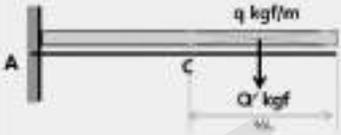
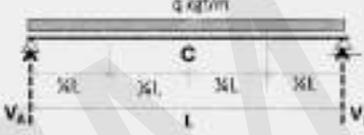
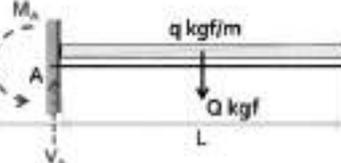
$$D_B \text{ (di kiri B)} = V_A - P = -6000 \text{ kgf}$$



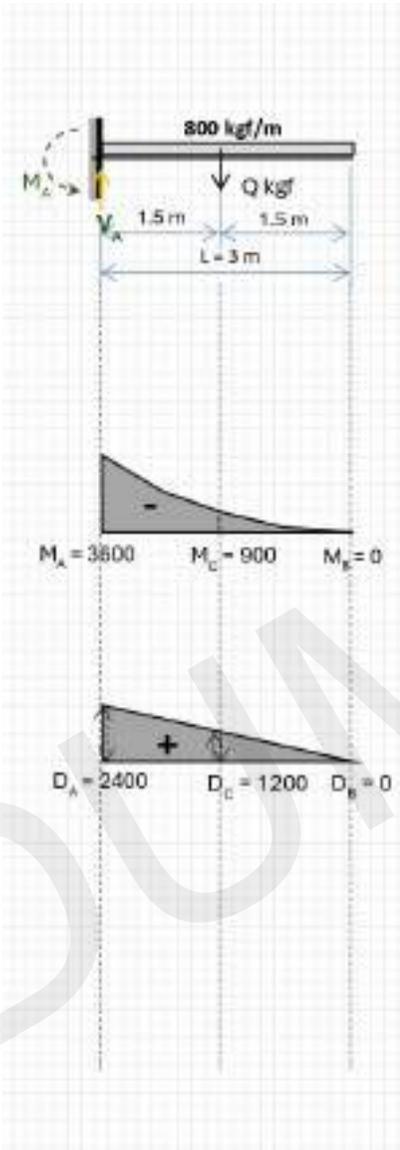
B. Beban Merata

Beban merata dinyatakan dalam q , yakni beban (kgf) per satuan panjang (m atau cm). Gaya resultan beban merata (Q) merupakan perkalian antara berat beban merata (q) dengan panjang beban yang ditinjau (l).

Balok Kantilever	Balok Sederhana
<p><u>Ilustrasi pembebanan</u></p> 	<p><u>Ilustrasi pembebanan</u></p> 
<p><u>Model Statik</u> q kgf/m</p> 	<p><u>Model Statik</u> q kgf/m</p> 
<p><u>Mencari Reaksi Tumpuan</u></p> <p>Pertama - tama, kita harus mencari gaya resultan beban merata total (Q)</p> $Q = q \times L \text{ kgf}$ <p>Sama seperti langkah pada beban terpusat, dengan menggunakan persamaan $\Sigma V = 0$, kita dapat menemukan besarnya gaya reaksi vertikal di tumpuan A.</p> $\Sigma V = 0$ $Q - V_A = 0$ $V_A = Q \text{ (kgf)}$	<p><u>Mencari Reaksi Tumpuan</u></p> <p>Pertama - tama, kita harus mencari gaya resultan beban merata total (Q)</p> $Q = q \times L \text{ kgf}$ <p>Langkah selanjutnya adalah menemukan besarnya gaya reaksi vertikal di satu titik tumpuan dengan menggunakan $\Sigma M = 0$. Misalkan, titik yang kita pilih adalah B.</p> $\Sigma M_B = 0$ $V_A \cdot L - Q \cdot \frac{1}{2} L = 0$ $V_A = \frac{1}{2} Q \text{ (kgf)}$ <p>Selanjutnya, menggunakan $\Sigma V = 0$, kita dapat mencari besarnya reaksi vertikal di titik A.</p> $\Sigma V = 0$ $V_A - Q + V_B = 0$ $\frac{1}{2} Q - Q + V_B = 0$ $V_B = \frac{1}{2} Q \text{ (kgf)}$

Balok Kantilever	Balok Sederhana
<p data-bbox="310 252 477 275"><u>Menghitung momen</u></p> <p data-bbox="224 306 565 517">Pertama - tama, dicari terlebih dahulu momen di tumpuan. Jika ditilik dari titik tumpuan A. Beban yang membebani tumpuan adalah beban merata sepanjang batang, maka Q yang digunakan adalah Q resultan sepanjang batang, dengan titik berat di tengah dari panjang beban merata.</p> $M_A = (qxL) \times \frac{1}{2} L$ $= \frac{1}{2} x q \times L^2$ <p data-bbox="224 628 565 679">Di titik ujung kantilever, besarnya $Q = q \times L = Q$.</p>  <p data-bbox="224 870 565 951">Untuk mengetahui besar momen di tengah bentang, maka resultan beban merata yang diperhitungkan adalah</p> $M_C = -(q \times \frac{1}{2} L) \times (\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} L)$ $= -\frac{1}{8} q \times L^2$	<p data-bbox="686 252 853 275"><u>Menghitung momen</u></p> <p data-bbox="600 306 941 387">Kita bisa langsung menentukan momen di tumpuan adalah 0 (sifat tumpuan sendi dan rot)</p> $M_A = M_B = 0$ <p data-bbox="600 467 941 620">Selanjutnya, dicari momen di titik titik tertentu, misalnya, momen maksimal di tengah bentang balok. Perlu diingat, bahwa menghitung momen hanya dengan meninjau gaya - gaya dari sisi kiri atau kanan titik yang ditinjau.</p>  <p data-bbox="600 790 941 888">Ditinjau dari kanan, besar q yang diperhitungkan adalah sebesar jarak titik C ke B ($\frac{1}{2} L$), yakni Q', dengan titik berat $\frac{1}{4} L$.</p> $M_{C-kanan} = -(Q' \times \frac{1}{4} L) + (V_B \times \frac{1}{2} L)$ $= -(qx \times \frac{1}{2} L \times \frac{1}{4} L) + (V_B \times \frac{1}{2} L)$ $= -\frac{1}{8} qL^2 + \frac{1}{4} qL^2$ $= \frac{1}{4} qL^2$
<p data-bbox="295 1103 495 1130"><u>Menghitung Gaya Geser</u></p> <p data-bbox="224 1157 565 1372">Untuk menghitung gaya geser, kita harus meninjau batang dari ujung kantilever ke tumpuan, dengan menutup batang dan berjalan mundur. Pada ujung batang, gaya yang bekerja hanyalah beban terpusat, sebesar P. Maka dari itu, besarnya gaya geser di titik ujung kantilever adalah P,</p> 	<p data-bbox="671 1103 871 1130"><u>Menghitung Gaya Geser</u></p> <p data-bbox="600 1157 941 1238">Untuk menghitung gaya geser, kita meninjau dari tumpuan paling kiri, bergeser ke arah tumpuan di kanan.</p>  <p data-bbox="600 1372 941 1507">Pada titik tumpuan A, bekerja gaya reaksi vertikal A, yakni V_A. Maka, pada titik tumpuan A, besarnya gaya geser adalah sebesar $D_A = V_A$. Kemudian kita bergeser ke titik C.</p>

Contoh Soal (3) Kantilever + Beban Merata



Diketahui:

$q = 800 \text{ kgf/m}$
 $L = 3 \text{ meter}$

Maka Q keseluruhan batang = $800 \times 3 \text{ kgf}$

---[Menghitung Reaksi]-----

Tinjau seluruh panjang:

$$\begin{aligned} \Sigma V &= 0 \\ -(800 \times 3) + V_A &= 0 \\ V_A &= 2400 \text{ kgf} \end{aligned}$$

---[Menghitung Momen]-----

Momen di A, C dan B (untuk A dan C tinjau sisi kanan)

$$\begin{aligned} M_A &= -(800 \times 3) \times 1,5 \\ &= -3600 \text{ kgf m} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} M_C &= -(800 \times 1,5) \times 0,75 \\ &= -900 \text{ kgf m} \end{aligned}$$

$$M_B = -(800 \times 0) \times 0 = 0$$

---[Menghitung Gaya Geser]-----

Gaya geser di A, C dan B (tinjau dari kiri ke kanan)

$$\begin{aligned} D_B &= 0 \text{ kgf} \\ D_C &= 800 \times 1,5 = 1200 \\ D_A &= 800 \times 3 = 2400 \text{ kgf} \end{aligned}$$

Contoh Soal (4) Balok Sederhana+ Beban Merata

Diketahui:

$$q = 5000 \text{ kg} \quad L = 4 \text{ meter}$$

---[Menghitung Reaksi]-----

Tinjau seluruh panjang:

$$\begin{aligned} \sum M_B &= 0 \\ V_A \cdot 4 - (\frac{1}{2} \cdot 4) (5000 \cdot 4) &= 0 \\ V_A &= 40000/4 \\ &= 10000 \text{ kgf} \\ \sum V &= 0 \\ 10000 - (5000 \cdot 4) + V_B &= 0 \\ V_B &= 10000 \text{ kgf} \end{aligned}$$

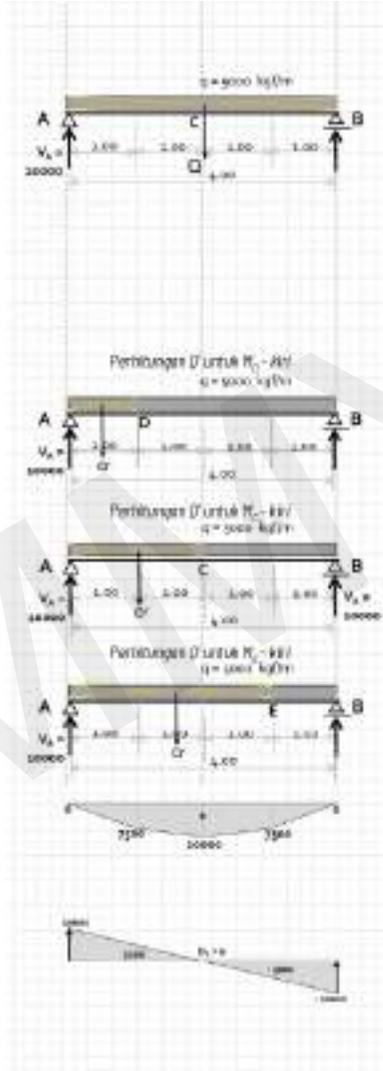
---[Menghitung Momen]-----

Diberikan titik tambahan D, dan E. Momen dihitung dengan meninjau sisi kiri balok.

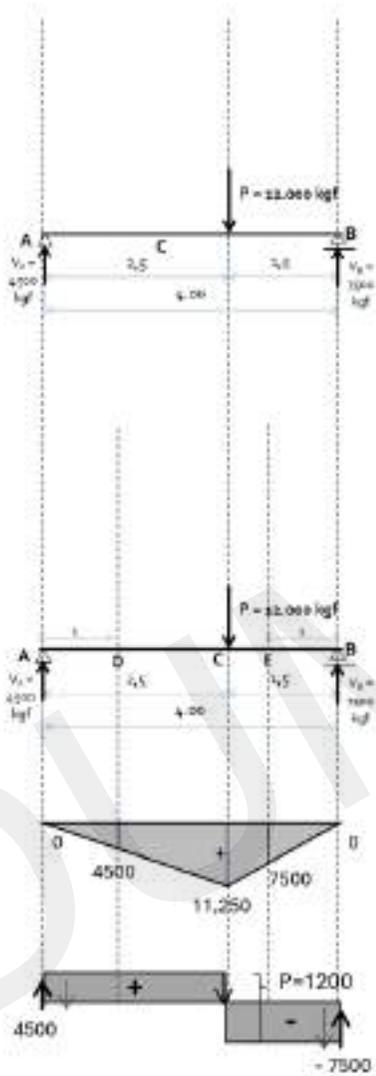
$$\begin{aligned} M_A &= \text{momen di tumpuan} = 0 \\ M_D &= (V_A \times 1) - (Q' \times 0,5) \\ &= (10000 \times 1) - \{(5000 \times 1) \times 0,5\} \\ &= 10000 - 2500 = 7500 \text{ kgf m} \\ M_C &= (V_A \times 2) - (Q' \times 1) \\ &= (10000 \times 2) - \{(5000 \times 2) \times 1\} \\ &= 20000 - 10000 = 10000 \text{ kgf m} \\ M_E &= (V_A \times 3) - (Q' \times 1,5) \\ &= (10000 \times 3) - \{(5000 \times 3) \times 1,5\} \\ &= 7500 \text{ kgf m} \\ M_B &= (V_A \times 4) - (Q \times 2) \\ &= (10000 \times 4) - \{(5000 \times 4) \times 2\} = 0 \text{ kgf m} \end{aligned}$$

---[Menghitung Gaya Geser]-----

$$\begin{aligned} D_A &= V_A = 10'000 \text{ kgf} \\ D_D &= 10'000 - (5000 \times 1) = 5'000 \text{ kgf} \\ D_C &= 10'000 - (5000 \times 2) = 0 \\ D_E &= 10'000 - (5000 \times 3) = -5'000 \text{ kgf} \\ D_B &= 10'000 - (5000 \times 4) = 10'000 \text{ kgf} \end{aligned}$$



Contoh Soal (5) Beban Terpusat Asimetri



Diketahui:

$$P = 12000 \text{ kgf}$$

$$L = 4 \text{ meter}$$

---[Menghitung Reaksi]-----

Tinjau seluruh panjang:

$$\sum M_B = 0$$

$$V_A \cdot 4 - 12000 \cdot 1,5 = 0$$

$$V_A = 4500 \text{ kgf}$$

$$\sum V = 0$$

$$V_A - P + V_B = 0$$

$$4'500 - 12'000 + V_B = 0$$

$$V_B = 7500 \text{ kgf}$$

---[Menghitung Momen]-----

Momen di tumpuan = 0

$$M_C = V_A \times 2,5$$

$$= 4'500 \times 2,5 = 11'250 \text{ kgf m}$$

Atau, jika dari kanan

$$M_C = V_B \times 1,5$$

$$= 7'500 \times 1,5 = 11'250 \text{ kgfm}$$

Titik tambahan untuk grafik yang lebih akurat

$$M_D = 4'500 \times 1$$

$$= 4'500 \text{ kgf m}$$

$$M_E = (4'500 \times 3) - (12'000 \times 0,5)$$

$$= 7'500 \text{ kgf m}$$

---[Menghitung Gaya Geser]-----

$$D \text{ di kiri } C = V_A = 4'500 \text{ kgf}$$

$$D \text{ di kanan } C = V_A - P$$

$$= 4'500 - 12'000$$

$$= -7'500 \text{ kgf}$$

Contoh Soal (6) Beban Merata Asimetri

Diketahui:

$$q = 5000 \text{ kg} \quad L = 4 \text{ meter}$$

---[Menghitung Reaksi]-----

Tinjau seluruh panjang:

$$\begin{aligned} \sum M_B &= 0 \\ V_A \times 4 - (5'000 \times 3) \times 1,5 &= 0 \\ V_A &= 22'500/4 \\ &= 5'625 \text{ kgf} \\ \sum V &= 0 \\ 5'625 - (5'000 \times 3) + V_B &= 0 \\ V_B &= 9'375 \text{ kgf} \end{aligned}$$

---[Menghitung Momen]-----

Untuk dapat menggambarkan bidang momen, perlu diketahui titik terjadi momen maksimal. Karena gaya asimetris momen maksimal tidak terjadi di tengah balok. Sifat balok sederhana \rightarrow momen maksimal akan terjadi pada $D=0$.

Pada titik A hingga titik D

$$0 < x_1 < 1 \text{ m} \rightarrow D_{x1} = V_A = 5'625 \text{ kgf}$$

Pada titik D, telah terjadi beban merata

$$\begin{aligned} x_2 > 1 \text{ m} \rightarrow D_{x2} &= V_A - (q \times (x_2 - 1)) \\ &= 5'625 - \{5'000 \times (x_2 - 1)\} \end{aligned}$$

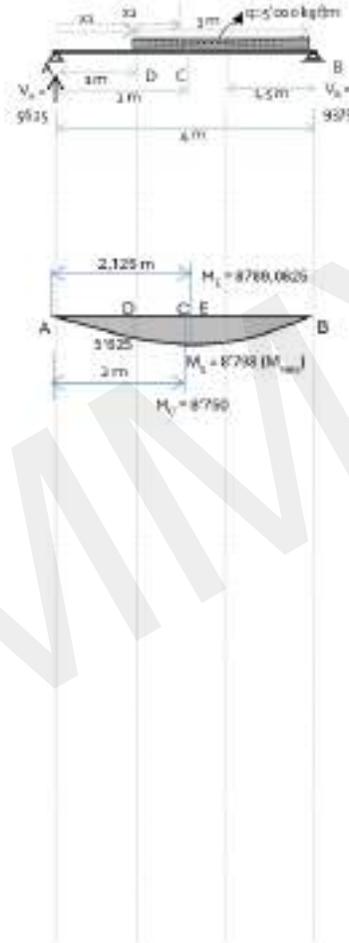
Jika $D = 0$, maka:

$$\begin{aligned} 0 &= 5'625 - \{5'000 \times (x_2 - 1)\} \\ x_2 &= 10'625 / 5'000 = 2,125 \text{ m} \\ &\rightarrow M \text{ maks (titik E)} \end{aligned}$$

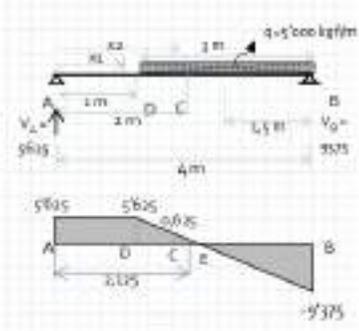
$$\begin{aligned} M_E &= 5'625 \times 2,125 - (5'000 \times 1,125) \\ &= 8789,0625 \text{ kgf m} \end{aligned}$$

$$M_D = 5'625 \times 1 = 5'625 \text{ kgf m}$$

$$\begin{aligned} M_C &= (5'625 \times 2) - \{(5'000 \times 1) \times 0,5\} \\ &= 8'750 \text{ kgf m} \end{aligned}$$



Contoh Soal (6) Beban Merata Asimetri (contd.)



---[Menghitung Gaya Geser]-----

$0 < x < 1\text{m} \rightarrow D_{x1} = 5'625 \text{ kgf}$

$D_A = 5'625 \text{ kgf}$

$D_D = 5'625 \text{ kgf}$

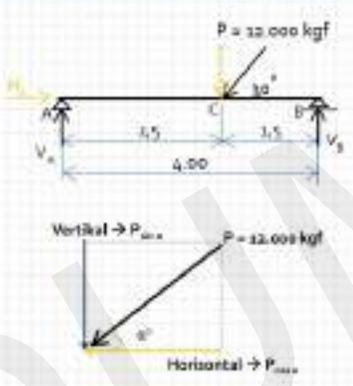
$x > 1\text{m} \rightarrow D_{x2} = 5'625 - 5'000 \cdot (x_2 - 1)$

$D_C = 5'625 - 5'000 (2 - 1) = 0,625 \text{ kgf}$

$D_E = 5'625 - 5'000 (2,125 - 1) = 0$

$D_B = 5'625 - 5'000 (4 - 1) = -9'375 \text{ kgf}$

Keterangan Tambahan **Beban tidak tegak lurus balok**



Pada kondisi beban terpusat yang memiliki sudut kemiringan terhadap balok, maka P diuraikan ke sumbu X dan sumbu Y yang sejajar dan tegak lurus balok.

Akibatnya, akan ada gaya reaksi horisontal pada tumpuan sendi (atau jepit, pada balok kantilever), namun tidak pada rol, karena tumpuan rol tidak dapat memikul gaya horisontal. Untuk mencari besar gaya reaksi horisontal dapat digunakan $\Sigma H = 0$.

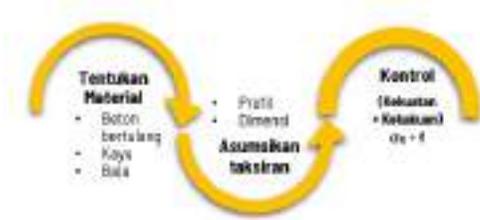
Setelah diproyeksikan ke sumbu X dan Y, maka step perhitungan akan mengikuti seperti contoh soal sebelumnya (untuk P_y).

$P_x = P \cos 30^\circ = 12000 \cdot 0,866 = 10'392 \text{ kgf}$

$P_y = P \sin 30^\circ = 12000 \cdot 0,5 = 6'000 \text{ kgf}$

$\Sigma H = 0 \rightarrow H_A - 10092 = 0 \rightarrow H_A = 10'092 \text{ kgf}$

Setelah besarnya momen, gaya geser, dan gaya aksial diketahui, maka tahapan selanjutnya adalah menaksir dimensi balok. Dalam buku ini, cara perhitungan yang dilakukan bersifat aproksimasi atau perhitungan kasar. Untuk aplikasi pada proyek nyata, yang melakukan perhitungan adalah perancang struktur dari teknik sipil.



Gambar 6.4 Langkah Pendimensian Balok

Sumber: Penulis



Gambar 6.5 Ilustrasi Kekuatan

Sumber: www.dreamstime.com

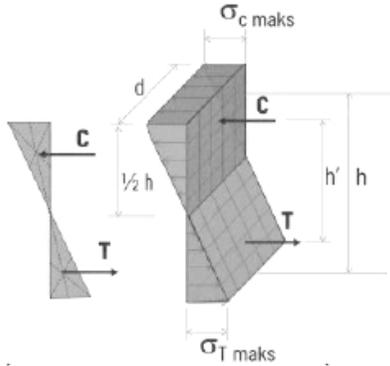
Persyaratan struktur yang harus dipenuhi untuk menghitung dimensi adalah kekuatan, kekakuan, dan daktilitas. Dalam buku ini, parameter daktilitas tidak dibahas lebih lanjut. Pada umumnya balok beton bertulang tidak dikontrol kekakuannya karena pada dasarnya dimensinya relatif gemuk sehingga kekakuannya relatif kurang berpengaruh terhadap dimensi balok dalam batas tertentu.

Kekuatan adalah kemampuan komponen struktur untuk mempertahankan kondisinya agar tidak mengalami kegagalan struktur (kerusakan) karena tegangan elastis materialnya dilampaui. Contohnya, seperti balok kayu yang kuat menahan gajah di Gambar 6.5.

Untuk kontrol kekuatan, ada dua syarat yang harus diperhatikan:

1. Tegangan lentur yang bekerja < tegangan lentur izin: $\sigma_{t \text{ maks}} < \sigma_{t \text{ izin}}$
2. Tegangan geser yang bekerja < tegangan geser izin: $\tau_{t \text{ maks}} < \tau_{t \text{ izin}}$

Di bagian atas sumbu normal terjadi tekan (*Compress*) dengan distribusi tegangan berbentuk prisma segitiga, sedang sisi bawahnya terjadi tarik (*Tension*) dengan bentuk distribusi tegangan yang sama. C adalah gaya resultan dari tegangan tekan, sedangkan T adalah gaya resultan dari tegangan tarik.



Posisi C dan T adalah di titik berat prisma tegangan, maka jarak C ke T adalah $2/3 h$ (dalam gambar adalah h').

Besarnya C dan T dapat dihitung dengan menghitung “volume” prisma segitiga tegangan:

$$\begin{aligned} \text{Volume } C &= \text{Luas penampang segitiga} \times \text{tebal balok} \\ &= \left(\frac{1}{2} \times \text{alas} \times \text{tinggi}\right) \times d \\ &= \left(\frac{1}{2} \times \sigma_{c \text{ maks}} \times \frac{1}{2} h\right) \times d \\ &= \frac{1}{4} \sigma_{c \text{ maks}} \times h \times d \end{aligned}$$

$$\text{Volume } T = \frac{1}{4} \sigma_{T \text{ maks}} \times h \times d$$

Di tinjau penampang balok pada momen maksimal, momen kerja maksimal dilawan oleh momen (kopel) perlawanan, sebesar $C \times h'$ atau $T \times h'$. Maka:

$$\begin{aligned} M &= C \times h' \\ &= \left(\frac{1}{4} \sigma_{c \text{ maks}} \times d \times h\right) \times \left(\frac{2}{3} h\right) \\ &= \frac{1}{6} \times \sigma_{c \text{ maks}} \times d \times h^2 \\ &= W_x \times \sigma_{c \text{ maks}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M &= C \times h' \\ &= \left(\frac{1}{4} \sigma_{c \text{ maks}} \times d \times h\right) \times \left(\frac{2}{3} h\right) \\ &= \frac{1}{6} \times \sigma_{c \text{ maks}} \times d \times h^2 \\ &= W_x \times \sigma_{c \text{ maks}} \end{aligned}$$

Catatan:

- σ_T dan σ_C disebut tegangan lentur (σ_{lt})
- Selanjutnya $\sigma_{T \text{ maks}}$ dan $\sigma_{c \text{ maks}}$ tidak dicantumkan kata maks
- $W_x = \frac{1}{6} \times d \times h^2$

$$M = \sigma_{lt} \times W_x$$

- $\sigma_{c\text{maks}} = \sigma_{r\text{maks}}$
- $\sigma_c =$ tegangan lentur tekan (*compression*)
- $\sigma_T =$ tegangan lentur tarik (*tension*)
- $W_x =$ momen tahanan sumbu x

C. Kekuatan

Momen kerja maksimal sebanding dengan momen kopel perlawanan. Maka dari itu:

- $M_{\text{maks}} = \sigma_c \times W_x$, maka $\rightarrow \sigma_c = M_{\text{maks}} / W_x$
- $M_{\text{maks}} = \sigma_T \times W_x$, maka $\rightarrow \sigma_T = M_{\text{maks}} / W_x$

Maka:

$\sigma_{\text{a(kerja)}} \leq \sigma_{\text{ijin material}}$	II	II
$M_{\text{maks}} / W_x \leq \sigma_{\text{ijin material}}$	II	II
Tegangan dibutuhkan $\leq \sigma_{\text{ijin material}}$		

Kekuatan balok dipengaruhi oleh properti mekanis material balok itu sendiri. Untuk keperluan desain penampang, properti mekanis material telah disediakan dalam tabel, sesuai materialnya sebagai berikut.

1. Properti mekanis kayu dikelompokkan berdasarkan kelas kuat kayu: kayu kelas 1 hingga 5, serta kayu jati, juga berdasarkan mutu kayu. Tegangan izin kayu menurut P.K.K.I. N.I-5:

	Kelas kuat					Jati (<i>Tectonagrandis</i>)
	I	II	III	IV	V	
$\bar{\sigma}_{lt}$ (kg/cm ²)	150	100	75	50	—	130
$\bar{\sigma}_{lk //} = \bar{\sigma}_{tr //}$ (kg/cm ²)	130	85	60	45	—	110
$\bar{\sigma}_{lk \perp}$ (kg/cm ²)	40	25	15	10	—	30
$\bar{\tau} //$ (kg/cm ²)	20	12	8	5	—	15

- $\bar{\sigma}_{lt}$ = tegangan izin untuk lentur
- $\bar{\sigma}_{lk //} = \bar{\sigma}_{tr //}$ = tegangan izin sejajar serat untuk tekanan
- $\bar{\sigma}_{lk \perp}$ = tegangan izin sejajar serat untuk tarikan
- $\bar{\tau} //$ = tegangan izin sejajar serat untuk geser

- a. Tabel di atas adalah tabel tegangan izin kayu dengan mutu A. Untuk kayu mutu B, angka-angka di atas harus dikalikan dengan faktor 0,75.
- b. Tegangan izin yang digunakan untuk menghitung dimensi balok dan kolom adalah tegangan izin lentur, tegangan izin tekan, dan tegangan izin tarik sejajar serat.

Properti mekanis baja dikelompokkan berdasarkan mutu baja.

Macam baja		Tegangan leleh		Tegangan dasar	
Sebutan lama	Sebutan baru	σ_y		$\bar{\sigma}$	
		kg/cm ²	M Pa	kg/cm ²	M Pa
St. 33	Bj. 33 (Fe. 310)	2000	200	1333	133,3
St. 37	Bj. 37 (Fe. 360)	2400	240	1600	160
St. 44	Bj. 44 (Fe. 430)	2800	280	1867	186,7
St. 52	Bj. 52 (Fe. 510)	3600	360	2400	240

- c. Selain tegangan leleh dan dasar, terdapat pula tegangan *ultimate*. Bj.33 adalah baja dengan tegangan *ultimate* 3'300 kgf/cm²; Bj.37 = baja dengan tegangan *ultimate* 3'700 kgf/cm², dan seterusnya.
 - d. Tegangan dasar adalah tegangan yang diizinkan.
2. Properti mekanis beton dikelompokkan berdasarkan mutu beton (K175, K225, K300, dan seterusnya).

D. Kekakuan

Hal yang berhubungan dengan kekakuan balok adalah deformasi/lendutan (f) balok, di mana deformasi maksimal yang terjadi pada sebuah balok tidak boleh melampaui deformasi yang diizinkan. Besarnya deformasi balok tergantung dari model struktur, pola pembebanan, dan materialnya.

Persyaratan kekakuan (kontrol lendutan f izin maks) sebagai berikut.

Material	Syarat f maks
Baja (SNI 03 - 1729-2002)	
Balok pemikul dinding atau <i>finishing</i> yang getas	$\leq (1/360) L$
Balok biasa	$\leq (1/240) L$
Kayu (NI-5, 61)	

Balok yang terlindung	$\leq (1/300) L$
Balok tidak terlindung (kena cuaca)	$\leq (1/400) L$
Gording dan usuk	$\leq (1/200) L$
Rangka batang tak terlindung	$\leq (1/700) L$

Mutu	Tegangan yang diijinkan (kg/cm ²)									
	beban tetap					beban sementara				
Kuat tekan	B1	K125	K175	K225	Umum	B1	K125	K175	K225	Umum
Karakteristik	100	125	175	225		100	125	175	225	
Lenturan tanpa dan/ atau dgn gaya normal.										
Tekan	35	40	60	75		55	70	100	125	
Tarik	5	5.5	6.5	7		7	7.5	9	10	
Gaya aksial										
Tekan	35	40	60	75		55	70	100	125	
Tarik	4	4	5	5.5		5	5.5	6.5	7.5	
Geser oleh lentur atau puntir.										
Tanpa tul geser	4.5	5	5.5	6.5		7	7.5	9	10	
Dgn tul geser	11	12	14	16		17	19	22	25	
Geser oleh lentur dengan puntir.										
Tanpa tul geser	5.5	6	7	8		8.5	9.5	11	13	
Dgn tul geser	14	15	18	20		21	24	28	32	
Geser pons pada penampang kritis										
Tanpa tul geser	6.5	7.5	8.5	10		10	11	13	15	
Dgn tul geser	13	15	17	20		20	22	26	30	

Tabel sebelumnya di atas mengatur batas f yang tidak boleh dilampaui oleh sebuah balok struktural. Jadi, semisal ada balok tidak terlindung (terkena cuaca) dengan material kayu, yang terbentang sepanjang 4 meter, maka deformasi maksimum yang boleh terjadi adalah $1/400$ dari 4 meter, yaitu 1 cm.

Perhitungan lendutan (f) beton bertulang cukup rumit. Untuk bentang tertentu lebih berperan *feeling* perancang struktur (tanpa kontrol lendutan). Hal tersebut umum dilakukan oleh perancang struktur. Bila h balok beton bertulang $1/12-1/10 L$, maka balok sampai bentang 15 m relatif tidak dikontrol terhadap lendutannya (<https://wiryanto.wordpress.com/2011/09/08/check-lendutan-pada-balok-beton-bertulang/>).

Rumus perhitungan deformasi yang terjadi dapat ditabelkan berdasarkan jenis balok dan pola pembebanannya. Dalam rumus deformasi (f) tersebut, terdapat dua komponen penting yang memengaruhinya, yaitu *modulus elastisitas* (E) dan *momen inersia* (I).

Besar modulus elastisitas tergantung oleh jenis-mutu material:

Elastisitas modulus kayu/serat

- Kelas kuat I $E = 125'000 \text{ kgf/cm}^2$
- Kelas kuat II $E = 100'000 \text{ kgf/cm}^2$
- Kelas kuat III $E = 80'000 \text{ kgf/cm}^2$
- Kelas kuat IV $E = 60'000 \text{ kgf/cm}^2$

Elastisitas modulus baja:

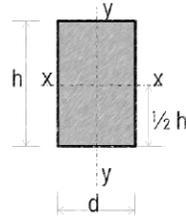
- $E = 2,1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$

Elastisitas modulus beton:

- $E = 2,1 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$

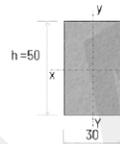
Momen inersia untuk material baja, dapat dilihat di tabel baja sesuai dengan profilnya, sedang untuk kayu dengan penampang persegi, dihitung menggunakan rumus berikut.

Terhadap sumbu x (I_x) $\rightarrow I_x = \frac{1}{12} \times d \times h^3 \text{ cm}^4$
 Terhadap sumbu y (I_y) $\rightarrow I_y = \frac{1}{12} \times d^3 \times h \text{ cm}^4$



Contoh: balok kayu berdimensi penampang 30/50

$I_x = \frac{1}{12} \times 30 \times 50^3$
 $= 312'500 \text{ cm}^4$
 $I_y = \frac{1}{12} \times 30^3 \times 50$
 $= 112'500 \text{ cm}^4$



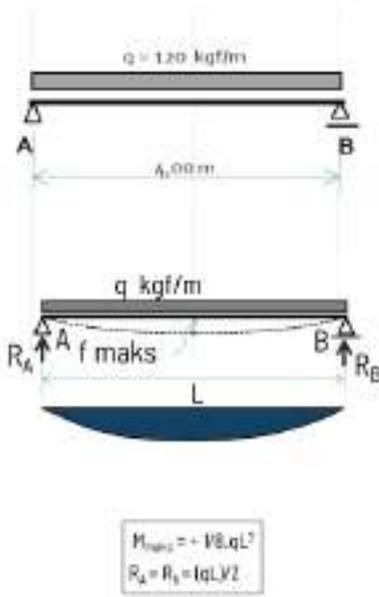
Momen dan lendutan balok kantilever	Model Struktur	Momen & Reaksi	Defleksi (f_{maks})
		$M_{maks} = -P \cdot L$ $R_A = P$	$f_{maks} = \frac{1}{3} (P L^3 / E I_x)$
		$M_{maks} = -P \cdot L$ $R_A = P$	$f_{maks} = \frac{1}{8} (P L^3 / E I_x)$
		$M_{maks} = -\frac{1}{2} q L^2$ $R_A = qL$	$f_{maks} = \frac{1}{8} (q L^4 / E I_x)$

E = modulus elastisitas material
 I_x = momen inersia terhadap sumbu x

Momen dan lendutan balok sederhana	Model Struktur	Momen & Reaksi	Defleksi (f_{maks})
		$M_{maks} = + \frac{1}{8} P L^2$ $R_A = R_B = \frac{1}{2} P$	$f_{maks} = \frac{5}{384} (q L^4 / E I_x)$
		$M_{maks} = + \frac{1}{4} P L$ $R_A = R_B = P/2$	$f_{maks} = \frac{1}{48} (P L^3 / E I_x)$
		$M_{maks} = + P a b L$ $R_A = (P b^2 / L)$ $R_B = (P a^2 / L)$	$f_{maks} = \frac{1}{24} (P a^2 b^2 / E I_x)$

E = modulus elastisitas material
 I_x = momen inersia terhadap sumbu x

Contoh Soal (7) Dimensi Balok Kayu



Diketahui:

Beban mati+hidup $\rightarrow q = 120 \text{ kgf/m}$
 $= 1,2 \text{ kgf/cm'}$

$L = 4 \text{ meter}$

Balok terlindung

Tegangan izin $= 100 \text{ kgf/cm}^2$

Elastisitas modulus $E = 100'000 \text{ kgf/cm}^2$

Hitung dimensi balok kayu !

---[Menghitung Momen Maksimum]-----

Dalam menghitung momen maksimum, dapat langsung menggunakan rumus seperti di tabel halaman 82 dan 83. Kondisi balok pada soal adalah balok sederhana dengan beban merata, maka $M_{\text{maks}} = + 1/8 \cdot q \cdot L^2$

$$M_{\text{maks}} = \frac{1}{8} \times q \times L^2$$

$$= \frac{1}{8} \times 120 \times 4^2$$

$$= 240 \text{ kgf m} = 24'000 \text{ kgf cm}$$

---[Kekuatan]-----

Pertama-tama, kita mengasumsikan besar penampang untuk diuji kekuatannya. Dicoba dimensi kayu 8/15, maka:

$$W_x = \frac{1}{6} \times d \times h^2$$

$$= \frac{1}{6} \times 8 \times 15^2 = 300 \text{ cm}^3$$

$$\sigma = \frac{M_{\text{maks}}}{W_x}$$

$$= \frac{24'000}{300}$$

$$= 80 \text{ kgf/cm}^2 < 100 \text{ kgf/cm}^2 \text{ ..Ok!}$$

---[Kekakuan]-----

Pada balok terlindung dengan material kayu, besarnya deformasi yang diizinkan adalah 1/300 dari bentangnya.

$$f \text{ izin maks} = 1/300 \times 400 = 1,3 \text{ cm}$$

Deformasi yang terjadi pada balok adalah sebesar $f \text{ maks} = 5/384 \cdot (q \cdot L^4 / E \cdot I_x)$.

Dalam hal ini, besarnya q , L dan E telah diketahui. I_x dapat dihitung dari posisi penampang 8/15 yang berdiri.

$$I_x = 1/12 \cdot d \cdot h^3 = 1/12 \times 8 \times (15)^3 = 2'250 \text{ cm}^4$$

$$f \text{ maks} = 5/384 \cdot (q \cdot L^4 / E \cdot I_x) = 5/384 \times (1,2 \times (400)^4 / (100'000 \times 2'250)) = 1,78 \text{ cm} > 1,3 \text{ cm}$$

Maka, kurang kaku → dimensi dibesarkan!

---[Membesarkan Dimensi]-----

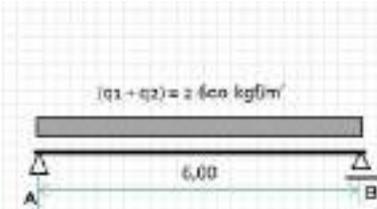
untuk menambah kekakuan balok lebih efektif kalau h dibesarkan → dicoba dimensi 8/18 (ada di pasaran!).

$$I_x = 1/12 \times 8 \times 18^3 = 3'888 \text{ cm}^4$$

$$f \text{ maks} = 5/384 \times (1,2 \times 400^4 / (100'000 \times 3'888)) = 1,03 \text{ cm} < 1,3 \text{ cm} \dots \text{Ok!}$$



Contoh Soal (8) Dimensi Balok Baja



Diketahui:

Beban mati lantai $q_1 = 1400 \text{ kgf/m}'$

Beban hidup $q_2 = 1200 \text{ kgf/m}'$

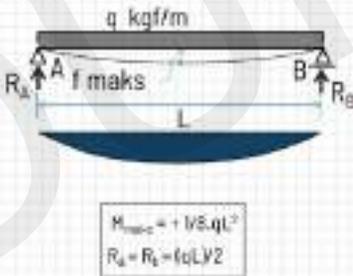
$L = 6 \text{ meter}$

Hitung dimensi balok IWF !

---[Menghitung Momen Maksimum]-----

Diasumsikan balok menggunakan IWF 500x200, maka \rightarrow lihat tabel baja :

Nomor Empangan mm	Klasifikasi Dimensi					Garis Arah K cm ²	Tinggi Profil cm	Informasi Tambahan					
	B x H mm	t1 mm	t2 mm	t3 mm	t4 mm			Kapasitas Momen II Inersia		Rasio II'		Momen II'	
								Ix cm ⁴	Iy cm ⁴	Sx cm	Sy cm	Ix cm ⁴	Iy cm ⁴
500 x 150	500 x 150	5,0	8	13	40,80	31,00	9,328	442	12,40	3,20	420,00	39,20	
500 x 150	500 x 150	4,5	8	13	48,78	34,73	1,218	3,74	11,40	3,20	441,00	42,70	
500 x 200	500 x 200	6,0	10	16	119,40	64,00	20,400	8,790	16,10	7,30	940,00	149,00	
500 x 175	500 x 175	8	8	16	83,88	51,13	11,380	7,92	14,80	3,88	60,00	81,00	
500 x 175	500 x 175	7	11	14	63,18	40,62	10,600	9,64	14,00	3,20	175,00	112,00	
500 x 200	500 x 200	12	10	20	173,02	117,00	40,800	10,400	16,00	8,00	1.250,00	173,00	
400 x 200	400 x 175	7	11	13	74,70	36,60	10,800	5,950	10,70	4,70	110,00	145,00	
400 x 200	400 x 200	8	10	18	84,7	50,00	10,700	7,740	10,60	6,70	110,00	174,00	
400 x 180	400 x 150	13	17	22	219,7	117,00	36,400	11,400	17,00	10,10	1.100,00	150,00	
400 x 200	400 x 200	8	14	15	84,3	61,20	14,800	1,900	14,00	4,40	140,00	137,00	
500 x 200	500 x 200	10	10	20	144,2	70,00	11,800	1,740	16,00	5,20	110,00	124,00	
600 x 300	600 x 300	11	11	22	194,7	109,00	17,800	2,200	24,00	4,10	1.200,00	220,00	
600 x 200	600 x 300	12	10	20	181,3	117,00	118,000	8,820	24,00	6,10	1.000,00	400,00	
700 x 300	700 x 300	13	14	24	239,4	145,00	20,400	14,800	26,00	6,20	1.500,00	170,00	
800 x 300	800 x 300	14	16	26	287,4	170,00	262,000	14,700	33,00	6,40	1.700,00	190,00	
800 x 300	800 x 300	16	16	26	308,0	145,00	41,800	14,800	36,40	6,50	1.800,00	243,00	



IWF 500 x 200 $\rightarrow W_x = 1910 \text{ cm}^3$

Berat sendiri balok IWF $q_3 = 89,6 \text{ kgf/m}'$

$q \text{ total} = 1400 + 1200 + 89,6 = 2689,6 \text{ kgf/m}'$

$$M_{maks} = 1/8 qL^2$$

$$= 1/8 \times 2689,6 \text{ kgf/m} \times (6)2m^2$$

$$= 12.103,2 \text{ kgf m} = 1.210.320 \text{ kgf cm}$$

---[Kekuatan]-----

$$\sigma = M_{maks}/W_x$$

$$= 1.210.320 \text{ kgf cm} / 1910 \text{ cm}^3$$

$$= 6$$

$$33,6 \text{ kgf/cm}^2 < 1600 \text{ kgf/cm}^2.$$

Sebelum kontrol lendutan dicoba mengecilkan dimensi karena besarnya tegangan yang terjadi berbeda cukup jauh terhadap tegangan izin

Asumsi ulang, balok IWF 350x175, maka $W_x = 775 \text{ cm}^3$, berat sendiri $q_3 = 49,6 \text{ kgf/m}'$.

Standar Dimensi/Dimensi					Tinggi h mm	Tinggi Tinggi mm	Tinggi Tinggi mm	Tinggi Tinggi mm	Tinggi Tinggi mm	Tinggi Tinggi mm	Momen Inersia				Momen Inersia Tinggi Tinggi mm
Dimensi mm	h mm	b mm	t mm	r mm							I_x cm ⁴	I_y cm ⁴	I_{xy} cm ⁴	I_{xx} cm ⁴	
350 x 175	350	175	10	10	350	175	10	10	119.86	119.86	119.86	119.86	119.86	119.86	119.86
350 x 175	350	175	10	10	350	175	10	10	119.86	119.86	119.86	119.86	119.86	119.86	119.86
350 x 175	350	175	10	10	350	175	10	10	119.86	119.86	119.86	119.86	119.86	119.86	119.86
350 x 175	350	175	10	10	350	175	10	10	119.86	119.86	119.86	119.86	119.86	119.86	119.86
350 x 175	350	175	10	10	350	175	10	10	119.86	119.86	119.86	119.86	119.86	119.86	119.86

$$M_{maks} = 1/8 q_2$$

$$= 1/8 \times 2'649,6 \text{ kgf/m} \times (6)2m^2$$

$$= 11'923,2 \text{ kgf m} = 1'192'322 \text{ kgf cm}$$

---[Kekuatan (2)]-----

$$\sigma = M/W_x$$

$$= 1'192'322 \text{ kgf cm} / 775 \text{ cm}^3$$

$$= 1'538,5 \text{ kgf/cm}^2 < 1600 \text{ kgf/cm}^2$$

Oke, karena mendekati, namun tidak lebih besar dari σ

---[Kekakuan]-----

Deformasi yang diizinkan

$$f \text{ izin maks} < 1/240 \times 600 \text{ cm} = 2,5 \text{ cm}$$

Deformasi yang terjadi

$$f \text{ maks} = 5/384 \cdot (q \cdot L^4 / E \cdot I_x)$$

$$= 5/384 \times \frac{\{26,496 \text{ kgf/cm} \times (600\text{cm})^4\}}{(2,1 \times 10^6 \times 13'600 \text{ cm}^4)}$$

$$= 1,57 \text{ cm} < 2,5 \text{ cm}$$

Karena deformasi yang terjadi < Deformasi yang diizinkan, maka OK!

Untuk perhitungan dimensi Baja, I_x tidak perlu dihitung sendiri, melainkan langsung dapat melihat tabel, sesuai profil yang diasumsikan untuk digunakan.

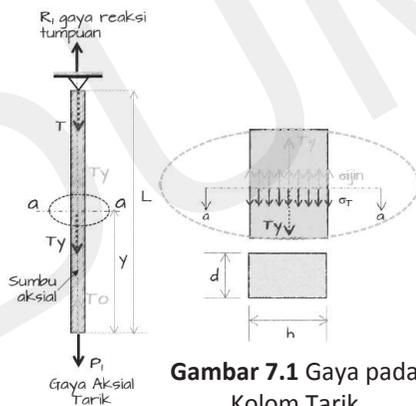
DUMMY

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 7

BATANG TARIK-TEKAN

A. Kolom Tarik (Batang Tarik)



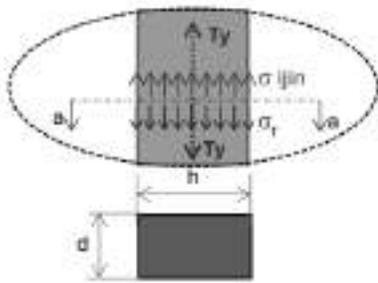
Gambar 7.1 Gaya pada Kolom Tarik

Sumber: Penulis

Ilustrasi kolom tarik adalah sebagai berikut.

1. Sebuah kolom digantung di atas dan diberi beban P_1 di ujung bawahnya. Berat sendiri kolom tiap meter = q kgf/m.
2. Di potongan a-a terjadi gaya tarik $T_y = P_1 + q \cdot y$.
3. Gaya reaksi tumpuan: $R_1 = T = P_1 + q \cdot L$.

Pada setiap potongan melintang, gaya internal T_y disebar ke seluruh penampang melintang menjadi tegangan kerja, dan akan dilawan oleh tegangan-tegangan aksial material di seluruh penampang melintang kolom dengan resultan gaya tarik perlawanan sebesar T_y . Tegangan tersebut dilawan oleh tegangan-tegangan aksial tarik material (σ_T).



POTONGAN a-a

Gambar 7.2 Gaya Tarik pada Potongan a-a

Sumber: Penulis

Tegangan aksial di pot. a-a:

$$\sigma_T = T_y/A \text{ kg/cm}^2$$

Catatan:

T_y = Gaya aksial tarik di a-a

A = luas penampang melintang batang ($A = d \times h$)

σ_T = tegangan kerja (tarik)

$\sigma_T \text{ izin}$ = tegangan tarik material yang diizinkan

Kontrol kekuatan:

$$\sigma_T \text{ kerja} \leq \sigma_T \text{ izin}$$

Gaya maksimal berada di tumpuan, maka:

$$R_A/A \leq \sigma_T \text{ izin}$$

$$(P_1 + q.l)/A \leq \sigma_T \text{ izin}$$

Contoh Soal Kontrol Kekuatan Batang Tarik:

Diameter Ø (mm)	Tebal t (mm)	Jarak J (mm)	Beban G (kg)	Momen Inersia		Momen Tahanan	
				I_x (cm ⁴)	I_y (cm ⁴)	W_x (cm ³)	W_y (cm ³)
31.7	3.0	3.000	0.200	0.289	0.289	0.200	
31.7	3.0	3.000	0.150	0.608	0.608	0.446	
31.7	3.0	3.000	0.100	1.270	1.270	0.899	
31.7	3.0	3.000	0.050	2.280	2.280	1.680	
34.8	3.0	3.000	0.200	0.380	0.380	0.270	
34.8	3.0	3.000	0.150	0.810	0.810	0.590	
34.8	3.0	3.000	0.100	1.410	1.410	1.030	
34.8	3.0	3.000	0.050	2.300	2.300	1.710	
41.7	3.0	3.000	0.200	0.570	0.570	0.400	
41.7	3.0	3.000	0.150	1.260	1.260	0.900	
41.7	3.0	3.000	0.100	2.190	2.190	1.580	
41.7	3.0	3.000	0.050	3.480	3.480	2.520	
44.8	3.0	3.000	0.200	0.760	0.760	0.540	
44.8	3.0	3.000	0.150	1.710	1.710	1.230	
44.8	3.0	3.000	0.100	3.000	3.000	2.160	
44.8	3.0	3.000	0.050	4.740	4.740	3.400	
48.0	3.0	3.000	0.200	1.000	1.000	0.710	
48.0	3.0	3.000	0.150	2.250	2.250	1.620	
48.0	3.0	3.000	0.100	3.960	3.960	2.830	
48.0	3.0	3.000	0.050	6.210	6.210	4.470	
51.0	3.0	3.000	0.200	1.290	1.290	0.930	
51.0	3.0	3.000	0.150	2.920	2.920	2.110	
51.0	3.0	3.000	0.100	5.070	5.070	3.640	
51.0	3.0	3.000	0.050	7.740	7.740	5.560	
54.0	3.0	3.000	0.200	1.640	1.640	1.180	
54.0	3.0	3.000	0.150	3.690	3.690	2.650	
54.0	3.0	3.000	0.100	6.480	6.480	4.680	
54.0	3.0	3.000	0.050	9.900	9.900	7.140	
57.0	3.0	3.000	0.200	2.050	2.050	1.470	
57.0	3.0	3.000	0.150	4.620	4.620	3.330	
57.0	3.0	3.000	0.100	8.100	8.100	5.880	
57.0	3.0	3.000	0.050	11.610	11.610	8.400	
60.0	3.0	3.000	0.200	2.520	2.520	1.810	
60.0	3.0	3.000	0.150	5.670	5.670	4.070	
60.0	3.0	3.000	0.100	10.000	10.000	7.200	
60.0	3.0	3.000	0.050	14.400	14.400	10.300	
63.0	3.0	3.000	0.200	3.050	3.050	2.200	
63.0	3.0	3.000	0.150	6.840	6.840	4.920	
63.0	3.0	3.000	0.100	12.300	12.300	8.760	
63.0	3.0	3.000	0.050	17.700	17.700	12.700	
66.0	3.0	3.000	0.200	3.660	3.660	2.630	
66.0	3.0	3.000	0.150	8.250	8.250	5.940	
66.0	3.0	3.000	0.100	14.500	14.500	10.400	
66.0	3.0	3.000	0.050	20.700	20.700	14.900	

Diketahui:

- Pipa baja diameter 8,91 cm, tebal 4 mm, dan panjang 3 m.
- Berat sendiri pipa per m = 8,39 kgf/m → dibulatkan 8,4 kgf/m.
- Luas penampang $A = 10,69 \text{ cm}^2$.
- Tegangan izin tarik $\sigma = 1'600 \text{ kgf/cm}^2$.
- Gaya tarik aksial di ujung bawah pipa = 15'000 kgf.

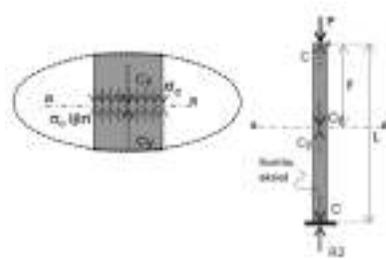
Kontrol kekuatannya!

Jawab:

Total gaya tarik di tumpuan (P) = berat sendiri pipa + gaya tarik aksial = $(8,4 \text{ kgf/m} \times 3 \text{ m}) + 15'000 \text{ kgf} = 15'026 \text{ kgf}$.
 $\sigma = P/A = 15'026/10,69 = 1'405,6 \text{ kgf/cm}^2$
 $1'405,6 \text{ kgf/cm}^2 < 1'600 \text{ kgf/cm}^2 \rightarrow \text{OK!}$

Ilustrasi kolom tekan adalah sebagai berikut.

- Sebuah kolom ditumpu di dasarnya.
- Berat sendiri kolom tiap meter = q kgf/m
- Di potongan a-a terjadi gaya tekan $C_y = P_2 + q.y$
- Gaya reaksi tumpuan: $R_2 = P_2 + q.L$



Gambar 7.3 Gaya Tekan pada Potongan a-a

GAYA internal C_y terbagi ke seluruh penampang melintang menjadi TEGANGAN aksial tekan (σ_c).

Tegangan tersebut dilawan oleh tegangan-tegangan aksial tekan material (σ_c).

- Tegangan aksial di pot. a-a:

$$\sigma_c = C_y / A \text{ kg/cm}^2$$

Catatan:

- C_y = Gaya aksial tekan di pot. a-a
 - A = luas penampang melintang batang ($A = d \times h$)
 - σ_c = tegangan kerja (tekan)
 - σ_c izin = tegangan tekan material yang diizinkan
- Kontrol kekuatan:

$$\sigma_c \text{ kerja} \leq \sigma_c \text{ izin}$$

- Gaya tekan maksimal berada di tumpuan, maka:

$$(P_2 + q.L) / A \leq \sigma_c \text{ izin}$$

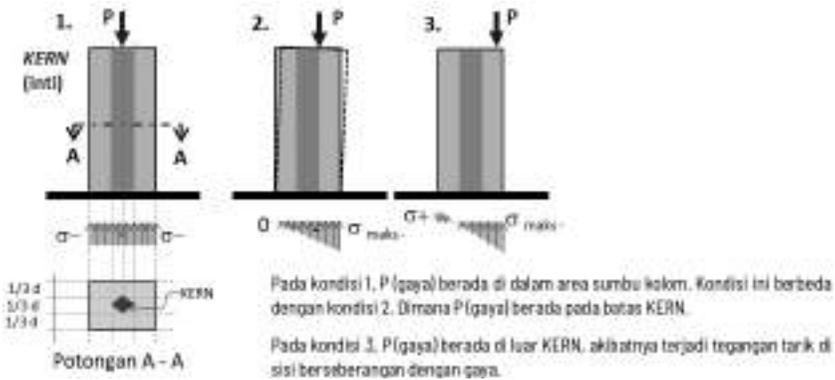
Perilaku kolom tekan beda dengan kolom tarik. Kolom tekan dibedakan dalam dua kategori, yaitu sebagai berikut.

- Kolom TEKAN GEMUK (1) baru akan mengalami kegagalan material (kerusakan) apabila kekuatan elastiknya dilampaui (*).
- Kolom TEKAN LANGSING (2) dapat TERTEKUK sebelum kekuatan elastiknya dilampaui. Oleh karena itu, kolom tekan langsing harus dikontrol terhadap tegangan kritis tekuk.

(* Catatan: untuk kontrol kekuatan: tegangan elastik (tegangan kerja) < tegangan izin material.

B. Kolom Tekan Gemuk

Di dalam kolom tekan gemuk terdapat area inti, yang disebut dengan area KERN, yang berada di bagian tengah kolom. Besar KERN ditinjau dari penampang transversal adalah sepertiga kedalaman kolom (h) dan sepertiga lebar kolom (d).



Gambar 7.4 KERN dalam Potongan Longitudinal Kolom Gemuk

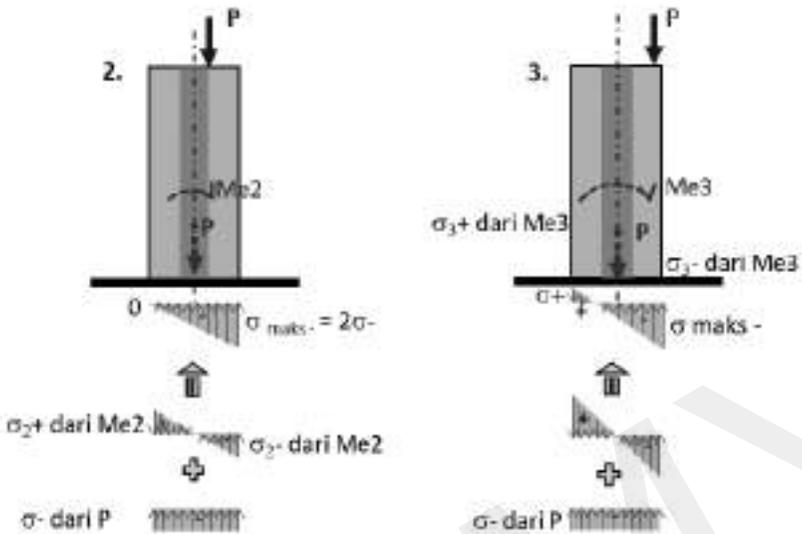
Sumber: Penulis

Kondisi 2, P berada tepat di batas tepi KERN sebagai berikut.

1. Gaya P eksentris dapat disetarakan dengan P sentris ditambah momen eksentris (Me_2).
2. Gaya tekan P menghasilkan tegangan tekan merata di seluruh penampang transversal kolom sebesar σ .
3. Me_2 menghasilkan tegangan lentur tarik σ_{2+} dan tekan σ_{2-} ($\sigma_{2+} = \sigma_{2-}$).
4. Ketika P berada tepat di batas tepi KERN, maka besarnya σ_{2+} dan σ_{2-} sama dengan σ , maka tegangan total yang terjadi di sisi kiri = 0 dan di sisi kanan = 2σ .

Kondisi 3, P berada di luar batas tepi KERN sebagai berikut.

1. Gaya tekan P menghasilkan tegangan tekan merata di seluruh penampang transversal kolom sebesar σ (sama dengan kondisi 2).
2. Me_2 menghasilkan tegangan lentur tarik σ_{3+} dan tekan σ_{3-} ($\sigma_{3+} = \sigma_{3-}$).
3. Ketika P berada di luar batas tepi KERN, maka besarnya σ_{2+} dan σ_{2-} lebih besar daripada σ , maka tegangan total yang terjadi di sisi kiri ada tegangan tarik sebesar $(\sigma_{3+} - \sigma_{2-})$, dan di sisi kanan $(\sigma_{3-} + 2\sigma)$, besarnya tergantung dari P dan e .



Ada dua macam kolom beton gemuk, yaitu:

1. Kolom beton polos (tanpa tulangan); dan
2. Kolom beton bertulang.

Batang/kolom beton polos gemuk hanya bisa menahan gaya tekan.

Rasio Kelangsingan Kolom Beton Gemuk

Aspek rasio kolom beton gemuk:

- Beton POLOS GEMUK: $L/d \rightarrow$ antara 2 – 3
- Beton BERTULANG GEMUK: $L/d \rightarrow \leq 10$
- Bila L/d DI ATAS 10 termasuk langsing!

Sumber: Lin, T.Y, 1981

1. Kolom Beton Polos Gemuk

Contoh kontrol kekuatan tekan kolom beton polos gemuk:

Diketahui:

- Sebuah kolom beton polos mempunyai dimensi 30 cm x 40 cm, dengan tinggi kolom 90 cm.
- Tegangan izin beton σ izin = 60 kgf/cm².

- Berat jenis beton polos = 2.200 kgf/m³.
 - Pada kolom tersebut bekerja beban sentris sebesar 30'000 kgf.
- Kontrol apakah kolom tersebut cukup kuat dan kaku?

Jawab:

Kekakuan kolom terhadap tekuk dikontrol dari ratio H/d :

$$H/d = 90 \text{ cm}/30 \text{ cm} = 3$$

Maka, kolom tergolong kolom gemuk → cukup kaku.

Kontrol kekuatan:

- Berat kolom = $0,3 \times 0,4 \times 0,9 \times 2200 = 264 \text{ kgf}$.
- $P \text{ total} = 30'000 + 264 = 30'264 \text{ kgf}$
- $\sigma = P \text{ tot}/A = 30'264 / (30 \times 40)$
 $= 25,22 \text{ kgf/cm}^2 < \sigma \text{ izin} = 60 \text{ kgf/cm}^2 \rightarrow \text{kolom cukup kuat}$

2. Kolom Beton Bertulang Gemuk

a. Kontrol Kekuatan Tekan Kolom Beton Bertulang Gemuk

Contoh:

Diketahui:

- Kolom beton bertulang menerima gaya tekan sentris sebesar $P = 12'000 \text{ kgf}$.
- Tegangan izin beton $\sigma \text{ izin} = 60 \text{ kgf/cm}^2$
- Berat jenis beton bertulang = $2'400 \text{ kgf/m}^3$
- Dimensi kolom 15/15; tinggi kolom 1,50 m

Kontrol kekuatannya!

Jawaban:

Kontrol kekakuan:

- $L/d = 150 \text{ cm} / 15 \text{ cm} = 10 \rightarrow \text{kolom gemuk}$
- Berat sendiri = $0,15 \times 0,15 \times 1,5 \times 2'400 = 81 \text{ kgf}$

Kontrol kekuatan:

- $\sigma = P/A = (12'000 + 81) \text{ kgf} / (15 \times 15) \text{ cm}^2 = 53,7 \text{ kgf/cm}^2$
 $< \sigma \text{ izin} = 60 \text{ kgf/cm}^2 \rightarrow \text{OK}$

b. Kontrol Kekuatan Tekan Beton Bertulang Langsing

Tertekuknya kolom tekan langsing sebelum material kolom mencapai tegangan elastik maksimal disebabkan karena batang tersebut kurang kaku terhadap tekuk. Artinya dari segi kekuatan, batang tersebut cukup, tetapi kekakuan terhadap tekuk kurang.

Besarnya tegangan tekan pada saat batang tepat hampir mulai tertekuk disebut tegangan kritis σ_k (tegangan izin tekuk). Besarnya σ_k tersebut tergantung dari modulus elastisitas material (E) dan angka kelangsingan (l). Angka kelangsingan l tergantung dari panjang tekuk kolom dan jari-jari inersia/radius girasi (i_x, i_y atau r_x, r_y); $i_x = \sqrt{I_x/A}$; $i_y = \sqrt{I_y/A}$, di mana I_x dan I_y adalah momen inersia, dan A adalah luas penampang transversal.

Bila panjang tekuknya besar dan jari-jari inersia kecil, angka kelangsingan (l) menjadi besar dan potensi tekuk semakin besar. Untuk mengurangi potensi tekuk, dapat dilakukan dengan memperpendek panjang tekuk, atau dengan memperbesar jari-jari inersia, yaitu dengan memperbesar dimensi dan/atau mengubah bentuk penampang transversal kolom.

Dalam buku ini dipilih metode pendekatan kasar dan sederhana untuk mengontrol tekuk kolom beton bertulang, baja, dan kayu (Lin, T.Y, 1981). Rasio kelangsingan kolom beton bertulang langsing, yakni sebagai berikut.

- Bila L/d di atas 10 \rightarrow beton bertulang langsing!
- Bila L/d di antara 10 – 20 \rightarrow untuk setiap peningkatan L/d sebesar 1 dari angka 10, kapasitas beban kolom berkurang sekitar kurang lebih 3% dari kekuatan kolom gemuk.
- $L/d = 20$ kekuatannya berkurang sebesar kurang lebih 30% dari kekuatan kolom gemuk.
- $L/d > 20$ \rightarrow harus didesain dengan teliti tidak bisa menggunakan pendekatan ini (Lin, T.Y., 1981).

Contoh:

Diketahui:

- Kolom beton bertulang menerima gaya tekan sebesar 12'000 kgf.

- Tegangan izin beton σ izin = 60 kgf/cm²
- Dimensi kolom 15/15, tinggi 2,70 m = 270 cm
- Berat jenis beton bertulang = 2400 kgf/m³.

Kontrol kekuatannya dan kekakuannya!

Jawaban:

- Kapasitas beban kolom beton 15/15 adalah:
 $P = \sigma \text{ izin} \times A = 60 \text{ kgf/cm}^2 \times (15 \times 15) \text{ cm}^2 = 13'500 \text{ kg}.$
- $l/d = 270 \text{ cm} / 15 \text{ cm} = 18 \rightarrow$ beban yang dapat dipikul berkurang sebesar $\{(18 - 10) \times 3\%\} \times 13'500 \text{ kgf} = 3'240 \text{ kgf}$

Jadi, beban yang dapat dipikul $P_1 = 13'500 - 3'240 = 10'260 \text{ kgf}$
 \rightarrow kolom tidak kuat menahan beban 12'000 kgf, dimensi harus dibesarkan!

Dimensi Baru:

- Cari TEGANGAN Izin BARU (σ izin') berdasarkan kapasitas beban $P_1 = 10.260 \text{ kgf}$: $\sigma \text{ izin}' = P_1/A$
- $\sigma \text{ izin}' = 10.260 \text{ kgf}/(15 \times 15) \text{ cm}^2 = 45,6 \text{ kgf/cm}^2$
- $P \text{ total} = 12'000 + (0,15 \times 0,15 \times 2,70 \times 2.400) = 12'146 \text{ kgf}$
- $A = P_1/\sigma \text{ izin} = 12'146 \text{ kgf} / 45,6 \text{ kg/cm}^2 = 266,4 \text{ cm}^2$
- Dimensi = 16,32/16,32 \rightarrow boleh dibulatkan ke atas, misalnya 17/17 atau 20/20.

C. Kolom Baja

Tegangan izin tekuk (σ_k) diperoleh kalau angka kelangsingan l diketahui. Besarnya $l = Lk / r$ min, untuk penyederhanaan perhitungan, dapat dicari langsung dengan menggunakan grafik-1 untuk konstruksi baja.

Langkah kontrol tekuk kolom baja sebagai berikut.

1. Cari jari-radius girasi/jari inersia r_x (i_x) dan r_y (i_y).

Ada dua cara:

- a. gunakan tabel-A (perkiraan radius girasi/jari-jari inersia), pilih nilai r atau i yang terkecil; dan
- b. gunakan tabel baja, pilih angka pada kolom i_x , i_y , atau r_x , r_y . Angka dari tabel baja adalah yang teliti.

2. Tegangan izin tekuk (σ_k), gunakan grafik tegangan izin baja:

- Dari $l = Lk / r$ min

Ditemukan tegangan izin tekuk σ_k

Dalam tabel-A (perkiraan radius girasi/jari-jari inersia) pada kolom paling kiri terdapat tujuh tipe bentuk penampang transversal kolom/batang tekan. Penampang nomer 1, 2, dan 7 kekakuan tekuk sumbu y lebih kecil dibanding kekakuan tekuk sumbu x , maka bentuk penampang tipe ini tidak efisien untuk menanggulangi tekuk, sedangkan penampang tipe ini tidak efisien untuk menanggulangi tekuk, sedangkan penampang nomer 3 s.d. 6 kekakuan tekuk sumbu x dan sumbu y sama besar, maka bentuk penampang tersebut efisien untuk menanggulangi tekuk. Bila menggunakan kolom dengan bentuk penampang tipe 1, 2, dan 7, akan diperoleh luas penampang transversal kolom/batang tekan yang lebih besar daripada bentuk penampang tipe 3 s.d. 6.

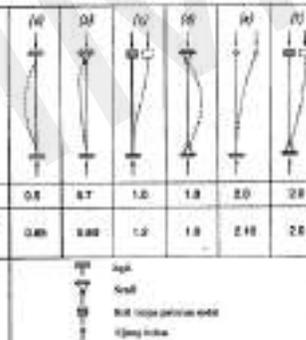
a. Perkiraan Radius Girasi/Jari-jari Inersia

Catatan: r_x dan r_y sama dengan i_x dan i_y yang ada dalam tabel baja.

Approximate values for Radius of Gyration for Some Section Shapes.

No. of Edges	Approximation of r VALUE	
1		$r_x = 0.281h$ $r_y = 0.143b$
2		$r = 0.281d$
3		$r_x = 0.281a$ $r_y = 0.281a$
4		$r = 0.281d$
5		$r = 0.281d$
6		$r_x = 0.281a$ $r_y = 0.281a$
7		$r_x = 0.281a$ $r_y = 0.281a$

b. Panjang Tekuk Menurut SNI 03 - 1729 - 2002

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Nilai μ efektif	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Nilai μ efektif untuk kolom yang terikat di kedua ujungnya	0,50	0,60	1,0	1,0	2,10	2,0
Nilai μ efektif						

Sumber: Lin, Y.T., 1981

c. Tabel Baja IWF

Tabel 7.1 Contoh Tabel Profil IWF

Wide Flange Shape
Product Specifications
Hot Rolled

Geometrical moment of inertia $I = I^y$
 Radius of gyration of area $I = \sqrt{I/A}$
 Modulus of section $Z = I/e$
 ($A =$ sectional area)

According AISI 3192

Standard Sectional Dimensions					Section Area A cm ²	Unit Weight kg/m	Informational Solutions					
Nominal Dimensional mm	H x B mm	t mm	d mm	r mm			Geometrical Moment of Inertia I ^y cm ⁴	Radius of Gyration r _y cm	Modulus of Section Z _y cm ³	I _x cm ⁴	r _x cm	Z _x cm ³
150 x 100	150 x 100	6	6	10	21.90	11.20	303	134	4.18	2.47	76.50	28.7
175 x 125	175 x 125	6.3	6.3	10	30.11	15.82	497	202	5.29	3.11	130.00	42.00
150 x 175	150 x 175	6	7	8	17.26	14.87	494	202	6.11	3.60	9.38	31.25
180 x 180	180 x 180	6	6	11	28.84	21.12	1.020	387	6.57	2.92	134.00	38.12
180 x 200	180 x 200	7	10	11	42.35	21.50	1.490	563	8.39	3.75	230.00	70.12
175 x 175	175 x 175	7.3	6	12	54.21	40.20	2.860	934	7.58	4.30	330.00	113.00
200 x 180	200 x 180	4.3	7	11	23.18	18.20	1.280	474	6.28	2.21	180.00	33.00
200 x 200	200 x 200	5.2	6	11	37.96	27.20	1.890	714	6.24	2.20	184.00	35.40
200 x 250	200 x 250	6	9	12	58.58	39.60	2.571	957	6.36	3.40	275.00	57.40
200 x 280	200 x 280	6	12	13	69.28	49.80	4.720	1.600	6.62	3.62	472.00	100.00
250 x 125	250 x 125	6	6	12	32.68	26.72	3.140	265	10.40	2.75	280.00	61.12
250 x 175	250 x 175	6	9	12	37.00	29.60	4.850	294	10.40	2.75	324.00	47.00
250 x 200	250 x 200	6	14	18	50.18	37.40	6.800	3.670	10.40	3.20	387.00	201.00
300 x 150	300 x 150	6.3	6	13	48.09	32.60	6.320	442	12.40	3.20	434.00	59.30
300 x 200	300 x 200	6.3	9	13	68.78	36.72	7.710	526	12.40	3.20	491.00	57.72
300 x 250	300 x 250	10	10	18	118.80	64.60	20.400	8.750	13.10	7.81	1.340.00	480.00
300 x 175	300 x 175	6	6	14	52.68	41.43	11.120	752	14.60	2.60	347.00	31.00
300 x 225	300 x 225	7	11	14	63.14	49.40	15.800	964	14.70	3.00	379.00	113.00
350 x 200	350 x 200	5.2	10	20	173.9	137.00	40.300	13.600	16.20	8.64	2.200.00	173.00
400 x 200	400 x 200	7	11	18	27.18	56.80	20.800	1.420	16.70	4.48	1.010.00	145.00
400 x 250	400 x 250	6	12	18	54.1	55.07	25.700	1.740	16.80	4.54	1.110.00	174.00
400 x 400	400 x 400	13	21	22	218.7	172.00	66.600	22.400	17.30	10.10	3.320.00	1.020.00
450 x 200	450 x 220	6	14	18	38.8	78.00	24.800	1.870	18.60	4.40	1.480.00	187.00
500 x 200	500 x 220	10	18	20	114.2	60.60	47.800	2.140	20.50	4.32	1.470.00	214.00
600 x 200	600 x 220	11	17	23	134.4	59.00	73.800	2.280	24.80	4.12	1.540.00	228.00
600 x 280	600 x 300	12	20	28	182.5	101.00	118.000	3.620	24.80	6.80	4.620.00	681.00
700 x 300	700 x 320	13	24	28	225.5	182.00	201.000	10.800	29.50	6.70	5.700.00	722.00
800 x 280	800 x 300	14	26	28	287.4	212.00	295.000	11.700	34.80	6.62	7.290.00	784.00
900 x 300	900 x 320	16	28	28	359.8	243.00	411.000	13.600	36.40	6.30	9.140.00	941.00

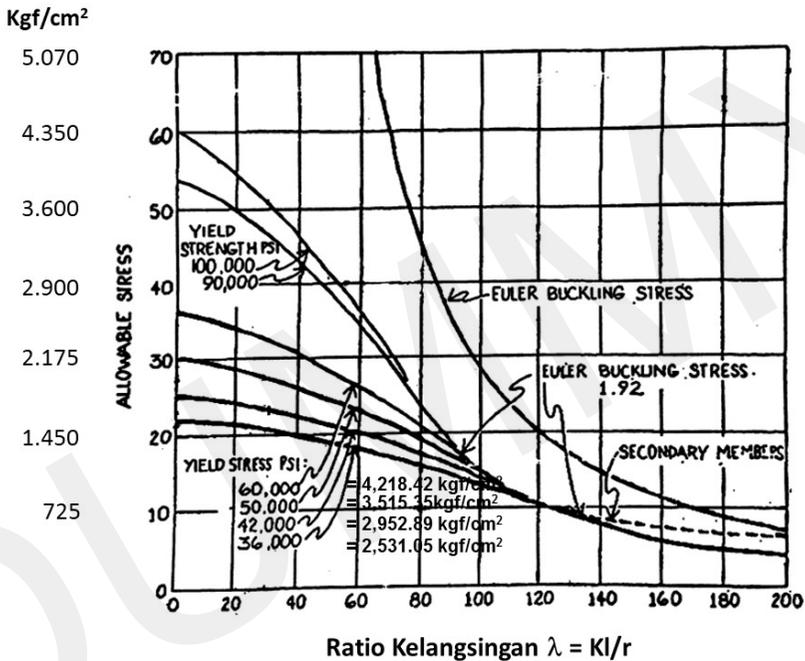
Sumber: https://www.gunungrajapaksi.com/upload/image_diyiwa/NewGRP-Catalogue.pdf

1. Kontrol Tekuk Kolom Baja

Langkah-langkah mengontrol tekuk kolom baja adalah sebagai berikut.

- a. Hitung dimensi kolom berdasarkan kekuatan: $\sigma = P/A \leq \sigma$ izin, diperoleh dimensi baja profil yang dipilih.
- b. Kontrol tekuk:
 - 1) Cari panjang tekuk L_k dengan menggunakan tabel-B (panjang tekuk menurut SNI 03 – 1729 – 2002).

- 2) Hitung radius girasi/jari-jari inersia r_{\min} dengan tabel-A atau langsung dilihat pada tabel baja C.
- 3) Hitung $l = Lk/r_{\min}$, angkanya diberi tanda pada Gambar 7.3, tarik garis vertikal sampai bertemu dengan garis lengkung mutu baja yang ditetapkan, kemudian tarik garis horizontal sampai bertemu dengan sumbu vertikal paling tepi. Maka, diperoleh besarnya tegangan kritis (besarnya dapat diperkirakan secara proporsional terhadap angka-angka yang ada).



Gambar 7.5 Grafik Tegangan Baja

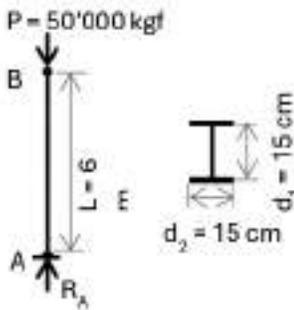
Sumber: Lin, T.Y., 1981

Contoh Perhitungan Kolom Baja:

Diketahui:

- Sebuah kolom baja dengan panjang $L = 6$ m ditumpu dengan sendi di ujung bawah dan di ujung atas.
- Kolom menggunakan baja St 37 (σ leleh = 36,000 psi), berat sendiri kolom boleh diabaikan.

Hitung dimensi kolom!



Jawab:

Reaksi tumpuan $R_A = P = 50'000 \text{ kgf}$

Tegangan tekan di tumpuan

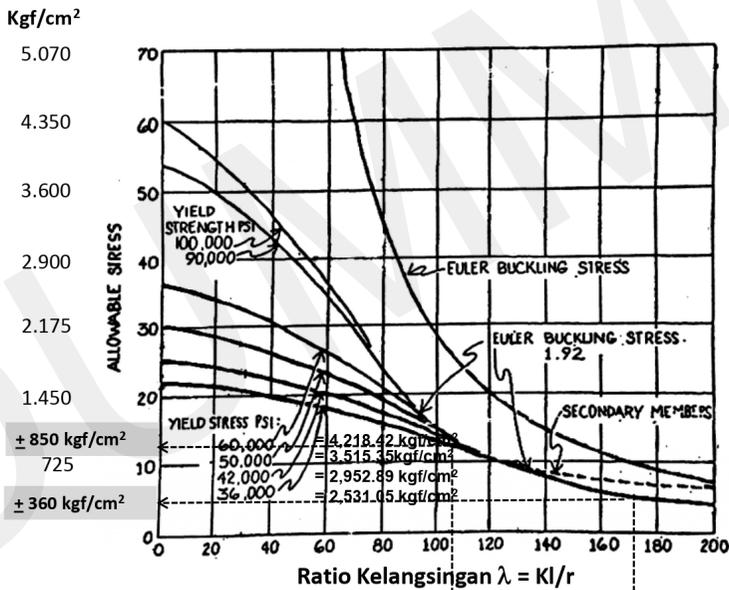
$$\sigma = P/A = 50'000/A$$

A dapat dicari dengan menggunakan tegangan izin:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{izin}} &= 1'600 \text{ kgf/cm}^2 \rightarrow 1'600 = 50'000/A \\ \rightarrow A &= 50'000/1'600 = 31,25 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

\rightarrow Maka, dipilih IWF 150 x 150, $A = 40,14 \text{ cm}^2$

$$\sigma = P/A = 50'000/40,14 = 1'245,64 \text{ kgf/cm}^2 < \sigma_{\text{izin}} \rightarrow \text{kuat!}$$



Sumber: Lin, T.Y,1981

$\lambda = 104,4$

$\lambda = 173,91$

Kontrol Tekuk:

- Panjang tekuk kolom yang ditumpu dengan sendi di kedua ujungnya: $L_k = L = 600 \text{ cm}$.

- Hitung radius girasi:
 - $r_x = 0,4 \times d_1 = 0,4 \times 15 = 6 \text{ cm}$
 - $r_y = 0,23 \times d_2 = 0,23 \times 15 = 3,45 \text{ cm} \rightarrow$ dipilih yang terkecil.
 - Jika dilihat pada tabel baja, diperoleh angka 3,75 cm (ini yang lebih teliti)
- $\lambda = Lk/r \text{ min} = 600/3,45 = 173,91$
 - Lihat grafik tegangan izin baja $\rightarrow \sigma_{k1} = \pm 360 \text{ kgf/cm}^2$
- $\sigma = 50'000/40,14 = 1'245,64 \text{ kgf/cm}^2 > \sigma_{k1} \rightarrow$ dimensi harus diperbesar.
Coba IWF 250 x 250, $A_2 = 92,18 \text{ cm}^2$
- $r_y = 0,23 \times 25 = 5,75 \text{ cm}$
- $\lambda = Lk/r_{\text{min}} = 600/5,75 = 104,4$
 - Lihat grafik tegangan izin baja $\rightarrow \sigma_{k2} = \pm 850 \text{ kgf/cm}^2$
- Kontrol ulang kekuatan:
 - $\sigma = P/A_2$
 - $\sigma = 50'000/92,18 = 524,4 \text{ kgf/cm}^2 \leq \sigma_{k2} \rightarrow \text{ok!}$

2. Alternatif Lain Penyelesaian Tekuk dengan Memperpendek Panjang Tekuk

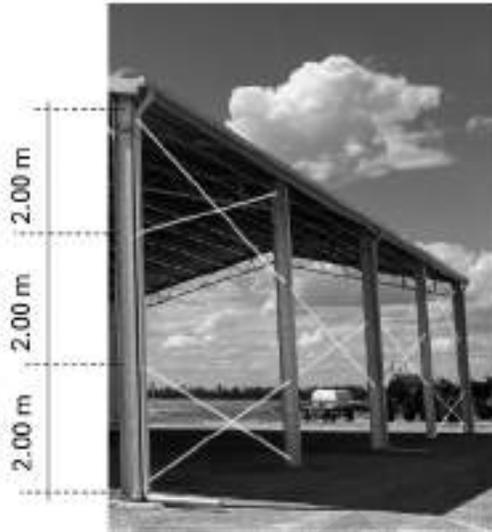
Memperpendek panjang tekuk dapat dilakukan, misalnya dengan memanfaatkan *bracing* dengan mengatur kofigurasinya sebagai pengaku horizontal kolom. Misalnya, *bracing* memperpendek panjang tekuk kolom menjadi 2 m (= 200 cm).

Tetap menggunakan IWF 150 x 150 ($A = 40,14 \text{ cm}^2$) dari perhitungan pertama.

- $L_k = 200 \text{ cm}$
- $l = L_k/r_{\text{min}} = 200/3,45 = 57,97$
- Lihat grafik tegangan izin baja, diperoleh $\sigma_k = 1300 \text{ kgf/cm}^2$

Kontrol kekuatan lagi:

- $\sigma = P/A = 50'000/40,14 = 1'245,64 \text{ kgf/cm}^2$ sama dengan perhitungan (1) < dari $\sigma_k = 1'300 \text{ kgf/cm}^2 < \sigma \text{ izin} = 1.600 \text{ kgf/cm}^2 \rightarrow \text{ok!}$



Gambar 7.6 Contoh Pemendekan Panjang Tekuk dengan Mengatur Konfigurasi *Bracing*

Sumber: Gambar Dimodifikasi dari: <https://www.abcsheds.net.au/blog/different-shed-bracing-types>

D. Kolom Kayu

Dengan pendekatan aproksimasi ini, tegangan izin tekuk (σ_k) untuk kolom kayu diperoleh dengan menemukan Lk/d , jadi berbeda dengan baja.

Langkah-langkah mengontrol tekuk kolom baja, yakni sebagai berikut.

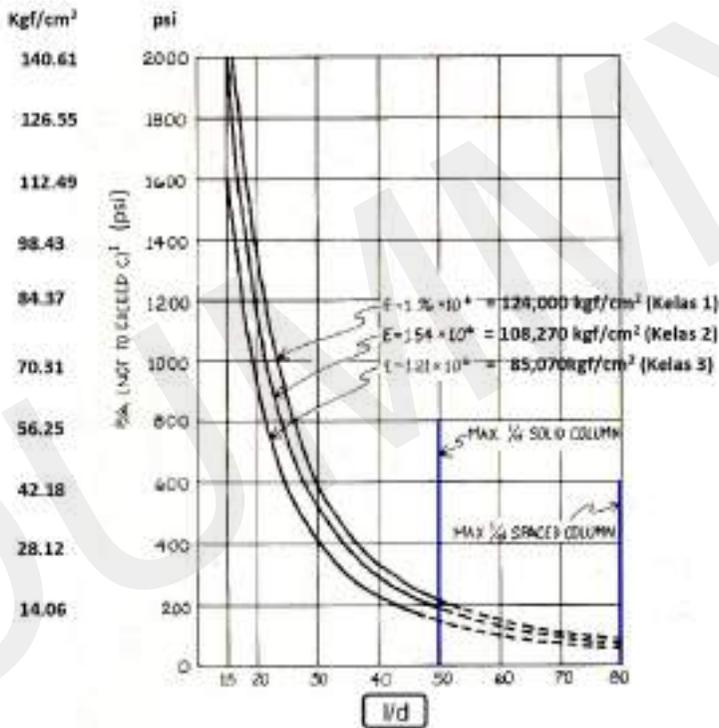
1. Hitung dimensi kolom berdasarkan kekuatan: $\sigma = P/A \leq \sigma$ izin, diperoleh dimensi kolom kayu.
2. Kontrol tekuk:
 - a. Cari panjang tekuk Lk dengan menggunakan tabel-B.
 - b. Hitung Lk/d_{\min} .
 - c. Cari tegangan kritis tekuk dengan menggunakan grafik E:
 - Pilih salah satu garis lengkung yang angka modulus elastisitasnya sesuai dengan kelas kayu yang dipilih.
 - Beri titik pada garis sumbu horizontal angka Lk/d_{\min} yang telah dihitung pada langkah b. Tarik garis dari titik tersebut ke atas sampai bertemu dengan garis lengkung

mutu baja yang dipilih.

- Dari titik temu tersebut, tarik garis horizontal ke kiri sampai bertemu dengan sumbu tegak. Titik temu antara garis sumbu tegak dengan garis horizontal tersebut adalah tegangan kritis tekuk yang dicari.

d. Kontrol ulang kekuatan:

- Coba-coba perbesar dimensi profil baja, diperoleh luas penampang transversal A_2 .
- Kontrol dengan $P/A_2 \leq \sigma_{k2}$.



Gambar 7.7 Grafik Tegangan Kayu

Catatan:

- C adalah tegangan izin tekan sejajar serat dari formula spesifikasi desain “Nasional” untuk kolom solid $P/A = 0.30/(l/d)^2$.
- Kolom berjarak (majemuk) dengan konektor berjarak $1/20$ dari ujung kolom, P/A dikalikan dengan 2.5.
- Kolom majemuk dengan konektor berjarak $1/20$ sampai $1/10$ dari ujung kolom, P/A dikalikan dengan 3.0.
- d = ketebalan batang individual.

Contoh Perhitungan Kolom Kayu:



Diketahui:

Sebuah kolom kayu ditumpu dengan sendi di ujung bawah dan atas. Kolom menggunakan kayu kelas 2, berat sendiri kolom diabaikan.

Hitung dimensi kayu!

Jawab:

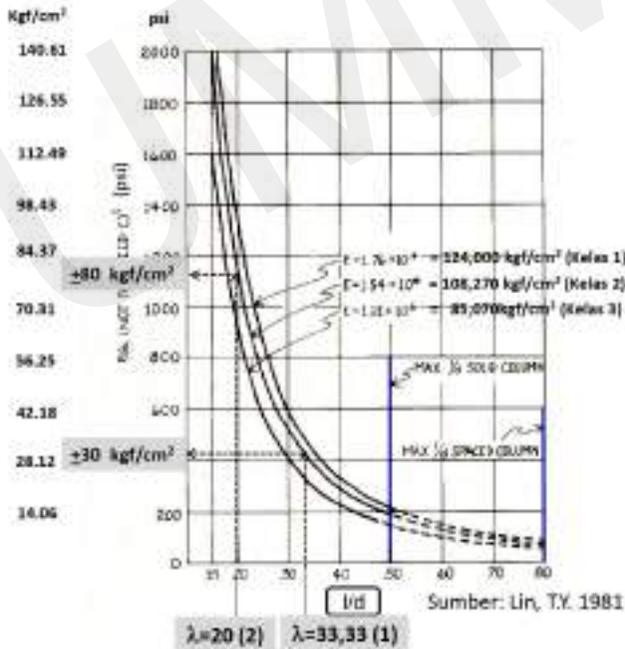
Tegangan tekan izin kayu kelas 2: σ_{tk} , izin = 95 kgf/cm^2

Reaksi tumpuan $R_A = P = 20'000\text{ kgf}$

Tegangan tekan di tumpuan $\sigma = P/A = 20'000/A$

a. Kekuatan:

- A dicari dengan menggunakan σ izin = 95 kgf/cm^2 :
- $95 = 20'000/A \rightarrow A = 20'000/95 = 210,5\text{ cm}^2 \rightarrow$ dipilih batang kayu 12/18, $A = 218\text{ cm}^2$.



b. Kontrol kekakuan tekuk:

- $Lk = L = 4 \text{ m} = 400 \text{ cm}$ (lihat tabel-B)
- Dimensi kolom 12/18, maka $d \text{ min} = 12 \text{ cm}$
- $Lk/d \text{ min} = 400/12 = 33,33$
- Lihat grafik tegangan izin kayu ($\sigma \text{ izin}$), diperoleh $\sigma_{k1} = \pm 30 \text{ kgf/cm}^2$

Kontrol kekuatan lagi:

- $\sigma = 20'000/(12 \times 18) = 92,6 \text{ kgf/cm}^2 > \sigma_{k1} = \pm 30 \text{ kgf/cm}^2$,
maka dimensi harus diperbesar.

Dicoba dimensi 20/20:

$$Lk/d \text{ min} = 400/20 = 20, \text{ diperoleh } \sigma_{k2} = + 80 \text{ kgf/cm}^2$$

Kontrol kekuatan lagi:

$$\text{Tegangan yang terjadi } \sigma = 20'000/(20 \times 20) = 50 \text{ kgf/cm}^2 < \sigma_{k2} = 80 \text{ kgf/cm}^2 \rightarrow \text{ok!}$$

Kesimpulan

Kolom atau batang tekan berpotensi mengalami perilaku tekuk. Bentuk penampang transversal kolom/batang berpengaruh pada kekakuan terhadap tekuk. Penampang berbentuk bujur sangkar dan lingkaran lebih optimal dalam menghadapi perilaku tekuk. Bentuk penampang longitudinal dapat diartikulasikan terhadap perilaku tekuk sehingga menghasilkan bentuk yang unik, pembahasannya ada dalam bab efisiensi struktur.

DUMMY

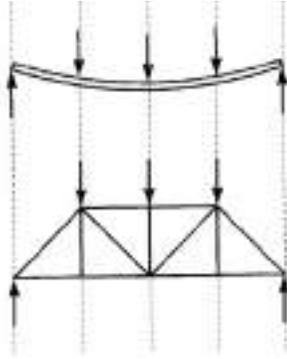
[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 8

STRUKTUR RANGKA BATANG

A. Rangka Batang

Struktur rangka batang adalah struktur yang terdiri dari batang-batang yang dirangkai menjadi satu kesatuan untuk menahan beban. Struktur rangka batang adalah pengembangan dari struktur balok yang diperbaiki bentuknya untuk tujuan efisiensi struktur. Profil balok yang diperbaiki menjadi rangka batang (*truss*) dapat dikategorikan dalam profil triangulasi, yaitu profil yang terdiri dari elemen-elemen batang yang membentuk segitiga (Gambar 8.1). Jika beban pada profil triangulasi tersebut diletakkan pada titik pertemuan batang, masing-masing elemen (batang) hanya menerima gaya dalam aksial saja.



Gambar 8.1 Perbaikan Balok Menjadi Rangka Batang

Sumber: McDonald, 2001

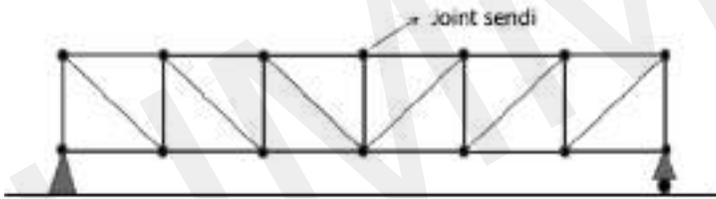
Jika beban pada profil triangulasi tersebut diletakkan pada titik pertemuan batang, masing-masing elemen (batang) hanya menerima gaya dalam aksial saja. Pada profil triangulasi, tegangan lentur yang terdapat pada elemen balok (*non form-active*) berubah menjadi gaya aksial di setiap batang (*form-active*). Efisiensi struktur dapat tercapai dengan meniadakan tegangan lentur, sehingga besaran batang bisa lebih kecil, tetapi secara keseluruhan struktur dengan profil triangulasi dapat menahan beban yang lebih besar dibandingkan dengan balok (*non form-active*) dengan volume material yang sama. Jadi, geometri internal triangulasi memungkinkan tercapainya efisiensi struktural yang tinggi bila beban eksternal diletakkan pada pertemuan batang.

Struktur rangka batang terdiri dari susunan elemen berupa batang yang membentuk segitiga. Hubungan antarbatangnya adalah hubungan sendi. Struktur ini dapat dikategorikan dalam jenis struktur dengan profil triangulasi (McDonald, 2001). Hubungan antarbatang yang berupa sendi sehingga tidak dapat meneruskan momen dari satu elemen ke elemen lainnya. Batang-batang pada rangka batang, tidak mengalami momen lentur atau gaya geser. Gaya internal batangnya adalah gaya aksial, baik gaya tarik atau gaya tekan. Selain gaya aksial tarik atau tekan, pada elemen rangka batang ada batang yang netral atau tidak ada gaya aksial sama sekali. Hal tersebut terjadi pada konfigurasi susunan batang tertentu, di mana tidak terjadi tegangan pada salah satu batang karena gaya aksial telah diterima oleh batang-batang yang lain. Dalam praktik, elemen-elemen dalam struktur rangka batang

biasanya tidak dihubungkan dengan sendi murni. Namun, dalam analisis, hubungan tersebut dapat diperhitungkan sebagai hubungan sendi supaya analisisnya lebih 'sederhana'.

Beberapa prinsip dalam struktur rangka batang bersendi adalah sebagai berikut.

1. Hubungan antarbatangnya merupakan hubungan sendi dan bentuk keseluruhan merupakan rangkaian bentuk segitiga yang diletakkan pada satu tumpuan sendi dan satu tumpuan rol.
2. Batang-batang hanya menahan gaya tarik dan tekan, tidak ada momen pada batang karena batang dihubungkan dengan sendi dan beban diletakkan pada pertemuan batang.
3. Bahan yang dipakai bisa seluruhnya batang kaku, misalnya logam, kayu, bambu (Gambar 8.3) atau kombinasi kaku dan tidak kaku. Batang kaku untuk menahan gaya tekan atau tarik, batang tidak kaku hanya menahan gaya tarik.



Gambar 8.2 Skematik Rangka Batang

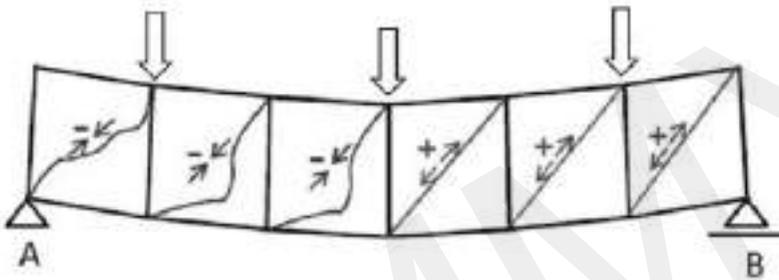
Sumber: Penulis



Gambar 8.3 Contoh Rangka Batang dengan Bahan Kaku (Material Kayu)

Sumber: Dokumentasi Penulis

Pada struktur rangka batang, gaya dalam pada batang hanya berupa gaya tarik atau tekan bila beban-beban diletakkan hanya pada titik-titik simpul (pertemuan batang). Untuk menemukan batang diagonal yang bersifat tekan dan yang bersifat tarik, dapat dilakukan percobaan dengan batang-batang diagonal diganti dengan tali (Gambar 8.4). Bila balok “rangka batang” tersebut melentur akibat berat sendirinya, tali yang menjadi ketat (yang cenderung memanjang) adalah batang tarik, sedangkan tali yang menjadi kendur (yang cenderung memendek) adalah batang tekan.



Gambar 8.4 Identifikasi Rangka Batang dengan Mengganti Batang Diagonal dengan Tali

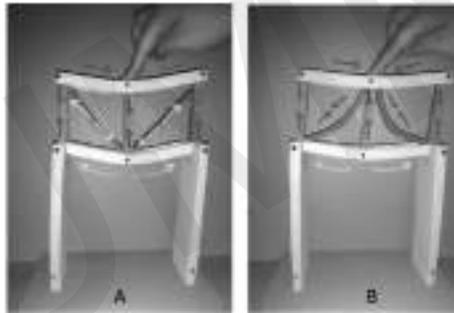
Sumber: Penulis

Identifikasi gaya pada rangka batang dapat dilakukan dengan eksperimen dengan model seperti pada Gambar 8.5. Dua model tersebut dibedakan dengan penempatan batang diagonal yang berbeda arah. Pada Model A, batang diagonal memusat ke bawah dan bertemu dengan batang tegak. Saat diberi beban, batang diagonal lurus ‘memanjang’, sehingga dapat diidentifikasi sebagai batang tarik. Pada Model B, batang diagonal memusat ke atas dan bertemu dengan batang tegak. Saat diberi beban, batang diagonal melengkung ‘memendek’, sehingga dapat diidentifikasi sebagai batang tekan.

Selain struktur rangka batang, ada jenis struktur yang juga terdiri dari rangkaian batang, tetapi secara prinsip berbeda dengan rangka batang. Struktur ini disebut struktur *vierendeel*. Bentuk unit dasar struktur *vierendeel* adalah persegi empat dan hubungan antarbatangnya dihubungkan dengan *joint* (hubungan) kaku (Gambar 8.6). Oleh sebab

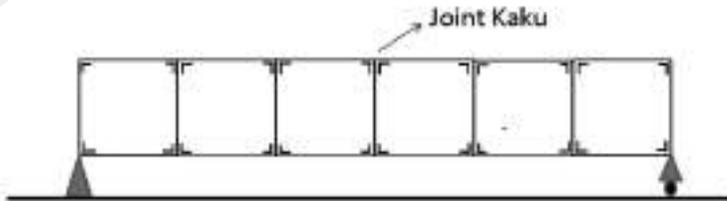
itu, elemen batang pada struktur mampu menahan gaya tarik, gaya tekan, dan momen.

Rangka *vierendeel* memiliki susunan rangka berbentuk persegi panjang atau bujur sangkar. Stabilitas rangka diperoleh dari *joint* kaku antarbatangnya. Gaya internal yang terjadi adalah gaya aksial dan momen lentur. Rangka *vierendeel* biasanya akan membutuhkan dimensi batang yang lebih besar daripada struktur rangka batang, karena kebutuhannya untuk menahan tegangan aksial/normal akibat lenturan dan gaya geser pada batang-batangannya. Keuntungan rangka *vierendeel* adalah kekakuannya yang tinggi dan susunan rangkanya yang berbentuk persegi panjang. Fitur kedua ini sering kali menjadikan jenis rangka lebih sesuai untuk diaplikasikan sebagai struktur rangka dinding karena tidak ada batang diagonal yang menghalangi bukaan pintu atau jendela. Baik struktur rangka batang dan *vierendeel* memiliki keunggulan dapat diaplikasikan untuk bangunan bentang lebar dengan material berdimensi kecil seperti yang terlihat pada Gambar 8.7.



Gambar 8.5 Eksperimen untuk Mengidentifikasi Gaya Internal pada Batang

Sumber: Penulis



Gambar 8.6 Skematik Struktur Rangka *Vierendeel*

Sumber: Penulis



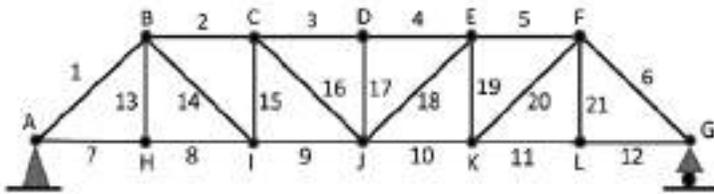
Gambar 8.7a Struktur Rangka Batang Baja

Sumber: <https://www-test.canambridges.com/products/steel-bridges/steel-standard-truss-bridges/>



Gambar 8.7b Struktur Vierendeel Baja

Sumber: <https://id.pinterest.com/pin/14847873753248883/>



Gambar 8.8 Bagian-bagian Rangka Batang

Sumber: Penulis

Pada rangka batang, terdapat elemen-elemen batang yang masing-masing dapat diberi nama sebagai berikut (Gambar 8.8).

1. Simpul adalah titik pertemuan batang (A, B, C, sampai L).
2. Batang tepi yang terdiri dari batang tepi atas (1, 2, 3, 4, 5, 6) dan batang tepi bawah (7, 8, 9, 10, 11, 12).
3. Batang pengisi, terdiri dari batang pengisi tegak (13, 15, 17, 19, 21), dan batang pengisi diagonal (14, 16, 18, 20).

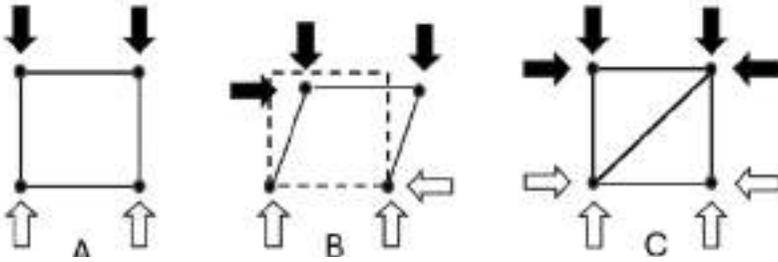


Gambar 8.9 Struktur Rangka Batang dengan Bahan Baja Ringan

Sumber: Penulis

Stabilitas rangka batang dapat dicapai apabila jumlah sendi pada satu rangkaian terdiri dari tiga sendi. Pada Gambar 8.10, satu rangkaian yang terdiri dari empat elemen/batang dihubungkan seluruhnya dengan *joint* sendi. Saat rangka batang (Gambar 8.10A) mendapat gaya vertikal simetri (sama besar), tidak terjadi deformasi, tetapi ketika mendapat gaya horizontal, rangka batang menjadi tidak stabil dan terjadi deformasi (Gambar 8.10B). Untuk mengatasi hal tersebut, maka ditambahkan batang diagonal sehingga rangka batang menjadi stabil (Gambar 8.10C).

Untuk menentukan apakah rangka batang dengan tumpuan (Gambar 8.10) dikategorikan stabil atau tidak, selain dapat dites dengan model, dapat dilakukan identifikasi dengan rumus sederhana seperti pada Tabel 8.1. Apakah rangka batang A, B, C, D (Gambar 8.11) tersebut stabil? Gunakan rumus pada Tabel 8.1 untuk mengidentifikasinya.



Gambar 8.10 Stabilitas Rangka Batang

Sumber: Penulis

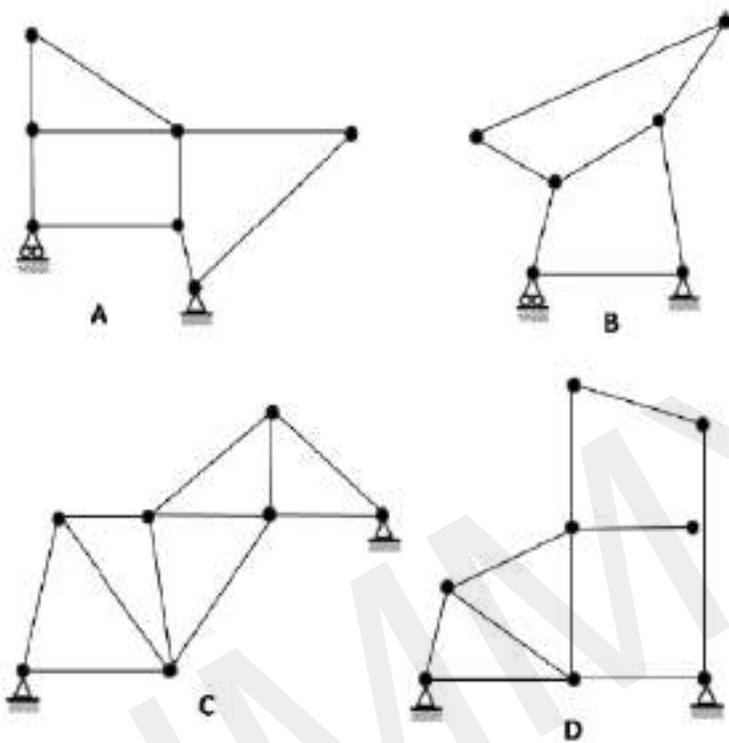
Tabel 8.1 Rumus Stabilitas Rangka Batang

Rumus	Kategori	Keterangan
$m + r = 2j$	stabil	m = jumlah batang
$m + r < 2j$	tidak stabil	j = jumlah joint sendi
$m + r > 2j$	over stabil	r = jumlah reaksi tumpuan

Sumber: Garrison, 2005

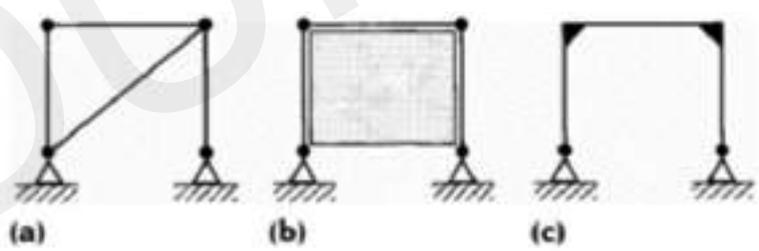
Stabilitas rangka batang yang disusun secara koordinat X dan Y (rangka batang 3D) dapat dianalisis dengan melakukan percobaan dengan model. Gambar 8.14 menunjukkan stabilitas rangka batang dalam dua arah yang berbeda dengan elemen stabilitas kombinasi batang diagonal dengan rangka kaku (*moment resisting frame*).

Elemen stabilitas gaya lateral terdiri dari tiga jenis dapat dilihat pada Gambar 8.12, yaitu batang diagonal atau *bracing* (Gambar 8.12A), dinding geser atau *shear wall* (Gambar 8.12B), dan rangka kaku atau *moment resisting frame* (Gambar 8.12C). Gambar 8.13 menunjukkan konstruksi struktur rangka baja dengan menggunakan elemen stabilitas *moment resisting frame* (A) dan batang diagonal atau *bracing* (B).



Gambar 8.11 Contoh Soal Stabilitas Rangka Batang

Sumber: MacDonald, 2001



Gambar 8.12 Elemen Stabilitas Gaya Lateral

Sumber: MacDonald, 2001

Stabilitas rangka batang yang disusun secara koordinat X dan Y (rangka batang 3D) dapat dianalisis dengan melakukan percobaan dengan model. Gambar 8.14 menunjukkan stabilitas rangka batang

dalam dua arah yang berbeda dengan elemen stabilitas kombinasi batang diagonal dengan rangka kaku (*moment resisting frame*).



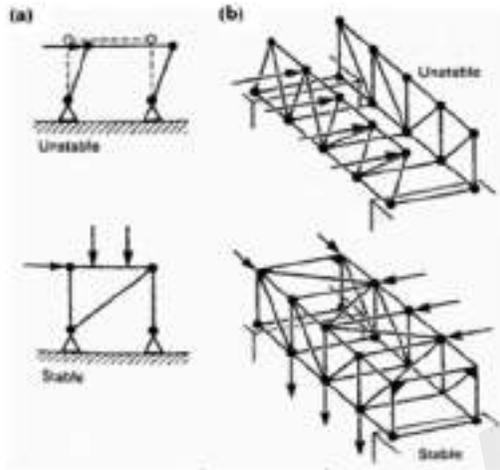
Gambar 8.13a *Frame dan Bracing*

Sumber: <https://www.cisc-icca.ca/2019-g-1-kulak-award-recipient-explores-steel-multi-tiered-braced-frames/>



Gambar 8.13b *Frame - Shear Wall*

Sumber: <https://engineersforum.com.ng/2020/12/14/what-is-a-shear-wall-and-why-do-structures-need-them/>



Gambar 8.14 Stabilitas Rangka Batang Dua Arah

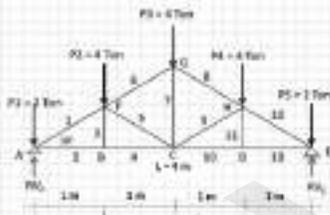
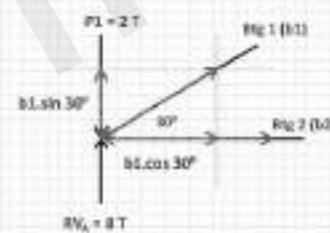
Sumber: MacDonald, 2001

B. Statika Rangka Batang

Analisis pada struktur rangka batang adalah menghitung gaya pada setiap batang dan mengidentifikasi apakah gaya tersebut tarik atau tekan. Terdapat tiga metode analisis, yaitu: (1) metode keseimbangan titik buhul; (2) metode penampang (*section*); dan (3) metode grafis. Pada buku ini, pembahasan hanya dilakukan untuk metode keseimbangan titik buhul. Cara ini cukup sederhana untuk dikerjakan, dengan langkah-langkah analisis sebagai berikut.

1. Perhitungan dimulai dari titik buhul yang memiliki maksimal dua batang yang belum diketahui. Pastikan titik yang ditinjau hanya memiliki dua batang yang belum diketahui.
2. Jika jenis batang belum diketahui, asumsikan batang tersebut sebagai batang tarik. Jika hasil perhitungan bertanda positif (+), arah pemisahan gaya sudah benar. Namun, jika hasil perhitungan bertanda negatif (-), arah pemisahan gaya harus diubah.
3. Arah gaya ke kanan bertanda positif (+), sebaliknya arah gaya ke kiri bertanda negatif (-).
4. Arah gaya ke atas bertanda positif (+), sebaliknya arah gaya ke bawah bertanda negatif (-).

Berikut contoh analisis rangka batang dengan metode keseimbangan titik buhul. Tentukan jenis gaya dan besarnya gaya pada batang!

Rangka Batang	Contoh Soal
<p>[Tahap 1: Mencari Gaya Reaksi di Titik Tumpuan]</p> <p>$\sum M_A = 0$</p> <p>$0 = -(RVE \times 4) + (2 \times 4) + (4 \times 3) + (4 \times 2) + (4 \times 1)$</p> <p>$0 = -4 RVE + 8 + 12 + 8 + 4$</p> <p>$4 RVE = 32 \text{ Tm}$</p> <p>$RVE = 8 \text{ T (↑)}$</p> <p>$\sum V = 0$</p> <p>$RVA - P1 - P2 - P3 - P4 - P5 + RVE = 0$</p> <p>$RVA - 2 - 4 - 4 - 4 - 2 + 8 = 0$</p> <p>$RVA = 8 \text{ T (↑)}$</p> <p>[Tahap 2: Analisis Tiap Simpul]</p> <p>$\sum V = 0$</p> <p>$RVA + b1 \sin 30^\circ - P1 = 0$</p> <p>$8 \text{ T} + b1 (\frac{1}{2}) - 2 \text{ T} = 0$</p> <p>$b1 = -12 \text{ ton}$</p> <p>*1) Pengandaian bntg 1 tidak tepat. Arah gaya batang mendekati titik simpul = tekan.</p> <p>$\sum H = 0$</p> <p>$b2 - b1 \cos 30^\circ = 0$</p> <p>$b2 = 12 \times (\frac{\sqrt{3}}{2})$</p> <p>$b2 = 10,39 \text{ T}$</p> <p>*1) Pengandaian arah gaya batang 2 benar, batang 2 menjauhi titik simpul = tarik.</p>	 <p style="text-align: center;">Simpul A</p>  <p>Diasumsikan dahulu arah gaya batang menjauhi/mendekati titik buhul. Jika hasil perhitungan negatif (-), maka arah gaya batang kebalikan dari asumsi.</p>

Contoh Soal Rangka Batang

$$\sum V = 0$$

$$b_3 = 0$$

Batang 3 adalah batang nol, karena tidak ada komponen gaya batang lain yang memberi keseimbangan.

$$\sum H = 0$$

$$b_4 - b_2 = 0$$

$$b_4 = b_2$$

$$b_4 = 10,39 \text{ T}$$

*1) Pengandaian arah b_4 benar, batang 4 menjauhi titik simpul = **tarik**.

$$\sum SB Y = 0$$

$$P_2 \cos 30^\circ - b_5 \cos 30^\circ = 0$$

$$P_2 \cos 30^\circ = b_5 \cos 30^\circ$$

$$b_5 = P_2 = 4 \text{ T}$$

*1) Pengandaian b_5 benar, gaya batang mendekati titik simpul → **tekan**.

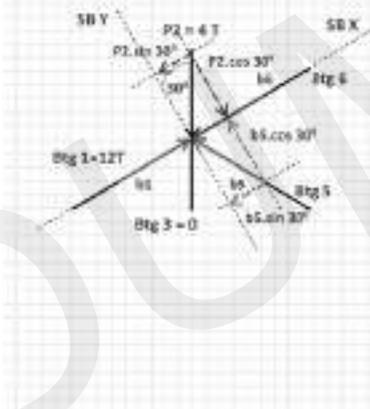
$$\sum SB X = 0$$

$$b_1 - b_6 - b_5 \sin 30^\circ - P_2 \sin 30^\circ = 0$$

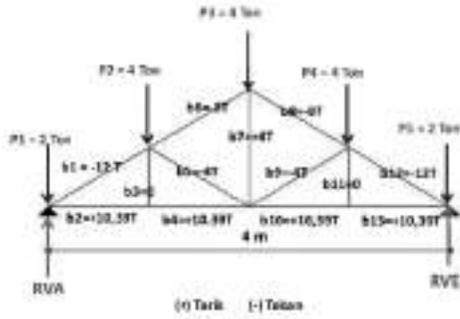
$$12 - b_6 - 4 \times (1/2) - 4 \times (1/2) = 0$$

$$b_6 = 8 \text{ T}$$

*1) Pengandaian arah b_6 benar, mendekati titik simpul → **tekan**.



[Tahap 3] Gaya Batang



Batang	Tarik	Tekan
1	-	12 T
2	10.39 T	-
3	-	-
4	10.39 T	-
5	-	4T
6	-	4T
7	4T	-
8	-	4T
9	-	4T
10	10.39 T	-
11	-	-
12	-	12T
13	10.39 T	-

DUMMY

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 9

STRUKTUR KABEL

Struktur kabel termasuk struktur tarik yang dibentuk oleh kabel-kabel baja. Kabel baja merupakan material yang dibuat dari baja tegangan tinggi, tegangan tariknya berkisar antara 11.900 kgf/cm^2 sampai 23.900 kgf/cm^2 , bila dibandingkan dengan baja BJ 37 di mana tegangan lelehnya 2.400 kgf/cm^2 , tegangan tarik kabel baja adalah sekitar 5 sampai 10 kali lebih besar. Dengan tegangan yang sedemikian besar, maka untuk menanggulangi bentang yang lebar dibutuhkan dimensi yang sangat kecil, sehingga kabel bersifat fleksibel dan hanya dapat digunakan untuk struktur tarik. Struktur kabel banyak digunakan untuk struktur jembatan gantung, dan pada bangunan tinggi yang menggunakan struktur gantung.



Gambar 9.1a Jembatan *Guyed Mast*

Sumber: <https://housing.com/news/cable-stayed-bridges/>



Gambar 9.1b Jembatan Gantung

Sumber: <https://www.roadtraffic-technology.com/features/feature-the-ten-longest-suspension-bridges-in-the-us/>

A. Geometri vs. Pola Pembebanan

Oleh karena material kabel bersifat fleksibel dan hanya bekerja menahan gaya tarik, maka ketika menerima beban dengan pola tertentu kabel tersebut akan menyesuaikan bentuknya dengan pola pembebanan tersebut sampai diperoleh keseimbangan di setiap posisi titik di kabelnya. Momen yang bekerja karena pembebanan dilawan oleh kabel dengan gaya aksial tarik yang bekerja di garis sumbu funikularnya yang berimpit dengan sumbu geometri kabel tersebut. Beberapa contoh bentuk geometri garis funikular kabel yang diberi gaya dengan konfigurasi yang berbeda-beda sebagai berikut.

1. Garis funikular kabel yang diberi gaya tarik di ujungnya adalah garis lurus mengikuti sumbu garis gaya aksial tersebut, misalnya sebuah kabel yang digantung vertikal dan dibebani di ujung bawahnya, garis funikularnya berbentuk **garis lurus vertikal**.
2. Garis funikular kabel terbentang yang dibebani dengan beban lintang terpusat berbentuk **poligon** dengan titik perubahan (koordinat) sudutnya berada di posisi titik gaya bekerja. Bentuk poligon tersebut tergantung dari jumlah beban terpusatnya, bila besarnya beban-beban terpusat tersebut tidak seragam, posisi titik perubahan sudut poligon dipengaruhi oleh besarnya masing-masing beban terpusat tersebut.
3. Geometri garis funikular kabel terbentang akibat berat sendirinya (beban merata sepanjang kabel tersebut) adalah **kateneri**.
4. Bentuk geometri garis funikular kabel terbentang akibat beban merata horizontal adalah **parabola**.



Gambar 9.2a Beban Aksial,
Garis Funikular Lurus



Gambar 9.2c Beban Merata
Sepanjang Kabel, Katenari



Gambar 9.2b Beban Lintang
Terpusat, Poligon

Sumber: <https://web2.ph.utexas.edu/~coker2/index.files/hangchain.jpg>; <https://constructionheadline.com/wp-content/uploads/2015/03/suspension-bridge.jpg>



Gambar 9.2d Beban Merata
Horizontal, Parabola

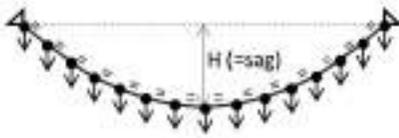
Sumber: <https://www.virtourist.com/asia/malaysia/kuala-lumpur/imatges/04.jpg>

B. Katenari dan Parabola

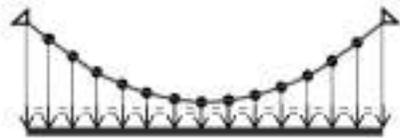
Bentuk geometri katenari (*catenary*) dan parabola hampir sama, apabila rasio panjang (L) dibanding kedalaman lengkung atau sag (h) $L/h > 5$, bentuk geometri keduanya hampir berimpit.

Dalam praktik analisis struktur, umumnya dipakai persamaan parabola sebagai pendekatan. Sebutan *catenary* (katenari) sering dipakai untuk menyebutkan bentuk lengkung kabel walaupun bebannya horizontal, seperti lengkung jembatan gantung ada yang menyebut lengkung katenari, sebenarnya bentuk geometrinya di antara katenari

(karena berat sendiri kabel) dan parabola (karena berat sendiri jembatan dan beban hidup kendaraan yang melaju).



Gambar 9.3a Kantenari

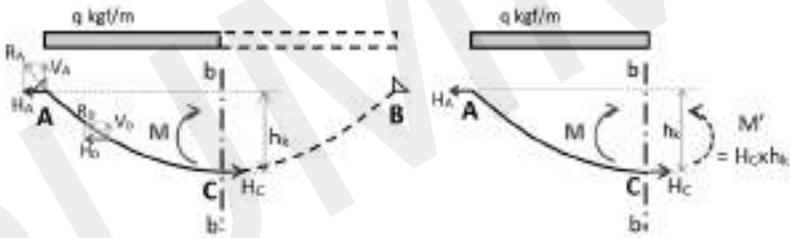


Gambar 9.3b Parabola

Sumber: Penulis

Gambar 9.3a adalah kabel yang terbentang dengan berat sendirinya sebagai beban, bentuk geometrinya adalah katenari, sedangkan Gambar 9.3b adalah kabel yang dibebani oleh beban merata horizontal, bentuk geometrinya adalah parabola.

C. Kinerja Struktur Kabel Parabola



Gambar 9.4 Gaya-gaya dalam Struktur Kabel Parabola

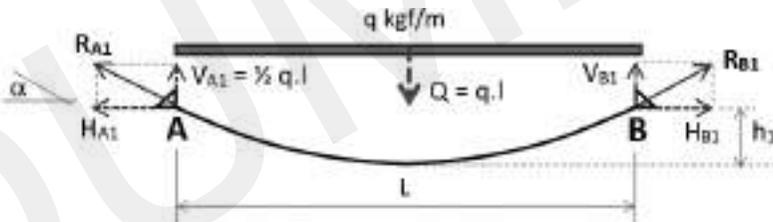
Sumber: Penulis

Gambar 9.4 menunjukkan struktur kabel yang menerima beban merata horizontal sebesar q kgf/m dan menghasilkan momen eksternal sebesar M . Struktur kabel tersebut dipotong secara maya di titik C (potongan $b-b$), bagian kanan struktur kabel tersebut (CB) dianggap tidak ada, dan diganti dengan gaya dalam yang bekerja melawan momen. Di tengah bentang pada potongan $b-b$ bekerja gaya dalam H_c , sedangkan di tumpuan A bekerja gaya reaksi tumpuan R_A , dan komponen gaya R_A adalah V_A dan H_A . M adalah momen eksternal maksimal berada di titik C (potongan $b-b$). Oleh karena kabel bekerja menahan hanya gaya aksial tarik saja, maka semua gaya di setiap kabel bekerja mengikuti

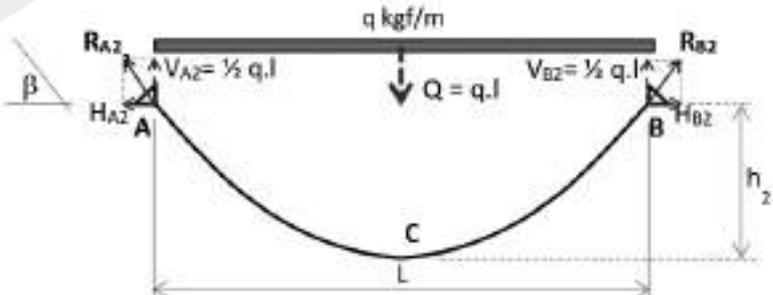
garis sumbu aksial kabel, di mana besarnya gaya-gaya di setiap titik di sebelah kiri dan kanan titik C lebih besar daripada H_C (misalnya $R_D > H_C$) dan semakin membesar ke arah tumpuan sampai maksimal adalah gaya reaksi tumpuan R_A dan R_B . Setiap gaya dalam kabel tersebut mempunyai komponen gaya horizontal dan vertikal, kecuali di titik C hanya ada gaya horizontal H_C karena titik C adalah titik terendah dari kabel parabola tersebut dan garis singgungnya adalah garis horizontal sehingga tidak ada komponen gaya vertikal. Besarnya semua komponen gaya horizontal di setiap titik kabel adalah sama misalnya $H_A = H_D = H_C$, sedangkan komponen gaya vertikal besarnya bervariasi mengikuti besarnya sudut kemiringan kabel di titik yang ditinjau, misalnya V_A adalah komponen gaya vertikal maksimal, V_D lebih kecil V_A , dan $V_C = 0$.

Momen M maksimal pada potongan b-b dilawan oleh kopel perlawanan M' (gaya H_C dan H_A dengan jarak h_k) yang besarnya adalah gaya tarik horizontal H_C dikalikan sag struktur kabel h_k , ... $M \text{ maks} = H_C \times h_k$, dan besarnya gaya tarik $H_C = M \text{ maks} / h_k$. Untuk bentang dan beban yang sama, besarnya H_C semakin kecil apabila h_k semakin besar dan sebaliknya.

Pengaruh Kedalaman Lungkung Kabel



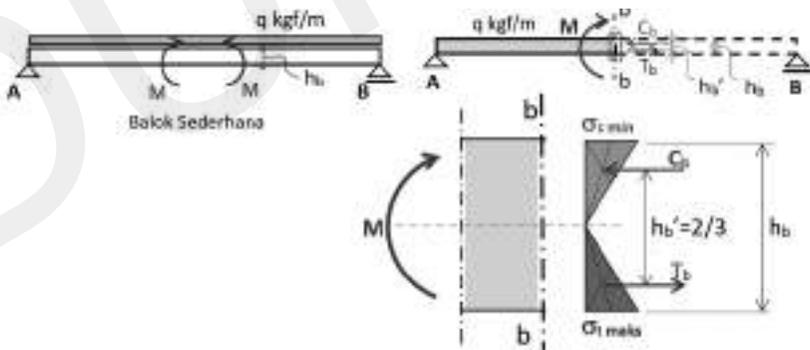
Gambar 9.4a Kabel dengan Sag Dangkal (1)



Gambar 9.4b Kabel dengan Sag Dalam (2)

Kabel dengan sag dangkal (1) adalah h_1 , kabel dengan sag dalam (2) adalah h_2 , di mana $h_1 < h_2$. Seluruh komponen vertikal gaya reaksi di tumpuan A dan B untuk kabel 1 dan 2 sama besar, yaitu $V_{A1} = V_{B1} = V_{A2} = V_{B2} = 1/2 q.l$ kgf, namun sudut garis singgung terhadap garis horizontal parabola 1 ditumpuan (a) lebih kecil daripada parabola 2 (b), maka R_{A1} lebih besar daripada R_{A2} , dan R_{B1} lebih besar daripada R_{B2} . Oleh karena itu, kabel dengan sag yang dalam membutuhkan dimensi kabel yang lebih kecil dibandingkan kabel dengan kelengkungan yang dangkal, namun membutuhkan panjang kabel yang lebih panjang. Rasio sag: bentang yang optimal untuk bangunan gedung sekitar 1/10 sampai 1/20, sedangkan untuk jembatan sekitar 1/8 sampai 1/12 (Shueller, W., 1983).

Dibandingkan dengan balok sederhana, struktur kabel lebih efisien karena ketika menerima momen eksternal kabel melawan dengan gaya dalam aksial tarik saja, sedangkan balok sederhana melawan momen lentur dengan tegangan lentur tekan-tarik. Besarnya gaya aksial kabel adalah momen eksternal maksimal dibagi sag kabel $H_c = M \text{ maks}/h_k$, sedangkan besarnya resultan tegangan lentur balok sederhana (C_b dan T_b) adalah momen eksternal maksimal dibagi $2/3$ ke dalam balok $T_b = C_b = M \text{ maks}/(2/3h_b)$. Kedalaman sag h_k jauh lebih besar daripada $2/3 h_b$, maka gaya aksial dalam kabel jauh lebih kecil dibandingkan dengan resultan tegangan lentur balok sederhana.



Gambar 9.5 Gaya dalam Balok Sederhana

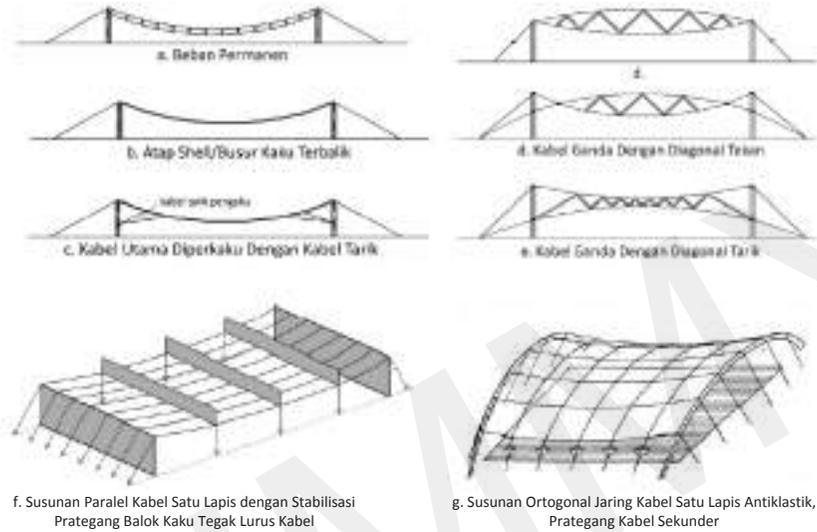
Struktur kabel rentan terhadap tiupan angin, yaitu ketika frekuensi alami struktur atap kabel berimpit dengan frekuensi gelombang tiupan angin, kabel akan mengepak naik-turun. Ketika kabel naik, gaya dalam

kabel berubah menjadi tekan dan mengurangi besarnya gaya tarik, padahal untuk stabilitas struktur gaya dalam struktur kabel harus berupa gaya tarik yang didapat melalui perhitungan.

Beberapa metode untuk menstabilkan struktur kabel adalah sebagai berikut.

1. Stabilisasi dengan pembebanan permanen, khususnya untuk susunan kabel 1 lapis lengkung 1 arah (Gambar 9.6a).
2. Stabilisasi dengan atap yang kaku busur atau *vault* terbalik, khususnya untuk susunan kabel 1 lapis lengkung 1 arah (Gambar 9.6b).
3. Jaring kabel diperkaku dengan kabel yang ditarik ke struktur penunjang, khususnya untuk susunan kabel 1 lapis lengkung 1 arah (Gambar 9.6c).
4. Stabilisasi dengan memberi gaya prategang (*prestressing*) pada jaring kabel untuk menjaga semua kabel selalu dalam keadaan tarik dan tegang.
 - a. Susunan kabel 2 lapis (*double layer*). Kabel dengan lengkung saling berbalikan diletakkan satu bidang (vertikal) dan di antara kedua kabel tersebut diberi pemisah berupa penunjang (*strutt*) batang tekan membentuk bentuk lensa cembung (Gambar 9.6d) atau kabel tarik membentuk bentuk lensa cekung (Gambar 9.6e). Apabila kabel atas dan kabel bawah ditarik, pemisah tekan akan menahan kabel atas dan bawah sehingga kabel-kabel menjadi tegang, demikian juga pemisah tarik akan menarik kabel atas dan bawah sehingga kabel-kabel menjadi tegang.
 - b. Susunan kabel 1 lapis (*single layer*) dengan lengkung 1 arah distabilkan dengan balok-balok kaku tegak lurus kabel utama dan balok tersebut ditarik ke bawah sehingga secara keseluruhan jaring kabel menjadi tegang dan stabil terhadap efek mengempak terhadap embusan angin (Gambar 9.6e).
 - c. Susunan kabel 1 lapis (*single layer*) dengan lengkung 2 arah antiklastik. Kabel sekunder (kabel dengan lengkung busur) diletakkan saling tegak lurus terhadap kabel utama (kabel

dengan lengkung kabel). Kabel sekunder diberi gaya tarik sebagai gaya prategang sehingga menegangkan kabel utama dan secara keseluruhan jaring kabel menjadi tegang dan stabil terhadap efek mengepak terhadap embusan angin (Gambar 9.6f).



Gambar 9.6 Metode Stabilisasi Struktur Kabel

Sumber: A.R. Karamjit S., Video Online; Engle, 1977; dan Penulis.

Sistem struktur kabel secara utuh terbentuk setelah dilakukan penataan elemen-elemen struktur kabel yang telah distabilkan seperti pada Gambar 9.6.

Tipe- tipe penataan struktur kabel:

1. Penataan paralel dengan lengkung 1 arah.
2. Penataan radial dengan lengkung 1 arah.
3. Penataan 2 arah ortogonal atau *skew* dengan lengkung 2 arah.

1. Penataan Paralel

Susunan kabel 1 lapis, yakni sebagai berikut.



Gambar 9.7a Susunan Paralel Kabel Tunggal dengan Beban Permanen (Gb. 6a) atau Atap *Shell* Terbalik (Gb. 6b)



Gambar 9.7b Dulles International Airport

Sumber: http://www.greatbuildings.com/cgi-bin/gbi.cgi/Dulles_Airport.html/cid_2402290.html



Gambar 9.7c Pemasangan Panel Atap Beton Pracetak Dulles International Airport

Sumber: https://rnc.library.cornell.edu/6306McCarthySOM/contentfiles/ser7x_img.htm



Gambar 9.7d Komponen-komponen Atap Dulles International Airport

Sumber: <https://user.eng.umd.edu/~austin/ence353.d/lecture-material2021/Dulles-Airport-Cable-Structure-Eero-Saarinens.pdf>

Dulles International Airport karya arsitek Eero Saarinen (Gambar 9.7a, Gambar 9.7c, Gambar 9.7d) mempunyai bentang 50,38 m, atapnya berbentuk lengkung tarik 1 arah. Atapnya dikonstruksikan dengan menggunakan struktur kabel yang disusun secara paralel, distabilkan dengan menggunakan penutup atap yang kaku dan beban matinya besar, yaitu beton bertulang. Kabel struktur tersebut dibungkus dengan beton *in-situ*, dan di antara busur tersebut diletakkan gording baja. Penutup atap bangunan ini menggunakan panel-panel beton pracetak yang diletakkan di atas gording baja sehingga memberikan beban mati yang

besar pada struktur atap tersebut, dan setelah seluruh beton pracetak selesai terpasang terbentuk bidang lengkung kaku (*vault* terbalik). Beban mati panel-panel pracetak tersebut dapat mengeliminir hisapan angin ke atas, dan selain itu *vault* terbalik memperkaku bidang atap, dengan demikian efek mengepak akibat tiupan angin dieliminir.

Kolom menggunakan kolom kantilever beton bertulang yang sangat besar, maka tidak memerlukan kabel untuk menstabilkan struktur secara keseluruhan seperti pada Gambar 9.7a. Kolom tersebut dibentuk mengikuti distribusi besar momen di sepanjang tinggi kolom, di mana momen maksimal ada di dasar kolom diberi dimensi terbesar. Sementara itu, balok yang berada di puncak kolom sebagai penumpu kabel-kabel diletakkan dalam keadaan rebah, di mana sumbu kuat dibutuhkan untuk menahan gaya tarik kabel-kabel.

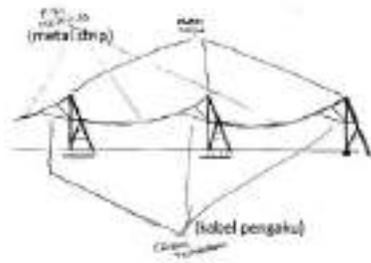
Exhibition Hall Hannover karya arsitek Thomas Herzog. Bangunan terdiri dari tiga buah *hall* besar yang disusun berderet saling menempel (Gambar 9.8a, Gambar 9.8b, dan Gambar 9.8c). Bentang atap tiap *hall* adalah 55 m, dikonstruksikan dengan struktur “kabel” lengkung tarik 1 arah yang asimetri, di mana satu sisi lebih tinggi dari sisi yang lain. Material “kabel” utama menggunakan pelat metal strip bukan kabel, kemungkinan pertimbangannya adalah untuk kemudahan pelaksanaan penempatan panel-panel penutup atapnya. Panel-panel atap dalam Gambar 9.8d tampaknya menggunakan material kayu yang tidak terlalu berat, oleh karena itu diperlukan kabel pengaku untuk menstabilkan struktur atapnya. Kabel pengaku diletakkan di sudut sisi yang tinggi, kabel pengaku tersebut menarik kabel utama dan diikat pada kolom/*buttres* rangka batang (Gambar 9.8b dan Gambar 9.8c). Dalam Gambar 9.8d tampak ada balok-balok baja I di bawah pelat strip, balok-balok tersebut hanya terletak di bagian sisi tepi bangunan sampai menjorok keluar di overstek (tampak di Gambar 9.8a).

Kolom menggunakan struktur kantilever rangka batang baja untuk menahan gaya tarik kabel-kabel. Kaki kantilever terbuka di bagian bawah untuk menerima momen maksimal.



Gambar 9.8a Exhibition Hannover

Sumber: <https://www.flickr.com/photos/14036391@N08/2346582029/>



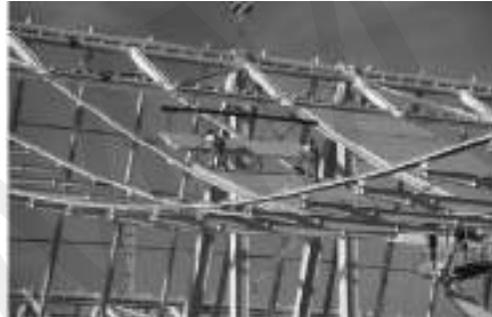
Gambar 9.8b Exhibition Hannover, Kabel Utama Diperkaku dengan Kabel Tarik

Sumber: <https://i.pinimg.com/originals/7b/72/4f/7b724f96b3df3570e1f5f1610f3ab1d5.jpg>



Gambar 9.8c Exhibition Hannover, Kabel Pengaku Dilihat dalam Interior

Sumber: <https://www.flickr.com/photos/14036391@N08/2346582029/>

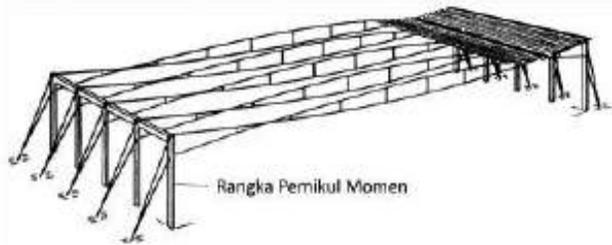


Gambar 9.8d Exhibition Hannover, Pemasangan Panel Atap

Sumber: <https://www.flickr.com/photos/14036391@N08/2346582029/>

Struktur atap kabel 2 lapis paralel dengan pemisah *strutt* tekan dapat ditata secara paralel (Gambar 9.9). Struktur atap tersebut sudah stabil terhadap embusan angin karena di antara kabel atas dan kabel bawah diberi *strutt* pemisah tekan (ada yang menggunakan batang diagonal tekan). Ketika masing-masing kabel atas dan bawah ditarik, batang tekan akan menahan kedua kabel tersebut agar tetap pada bentuk asalnya berbentuk lengkung tarik dan lengkung tekan (seperti lensa) dan menegangkan kabel atas dan kabel bawah serta berkinerja sebagai kesatuan yang tegang dan stabil. Stabilitas struktur keseluruhan ke arah longitudinal dijamin oleh kabel-kabel yang ditarik miring ke bawah dan

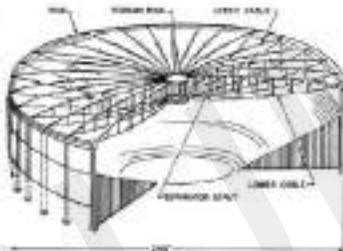
dijangkar ke fondasi. Sementara itu, stabilitas struktur keseluruhan ke arah transversal dijamin oleh 2 buah rangka pemikul momen yang ada di kedua ujung bangunan.



Gambar 9.9 Susunan Paralel Kabel Ganda

Sumber: https://www.researchgate.net/figure/Fig-22-Cable-beam-structure-with-corrugated-metal-roof-decking_fig3_303961831

2. Penataan Radial



Gambar 9.10a1 Susunan Radial Dua Lapis Kabel

Sumber: <https://www.uticaod.com/story/news/2010/06/06/aud-architecture-made-it-breakthrough/45059441007/>



Gambar 9.10a2 Utica Memorial Auditorium

Sumber: <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=0qbkrPE133Q>

Susunan kabel 2 lapis dapat ditata secara radial (*“double-bicycle wheel” cable-suspended roof*). Kabel-kabel tersebut di sisi tepinya dipegang oleh *ring* tepi dan bagian tengahnya dipegang oleh *ring* tengah. Ketika kabel-kabel tersebut ditarik, *strutt* pemisah tekan menahan kabel atas dan kabel bawah sehingga menjadi tegang serta struktur atap berkinerja sebagai kesatuan yang tegang dan stabil terhadap embusan angin. Kabel-kabel yang tertarik tersebut memberi gaya lintang ke arah dalam menuju pusat jari-jari lingkaran pada *ring* tepi dan memberi gaya lintang ke arah luar meninggalkan pusat jari-jari lingkaran pada *ring* tengah. Oleh karena *ring* tepi maupun *ring* tengah berbentuk lingkaran dan

arah gaya-gaya lintang yang membebani adalah radial, maka *ring tepi* dan *ring tengah* merupakan struktur *form-active* (dalam posisi rebah). Di dalam *ring tepi* bekerja gaya aksial tekan, sedangkan di dalam *ring tengah* bekerja gaya aksial tarik (Gambar 9.10b).



Gambar 9.10b Gaya dalam *Ring Tepi* dan *Ring Tengah*

Utica Memorial Auditorium karya Lev Zetlin mempunyai bentang (diameter) 76,2 m. Bangunan ini merupakan salah satu contoh penggunaan kabel 2 lapis yang disusun secara radial. Oleh karena itu, dipilih struktur atap kabel 2 lapis karena sangat ringan dan dapat menanggulangi bentang yang lebar (<https://www.thorntontomasetti.com/project/adirondack-bank-center>).

3. Penataan Kabel 1 Lapis Ortogonal Lengkung 2 Arah

Penataan kabel tarik 1 lapis ortogonal harus berbentuk jaring dengan lengkung 2 arah dan berbentuk antiklastik agar struktur tersebut dapat ditegangkan dan stabil terhadap efek mengepak akibat embusan angin. Untuk menghasilkan bentuk jaring antiklastik, harus ada posisi tumpuan yang berada di atas dan di bawah. Tumpuan atas membutuhkan elemen struktur tekan, seperti kolom, busur, atau struktur jaring kabel tersebut titik atasnya diikatkan pada bagian dari sebuah bangunan. Struktur kabel 2 arah juga disebut sebagai struktur jaring (*net structures*).

Ada tiga tipe dasar bentuk jaring kabel antiklastik, yaitu paraboloida-hiperbolik (*hyperbolic-paraboloid/hypar*), *conic*, dan bentuk pelana dengan kabel penggantung utama.

a. Bentuk *Hypar*

Pada dasarnya bentuk dasar *hypar* tunggal berasal dari bentuk “pelana kuda” (Gambar 9.11a). Sementara variasi bentuk *hypar* tunggal diperoleh dengan menetapkan pola batas tepi strukturnya, kemudian bentuk pelana “dipotong” berdasarkan pola garis batas tepi tersebut (Gambar 9.11b, Gambar 9.11c, Gambar 9.11d, dan Gambar 9.11e).



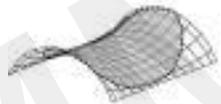
Gambar 9.11a
Bentuk Dasar
Hypar Pelana



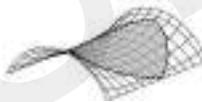
Gambar 9.11b
Hypar Denah
Persegi Diterapkan
dalam *Hypar*
Pelana



Gambar 9.11c
Hypar Denah
Persegi dengan
Batas Tepi Lengkung
Diterapkan dalam
Hypar Pelana



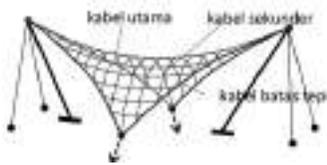
Gambar 9.11d
Hypar Denah
Elips
Diterapkan dalam
Hypar Pelana



Gambar 9.11e *Hypar*
Denah Parabola
Ganda Diterapkan
dalam *Hypar* Pelana



Gambar 9.12a
Hypar Denah
Persegi dengan
Batang Tepi Kaku
Berbentuk Lurus



Gambar 9.12b1 Penerapan Persegi dengan Batang Tepi Kabel Lengkung



Gambar 9.12b2 Contoh Bangunan

Sumber: <http://sftco.com/tensile-structure.html>



Gambar 9.12c1 Hypar Denah Elips dengan Tepi Kaku Berbentuk Elips Batang

Sumber: https://www.researchgate.net/publication/319399258_Practical_Aspects_of_the_Design_and_Construction_of_a_Small_Cable_Roof_Structure



Gambar 9. 12c2 Christopher's Pavilion/Sao Cristovao Pavilion

Sumber: <https://www.archdaily.com/887462/tensile-structures-how-do-they-work-and-what-are-the-different-types>



Gambar 9.12d1 Susunan Ortogonal Kabel Kabel Satu Lapis

Sumber: https://www.researchgate.net/publication/305407889_Static_and_Dynamic_Analysis_of_Circular_Cable_Roof_Nets/download



Gambar 9.12d2 Dorton Arena, North Carolina

Sumber: <http://www.themodernistangle.com/2016/06/it-caught-my-eye-dorton-arena-in.html>

Lengkung utama struktur jaring kabel *hypar* adalah kabel dengan lengkung positif (lengkung kabel), sedangkan lengkung sekunder adalah kabel dengan lengkung negatif (lengkung busur). Kekakuan dan stabilitas struktur jaring kabel *hypar* terhadap efek mengempak terhadap

embusan angin diperoleh dengan menarik (memberi gaya prategang) pada kabel-kabel tersebut. *Hypar* dengan denah persegi, struktur garis tepinya bisa menggunakan kabel atau batang kaku.

Bila menggunakan kabel, kabel tepi tersebut dibuat lengkung ke dalam/cekung (Gambar 9.11c, Gambar 9.12b1, dan 9.12b2) dan kabel tepi tersebut ditarik. Kecenderungan kabel tepi untuk menjadi lurus ketika ditarik, menghasilkan gaya-gaya tarik di dalam semua kabel jaring sehingga struktur jaring kabel menjadi kaku dan stabil terhadap efek mengempak terhadap angin.

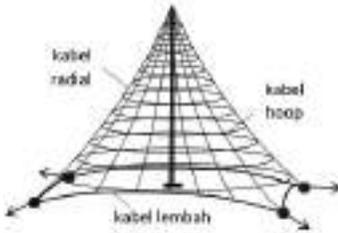
Bila menggunakan batang kaku, bentuk batang tepi yang sesuai adalah yang berbentuk lurus dan lengkung ke luar/lengkung busur. Batang lurus bekerja sebagai balok dalam posisi penampang melintang rebah (posisi sumbu lemah) dengan 2 buah tumpuannya, yaitu di tumpuan dasar dan di puncak *hypar*, di mana gaya-gaya tarik kabel bekerja sebagai gaya lintang. Sementara batang lengkung cembung bekerja sebagai busur *form-active* atau *semi form-active* dalam posisi rebah, di mana gaya-gaya tarik kabel bekerja sebagai gaya lintang.

Kekakuan dan stabilitas struktur jaring kabel *hypar* dengan batang tepi kaku terhadap efek mengempak terhadap embusan angin diperoleh dengan menarik (memberi gaya prategang) pada kabel-kabelnya dan dikunci pada batang tepi. Dengan bentuk antiklastik, kabel-kabel yang saling tegak lurus saling mengangkat satu sama lain.

b. Bentuk *Conical*

Struktur jaring *conical* terdiri dari kabel radial, kabel *hoop* (melingkar), dan kabel lembah (kabel tepi) atau *ring* kaku berbentuk lingkaran atau elips, dan tiang penunjang (Gambar 9.13a dan Gambar 9.13b). Stabilitas terhadap efek mengempak karena embusan angin untuk bentuk *conic* dengan kabel lembah diperoleh dengan menarik kabel lembahnya, sedangkan untuk bentuk *conic* dengan *ring* kaku diperoleh dengan menarik tiap kabel radial sehingga jaring secara keseluruhan menjadi tegang dan stabil.

Bangunan Institute for Lightweight Structures at the University of Stuttgart (Gambar 9.13a2) bentuknya tidak *conic* murni.

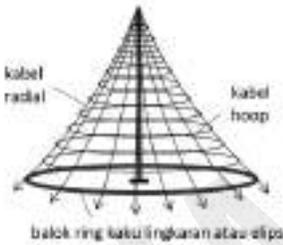


Gambar 9.13a1 Bentuk *Conic* dengan Kabel Lembah



Gambar 9.13a2 Institute for Lightweight Structures (IL) at the University of Stuttgart

Sumber: <https://www.re-thinkingthefuture.com/know-your-architects/a1772-10-things-you-did-not-know-about-frei-otto/#fa1459cea5e7d4d7b6b099c5f98c52566c018568#152032>



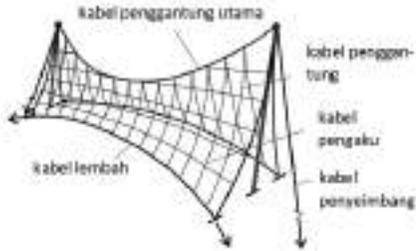
Gambar 9.13b1 Bentuk *Conic* dengan *Ring* Kaku



Gambar 9.13b2 The Khan Shatyr Entertainment Center, Kazakhstan

Sumber: <https://vitruvius.com.br/revistas/read/projetos/11.128/4005>

c. Bentuk Pelana dengan Kabel Penggantungan Utama

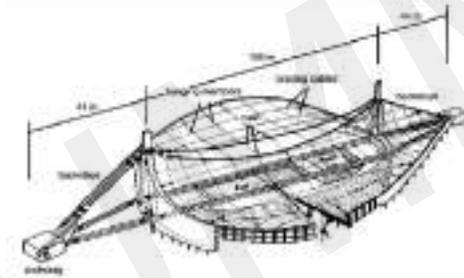


Gambar 9.14a1 Bentuk Pelana dengan Kabel Penggantungan Utama



Gambar 9.14a2 Yoyogi Stadium, Tokyo

Sumber: <https://structurae.net/en/structures/first-gymnasium-of-yoyogi-national-stadium>



Gambar 9.14a3 Skema Penataan Kabel Yoyogi Stadium

Sumber: <https://bpb-us-e1.wpmucdn.com/journeys.dartmouth.edu/dist/9/5090/files/2022/03/ascl-1-research.pdf>

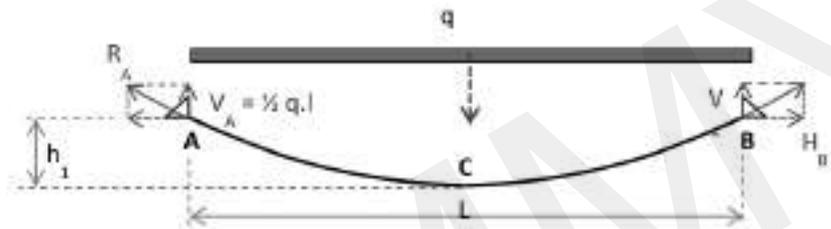
Pada struktur jaring jenis ini kabel penggantung utama diletakkan di puncak jaring dan berfungsi sebagai kabel utama yang memikul seluruh jaring kabel penggantung dan kabel pengaku. Kabel penggantung utama tersebut memberi gaya tarik pada kolom ke arah dalam, maka untuk mengimbangi gaya tarik tersebut, dipasang kabel penyeimbang ke arah yang berlawanan dan dijangkar ke fondasi. Stabilitas struktur jaring ini terhadap efek mengempak ketika diembus angin diperoleh dengan menarik kabel lembah.

Contoh bangunan Yoyogi Stadium termasuk struktur jaring yang ada kabel penggantung utamanya, namun ada perbedaan dengan

Gambar 9.14a, di mana pada Yoyogi Stadium bentuk batas tepi jaringnya adalah balok kaku berbentuk lengkung cembung, tidak menggunakan kabel lembah seperti Gambar 9.14a. Kabel puncak ditarik dengan kabel penyeimbang pada arah longitudinal, dalam Gambar 9.14a3 disebut *backstays*. Setelah kabel-kabel jaring diberi gaya tarik, kabel pengaku (*bracing cable*) dan kabel penggantung saling menegangkan.

Bentuk-bentuk *hypar* maupun *conic* tunggal dapat dikembangkan menjadi bentuk majemuk yang sangat bervariasi.

E. Statika Struktur Kabel

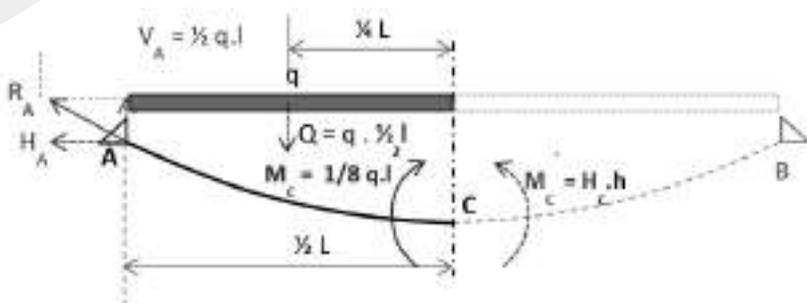


Cara menghitung gaya reaksi vertikal dan momen maksimal akibat q sama dengan balok sederhana, bedanya adalah pada kabel ada reaksi horizontal.

1. Reaksi Tumpuan Vertikal

Reaksi tumpuan vertikal dicari dari kesetimbangan jumlah gaya vertikal Σ :

- $\Sigma M_A = 0 \rightarrow V_B \cdot L - q \cdot L \cdot \frac{1}{2} L = 0 \rightarrow V_B = \frac{1}{2} qL$
- $\Sigma V = 0 \rightarrow V_A - Q + V_B = 0 \rightarrow V_A - qL + \frac{1}{2} qL = 0 \rightarrow V_A = \frac{1}{2} q \cdot l$



2. Reaksi Tumpuan Horizontal

Momen kerja maksimal = Momen perlawanan

- $M_C = M_C'$

$$M_C = V_A \cdot \frac{1}{2} L - Q \cdot \frac{1}{4} L$$

$$= (\frac{1}{2} q L \times \frac{1}{2} L) - (\frac{1}{2} q L \times \frac{1}{4} L) = \frac{1}{8} q L^2$$

$$M_C' = H_C \times h$$

$$\frac{1}{8} q \cdot L^2 = H_C \times h \rightarrow H_C = \frac{q \cdot L^2}{8 \cdot h}$$

- $R_A = (V_A^2 + H_A^2)$

F. Gaya dalam Struktur Kabel

Uraian sebelumnya menunjukkan bahwa struktur kabel hanya bekerja menahan gaya aksial tarik saja. Di tengah bentang (titik C) bekerja gaya aksial tarik horizontal. Di tumpuan (titik A dan B) bekerja gaya vertikal V_A dan gaya horizontal H_A , yaitu komponen gaya resultan R_A .

R_A bekerja menurut arah garis singgung sumbu aksial kabel di tumpuan (demikian juga R_B). R_A dan R_B lebih besar dari H_C .

Di antara titik A dan C, dan di antara B dan C, gaya-gaya aksial bekerja mengikuti arah sumbu aksial kabel di setiap titik yang ditinjau (jadi mempunyai komponen gaya horizontal dan vertikal). Komponen gaya horizontal selalu sama di setiap titik, tapi komponen vertikalnya semakin besar ke arah tumpuan, maka R_A dan R_B adalah gaya aksial maksimal.

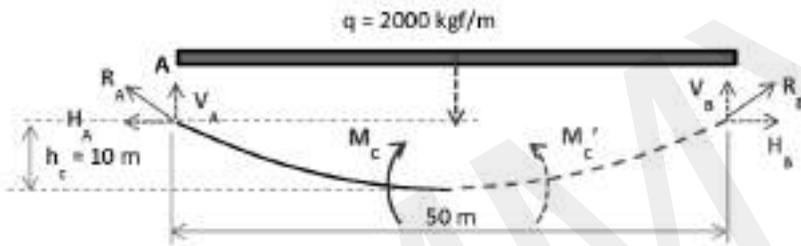
Tabel 9.1 Kekuatan Tarik Kabel

Grade	Tensile Strength (psi)
Extra improved plow steel	245,000 to 340,000
Improved plow steel	220,000 to 300,000
Plow steel	195,000 to 258,000
Mild plow steel	168,000 to 225,000
Iron	100,000

Tabel 9.2 Konversi Satuan dalam kgf/cm²

Grade	Tensile Strength (kgf/cm ²)
Extra improved plow steel	17.225 kgf/cm ² sampai 23.900 kgf/cm ²
Improved plow steel	15.470 kgf/cm ² sampai 21.000 kgf/cm ²
Plow steel	13.700 kgf/cm ² sampai 18.140 kgf/cm ²
Mild plow steel	11.810 kgf/cm ² sampai 15.820 kgf/cm ²
Iron	7030 kgf/cm ²

Contoh perhitungan kasar struktur kabel:



- $\sum M_A = 0 \rightarrow V_B \cdot 50 - 2'000 \cdot 50 \cdot \frac{1}{2} \cdot 50 = 0 \rightarrow V_B = 50'000 \text{ kgf}$
Simetri $\rightarrow V_A = V_B \rightarrow 2 V_A = 100'000 \rightarrow V_A = V_B = 50'000 \text{ kgf}$
- $M_C = 50'000 \times 25 - 2'000 \times 25 \times 12,5 = 1'250'000 - 625'000 = 625'000 \text{ kgf m} \dots (= M_C')$
- $H_C = M_C/h \rightarrow H_C = 625'000/10 = 62'500 \text{ kgf}$
- $\sum H = 0 \rightarrow H_C - H_A = 0 \rightarrow H_A = 62'500 \text{ kgf}$
 $\rightarrow R_A = (50'000^2 + 62'500^2) = 80'040 \text{ kgf}$

Perkiraan dimensi kabel:

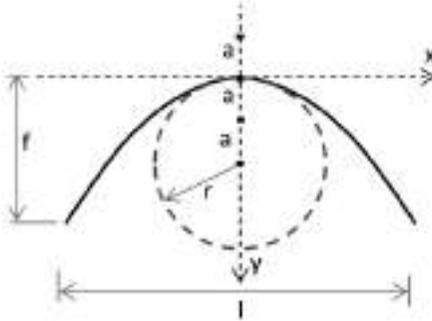
- Dipilih gaya dalam kabel terbesar, yaitu $R_A = 80'040 \text{ kgf}$.
- Tegangan tarik kabel (dipilih *plow steel*), $\sigma = 13'700 \text{ kgf/cm}^2 \rightarrow$ persyaratan boleh dipakai $0,8 \sigma = 0,8 \times 13'700 = 10'960 \text{ kgf/cm}^2$.
- Dimensi penampang kabel = $80'040/10'960 = 7,3 \text{ cm}^2$, dipilih diameter $3,175 \text{ cm}$ ($1 \frac{1}{4}$ ").

Catatan:

- Diameter penampang A bisa dihitung sendiri dengan rumus luas lingkaran atau lihat tabel diameter tulangan.

- Kalau diperlukan menghitung berat total kabel → hitung panjang kabel x luas penampang transversal kabel x berat jenis kabel.

Cara menghitung panjang kabel:



Persamaan parabola:

$$y = x^2/4a$$

$$a = 1/2r$$

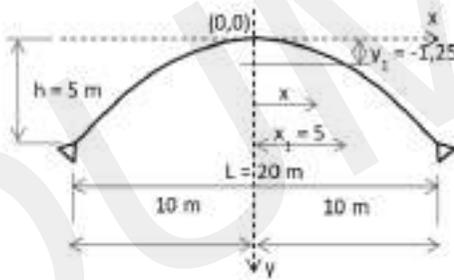
Panjang parabola (kasar):

$$n = f/l ; L = l(1+8n^2/3)$$

Sumber: Schueller W. (1983) Horizontal Building Structures

Contoh:

Contoh:



Mencari koordinat:

Masukkan angka-angka yang diketahui ($y = h$ dan $x = 1/2L$)

- $y = -5 ; x_1 = -10 ; x_2 = 10$

- $y = x^2/4a \rightarrow -5 = 10^2/4a$

- $a = 100/(-5.4) = -5$

Untuk $x_1 = 5 \text{ m} \rightarrow y_1 = 5^2/4.(-5)$

$$y_1 = 25/-20 = -1,25 \text{ m}$$

Mencari panjang parabola:

$$n = f/l = 5/20 = 1/4$$

$$L = 20(1 + 8.1/4^2/3) = 23.33 \text{ m}$$

DUMMY

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 10

STRUKTUR MEMBRAN FLEKSIBEL

A. Struktur Membran

Struktur membran tarik adalah struktur yang terbuat dari material lembaran fleksibel sebagai pendukung beban, yang di dalam permukaannya bekerja tegangan tarik dan tegangan geser. Struktur membran ini termasuk struktur yang sangat ringan dengan kemampuan menanggulangi bentang yang lebar. Penggunaan struktur membran cukup luas, bisa digunakan untuk bangunan berbentuk kecil, seperti tenda-tenda perkawinan, sampai bangunan berbentuk lebar seperti stadion, dan bangunan lain yang membutuhkan bentang lebar. Bentuk struktur membran ada dua macam, yaitu bentuk antiklastik dan bentuk sinklastik.



Bentuk Antiklastik-
Hypar



Bentuk Antiklastik-
Conical



Bentuk Sinklastik-
Spherical

Gambar 10.1 Macam Bentuk Struktur Membran

Sumber: <https://www.architen.com/articles/basic-theories-of-tensile-membrane-architecture/>

Membran antiklastik mempunyai bentuk lengkungan yang berlawanan pada arah sumbu yang saling tegak lurus, yaitu pada salah satu sumbu lengkung cembung (lengkung busur), pada sumbu yang lain lengkung cekung (lengkung kabel). Sementara itu, membran sinklastik mempunyai bentuk lengkungan yang sama pada kedua arah sumbu yang saling tegak lurus, yaitu masing-masing lengkung cembung, atau masing-masing lengkung cekung.

Bentuk antiklastik struktur membran fleksibel relatif sama dengan struktur jaring, seperti bentuk *hypar*, bentuk konikal, bentuk pelana kuda, dan bentuk pelana dengan kabel penggantung utama. Setiap struktur membran fleksibel harus dijaga dalam kondisi yang selalu tegang (mengalami tegangan tarik) untuk menghindari efek mengempak karena tiupan angin, oleh karena itu membran selalu diberi tegangan tarik awal (prategang) yang cukup. Untuk memberikan tegangan tarik awal tersebut. Pemberian tegangan tarik (sistem penegangan) pada struktur membran berbentuk antiklastik berbeda dengan struktur membran berbentuk sinklastik.

1. Material Struktur Membran

- a. *Fabric* PTFE (*Polytetrafluoroethene* atau dikenal dengan *Teflon*), dilapisi *fiberglass*.
- b. PVC dilapisi *polyester*.
- c. Film ETFE.

2. PTFE + *Fiberglass*

- a. PTFE adalah bahan campuran yang dibentuk dengan mengecat resin PTFE pada kain *fiberglass* (kaca β) dengan teknologi tertentu.

- b. *Fiberglass* memiliki intensitas yang lebih tinggi dari baja, tahan panas yang unggul (700–800°C), dan tidak terpengaruh oleh suhu rendah dan ultraviolet.
 - c. Resin PTFE memiliki ketahanan terhadap air, cuaca, dan panas serta kinerja pembersihan mandiri.
 - d. Membran PTFE adalah bahan konstruksi yang sangat baik, memberikan sifat superior dan eksterior estetika dengan umur panjang.
3. ETFE
- a. *Ethylene Tetra Fluoro Ethylene* (ETFE) atau polimer plastik berbahan dasar *fluorine*.
 - b. Dapat digunakan untuk struktur permanen atau sementara sebagai pengganti kaca.
 - c. Sangat ringan, hanya 1% dari berat kaca, tahan terhadap sinar UV, kuat, dan tidak pecah.
 - d. Memiliki sifat tidak mudah terbakar dan dapat memadamkan api sendiri.
 - e. Memiliki ketahanan korosi yang tinggi dan kekuatan pada rentang suhu yang luas.
 - f. Tidak hancur terhadap impak, membuatnya cocok untuk aplikasi yang membutuhkan mitigasi ledakan.
 - g. Perawatan rendah.
 - h. Memungkinkan transmisi hampir seluruh spektrum UV (95%). Ini membuatnya ideal untuk bangunan yang mengandung tanaman yang membutuhkan sinar UV untuk fotosintesis.
 - i. Tingkat transparansi beragam: transparan, *matte* (difus), putih, dan dicetak (*print*, *dot*, atau kotak-kotak), memungkinkan untuk menyesuaikan perlindungan UV dan kontrol cahaya. *Opacity* dari ETFE dapat bervariasi dari 5% hingga 90%, tergantung pada kebutuhan.
 - j. Dapat didaur ulang, tahan sampai dengan umur 20–30 tahun tanpa kehilangan transparansi atau kekuatan.
 - k. Permukaan antilengket, tahan terhadap polusi dan bau di udara.

- l. Kekuatan tarik ETFE lebih tinggi daripada PTFE.
 - m. PTFE lebih sukar terbakar dan lebih tahan terhadap panas dibanding dengan ETFE (meleleh pada 327°C lebih besar 60°C daripada ETFE).
4. Sistem Penegangan
- a. Membran antiklastik ditegangkan dengan menarik membran ke 2 arah sumbu utama struktur membran yang saling tegak lurus. Teknik penarikan tergantung dari bentuk struktur membrannya, misalnya bentuk konikal bisa dilakukan dengan mendorong *ring* puncaknya ke atas sehingga secara keseluruhan membran menjadi tegang, sedangkan untuk struktur membran berbentuk *hypar* bisa dilakukan dengan menarik kabel tepinya.
 - b. Membran sinklastik ditegangkan dengan memberi tekanan udara, struktur jenis ini disebut struktur *pneumatic*.

B. Struktur Membran Antiklastik

Bentuk lengkung membran antiklastik dapat dihasilkan kalau ada tumpuan yang berada di bawah dan di atas. Tumpuan atas selalu membutuhkan struktur tekan sebagai penunjang, yaitu berupa: kolom, busur, bagian dari bangunan lain, atau kombinasi. Bentuk struktur membran secara keseluruhan dipengaruhi oleh jumlah, posisi, serta bentuk tumpuan atas dan tumpuan bawah.

Penunjang berupa kolom membentuk tumpuan titik, busur membentuk tumpuan garis lengkung, *ring* membentuk tumpuan garis lingkaran/elips (material kaku), bentuk tetes air (material fleksibel/kabel), atau balok membentuk garis lurus.

Tipe-tipe struktur membran berdasarkan bentuk tumpuannya sebagai berikut.

- Membran yang ditumpu oleh titik-titik (tumpuan atas dan bawah).
- Membran yang ditumpu oleh garis (lurus/lengkung).
- Membran yang ditumpu oleh *ring* (tekan/tarik atas dan/atau bawah)
- Kombinasi dari 2 atau 3 poin di atas.

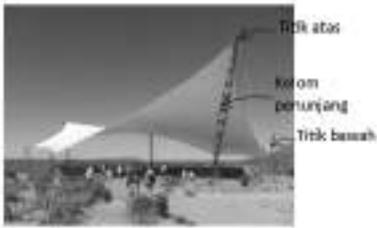
Form Finding

Form-finding adalah istilah yang digunakan untuk menemukan bentuk struktur dengan tujuan menemukan bentuk struktural yang optimal (tidak khusus untuk struktur tarik/membran saja). Menemukan bentuk optimal untuk struktur membran berarti mencari “permukaan minimal”. Permukaan minimal dihasilkan apabila terjadi kesetimbangan tegangan di semua titik pada bidang membran.

Ada banyak metode *form-finding*, yang saat ini populer dengan menggunakan *software* (misalnya: *Grasshopper-Rhino*), dengan model fisik, dan dengan busa sabun (Frei Otto, lihat <https://www.youtube.com/watch?v=-IW7o25NmeA>).

Form finding dengan model fisik sebagai berikut.

1. Menemukan bentuk struktur yang terintegrasi dengan tuntutan ruang. Seperti: di mana boleh ada penunjang tekan (kolom, busur), apakah di dalam interior boleh ada atau tidak, berapa jarak bentang bebas penunjang tekan tersebut; di posisi mana ruang menuntut ketinggian maksimal dan minimal, berapa banyak jumlah titik tertinggi dan terendah yang dapat menunjang kualitas ruang, dan lain-lain.
2. Pilih bentuk penunjang kaku sebagai tumpuan atas, tentukan posisi tumpuan penunjang tersebut yang tertumpu di fondasi dan puncaknya.
3. Tentukan bentuk dan struktur tepi membran: lengkung positif (kabel), atau lengkung negatif (busur), atau garis lurus (balok kaku).



Gambar 10.2

Sumber: <http://image.made-in-china.com/43f34j00kSgTzMslhfrF/Architecture-Beach-Sun-Shade-Tent-Membrane-Structure.jpg>, <https://hitent.co.id/atap-membran-stadion/>, diunduh Februari 2024



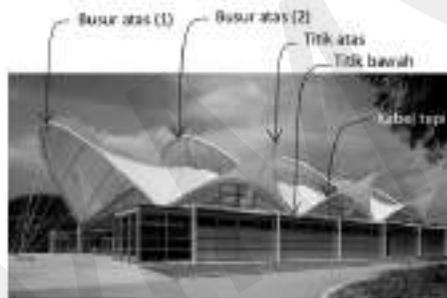
Gambar 10.3

Sumber: <https://hitent.co.id/atap-membran-stadion/>, diunduh Februari 2024



Gambar 10.4

Sumber: <https://www.bdir.com/id/gallery/struktur-tarik-stadion>, diunduh Februari 2024



Gambar 10.5

Sumber: http://img.archiexpo.com/images_ae/photo-g/58335-7389505.jpg, diunduh Februari 2024 April 2024



Gambar 10.6

Sumber: <https://tensilestructures.com/structure-types/#images-1>, diunduh April 2024



Gambar 10.7

Sumber: <https://saroglobal.ir/Architecture-s-Nobel-Prize-awarded-to-German-architect-Frei-Otto-5132801.html>, diunduh April 2024

Struktur membran pada Gambar 10.2, tumpuan atas dan tumpuan bawah membrannya berbentuk titik semua. Baik tumpuan atas maupun tumpuan bawah ditunjang oleh kolom penunjang, dengan panjang

kolom sesuai dengan posisi tinggi titik tumpuan atas dan bawah. Bagian tepi membran di antara dua buah tumpuan bawah ditarik dengan kabel tepi untuk menegangkan membran. Konfigurasi tersebut menghasilkan bentuk membran *paraboloida-hyperbolic (hypar)*.

Struktur membran pada Gambar 10.3, penunjang membrannya berbentuk busur kaku dari pipa baja. Sebuah struktur busur selalu menghasilkan tumpuan atas dan tumpuan bawah sekaligus. Batas tepi membran di antara dua buah tumpuan bawah busur ditarik dengan kabel baja untuk menegangkan membran. Konfigurasi tersebut menghasilkan bentuk membran hiperboloida.

Struktur membran pada Gambar 10.4 terdiri dari enam pasang unit membran konikal, penunjang atas membran berbentuk titik, sedangkan tumpuan bawah berbentuk lengkung kantilever *truss* dari pipa baja. Kantilever *truss* selain sebagai tumpuan bawah, juga menjadi batas tepi tiap unit-unit tersebut. Kantilever *truss* yang lebih panjang ditarik dengan kabel baja di ujungnya sehingga menjadi *prop-cantilever*. Konfigurasi tersebut menghasilkan bentuk membran konikal majemuk.

Struktur membran pada Gambar 10.5 mempunyai dua tipe tumpuan atas, yaitu tumpuan titik dan tumpuan berbentuk busur. Bentuk struktur membran ini merupakan *hypar* yang lebih kompleks dari pada Gambar 10.2.

Struktur membran pada Gambar 10.6 penunjang membrannya adalah busur *space-truss* dari pipa baja yang disusun secara berderet paralel, menghasilkan bentuk membran hiperboloida majemuk.

Struktur membran pada Gambar 10.7, tumpuan atasnya berbentuk lengkung tetes air dari kabel baja yang ditunjang oleh kolom tekan, sedangkan tumpuan bawahnya berbentuk titik, menghasilkan bentuk struktur konikal. Struktur membran bentuk ini dapat disusun menghasilkan bentuk membran konikal majemuk.

C. Struktur Membran Sinklastik

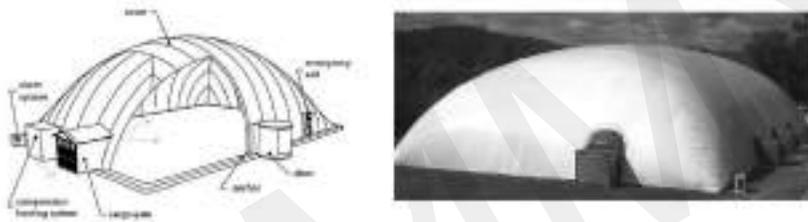
Struktur membran berbentuk sinklastik ditegangkan dengan memberikan tekanan udara di dalamnya, disebut struktur membran *Pneumatic*. Oleh karena penegangannya mengandalkan tekanan udara, maka struktur membran *pneumatic* tidak memerlukan penunjang tekan untuk menumpu membran bagian atas.

Macam-macam bentuk sinklastik: *spherical* (bola/segmen bola), *elliptical*, paraboloid, dan lain-lain. Ada dua tipe struktur *pneumatic*, yaitu:

1. membran *pneumatic air supported*; dan
2. membran *pneumatic air inflated*.

1. Struktur Membran *Pneumatic Air-Supported*

Struktur membran *pneumatic air supported* adalah struktur membran yang diberikan tekanan udara di dalam ruang dalamnya untuk menegangkan permukaan membrannya. Membran ada yang terdiri dari satu lapis, ada yang dua lapis di mana lapisan luar sebagai proteksi terhadap sinar UV, sedangkan lapisan dalam untuk insulasi termal.



Gambar 10.8 Struktur Membran *Pneumatic Air-Supported*

Sumber: <https://www.linkedin.com/pulse/air-supported-structure-description-%D0%B0%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%81%D0%B5%D0%B9-%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B5%D1%86Membran Air Supported>

Besarnya tekanan udara yang harus disuplai untuk menegangkan membra dan harus dijaga selalu lebih besar daripada tekanan udara biasa. Kelebihan tekanan udara tersebut berkisar antara 150 Pa–400 pa (0,0015–0,004 Atm), penambahan tekanan udara tersebut tidak besar sehingga tidak mengganggu kenyamanan pengguna. Besarnya tekanan udara yang harus dipompakan ke dalam ruang tergantung dari dimensi dan radius/kedalaman bentuk lengkung struktur membran, serta besarnya lubang-lubang ventilasi yang memengaruhi jumlah udara yang keluar, besarnya beban eksternal, yaitu embusan angin setempat, hujan, dan lain-lain. Angin merupakan beban pada membran yang paling dominan. Sisi permukaan membran yang berada pada arah datangnya angin menerima tekanan angin dan akan berdeformasi ke

arah dalam. Perlu dijaga agar tegangan tarik pada permukaan membran yang dihasilkan oleh tekanan udara yang dipompakan ke dalam ruang lebih besar daripada tegangan tekan pada permukaan membran yang terjadi karena tekanan angin.

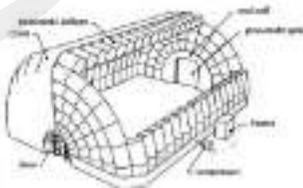
Struktur membran *pneumatic* yang mempunyai bentang besar diperkaku dengan jaring kabel baja, misalnya pada Paviliun Amerika di Ekspo Osaka Jepang 1970.

Kelebihan struktur ini termasuk struktur yang sangat ringan dan dapat dipindah-pindahkan, namun kelemahannya apabila terjadi kebocoran signifikan seluruh struktur akan runtuh.

2. Struktur Membran *Pneumatic Air-Inflated*

Struktur membran *pneumatic air-inflated* adalah struktur membran dua lapis yang berongga (membentuk bantalan atau tabung) dan di dalam rongganya diberi tekanan udara yang besar sehingga membran dapat berdiri dengan stabil dan pada permukaan membrannya menerima tegangan tarik. Berbeda dengan struktur membran *pneumatic air-supported*, ruang dalam bangunan yang berfungsi untuk orang berkegiatan tidak dipengaruhi tekanan udara.

Kelebihan struktur ini dapat mengakomodasi penggunaan bentuk yang cukup bervariasi, dapat diterapkan untuk bangunan yang terbuka tanpa dinding, dapat dikonstruksikan menjadi portal, dan sebagainya. Kalau struktur ini dibentuk dari rangkaian tabung membran, misalnya busur tabung yang dirangkai membentuk sistem struktur vault, maka apabila ada kebocoran pada kulit membrannya, tidak terjadi keruntuhan secara menyeluruh, tetapi hanya terjadi pada tabung yang bocor.



Gambar 10.9 Struktur Membran *Pneumatic Air-Inflated* dengan Kover Eksternal

Sumber: https://www.holstroy.com.ua/pnevmo/eng_technical_data.htm, diunduh 19/4/2024



Gambar 10.10 Struktur Membran *Air-Inflated* Tanpa Kover Eksternal

Sumber: <https://www.designboom.com/category-banner/aerodream-exhibition-history-of-inflatables-centre-pompidou-metz-07-05-2021/>, diunduh 19/4/2024



Gambar 10.11 Struktur Busur Membran *Air-Inflated*

Sumber: <https://blackwell.ca/project/ontarios-celebration-zone/>, diunduh 19/4/2024

Gambar 10.9 kiri menunjukkan anatomi salah satu bentuk struktur membran *pneumatic air-inflated* berbentuk *vault* yang terdiri dari rangkaian beberapa busur tabung membran. Udara dipompakan ke dalam tiap busur tabung, dan dalam contoh ditunjukkan struktur tersebut diberi kover eksternal (Gambar 10.9 kanan). Kover tersebut dapat berfungsi sebagai proteksi terhadap sinar UV, namun tidak semua struktur jenis ini selalu diberi kover, misalnya salah satu paviliun di Expo Osaka 1970 pada Gambar 10.10, dan bangunan Ontario's Celebration Zone pada Gambar 10.11.

BAB 11

STRUKTUR BUSUR

Struktur busur termasuk struktur tekan berbentuk batang lengkung yang terbuat dari material kaku. Bentuk garis funikular busur terhadap berat sendirinya dan terhadap beban merata seluruh bentang, merupakan balik cermin dari garis funikular kabel. Terhadap berat sendiri bentuk funikular busur adalah katenari dan terhadap beban merata bentuk funikularnya adalah parabola.

Struktur busur telah dikenal sejak zaman kuno, seperti bangunan-bangunan di Romawi Kuno banyak untuk bangunan-bangunan gereja. Pada masa itu, struktur busur dibuat dari batu alam atau bata. Perkembangan selanjutnya, pada masa kini konstruksi busur telah berkembang dengan material yang beragam, seperti baja, beton bertulang, gluelam, dan bambu. Penggunaan busur cukup beragam, seperti untuk jembatan, bangunan bentang pendek, bangunan bentang lebar seperti stadion, dan untuk bangunan tinggi.



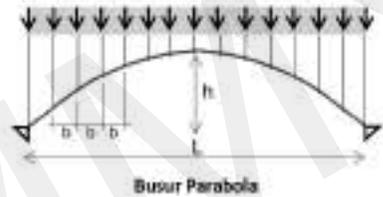
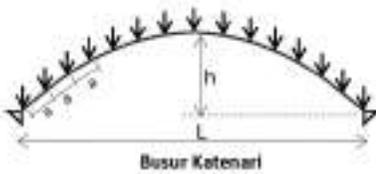
Gambar 11.1 Busur Catenary, Berat Sendiri

Sumber: <https://www.architecturaldigest.com/story/eero-saarinens-st-louis-arch-gets-renovation>, diunduh April 2024



Gambar 11.2 Busur Parabola, Beban Merata

Sumber: <https://resource.midasuser.com/en/solution/arch-bridge>, diunduh April 2024



Bentuk geometris busur yang terbentuk oleh berat sendiri di sepanjang lengkung busur adalah busur katenari yang merupakan balik cermin dari kabel katenari. Dalam gambar a, jarak unit beban sama sepanjang lengkung busur (a , a , a , dan seterusnya).

Bentuk geometris busur yang terbentuk oleh berat beban merata di seluruh bentang busur adalah busur parabola yang merupakan balik cermin dari kabel parabola. Dalam gambar b2, jarak unit beban sama sepanjang garis horizontal (b , b , b , dan seterusnya).



Batu alam dapat disusun membentuk busur, namun bentuk geometri garis funikularnya berupa lengkung tak beraturan, karena gaya berat sendiri, bentuk, dan dimensi batu-batu tidak seragam.

A. Tipe Busur Menurut Kelangsingannya

Busur gemuk dibuat dari material *mono-directional* tekan, seperti pasangan batu, pasangan bata merah, pasangan bata beton, dan lain-

lain, sehingga konstruksi bangunannya cenderung berat. Busur gemuk tidak terlalu sensitif terhadap perilaku *semi form-active* (menerima gaya aksial dan momen).

Busur langsing dibuat dari material *bi-directional*, seperti baja profil, baja pipa, beton bertulang, kayu lapis (*gluelam/laminated-wood*), sehingga konstruksinya cenderung ramping dan ringan. Oleh karena kelangsingannya, maka busur langsing sangat sensitif terhadap perilaku *semi form-active*.

1. Busur Gemuk

Bangunan-bangunan masa lalu di Eropa pada umumnya menggunakan konstruksi pasangan bata/batu yang membutuhkan dimensi penampang melintang yang besar karena sifat materialnya, yaitu tidak tahan gaya tarik dan berat sendiri materialnya besar. Sementara itu, struktur yang menerima gaya tekan berpotensi mengalami gejala tekuk.

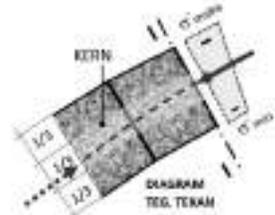
Pada umumnya, konstruksi busur pada zaman Romawi terbuat pasangan bata/batu berbentuk geometris lingkaran ($\frac{1}{2}$ lingkaran, $\frac{1}{4}$ lingkaran, dan sebagainya) yang simetris.

Perilaku Busur Gemuk

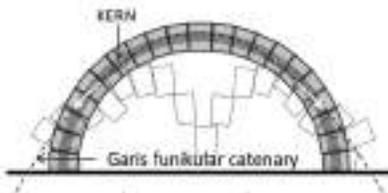
Pada Gambar 11.3 tampak busur batu yang gemuk dengan bentuk geometris $\frac{1}{2}$ lingkaran dapat berdiri dengan baik, padahal garis funikular untuk berat sendiri busur batu adalah katenari, sedangkan bentuk geometris busur adalah $\frac{1}{2}$ lingkaran. Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut: busur merupakan struktur yang dominan bekerja menahan gaya tekan. Batang tekan gemuk mempunyai zona KERN setebal $\frac{1}{3}$ dari ketebalan busur, di mana semua gaya tekan yang bekerja di dalam zona KERN tersebut tidak mengakibatkan terjadinya tegangan tarik pada batang tekan. Gaya tekan pada busur akibat berat sendiri bekerja di sepanjang garis funikular berbentuk katenari, selama garis funikular berada di dalam KERN busur batu, maka di seluruh penampang busur hanya bekerja gaya tekan (Gambar 11.4). Hal tersebut yang terjadi pada busur gemuk sehingga dapat tetap berdiri dengan baik. Gambar 11.5 memperjelas bila gaya tekan keluar dari KERN, maka struktur busur akan runtuh. Dalam Gambar 11.6 ditunjukkan bahwa dinding di sayap kiri-kanan dapat memberi gaya reaksi terhadap komponen gaya tekan horizontal sehingga busur dapat tetap berdiri dengan baik.



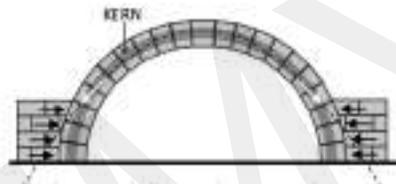
Gambar 11.3 Garis *Funicular* Busur Batu Gemuk di dalam KERN



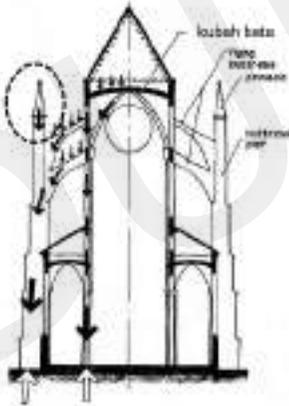
Gambar 11.4 Perilaku Gaya di Pot I-I



Gambar 11.5 Keruntuhan Busur



Gambar 11.6 Dinding Penahan Keruntuhan Busur



Gambar 11.7 Potongan Gereja Gotik

Sebuah contoh bagaimana struktur bangunan gereja gotik menampilkan penyelesaian yang sangat menarik untuk menjaga gaya tekan tetap bekerja di dalam zona KERN.

Gaya tekan dari atap dan kubah bata interior ditahan oleh *flying buttress* yang berbentuk busur. Gaya tekan dari busur diteruskan ke *buttress pier*. Gaya tekan dari *flying buttress* terdiri dari komponen gaya vertikal dan horizontal sehingga berpeluang keluar dari KERN. *Pinnacle* (menara) di atas memberi gaya tekan vertikal menambah besarnya komponen gaya vertikal, sehingga resultan gaya tidak keluar dari KERN.

2. Busur Langsing

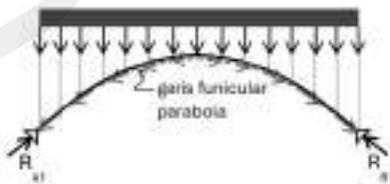
Busur langsing mempunyai problem yang sangat berbeda dengan busur gemuk, walaupun busur langsing dan busur gemuk sama-sama menahan gaya tekan. Pada busur langsing dimensi KERN sangat tipis. Bila bentuk geometris busur berbeda dengan bentuk geometris garis funikular terhadap berat sendiri busur (katenari), maka gaya tekan cenderung keluar dari zona KERN.

Bila bentuk geometris busur sama dengan bentuk geometris garis funikular terhadap berat sendiri (katenari), di dalam busur hanya bekerja gaya aksial tekan saja, dan busurnya termasuk *form-active*.

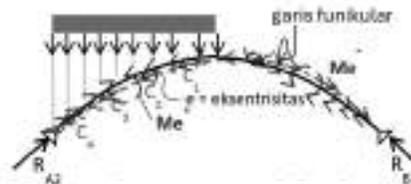
3. Busur Parabola

a. Perilaku Busur Parabola terhadap Beban Gravitasi

Bentuk geometris parabola sangat mendekati/hampir berimpit dengan bentuk geometris katenari, maka bila busur parabola memikul beban merata seluruh bentang, di dalam busurnya akan bekerja gaya aksial tekan saja (Gambar 11.8). Busur parabola langsing yang menerima beban merata seluruh bentang termasuk busur *form-active*. Namun, apabila pola pembebanan diubah, busur tidak bisa berperilaku seperti kabel karena sifat materialnya kaku sehingga cenderung melawan perubahan bentuk. Misalnya, kalau busur parabola diberi sebuah beban terpusat di satu titik, maka busur tersebut tidak dapat berubah bentuk menjadi poligon segitiga (tidak seperti kabel), namun busur tersebut mengalami deformasi membentuk lengkung yang berbeda dari lengkung asalnya.



Gambar 11.8 Busur Parabola Beban Gravitasi Merata Penuh



Gambar 11.9 Busur Parabola Beban Gravitasi Merata $\frac{1}{2}$ Bentang

Setiap struktur harus didesain dengan aman, maka harus ditetapkan kondisi yang paling tidak menguntungkan untuk strukturnya. Dalam analisis/perhitungan struktur busur langsing, beban hidup harus dihitung sebagai beban asimetri, yaitu beban merata sepanjang setengah ($\frac{1}{2}$) bentang busur sehingga garis funikularnya berdeformasi seperti garis putus-putus dalam Gambar 11.9, sedangkan beban mati tetap dihitung sebagai beban merata sepanjang bentang. Deformasi tersebut mengakibatkan di antara garis funikular dengan sumbu normal busur terjadi eksentrisitas (e), maka gaya tekan yang bekerja di sumbu garis funikular dengan jarak e terhadap sumbu normal busur mengakibatkan terjadi momen eksentris sebesar $Me = Cn \times e$ pada potongan melintang yang ditinjau. Melihat bentuk deformasinya, momen di sisi beban hidup adalah momen positif dan di sisi yang lain momen negatif. Besarnya momen tersebut mengecil ke arah tumpuan dan puncak busur untuk masing-masing sisi sampai besarnya adalah nol di tumpuan dan di puncak busur. Momen maksimal untuk M^+ dan minimal untuk M^- berada di antara tumpuan dan puncak busur.

b. Perilaku Busur Parabola terhadap Beban Lateral

Beban lateral mengakibatkan deformasi yang mirip dengan deformasi akibat beban gravitasi asimetri $\frac{1}{2}$ bentang. Namun, gaya dalam yang bekerja dan reaksi tumpuannya sangat berbeda. Bila busur didorong dengan gaya lateral dari sisi kiri seperti pada Gambar 11.10a, busur cenderung terguling, di sisi beban busur akan terangkat dan di sisi lain akan tertekan ke dalam tanah. Oleh karena itu reaksi tumpuan R_{A3} adalah gaya tarik, sedangkan R_{B3} adalah gaya tekan. Gaya pada busur bekerja melalui garis funikular, di sisi beban bekerja gaya tarik Cn^+ dan di sisi lain bekerja gaya tekan Cn^- . Gaya tarik Cn^+ dan gaya tekan Cn^- bekerja pada garis funikular yang eksentris sebesar e terhadap sumbu garis busur parabola, maka pada titik yang ditinjau terjadi momen sebesar $Me = e \times Cn$. Dalam Gambar 11.10b dijelaskan perilaku gaya pada dua buah penampang yang ditinjau, masing-masing di sisi tekan dan di sisi tarik. Dari bentuk deformasi dan perilaku gaya pada Gambar 11.10b, dapat disimpulkan momen di sisi gaya adalah momen positif, sedangkan di sisi lain adalah momen negatif. Gaya tarik $Cn1^-$ bekerja di garis funikular berjarak terhadap sumbu busur sebesar $e1$, maka terjadi momen positif (lihat arah putarannya) sebesar $Me1(+)= e1 \times Cn1^+$ dan gaya tekan

$Cn2^-$ bekerja di garis funikular berjarak terhadap sumbu busur sebesar $e2$, maka terjadi momen sebesar $Me2(-) = e2 \times Cn2^+$.

Busur parabola langsing termasuk busur *semi-form active* karena ketika menerima beban gravitasi asimetri serta beban lateral di dalam busur bekerja gaya aksial dan momen.



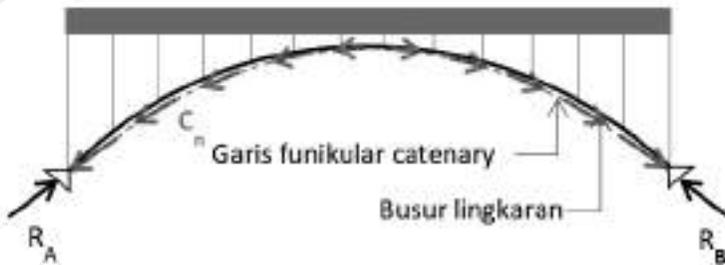
Gambar 11.10a Busur Parabola terhadap Beban Lateral



Gambar 11.10b Penjelasan Gaya dalam Busur

4. Busur Lingkaran

Busur lingkaran pada umumnya berbentuk $\frac{1}{2}$ lingkaran atau segmen lingkaran (selanjutnya, disebut busur lingkaran saja). Bentuk geometris busur lingkaran dan bentuk geometris garis funikular berat sendiri (katenari)/beban merata (parabola) tidak berimpit, sehingga pada busur lingkaran selalu bekerja momen eksentris selain gaya tekan (Gambar 11.11), maka busur lingkaran termasuk busur *semi form-active*.



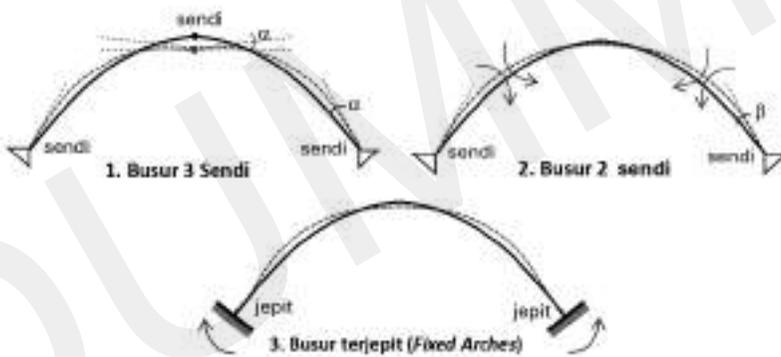
Gambar 11.11 Busur Lingkaran terhadap Berat Sendiri

B. Tiga Tipe Busur Langsing

1. Busur 3 sendi;
2. Busur 2 sendi; dan
3. Busur terjepit.

1. Busur 3 Sendi

Busur 3 sendi termasuk struktur statis tertentu. Bila menerima beban, pada tumpuan dan join sendinya terjadi perputaran sudut karena sendi tidak bisa menahan momen. Maka, busur tipe ini merupakan busur yang paling fleksibel terhadap perubahan suhu (kembang-susut) dan perbedaan penurunan fondasi. Bila terjadi perbedaan penurunan fondasi, pada busur 3 sendi tidak bekerja momen pada batang busurnya. Di antara 3 busur, terhadap beban eksentris busur tipe ini menerima momen eksentris terbesar.



2. Busur 2 Sendi

Busur tipe ini termasuk struktur statis tak tentu tingkat satu. Bila menerima beban, hanya sendi di tumpuan yang bisa berputar. Oleh karena itu, busur 2 sendi tidak sefleksibel busur 3 sendi bila mengalami perubahan suhu (kembang-susut) dan perbedaan penurunan fondasi. Bila terjadi perbedaan penurunan fondasi, busur ini tidak terlalu terpengaruh, namun terhadap pergeseran horizontal fondasi di puncak busur terjadi momen lentur.

3. Busur Terjepit (*Fixed Arches*)

Busur tipe ini termasuk struktur statis tak tentu tingkat dua, dan busur ini paling tidak fleksibel terhadap perbedaan penurunan fondasi dan perubahan suhu (kembang-susut). Oleh karena tidak ada sendi, maka terjadi perbedaan penurunan maupun perubahan suhu pada tumpuan dan seluruh batang terjadi momen lentur. Bila bekerja beban eksentris, momen akan terbagi di tumpuan dan di batang busur, sedangkan momen maksimal berada di tumpuan.



Gambar 11.12 Busur
Glulam 3 Sendi

Sumber: <https://landscapearchitect.com/ladetails/landscape-product/bridges-boardwalks/western-wood-structures/pressure-treated-glulam-bridges>



Gambar 11.13 Busur
Baja 2 Sendi

Sumber: <https://structurae.net/en/structures/bridges/two-hinged-arch-bridges/media>



Gambar 11.14 Busur
Beton Tumpuan Jepit

Sumber: https://issuu.com/thegreenagenda/docs/the_green_agenda_april_2022/s/15509391

C. Statika Busur Langsing

Tidak sama dengan kabel, busur tidak bisa berubah bentuk untuk menyesuaikan geometrinya dengan pola pembebanan. Oleh karena itu, kalau bentuk geometrinya tidak serasi dengan pola pembebanannya, misalnya bebannya asimetri, maka di dalam busur selain bekerja gaya aksial juga bekerja momen (*semi form-active*), artinya busur langsing tidak murni *form-active*.

Perhitungan busur disesuaikan dengan sifat tersebut, yaitu terhadap beban gravitasi dihitung berdasarkan kondisi yang paling tidak menguntungkan, yaitu:

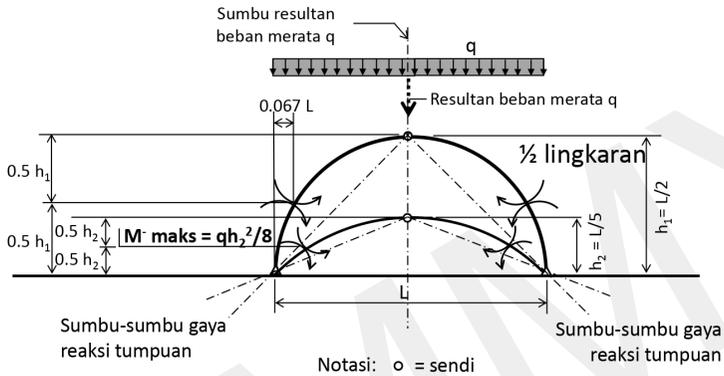
1. Beban hidup busur harus dihitung $\frac{1}{2}$ bentang; dan
2. Beban mati dihitung seluruh bentang.

Oleh karena perhitungan statika busur lebih rumit dari kabel, maka dalam perkuliahan ini tidak dibahas analisis struktur secara analitis. Selanjutnya, untuk mencari reaksi tumpuan dan momen pada busur $\frac{1}{2}$ lingkaran dan busur parabola digunakan gambar skematik.

Halaman-halaman berikut adalah rumus-rumus dan garis-garis sumbu penting dalam gambar skematis, yang dapat digunakan untuk menghitung gaya reaksi tumpuan dan momen. Gambar skematik tersebut memang terbatas dan tidak mengakomodasi semua kondisi busur, namun cukup untuk taraf pembelajaran di arsitektur.

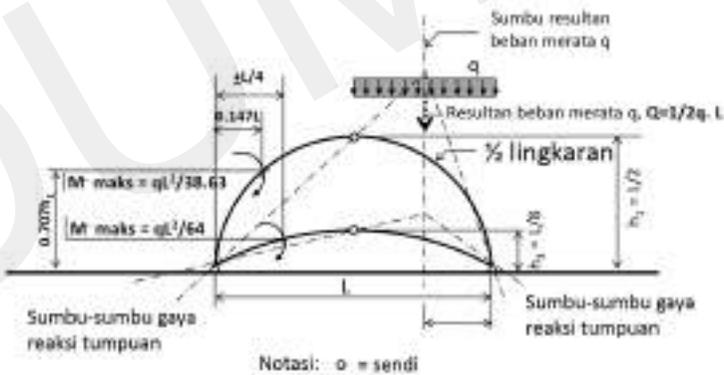
Busur ½ lingkaran 3 sendi, yakni sebagai berikut.

1. Beban merata simetri seluruh bentang.



Sumber: Shueller (1983), *Horizontal-Span Buildings*

2. Beban merata asimetri setengah bentang.

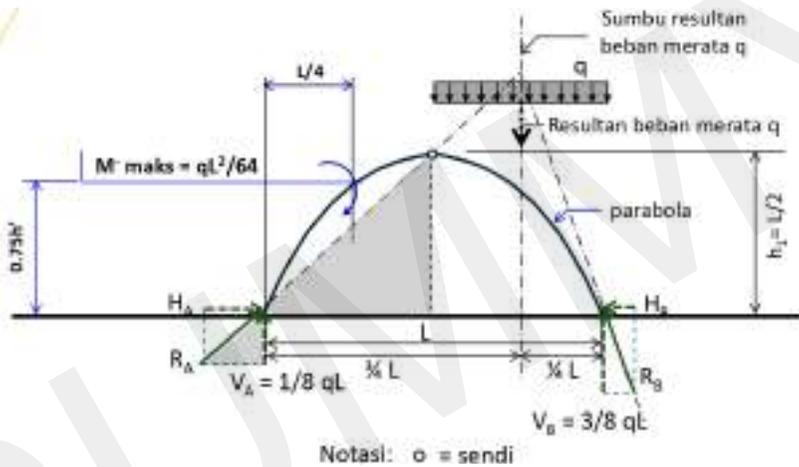


Sumber: Shueller (1983), *Horizontal-span buildings*

Dalam gambar skemati ada rumus momen dan garis-garis sumbu kerja gaya reaksi tumpuan.

1. Momen internal dihitung langsung dengan rumus dalam gambar skematik.
2. Gaya reaksi tumpuan vertikal dihitung dengan rumus $V_A = V_B = \frac{1}{2} ql$ (atau dicari dengan keseimbangan momen dan keseimbangan gaya vertikal $\sum M = 0$ dan $\sum V = 0$).
3. Gaya reaksi tumpuan horizontal dihitung dengan perbandingan sisi segitiga (trigonometri) sesuai dengan sudut serta jarak sumbu kerja gaya reaksi tumpuan terhadap sumbu horizontal dan vertikal.

D. Statika Busur Parabola



Sumber: Shueller (1983), *Horizontal-Span Buildings*

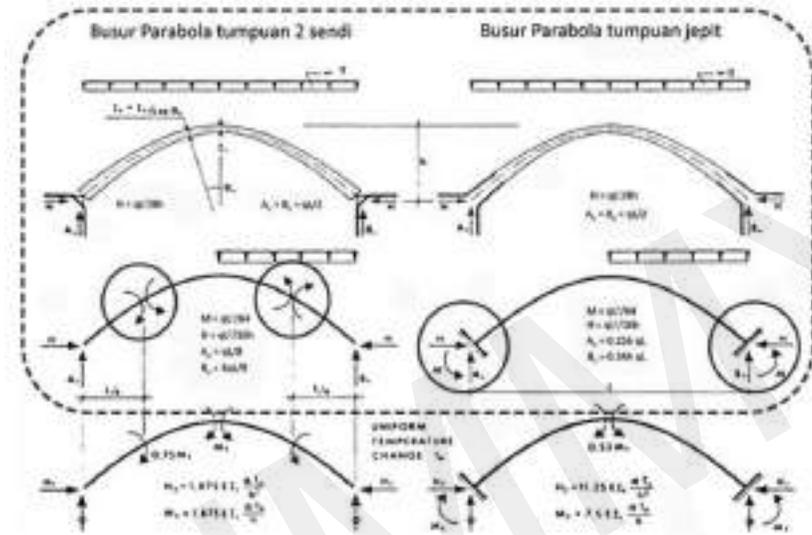
Tidak ada gambar skematik untuk busur parabola dengan beban merata penuh karena di dalam busur tidak bekerja momen, hanya bekerja gaya aksial (busur *form-active*). Gambar skematik hanya diberikan untuk busur dengan beban merata asimetri $\frac{1}{2}$ bentang.

Dalam gambar skematik ada rumus momen, dan arah sumbu garis-garis kerja gaya reaksi tumpuan.

1. Momen internal dihitung langsung dengan rumus dalam gambar skematik.
2. Gaya reaksi tumpuan vertikal dihitung dengan rumus: $V_A = ql/8$; $V_B = 3ql/8$.

- Gaya reaksi tumpuan horizontal dihitung dengan rumus trigonometri perbandingan sisi segitiga sebangun (warna abu-abu dalam gambar).

Busur Parabola 2 Sendi dan Terjepit Berbentuk Landai $h/L \leq 1/5$



Sumber: Shueller (1983), Horizontal-Span Buildings

Tidak ada rumus momen dalam gambar skematik untuk busur parabola dengan beban merata seluruh bentang karena di dalam busur tersebut tidak bekerja momen (busur *form-active*). Hal yang ada dalam gambar skematik adalah sebagai berikut.

- Dalam gambar skematik parabola beban merata asimetri $1/2$ bentang ada rumus: reaksi tumpuan A_v , B_v , H , Momen lapangan untuk parabola 2 sendi dan momen tumpuan untuk parabola terjepit.
- Rumus-rumus tersebut bisa langsung dipakai dalam perhitungan (analisis struktur).

Catatan: rumus-rumus dalam gambar skematik di atas hanya berlaku untuk parabola dengan rasio $h/L \leq 1/5$

E. Perhitungan Dimensi

Oleh karena di dalam busur bekerja gaya aksial dan momen, maka dicari masing-masing tegangan kerjanya, kemudian tegangan kerja aksial dijumlahkan dengan tegangan lentur.

1. Tegangan kerja akibat gaya aksial: $\sigma_{tk} = -P/A$
2. Tegangan kerja akibat momen: $\sigma_{lt} = \pm M/Wx$ (+ dan -)

σ_{tk} = tegangan tekan

σ_{lt} = tegangan lentur

M = momen

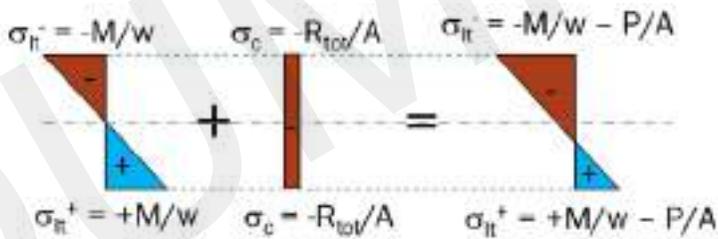
Wx = momen tahanan terhadap sumbu x

Untuk penampang persegi panjang $Wx = 1/6 b.h^2 \text{ cm}^3$.

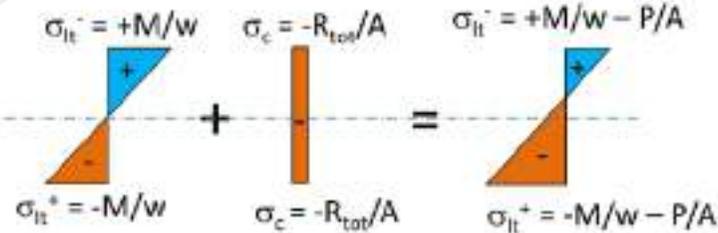
Untuk baja profil Wx dilihat di dalam tabel baja.

$$\sigma_{\text{total}} = \pm \sigma_{lt} + \sigma_{tk} = \pm M_{\text{maks}} / W_x + (-P/A)$$

Pada posisi momen positif:



Pada posisi momen negatif:



Contoh Soal:

Busur ½ Lingkaran (Beban Merata Penuh)

Contoh Soal (1)

Diketahui:

Busur ½ lingkaran dengan bentang 30m menerima beban merata seluruh bentang sebesar $q = 900 \text{ kgf/m}$.

Busur menggunakan baja dengan IWF, dengan mutu bj 37.

Hitunglah dimensi busur tersebut!

Jawaban:

Dalam tabel hanya ada arah sumbu reaksi tumpuan dan koordinat posisi momen.

$$V_A = V_B = \frac{1}{2} qL$$

$$= \frac{1}{2} (900 \times 30) = 13'500 \text{ kgf}$$

Sudut sumbu reaksi dengan horizontal = $45^\circ \rightarrow H_A = V_A$

$$R_A = \sqrt{(13'500^2 + 13'500^2)}$$

$$= 19'091 \text{ kgf}$$

$$M_{maks} = V_A \times 0.067L - H_A \times 0.5 h_1$$

$$= 13'500 \times 2,01 - 13'500 \times 7.5$$

$$= 27'135 - 101'250$$

$$= -74'115 \text{ kgf m}$$

Material busur baja IWF, tegangan ijin = 1600 kgf/cm^2 .

- $M = 74'115 \text{ kgf m} = 7'411'500 \text{ kgf cm}$
- $\sigma_i = M/W \rightarrow W_x = 7'411'500 / 1600 = 4'632 \text{ cm}^3$
- $R_A = 19'091 \text{ kgf}$
- $\sigma_{tk} = RA/A \rightarrow A = 19'091 / 1600 = 11,94 \text{ cm}^2$
- Diasumsikan $\rightarrow \text{WF } 700 \times 300; A = 235,5 \text{ cm}^2; W_x = 5'760 \text{ cm}^3$

Kontrol terhadap tegangan tekan total:

$$\sigma_{tot} = M/W_x + RA/A$$

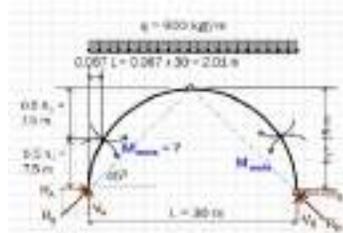
$$= 7'411'500 / 5'760 + 19'091 / 235,5$$

$$= 1286,72 + 81,06$$

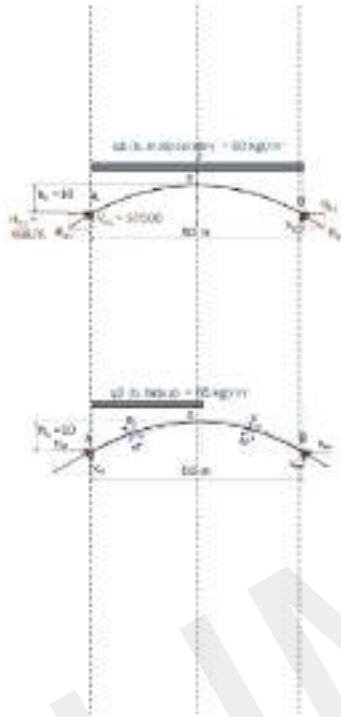
$$= 1367,8 \text{ kgf/cm}^2 < 1600 \text{ kgf/cm}^2 \rightarrow \text{OK!}$$

Catatan:

- Untuk perhitungan lebih teliti seharusnya tegangan aksial yang dijumlahkan dengan tegangan lentur adalah di posisi M_{maks} .



Contoh Soal (2) Busur Parabola



Diketahui:

- Struktur atap busur memikul berat sendiri busur sebesar 50 kgf/m' dan beban hidup sebesar 65 kgf/m' . Beban angin tidak diminta untuk diperhitungkan.
- Busur menggunakan baja IWF mutu bj37.

Hitung perkiraan dimensi busur tersebut!

Jawaban:

a. Beban Mati

(perhitungan berdasarkan rumus dalam gambar, parabola 2 sendi)

- $V_{A1} = V_{B1} = qL/2 = 50 \times 16 / 2 = 1'250 \text{ kgf}$
- $H_{A1} = H_{B1} = qL^2/8h = (50 \times 16^2) / (8 \times 8) = 1'562,5 \text{ kgf}$

Catatan: parabola dengan beban penuh adalah form active, maka tidak ada momen.

b. Beban Hidup

(perhitungan berdasarkan gambar skematik, lihat busur parabola tumpuan 2 sendi)

- $V_{A2} = 3 qL/8 = 3 \times 65 \times 16/8 = 1'218,75 \text{ kgf}$
- $V_{B2} = qL/8 = 65 \times 16/8 = 406,25 \text{ kgf}$
- $\Sigma H = 0 \rightarrow HA2 = HB2 = qL^2/16h = (65 \times 16^2) / (16 \times 8) = 1'015 \text{ kgf}$
- $M = qL^2/64 = 65 \times 16^2/64 = 2'569 \text{ kgf m} = 256'900 \text{ kgf cm}$

Gaya aksial maksimal = jumlah reaksi vertikal dan horisontal total (a + b):

- $V_{A1} + V_{A2} = 1'250 + 1'218,75 = 2'468,75 \text{ kgf}$

(dalam contoh ini beban hidup q_2 berada di sisi A, maka dipilih reaksi di A bukan di B karena $VA2 > VB2$)

- $H_{A1} + H_{A2} = 1'562,5 + 1'015 = 2'577,5 \text{ kgf}$
- $R_{\text{total}} = \sqrt{(2'468,75^2 + 2'577,5^2)} = 3'569 \text{ kgf}$

Berdasar M (positif) $\rightarrow \sigma = M/Wx \rightarrow Wx = M/\sigma_{ijin} = 256'900/1'600 = 160,150 \text{ cm}^3$

Dipilih WF 200x100 ; $Wx = 184 \text{ cm}^3$, unit berat = 21,30 kgf/m.

Kontrol kekuatan:

- $\sigma_{tot} = -M/Wx - R_{A \text{ tot}} / A$
 $= -256'900/184 - 3'569 / 27,16$
 $= -1379,9 - 132$
 $= -1511,9 \text{ kgf/cm}^2 < 1600 \text{ kgf/cm}^2 \rightarrow \text{OK!}$

Kontrol tekuk WF 200x100:

Busur-busur diletakkan paralel, maka perlu ikatan angin untuk stabilitasnya. Ikatan angin ini dapat dimanfaatkan untuk memperpendek panjang tekuk (lk).

Ditetapkan jarak ikatan angin = 6 m = 600 cm.

- $r_y = 0,23 \times 10 = 2,3 \rightarrow lk/r_y = 600/2,3 = 260 \rightarrow$ Tegangan ijin tekuk terlalu kecil, dimensi dibesarkan.
- Pilih IWF 175 x175; $A = 51,21 \text{ cm}^2$; $W = 330 \text{ cm}^3$, unit berat = 40.20 kgf/m
- $\sigma_{tot} = M/Wx + R_{A \text{ tot}} / A$
 $= 256'900/330 + (2'000 + 1.586) / 27,16$
 $= 1396,2 + 132 = 1528,24 \text{ kgf/cm}^2$

Kontrol tekuk:

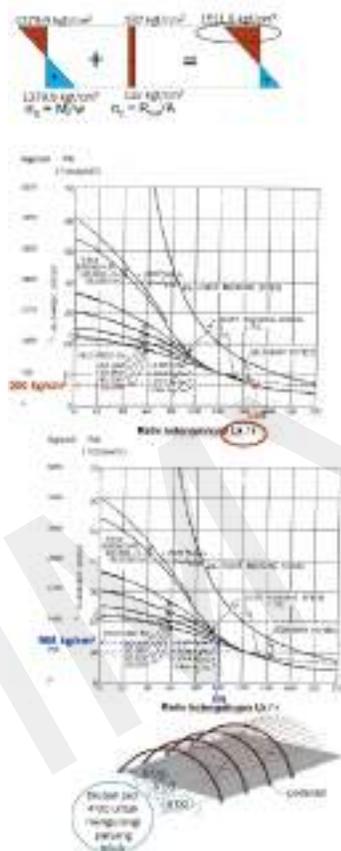
- $r_y = 0,23 \times 17,5 = 4,024 \rightarrow lk/r_y = 600/4,024 = 149 \rightarrow \sigma$ ijin tekuk = + 500 kgf/cm² (lihat tabel).
- $\sigma_{tot} = M/Wx + R_{A \text{ tot}} / A$
 $= 256'900/330 + (2'000 + 1'586) / 51,21$
 $= 778,5 + 70$
 $= 848,5 \text{ kgf/cm}^2 > \sigma$ ijin tekuk = 500 kgf/cm² \rightarrow dimensi tidak cukup.

Coba dengan memendekkan jarak ikatan angin menjadi 4 m

- $lk/r_y = 400/4,025 = 99$, σ ijin tekuk = + 966 kgf/cm²
- Tegangan tekan maksimal 848,5 kg/cm² < σ ijin tekuk = 966 kgf/cm² $\rightarrow \text{OK!}$

Catatan:

Dalam soal ini berat sendiri IWF telah ditentukan = 50 kgf/m lebih berat dari IWF hasil perhitungan (IWF 200x100 dan IWF 175x175). Oleh karena itu ketika IWF dibesarkan tidak dihitung ulang momen terhadap berat sendiri, kalau ternyata berat IWF hasil perhitungan lebih besar cukup signifikan dari pada yang berat IWF yang diketahui, maka momen berat sendiri dihitung ulang.



Rangkuman

Mempelajari statika mulai dari balok sederhana sampai dengan busur dan perhitungan aproksimasi dimensi dapat memperdalam pemahaman perilaku masing-masing sistem struktur dan keterkaitannya dengan material. Selain itu, dapat mengonfirmasi kesesuaian antara teori

dengan hasil analisis struktur, karena pada dasarnya analisis struktur dan perhitungan dimensi bersumber dari teori.

Tabel di bawah ini adalah salah satu tugas mahasiswa untuk menghitung dimensi masing-masing struktur dan mengurutkan berat struktur, mulai dari yang paling ringan sampai dengan yang paling berat. Bentang struktur semua struktur sama, dan material yang digunakan ditetapkan baja bj37. Semua struktur menggunakan baja IWF, kecuali lengkung kabel menggunakan baja strip yang diletakkan rebah agar dapat melentur dengan mudah dan mutu bajanya sama dengan yang lain.

Sistem-sistem struktur yang dibandingkan adalah sebagai berikut.

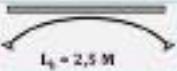
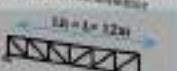
1. Balok sederhana.
2. Balok terjepit.
3. Rangka batang tanpa pengaku tekuk (di sisi atas yang mengalami tekan tidak ada pengaku horizontal).
4. Rangka batang dengan pengaku tekuk (di sisi atas yang mengalami tekan ada pengaku horizontal tiap 1 m).
5. Busur dengan beban merata simetri seluruh bentang.
6. Busur dengan beban merata asimetri $\frac{1}{2}$ bentang.
7. Lengkung kabel yang menggunakan material baja strip.

Hasinya dibuatkan tabel di bawah ini, tampak urutan struktur yang paling ringan dan paling berat sesuai dengan teorinya. Dengan demikian, mahasiswa mendapatkan kejelasan dan kepastian bahwa ada kesesuaian antara teori dan hasil analisis struktur.

Dari tabel tersebut, tampak bahwa struktur kabel tarik (*form-active*) paling efisien disusul struktur busur tekan dengan beban simetri (*form-active*), struktur busur tekan dengan beban asimetri (*semi form-active*), struktur *truss* (*non form-active* yang diperbaiki) dengan panjang tekuk batang tekan horizontal yang pendek, struktur *truss* (*non form-active* yang diperbaiki) dengan panjang tekuk batang tekan horizontal yang panjang, balok dengan tumpuan jepit (*non form-active*), dan paling tidak efisien adalah balok sederhana (*non form-active*).

Hal ini mengonfirmasi bahwa struktur *form-active* adalah yang paling efisien disusul struktur-struktur *semi form-active*, dan terakhir

struktur *non form-active*. Sementara itu, struktur tekan yang panjang tekuknya pendek lebih efisien daripada struktur tekan yang panjang tekuknya panjang.

STRUKTUR	BENTANG	DEMENSI BAJA PROFIL	TOTAL BERAT STRUKTUR	RANGKING PALING RINGAN BE BERAT
	l = 12 m L = 13,4 m	Strip 15x140	219,33 kgf	1
	l = 12 m, L = 13,4 m (l ₀ = 2,5 m)	IWF 150x150	422,3 kgf	2
	l = 12 m, L = 13,4 m (l ₀ = 2,5 m)	IWF 200x200	660,3 kgf	3
	12 m, (l ₀ = 1 m)	B: IWF 125x125 C: IWF 125x125 D: IWF 125x125	928 kgf	4
	12 m, (l ₀ = 12 m)	B: IWF 125x125 A: IWF 300x300 D: IWF 125x125	1'170,81 kgf	5
	12 m	IWF 600 x 200	1'260 kgf	6
	12 m	IWF 500 x 300	1'312 kgf	7

BAB 12

STRUKTUR PELAT LIPAT

Struktur pelat datar yang dibentangkan mempunyai kekakuan yang kecil terhadap momen lentur (12.1). Bila pelat tersebut bentuknya diubah menjadi pelat lipat akan menjadi lebih kaku (12.2) karena mempunyai kedalaman struktur (h) yang besar, sehingga momen inersianya besar.



Bila beban diperbesar, pelat lipat dapat mengalami kegagalan struktural, hal itu terjadi karena lipatannya cenderung berubah bentuk menjadi landai (12.3). Namun, apabila di kedua ujung bidang lipat diberi bidang pengaku, bidang lipat terjaga tidak mengalami perubahan bentuk,

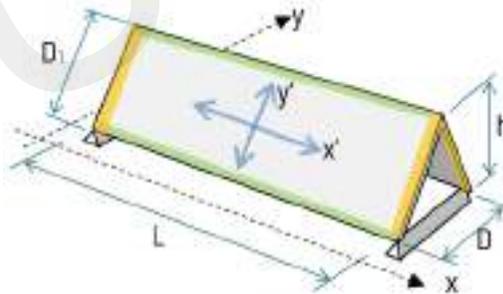
dan dapat menerima beban yang lebih besar (12.4). Jadi, pada dasarnya perubahan bentuk lipatan harus dihindari agar struktur pelat lipat tidak mengalami kegagalan struktural.

Pelat lipat dapat mengakomodasi berbagai bentuk yang tercakup dalam bentuk-bentuk prismatic, seperti balok pelat lipat, portal pelat lipat; dan bentuk-bentuk non-prismatic, seperti kubah pelat lipat. Bentuk penampang transversal pelat lipat prismatic bisa beragam, seperti segitiga, trapesium, dan sebagainya. Dalam buku ini hanya dibahas pelat lipat berbentuk prismatic saja.

A. Kinerja Struktur Pelat Lipat

Bidang miring pada pelat lipat ditumpu di empat sisinya, yaitu pada dua buah tumpuan transversal di ujung longitudinalnya yang juga berfungsi sebagai pengaku berupa rangka *gable* pemikul momen atau dinding pemikul beban, pada arah longitudinal di lipatan puncak dan tepi pelat bagian bawah (yang diperkuat dan diperkaku). Seperti pelat datar, pelat miring pada pelat lipat yang ditumpu di empat sisinya menyalurkan gaya ke dua arah sumbu, tergantung dari proporsi L/D_1 . Untuk $L/D_1 \geq 2$ penyaluran gayanya *one-way* ke arah yang pendek, yaitu ke arah x' , sedangkan kalau $L/D_1 < 2$ penyaluran gayanya *two-way* (Gambar 12.5). Untuk pelat lipat panjang $L/D_1 \geq 2$, rasio optimal kedalaman lipatan (h) dibanding lebar bentangnya (L) sekitar 1/10 sampai dengan 1/15.

Sudut kemiringan pelat lipat yang optimal adalah 45° (Moore, 1999), sedangkan rentang yang umum diterapkan adalah 25° – 45° (Schueller, 1983).

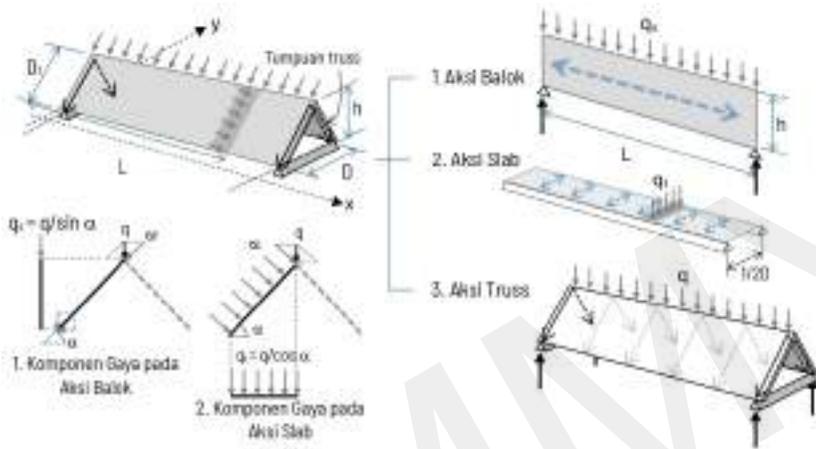


Gambar 12.5 Arah Penyaluran Gaya pada Bidang Lipat

Struktur pelat lipat dapat diibaratkan sebagai balok sederhana dengan penampang melintang berbentuk *truss*. Sebagai balok yang menerima beban gravitasi, maka sepanjang bentang pelat lipat (arah sumbu y) bekerja momen lentur dan gaya geser lentur. Oleh karena

penampang melintangnya berbentuk *truss*, maka ada perbedaan perilaku gaya di dalam strukturnya dibandingkan dengan balok dengan bentuk penampang kotak masif.

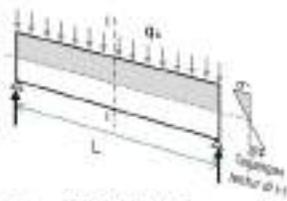
Ada tiga perilaku gaya yang bekerja di dalam strukturnya, yakni sebagai berikut.



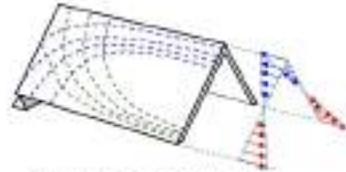
Gambar 12.6 Perilaku Pelat Lipat

1. Aksi Balok

Aksi balok (*beam-action*) bekerja pada arah longitudinal pada kedua bidang miring, di mana masing-masing bidang menahan komponen unit gaya gravitasi sejajar bidang miring tersebut (q_s). Bila diproyeksikan pada bidang vertikal, bidang miring tersebut menjadi seperti balok bidang dengan kedalaman struktur h . Terhadap unit beban q_s , pada balok bekerja momen lentur, dan ditahan oleh balok dengan tegangan lentur tarik-tekan.



Gambar 12.7 Aksi Balok: Tegangan Lentur



Gambar 12.8 Aksi Balok: Tegangan Lentur Seluruh Bidang Lipat

2. Aksi Slab

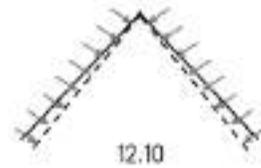
Struktur pelat lipat yang umum diterapkan adalah pelat lipat panjang, di mana L/D_1 selalu ≥ 2 , maka aksi slab bekerja pada arah transversal ke arah tumpuan longitudinal atas dan bawah. Aksi slab ini terjadi karena komponen unit gaya gravitasi (unit beban merata) tegak lurus bidang miring q_t (Gambar $b2_a$ dan $b2_b$). Komponen unit gaya q_t menyebabkan pada slab bekerja momen lentur. Momen lentur ini yang menentukan dimensi ketebalan pelat bidang miring.

3. Aksi Truss

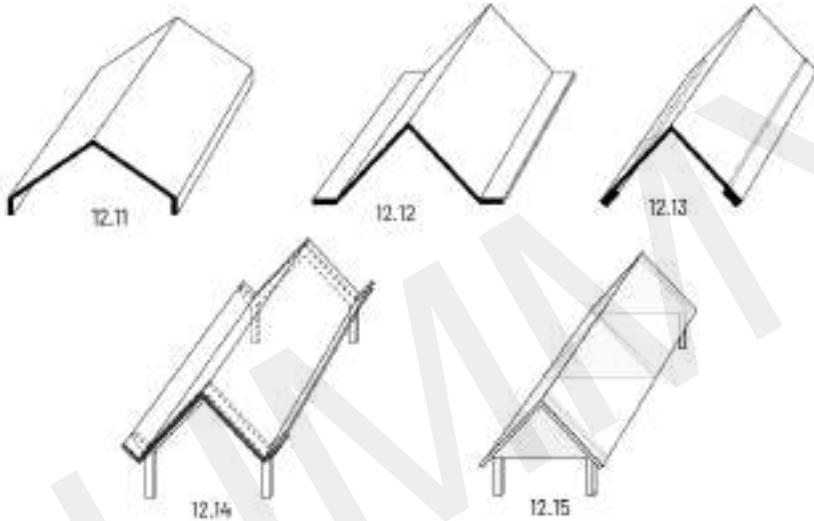
Aksi truss bekerja pada bidang miring berupa gaya aksial tekan menuju ke bawah. Aksi truss bekerja maksimal di tumpuan karena di tumpuan ada perlawanan terhadap komponen gaya truss vertikal dan horizontal.

Aksi balok, aksi slab, dan aksi truss semuanya bekerja pada struktur pelat lipat, namun ada di antaranya yang lebih dominan daripada yang lain. Untuk pelat lipat yang landai, aksi slab lebih dominan, sedangkan untuk pelat lipat yang curam, aksi balok lebih dominan. Aksi-aksi tersebut berusaha mengubah bentuk pelat lipat, dan struktur pelat lipat harus memberi perlawanan agar tidak terjadi deformasi yang signifikan. Ketika gaya aksial tekan dari aksi truss bekerja di tumpuan, maka pada posisi tersebut ada potensi terjadi perilaku dan deformasi tekuk.

Oleh karena itu pelat lipat pada posisi tumpuan harus dikontrol terhadap tekuk, bila ada potensi gejala tekuk, perlu diberi pengaku (Gambar 12.14) atau bidang (Gambar 12.15). Ketika gaya aksial tekan dari aksi truss bekerja di tengah bentang pelat lipat, komponen gaya vertikal dan horizontalnya cenderung menggeser batas tepi bawah pelat lipat sehingga pelat lipat cenderung berdeformasi menjadi lebih landai, yaitu puncak pelat lipat turun dan bagian tepi bawahnya terdorong ke luar dan ke bawah (Gambar 12.9). Batas tepi bawah pelat lipat sangat lemah terhadap aksi slab karena bagian tersebut berupa pelat yang tidak dilipat (Gambar 12.10), kelemahan ini menonjol pada struktur pelat lipat yang bentangnya lebar.



B. Beberapa Cara Memperkaku Pelat Lipat



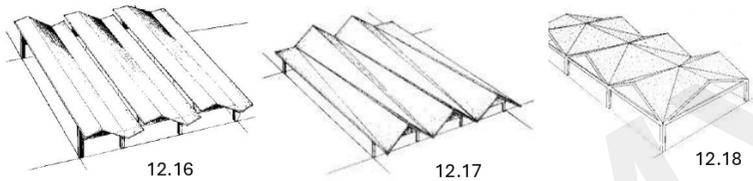
Batas tepi bawah pelat lipat dapat diperkaku dengan memberi balok dalam posisi vertikal (Gambar 12.11), dengan balok horizontal (Gambar 12.12), balok yang terintegrasi dengan bidang miringnya (Gambar 12.13), balok miring dengan kemiringan sama dengan kemiringan pelat lipat (Gambar 12.14), atau dengan bidang (Gambar 12.15). Pengaku di dalam bentang struktur seperti dalam Gambar 12.15 cenderung diperlukan untuk struktur pelat lipat dengan bentang yang lebar. Penyelesaian pada Gambar 12.11 lebih sesuai untuk pelat lipat yang landai, sedangkan penyelesaian pada Gambar 12.12 lebih sesuai untuk pelat lipat yang curam.

1. Bentuk dan Pola Penataan Struktur Pelat Lipat

Pelat lipat berbentuk prismatic dapat ditata dengan berbagai pola, dan secara garis besar ada dua pola, yaitu pelat lipat tunggal dan pelat lipat

majemuk. Pelat lipat majemuk dapat ditata dengan beberapa varian bentuk: berjajar paralel, berjajar radial membentuk lingkaran, berjajar membentuk denah lengkung linier, dan pelat lipat majemuk dengan variasi bentuk lain (bisa dibayangkan seperti origami). Untuk pelat lipat prismatic majemuk, batas tepi bawah di bagian pertemuan dua buah bidang lipat tidak diperlukan pengaku karena masing-masing bidang bagian tersebut sudah saling mengakukan.

Contoh penerapan penataan struktur pelat lipat sebagai berikut.



3. Material Struktur Pelat Lipat

Struktur pelat lipat dapat dikonstruksikan dengan menggunakan material beton bertulang, *plywood*, rangka kayu, dan rangka baja. Struktur pelat lipat yang menggunakan material beton bertulang *in-situ* kondisi lipatannya bersifat monolit dan merupakan join kaku, sedangkan kalau menggunakan *plywood*, rangka kayu dan rangka baja join lipatannya dianggap sendi. Hal ini berpengaruh pada analisis dan desain strukturnya.



Gambar 12.19 Pelat Lipat Beton Bertulang Kantilever Paralel

Sumber: <https://www.michiganmodern.org/modern-buildings/american-concrete-institute-building/>



Gambar 12.20 Struktur Atap Pelat Lipat Beton Bertulang Radial

Sumber: <https://theconstructor.org/concrete/concrete-thin-shell-structure-types-forms/6003/>



Gambar 12.21 Struktur Atap Pelat Lipat Kayu (DLT*)

Sumber: <https://www.woodworks.org/award-gallery/southwest-library/>

*DLT = *Dowel Laminated Timber*



Gambar 12.22 Struktur Pelat Lipat Rangka Baja

Sumber: https://www.researchgate.net/figure/Air-Force-Academy-Chapel-Colorado-Springs-USA-architect-Walter-Netsch-year-1962-28_fig2_281395871

DUMMY

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 13

STRUKTUR SHELL

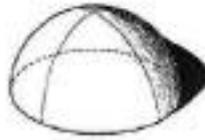
Struktur *shell* adalah struktur bidang tipis berbentuk lengkung dengan material kaku yang bekerja sebagai membran, di mana gaya-gaya tekan, gaya tarik dan gaya geser disalurkan di dalam bidang tipis tersebut. Struktur *shell* juga menerima gaya sekunder yang mengakibatkan deformasi lentur. Struktur *shell* pada umumnya dikonstruksikan dengan pasangan bata atau batu, beton bertulang, *ferro cement*, maupun plat baja.

Ada tiga tipe *shell*, sebagai berikut.

1. *Shell* lengkung 1 arah, yaitu *barrel vault*, *long barrel shell*, dan *short barrel shell*.
2. *Shell* lengkung 2 arah, yaitu sinklastik dan antiklastik.
3. *Shell* bentuk bebas (*free form*).



Shell lengkung 1 arah



Shell lengkung 2 arah sinklastik



Shell lengkung 2 arah antiklastik

Gambar 13.1 Tipe-tipe Shell

Sumber: https://faculty-legacy.arch.tamu.edu/anichols/index_files/courses/arch631/arch631old/notesGambar 13.pdf

A. Shell Lengkung Satu Arah

Shell lengkung 1 arah berbentuk lengkung pada satu arah sumbu dan berbentuk lurus pada arah sumbu yang lain. Bentuk geometris lengkung yang umum diterapkan dalam bangunan adalah: lingkaran, elips, dan parabola.

Ditinjau dari posisi tumpuannya, ada dua tipe *shell* lengkung 1 arah, yaitu:

1. *barrel vault*; dan
2. *barrel shell*.

1. *Barrel Vault*

Barrel vault adalah bidang lengkung satu arah yang terbentang seperti busur dan ditumpu di kedua sisi longitudinalnya/pada tepi yang lurus langsung pada fondasi lajur, atau balok, atau dinding. Bentuknya seperti busur yang ditata berimpitan satu sama lain membentuk sebuah bidang lengkung.

Barrel vault kinerjanya sama dengan busur, yang berbeda adalah stabilitas pada arah longitudinalnya di mana struktur *vault* sudah dalam keadaan stabil karena berbentuk bidang, sedangkan struktur busur berbentuk batang sehingga harus ada penyelesaian untuk stabilitasnya. Terhadap beban gravitasi merata pada *barrel vault* bekerja aksi busur berupa gaya aksial tekan dari puncak menuju ke tumpuan.

Struktur *barrel vault* banyak diterapkan pada jembatan dan bangunan gedung. Material yang umum digunakan adalah bata, batu, beton bertulang, dan pelat baja gelombang (*corrugated steel plate*). Pelat baja

(tipis) dibuat bergelombang untuk memperoleh kekakuan terhadap tekuk dan lentur.



Gambar 13.2 Barrel Vault Bata

Sumber: https://www.re-thinkingthefuture.com/designing-for-typologies/a3814-15-examples-of-vaulted-ceilings-in-modern-context/#google_vignette



Gambar 13.4 Produk Barrel Vault Pelat Baja Gelombang

Sumber: <https://www.steelroofsheets.co.uk/products/curved-3-corrugated-steel-sheets/>



Gambar 13.3 Barrel Vault Batu

Sumber: <https://www.bridgemeister.com/pic.php?pid=2784>



Gambar 13.5 Barrel Vault Beton Betulang

Sumber: <https://wieserconcrete.com/profile/weyers-road-wisdot-conspan-bridge/>



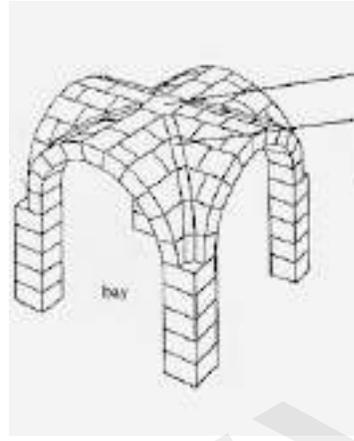
Gambar 13.6 Barrel Vault Pelat Baja Gelombang

Sumber: <https://www.contemporist.com/corrugated-metal-covers-the-barrel-shaped-roofs-of-this-portable-home/>



Gambar 13.7 Barrel Vault Beton Bertulang

Sumber: <https://www.adelto.co.uk/a-simple-art-studio-the-art-warehouse-made-from-a-barrel-vault-greece/>

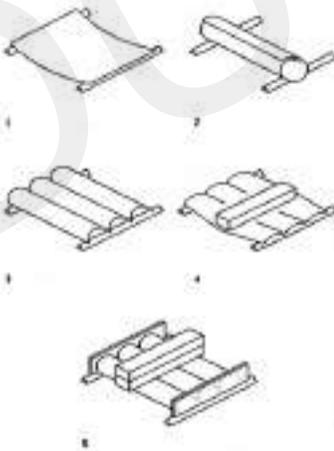


Gambar 13.8 Intersection Vault

Sumber: <https://traveltoeat.com/the-arch-in-architecture-and-history/>

2. Barrel Shell

Barrel shell adalah bidang lengkung yang terbentang seperti “balok” dan ditumpu di sisi transversalnya (sisi yang melengkung). Berbeda dengan struktur *vault*, perilaku *barrel shell* khususnya yang panjang mendekati perilaku balok.



Gambar 13.9 Barrel Shell

Mengapa *barrel shell* dapat terbentang seperti “balok”? Hal itu dapat dijelaskan dengan selembar kertas pada gambar di samping.

Bila lembar kertas dibentangkan (1) akan mengalami lenturan, namun apabila digulung membentuk tong/*barrel* (2) bisa terbentang dengan baik. Prinsip ini menjelaskan lembaran kertas yang dilengkungkan menjadi kaku, sama dengan prinsip lembaran kertas yang dilipat.

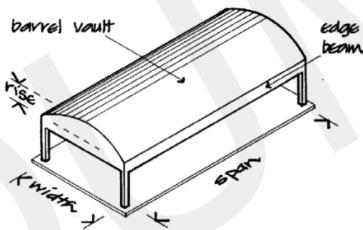
Gambar (3) menjelaskan kertas yang dilengkungkan membentuk tiga buah *barrel* yang berimpitan dan ditumpu di

sisi yang melengkung dapat terbentang. Namun, bila diberi beban (4) bentuk lengkung *barrel* akan berdeformasi melebar dan struktur kertas tersebut mengalami kegagalan. Gambar (5) menjelaskan bila bentuk lengkung dipertahankan dengan memasang bidang di kedua sisi yang tertumpu, maka struktur dapat berdiri dengan baik.

B. Struktur *Barrel Shell*

Ada dua tipe struktur *barrel shell* yang kinerjanya berbeda satu sama lain, yaitu: (1) struktur *barrel shell* panjang (*long barrel*); dan (2) struktur *barrel shell* pendek (*short barrel*).

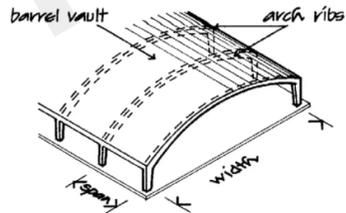
Gambar 13.10 memperlihatkan anatomi struktur lengkap sebuah *barrel shell* panjang, dan Gambar 13.11 memperlihatkan struktur lengkap sebuah *barrel shell* pendek. Dalam Gambar 13.10 dan Gambar 13.11 diperlihatkan bentang adalah jarak antardua kolom pada arah longitudinal, sedangkan lebar adalah jarak antardua kolom pada arah transversal. Kedua struktur tersebut telah dilengkapi dengan balok pengaku longitudinal dan pengaku transversal yang akan dibahas pada bahasan berikut.



Long Span Barrel Vault

Gambar 13.10 *Barrel Shell* Panjang

Sumber: <https://www.slideshare.net/slideshow/shell-structure/71300367#16>



Short Span Barrel Vault

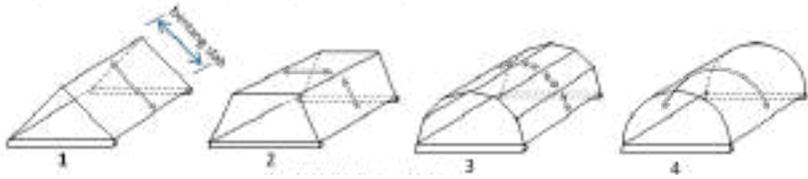
Gambar 13.11 *Barrel Shell* Pendek

Sumber: <https://www.slideshare.net/slideshow/shell-structure/71300367#16>

1. Struktur *Barrel Shell* Panjang

Barrel shell termasuk panjang apa bila rasio ketinggian (h) dibanding bentang (L) adalah kecil, tidak ada batas rasio yang pasti untuk menentukan *barrel shell* termasuk panjang, namun ada rentang rasio yang dapat diacu, yaitu antara $h/L = 1/10 - 1/15$ (Shueller, 1983).

Kinerja struktur *barrel shell* dapat dikaji dari struktur pelat lipat.



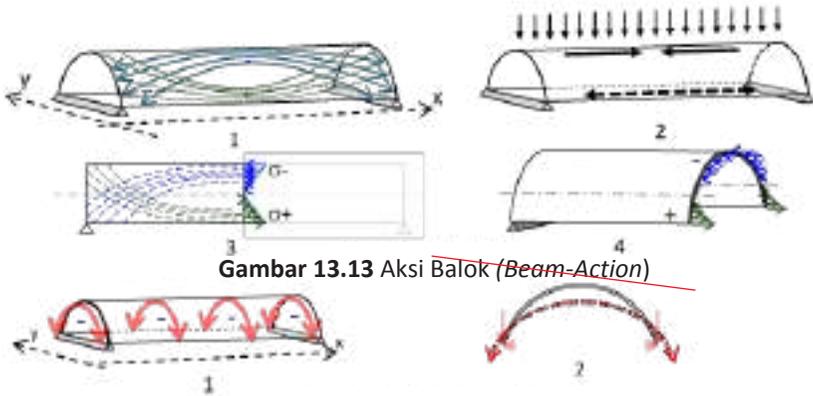
Gambar 13.12 Aksi Slab vs. Aksi Busur

Empat buah pelat lipat prismatik, masing-masing dengan bentuk penampang transversal segi tiga (Gambar 13.12.1), trapezium (Gambar 13.12.2), poligon segi enam (Gambar 13.12.3), dan *barrel shell* dengan bentuk penampang setengah lingkaran (Gambar 13.12.4). Bentang slab pada pelat lipat Gambar 13.12.1 paling lebar, kemudian lebih pendek adalah pelat lipat Gambar 13.12.2, dan paling pendek adalah pelat lipat Gambar 13.12.3. Maka, besarnya gaya pada aksi pelat semakin banyak lipatnya semakin kecil. Bila jumlah lipatnya tidak terhingga, lipatan hilang berubah menjadi lengkung sehingga slabnya hilang dan aksi pelat berubah menjadi aksi busur (*arch action*).

Pada struktur *barrel shell* panjang ada dua aksi penyaluran gaya, yaitu:

1. Pada arah longitudinal (sumbu x) bekerja aksi balok (*beam-action*); dan
2. Pada arah busur (*arch-action*).

Kinerja struktur *barrel shell* panjang pada arah longitudinal serupa dengan balok, di mana momen lentur eksternal menghasilkan tegangan tekan di sisi atas sumbu netral balok dan tegangan tarik di sisi bawah sumbu netral balok, sedangkan pada struktur *barrel shell* tegangan tekan tersebut bekerja pada kulit *barrel shell* di bagian atas sumbu netral, dan tegangan tarik bekerja pada kulit *barrel shell* di bagian bawah sumbu netral. Diagram tegangan lentur tekan-tariknya sama dengan balok, namun bekerja pada kulit *barrel shell* (Gambar 13.13.1 s.d. Gambar 13.13.4).



Gambar 13.13 Aksi Balok (~~Beam-Action~~)

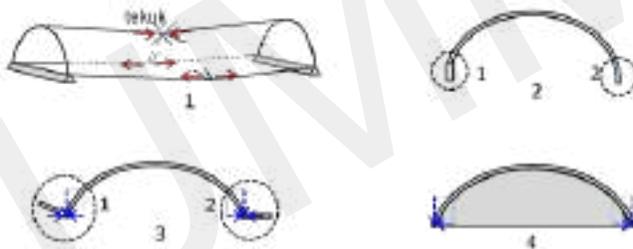
Gambar 13.14 Aksi Busur (Arch-Action)

Aksi busur pada struktur *long barrel* bekerja pada kulit *barrel shell* di semua penampang melintangnya berupa gaya aksial tekan menuju ke batas tepi bawah *barrel shell* (Gambar 13.14.1). Untuk busur dengan lengkung yang landai, misalnya penampang transversalnya berbentuk segmen lingkaran yang tipis, maka ketika gaya tekan dari aksi busur sampai ke batas tepi *barrel shell*, gaya tekan tersebut mendorong batas tepi dengan posisi miring sehingga mempunyai komponen gaya vertikal dan horizontal yang mendorong batas tepi vertikal ke bawah dan horizontal ke luar (Gambar 13.14.2). Kalau karena gaya tersebut batas tepi mengalami deformasi yang berarti, yaitu semakin melebar dan melandai pada arah transversalnya, maka bagian atas struktur *barrel shell* pada arah longitudinal akan mengalami tekuk karena tegangan aksial tekan dan struktur mengalami kegagalan struktural (Gambar 13.15.1). Selain problem kekakuan batas tepi, pembebanan nonfunikular pada lengkung busur (misalnya lengkung setengah lingkaran tidak berimpit dengan lintasan funikular berat sendirinya, atau bekerja gaya lateral) cenderung mengakibatkan deformasi lentur pada lengkung busur. Kecenderungan deformasi-deformasi tersebut harus diantisipasi dengan memberi pengaku pada bidang lengkung *barrel shell*, terutama di posisi tumpuan. Pengaku tersebut diperlukan di posisi bentang *barrel shell* apabila lebar bentangnya besar.

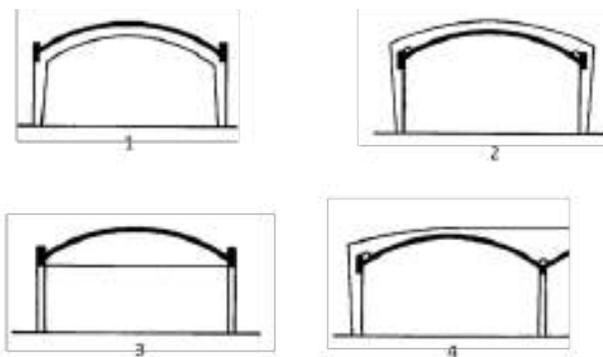
Untuk memperkuat batas tepi, antara lain dilakukan dengan menambahkan balok yang diletakkan “vertikal” (pada posisi sumbu kuat) (Gambar 13.15.2), dengan memodifikasi arah sudut bidang

tepi sehingga menjadi vertikal (Gambar 13.15.2), dengan balok yang dipasang miring (Gambar 13.15.3), dengan balok “horizontal” (pada posisi sumbu lemah) (Gambar 13.15.3), dengan bidang transversal (Gambar 13.15.4). Untuk lengkung berbentuk lingkaran, sudut kemiringan maksimum garis singgung dengan batas tepi adalah 45° untuk *barrel shell* tanpa balok pengaku tepi, dan 30° untuk *barrel shell* dengan balok tepi (Shueller, 1983). Bentuk geometri lengkung sehubungan dengan problem kekakuan batas tepi yang optimal untuk *barrel shell* adalah elips karena lengkungan di batas tepinya curam sehingga arah gaya dari aksi busur sudutnya juga curam.

Untuk memperkuat terhadap deformasi bidang lengkung antara lain dilakukan dengan memasang bidang transversal (Gambar 13.15.4), dengan portal lengkung (Gambar 13.16.1 dan Gambar 13.16.2), dengan bidang (Gambar 13.16.3). Penempatan portal lengkung maupun bidang dapat diletakkan di bawah kulit *barrel shell* (Gambar 13.16.1 dan Gambar 13.16.3) atau di atas kulit *barrel shell* (Gambar 13.16.2 dan Gambar 13.16.4).



Gambar 13.15 Kegagalan Struktur dan Penyelesaiannya

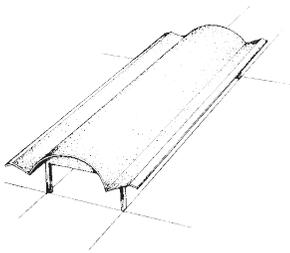


Gambar 13.16 Penyelesaian dalam Struktur

Sumber: <https://www.slideshare.net/slideshow/shell-structure/71300367>

Bentuk dan Pola Penataan Struktur *Barrel Shell*

Ada dua pola penataan *barrel shell*, yaitu *barrel shell* tunggal (Gambar 13.17) dan *barrel shell* majemuk. *Barrel shell* majemuk pada umumnya ditata berjajar paralel (Gambar 13.18 dan Gambar 13.19), atau bersilang (Gambar 13.20). Untuk *barrel shell* majemuk paralel, batas tepi yang merupakan pertemuan antar-*barrel shell* tidak perlu diberi pengaku karena sudah masing-masing *barrel shell* saling menahan, namun batas tepi untuk *barrel shell* yang berada di tepi perlu diberi pengaku (Gambar 13.17).



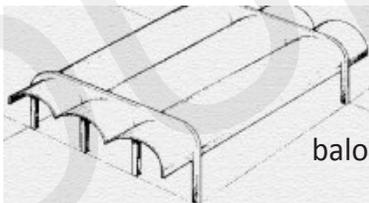
Gambar 13.17 *Barrel Shell* dengan Pengaku Bidang dan Bidang Miring

Sumber: https://www.ketchum.org/ShellTandF/combo_fpbv.html



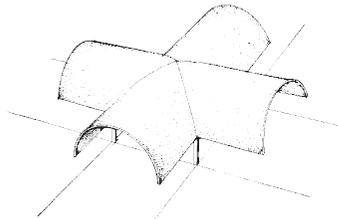
Gambar 13.18 Long *Barrel Shell* dengan Pengaku Balok “Vertikal”

Sumber: <https://projects.archiexpo.com/project-290197.html>



Gambar 13.19 *Barrel Shell* Majemuk Paralel

Sumber: <https://theconstructor.org/concrete/concrete-thin-shell-structure-types-forms/6003/>



Gambar 13.20 *Barrel Shell* Bersilang

Sumber: https://www.ketchum.org/ShellTandF/inter_xbar.html

2. Struktur *Barrel Shell* Pendek

Struktur *barrel shell* pendek mempunyai perilaku yang rumit dibanding dengan struktur *barrel shell* panjang. Tidak seperti *barrel shell* panjang, kinerjanya *barrel shell* pendek terhadap momen lentur tidak dapat disamakan

dengan kinerja balok sederhana, penyaluran beban pada *short barrel* lebih dominan arah transversal. Bentuk geometri lengkung *barrel shell* pendek yang palong optimal adalah parabola karena aksi *truss* dominan.



Gambar 13.21 *Barrel Shell* Pendek

Sumber: https://www.flickr.com/photos/army_arch/2407693430/in/photostream/

C. *Shell* Lengkung Dua Arah

Bentuk struktur bidang lengkung dua arah:

1. Sinklastik à kelengkungan kedua arah sama; dan
2. Antiklastik à kelengkungan arah yang satu berbalikan dengan kelengkungan arah yang lain, masing-masing lengkung 'positif' dan lengkung 'negatif'.

Di dalam struktur *shell* lengkung dua arah, dominan bekerja gaya-gaya aksial dan geser di dalam bidangnya. Momen dapat juga terjadi di dalam struktur *shell*, sebagai gaya sekunder.

Struktur *shell* lengkung dua arah termasuk struktur *form-active*, memiliki ketebalan yang sangat tipis dibandingkan dengan lebar bentangnya. Struktur *shell* sangat kuat menahan beban merata, tetapi tidak kuat terhadap beban terpusat yang signifikan.

Jenis struktur *shell* sinklastik:

1. *dome spherical* (bola);
2. *elliptical*; dan
3. *paraboloid*.

Jenis struktur *shell* antiklastik:

1. *hyperbolic paraboloid (hypar)*; dan
2. *hyperbolic*.



Gambar 13.22 *Shell* Sinklastik

Sumber: <https://constructionxperts.co.in/a-comprehensive-exploration-of-shell-structures-part-2/>



Gambar 13.23 *Shell* Antiklastik

Sumber: <https://www.flickr.com/photos/feargal/3765929956/in/photostream/>

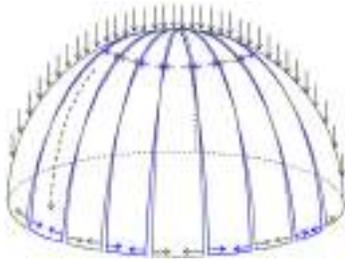
D. Dome Shell (Spherical)

Struktur *shell dome* termasuk struktur *form-active*, di mana pada kulit *shell* dominan bekerja gaya aksial tekan. *Shell dome* sangat efektif dan efisien menahan berat sendiri atau beban hidup merata yang bekerja di permukaan kulit *shell*, tetapi tidak tahan terhadap beban terpusat yang signifikan. Struktur *shell dome* sering dianalogikan seperti telur ayam. Telur dapat menahan berat induk ayam pada saat dierami, tetapi pecah ketika dipatuk anak ayam dari dalam pada saat menetas. Hal itu disebabkan karena badan induk ayam membebani telur secara merata, sedangkan paruh anak ayam membebani kulit telur secara terpusat.

Hasil uji coba tekan dengan beban merata di sisi atas sebuah telur menunjukkan telur tersebut baru pecah setelah menerima beban 51,49 lbs.



1. Struktur *Dome* $\frac{1}{2}$ Lingkaran



Gambar 13.24 Analogi $\frac{1}{2}$ Bola Dibelah-belah

Shell dome dapat dibayangkan seperti $\frac{1}{2}$ bola yang dibelah-belah seperti gambar. Ketika diberi beban gravitasi, maka belahan-belahan bagian atas cenderung saling mendesak (menekan) satu sama lain, sedangkan belahan-belahan bagian bawah cenderung saling terbuka (menarik) satu sama lain. Gaya-gaya tekan dan gaya-gaya tarik tersebut bekerja melingkar di

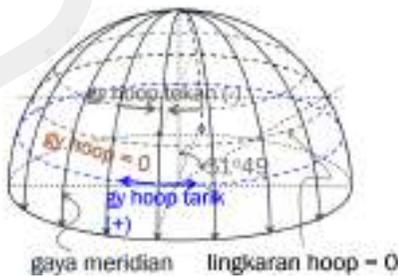
seluruh kulit bola, dan di posisi lingkaran tertentu, tidak terjadi gaya tekan atau tarik.

2. Gaya Dalam *Dome* $\frac{1}{2}$ Lingkaran

Ada dua macam gaya internal yang bekerja di dalam kulit *shell dome*:

- gaya meridian (seperti busur);
- gaya *hoop* (melingkar);
 - hoop* tekan (-);
 - hoop* tarik (+); dan
- di posisi lingkaran pada sudut $51^{\circ}49'$ terhadap sumbu vertikal, gaya *hoop* = 0.

3. Perilaku Gaya Dalam



Gambar 13.25 Perilaku Gaya dalam *Shell Dome*

a. Gaya meridian bekerja di kulit *shell* dari atas turun menuju ke tanah, seperti busur-busur yang berimpitan dan selalu bekerja tekan.

b. Gaya *hoop* bekerja melingkar di kulit *shell*. Bila ditarik jari-jari dari pusat bola dengan sudut $51^{\circ}49'$ terhadap sumbu vertikal, kemudian diputar membentuk

lingkaran, maka di lingkaran tersebut, gaya *hoop* = nol. Di atas lingkaran tersebut terjadi gaya *hoop* tekan, sedangkan di bawah lingkaran tersebut bekerja gaya *hoop* tarik.

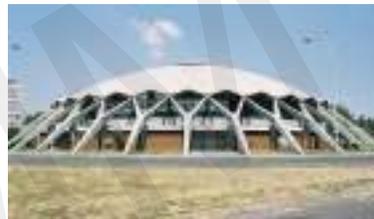
- c. Gaya-gaya meridian pada *shell* bola $\frac{1}{2}$ lingkaran dapat dibandingkan dengan gaya busur $\frac{1}{2}$ lingkaran yang diletakkan saling berimpit dan saling terikat satu sama lain. Busur $\frac{1}{2}$ lingkaran termasuk struktur *semi form-active* yang mengalami deformasi lentur sehingga terjadi momen, namun perilaku tersebut tidak terjadi pada *shell* $\frac{1}{2}$ bola, karena ketika kulit *shell* di atas dan di bawah *hoop* nol akan berdeformasi, gaya-gaya *hoop* pada kulit *shell* tersebut saling menahan satu sama lain.

Contoh Penggunaan Struktur *Shell Dome*:



Gambar 13.26 *Shell* Pasangan Batu Marmer

Sumber: <https://stock.adobe.com/images/close-up-taj-mahal-dome-agra-india/180564128>



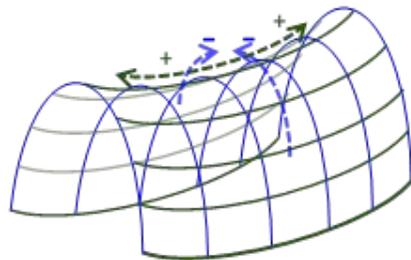
Gambar 13.27 *Shell* Beton Bertulang

Sumber: <https://structurae.net/en/structures/palazetto-dello-sport>

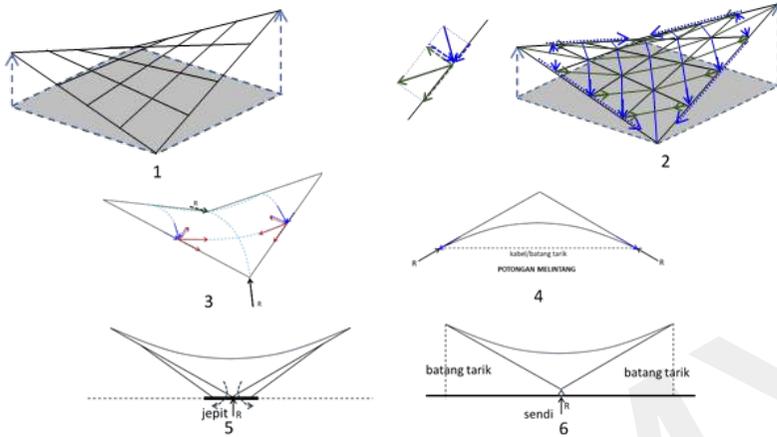
E. *Shell* Paraboloida Hiperbolik (*Hypar*)

Shell hyperbolic paraboloid (hypar) termasuk *shell* antiklastik, pada arah melintang bentuk lengkungnya parabola negatif, pada arah lainnya bentuk lengkungnya parabola positif.

1. Pada arah lengkung negatif bekerja gaya tekan (-).
2. Pada arah lengkung positif bekerja gaya tarik (+).



Bentuk dan Perilaku Gaya



Gambar 13.28 Bentuk dan Perilaku *Shell Hypar*

Bila dilihat dari denah, arah garis lengkung busur dan lengkung kabel bertemu dengan garis tepi membentuk sudut tertentu, dan apabila denah tersebut berbentuk bujur sangkar, sudutnya masing-masing adalah 45° . Gaya tekan dan gaya tarik pada titik temu garis lengkung busur/lengkung kabel dengan garis tepi mempunyai komponen gaya tegak lurus garis tepi dan komponen gaya mengikuti arah garis tepi. Komponen gaya tekan dan komponen gaya tarik tegak lurus garis tepi saling meniadakan karena arahnya berlawanan, sedangkan komponen gaya tekan dan gaya tarik pada garis tepi saling menambahkan karena arahnya sama-sama ke bawah menuju fondasi. Maka, pada garis tepi bekerja gaya tekan, di mana gaya tekan di puncak garis tepi adalah nol, sedangkan gaya tekan di tumpuan adalah maksimal. Untuk menahan gaya tekan tersebut, pada garis tepi *shell hypar* harus diberi balok, dan berdasarkan besarnya gaya tekan yang bekerja, dimensi balok tersebut membesar ke bawah. Gaya tekan pada balok tepi bekerja membentuk sudut terhadap tumpuan, komponen horizontal gaya tekan balok tepi pada tumpuan mendorong tumpuan ke luar, maka reaksi tumpuannya mengarah ke arah dalam. Komponen horizontal gaya reaksi tumpuan tersebut dapat digantikan dengan memberi batang tarik yang menghubungkan kedua tumpuan, sehingga gaya dorong horizontal pada masing-masing tumpuan saling meniadakan.

Komponen-komponen gaya tekan dan tarik mengakibatkan pada kulit *shell hypar* bekerja gaya geser. Gaya geser tersebut ditahan oleh batang diagonal, sedangkan untuk kulit *shell hypar* masif pelat beton bertulang atau lapisan papan-papan kayu, gaya geser tersebut ditahan oleh kulitnya. Gaya geser tersebut juga bekerja pada pertemuan antara kulit *shell* dengan balok tepi, hal ini dapat dilihat lebih jelas pada pertemuan balok tepi dengan kulit *shell hypar* kayu pada Gambar 13.29.

Untuk tipe *shell hypar* berbentuk persegi dengan tumpuan di dua buah titik, strukturnya tidak stabil pada arah memanjangnya. Cara menstabilkan struktur adalah dengan: (1) memberi batang tarik di dua puncak *hypar* ditarik ke fondasi; atau (2) dengan tumpuan jepit. Penggunaan tumpuan jepit menyebabkan dimensi balok tepi menjadi besar. Untuk *hypar* kayu dengan dinding kaca keliling, pada umumnya kusen kaca difungsikan sebagai elemen penstabil.

Contoh Penggunaan *Shell Hypar* Beton Bertulang:



Sumber: <https://www.atlasobscura.com/places/1960s-hyperbolic-paraboloid-gas-station-canopy>



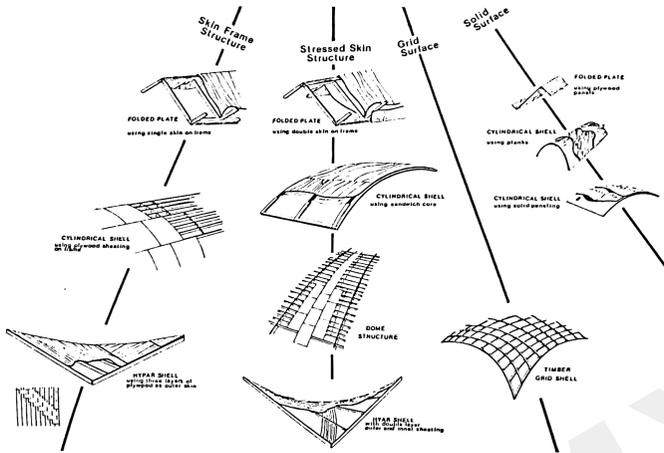
Sumber: <https://www.graphics.cornell.edu/sites/default/files/inline-files/TheHyparTurns50FINAL.pdf>



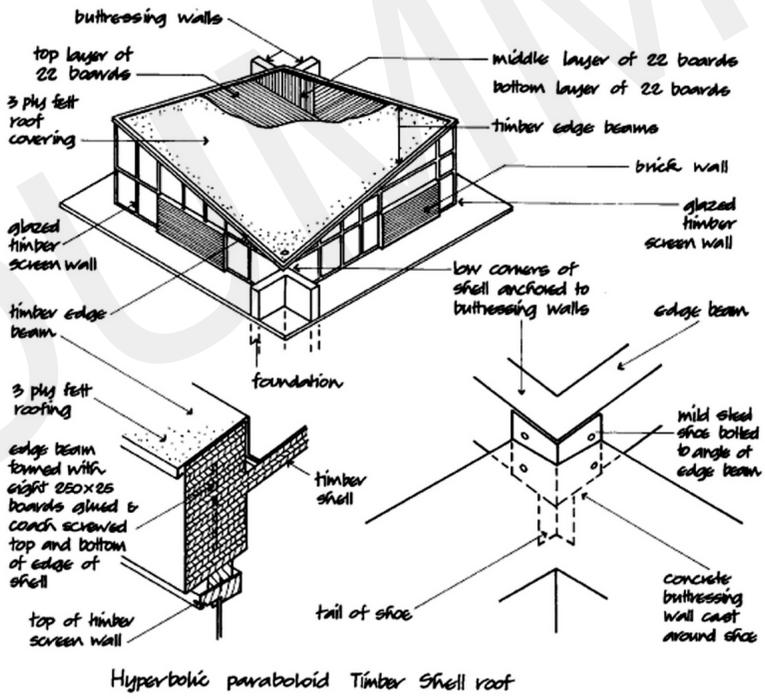
Sumber: <https://archello.com/project/the-zarzuela-hippodrome-rehabilitation>



Sumber: <https://architectuul.com/architecture/cathedral-of-saint-mary-of-the-assumption>



Gambar 13.29 Konstruksi Shell Hypar Kayu



Gambar 13.30 Contoh Konstruksi Hypar Kayu Solid

Contoh Penggunaan *Shell Hypar* Kayu:



Sumber: <http://nyslandmarks.com/mowry/mowry3.htm>



Sumber: <https://parametric-architecture.com/church-of-saint-alloysius-hyperbolic-paraboloid-roof-symbolizes-four-devotions/>

F. *Grid Shell*

Grid shell adalah struktur bidang lengkung yang terbentuk dari rangkaian batang-batang yang kinerjanya mirip dengan *shell*. Material yang umum digunakan adalah baja, kayu, dan bambu.

Contoh Penggunaan *Gridshell* Kayu:



Sumber: <https://www.architecturalrecord.com/articles/14393-a-closer-look-at-the-gridshell-roof-of-swatch-headquarters-by-shigeru-ban>



Sumber: <https://www.dezeen.com/2019/10/18/swatch-headquarters-shigeru-ban-switzerland/>



Sumber: <https://i0.wp.com/nen.press/wp-content/uploads/2023/07/Bamboo-timber-grid-shell-2.jpg?ssl=1a>



Sumber: <https://materialdistrict.com/wp-content/uploads/2020/09/a-timber-and-polycarbonate-deployable-grid-shell-materialdistrict-15.jpg>



Sumber: <https://adamcoupe.com/project/savill-building-architecture-photographer/>

Gambar 13.31 *Grid Shell* Kayu

Contoh Penggunaan *Grid Shell* Baja:



Gambar 13.32 *Grid Shell* Baja

DUMMY

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 14

MATERIAL DALAM KONSTRUKSI BANGUNAN

Telah dibahas dalam pembahasan pada bab sebelumnya bahwa bentuk, struktur, dan material merupakan tiga hal yang saling terkait dalam membentuk struktur bangunan. Bab ini akan membahas material kayu, baja, beton, dan bata/batu yang merupakan material yang sangat umum digunakan untuk pekerjaan bangunan gedung.

A. Kayu

Kayu merupakan salah satu material yang populer dan banyak digunakan untuk berbagai produk, seperti perlengkapan rumah tangga, perabot, material konstruksi bangunan yang bersifat nonstruktural dan struktural, dan sebagainya. Dalam buku ini hanya dibahas kayu sebagai material konstruksi bangunan yang bersifat struktural.

Sebagai material alami, kayu berbeda dengan baja dan beton, baik dari segi sifat fisiknya, sifat mekaniknya, proses penanganannya, sampai menjadi komponen konstruksi bangunan dan proses pemeliharannya. Kayu dihasilkan dari penebangan pohon untuk dipotong-potong menjadi balok atau papan, maka semua sifat alami yang ada pada pohon asal juga terkandung pada kayu potongan tersebut, termasuk cacat-cacat kayu.

Beberapa sifat alami yang merupakan kelemahan kayu:

1. Kurang seragam atau kurang homogen;
2. Terdapat cacat bawaan dan cacat alam, seperti mata kayu dan pecah-pecah;
3. Mudah terbakar;
4. Mudah terserang hama rayap dan jamur;
5. Mudah terpengaruh oleh iklim; serta
6. Kelembapan yang tinggi dapat menyebabkan kerusakan pada kayu.

Sifat mekanis kayu: kayu merupakan material *bi-directional*, yaitu mampu menahan gaya tarik dan gaya tekan. Namun, kekuatan kayu tergantung dari arah seratnya, di mana kekuatan kayu sejajar arah serat lebih besar daripada kekuatan kayu tegak lurus arah serat.

Faktor-faktor yang memengaruhi kekuatan kayu adalah sebagai berikut.

1. Kepadatan
 - Kayu yang semakin padat, semakin kuat.
 - Inti kayu kepadatannya paling rendah.
2. Kandungan Air
 - Semakin banyak kandungan air, kekuatan kayu semakin kecil.
3. Kemiringan Serat
 - Serat yang baik adalah yang lurus.
 - Kemiringan serat dapat mengurangi kekuatan tarik // serat kayu, tekan // serat kayu, dan lentur sekitar 45% sampai 80% dibandingkan kayu dengan serat lurus.
4. Mata Kayu
 - Mata kayu merupakan cacat kayu, yang mengurangi kekuatan kayu.

Di samping kelemahan-kelemahan di atas, kayu mempunyai kelebihan pada sifat mekanisnya, yaitu rasio antara kekuatan dibanding dengan beratnya besar, artinya kayu mempunyai berat yang ringan namun kekuatannya besar. Sebagai contoh: berat jenis kayu kelas 2 yang terbesar = $0,9 \text{ kgf/m}^3$, tegangan izin tekan = 85 kgf/cm^2 , dibandingkan

dengan beton berat jenisnya $0,0024 \text{ kgf/cm}^3$, tegangan izin tekan untuk beton mutu K225 = 75 kgf/cm^2 .

Pembagian mutu kayu menurut P.K.K.I. N.I.5. sebagai berikut.

1. Mutu kayu dibagi dua jenis:
 - a. kayu mutu A; dan
 - b. kayu mutu B.
2. Kriteria yang menentukan mutu tersebut:
 - a. kadar lengas; dan
 - b. besarnya mata/cacat kayu.

Mutu A	Mutu B
a. Kadar lengas : kering udara (12–18%, rata-rata 15%)	a. Kadar lengas : $\leq 30\%$
b. Mata kayu : $d_1 \leq 1/6b$; $d_2 \leq 1/6.h$ $d_1 \leq 3,5 \text{ cm}$; $d_2 \leq 3,5 \text{ cm}$	b. Mata Kayu : $d_1 \leq 1/4.b$; $d_2 \leq 1/4.b$ $d_1 \leq 5 \text{ cm}$; $d_2 \leq 5 \text{ cm}$
c. Wanvlak : $e_1 \leq 1/10.b$; $e_2 \leq 1/10.h$	c. Wanvlak : $e_1 \leq 1/10.b$; $e_2 \leq 1/10.h$
d. Miring arah serat : $\text{tg}\alpha \leq 1/10$	d. Miring arah serat : $\text{tg}\alpha \leq 1/7$
e. Retak-retak : $h_r \leq 1/4.b$; $h_t \leq 1/5.b$	e. Retak-retak : $h_r \leq 1/3.b$; $h_t \leq 1/4.b$

B. Teknologi Kayu dalam Konstruksi Bangunan

Ada dua macam teknologi pengolahan kayu untuk dijadikan komponen struktur bangunan:

1. kayu gergajian; dan
2. *laminated wood/gluelam*.

Kayu gergajian adalah bahan untuk konstruksi bangunan yang dihasilkan dari pemotongan batang pohon, kemudian dilakukan pengeringan dan penggergajian membentuk balok atau papan.

Laminated wood (gluelam) adalah bahan untuk konstruksi bangunan yang terbentuk dari susunan papan-papan kayu yang disatukan dengan lem dan dipres, membentuk balok/komponen struktur lain. *Laminated wood* merupakan produk yang diproses di pabrik.

1. Kayu Gergajian

Setelah pemotongan pohon, kayu dalam bentuk gelondongan dikirim ke tempat pemotongan/penggergajian. Kayu dipotong di pabrik dalam bentuk papan dan balok dengan variasi dimensi tertentu. Panjang potongan tersebut yang umum dipasaran adalah 3 meter atau 4 meter.

Agar dapat digunakan sebagai material konstruksi bangunan, kadar air dalam kayu yang telah dipotong harus dikurangi melalui proses pengeringan yang benar untuk menghindarkan terjadi penyusutan kayu yang tidak merata sehingga kayu jadi terpuntir atau bengkok. Ada dua metode pengeringan:

- a. pengeringan alami; dan
- b. pengeringan dengan tungku/tanur (*kiln*).

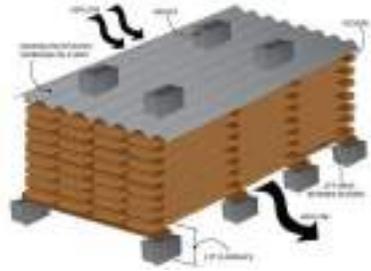
Pengeringan alami dilakukan dengan menumpuk balok-balok atau papan-papan di bawah lindungan atap, agar tidak terkena panas matahari secara langsung. Dalam penumpukan harus dijaga agar angin bisa melewati semua sisi tiap batang balok atau tiap lembar papan untuk menjamin pengeringannya merata. Untuk itu, di antara tiap batang balok atau tiap lembar papan tersebut diberi ganjal (dari kayu yang sejenis) sehingga tidak saling menempel satu sama lain. Proses pengeringan alami membutuhkan waktu yang lama, dalam rentang waktu bulanan atau bahkan tahunan.

Pengeringan dengan tungku dilakukan dengan memasukkan tumpukan kayu ke dalam tungku. Pada dasarnya, tungku pengering tersebut adalah ruang terisolasi di mana suhu, kelembapan, dan sirkulasi udara di dalamnya dapat diatur serta dijaga sesuai kebutuhan.



Gambar 14.1 Penumpukan Kayu pada Saat Proses Pengeringan secara Alami

Sumber: https://berita.99.co/proses-pengeringan-kayu/#google_vignette



Gambar 14.2 Proses Pengeringan Kayu secara Alami

Sumber: <https://www.builder.id/pengeringan-udara-pada-kayu/>



Sumber: <https://www.builder.id/metode-pengeringan-kayu/>



Sumber: https://www.lesprom.com/de/news/M%25C3%25BChb%25C3%25B6ck_supplied_two_drying_kilns_to_Eschelm%25C3%25BChl_Holz_in_Austria_92353/

Gambar 14.3 Proses Pengeringan Kayu dengan Tungku

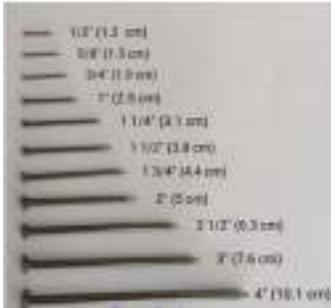
a. Alat Penghubung pada Konstruksi Kayu

Balok dan papan kayu yang ada di pasaran panjangnya terbatas 3 m atau 4 m. Dalam penggunaannya butuh untuk disambung karena dibutuhkan panjang yang lebih besar dari yang ada, atau perlu dirangkai membentuk rangka batang dan sebagainya. Untuk hal itu diperlukan bentuk konstruksi sambungan tertentu dan alat penghubung tertentu.

Alat penghubung yang umum digunakan pada konstruksi kayu:

- 1) paku;
- 2) baut-mur;
- 3) pelat buhul (*gusset plate*);

- 4) lem; dan
- 5) alat penghubung lain: cincin belahan (*split ring connector*), kokot buldog (*bulldog connector*), paku pelat, dan lain-lain.



Gambar 14.4 Paku



Gambar 14.5 Baut-Mur



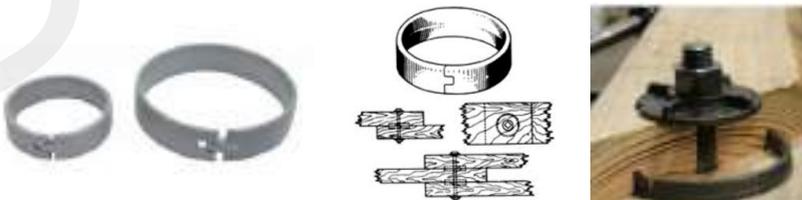
Gambar 14.6 Pelat Penghubung

Sumber: <https://hookeparkbigshed.wordpress.com/2011/10/page/2/#jp-carousel-299>



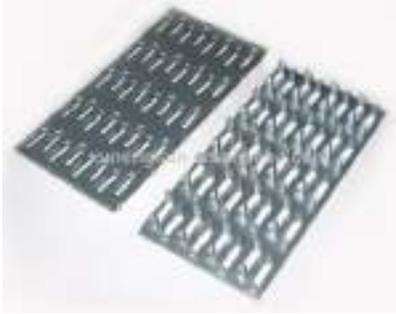
Gambar 14.7 Pelat Penghubung pada Konstruksi Kuda-kuda

Sumber: <https://i.ytimg.com/vi/bSyWtc3mcac/maxresdefault.jpg>



Gambar 14.10 Ring Belahan

Sumber: <https://tecoproducts.co.uk/products/timber-connectors/timber-connectors-split-ring/>; <https://encyclopedia2.thefreedictionary.com/split-ring+connector>; https://www.youtube.com/watch?v=lxlb_p2V-LQ



Gambar 14.8 Paku Pelat

Sumber: <https://i.pinimg.com/originals/dc/37/39/dc373957d5c8e07af12ef2c07e1322c3.jpg>



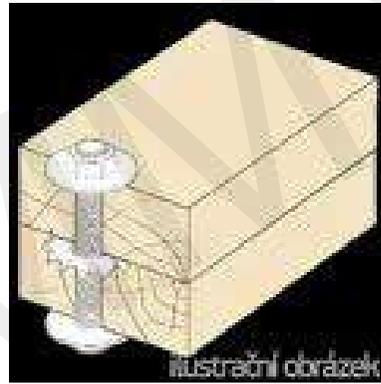
Gambar 14.9 Pelat Paku pada Kuda-kuda

Sumber: <https://i.pinimg.com/originals/3a/60/1c/3a601c2270f3086582c2f4ad9a8567b1.jpg>



Gambar 14.11 Pelat Kokot Buldag

Sumber: <https://www.haspl.eu/en/press-in-timber-connector-double-sided-50-17x1-0.html>



b. Konstruksi Sambungan Kayu dan Alat Penghubung

Kayu gergajian tersedia dalam bentuk balok dan papan dengan dimensi terbatas sesuai dengan standar yang ada di pasaran. Dimensi penampang transversal yang ada di pasaran beragam, mulai dari 2/3 sampai dengan 8/25 dengan dimensi panjang 3m dan 4m. Dimensi transversal tergantung dari kebutuhan kekuatan dan kekakuan struktur, sedangkan dimensi panjang terbatas pada standar pasar sehingga apabila dibutuhkan panjang yang lebih besar harus disambung.

Ditinjau dari arah batang yang disambung ada tiga jenis sambungan/hubungan kayu:

- 1) sambungan memanjang;
- 2) sambungan menyudut; dan
- 3) sambungan melebar.

Sambungan memanjang diterapkan untuk memperpanjang balok atau papan, sambungan menyudut diterapkan pada pertemuan balok yang membentuk sudut satu sama lain (sudut $>0^\circ$ s.d. 90°), sedangkan sambungan melebar diterapkan pada papan-papan yang disambung ke samping untuk membentuk bidang, misalnya untuk lantai atau dinding.

Pada sambungan memanjang dan menyudut terjadi pertemuan gaya-gaya: tekan, tarik, momen, dan geser (bisa salah satu gaya atau sebagian gaya-gaya) sehingga dibutuhkan penyelesaian konstruksi yang dapat menahan semua gaya tersebut. Namun, detail konstruksi sambungan/hubungan tidak dibahas dengan detail dalam buku ini, untuk mendalami dapat dipelajari dari buku lain yang sudah banyak beredar.

Ditinjau dari gaya yang bekerja sebagai berikut.

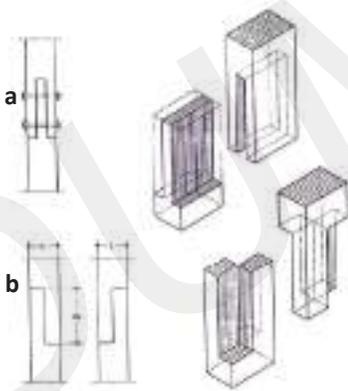
- 1) Sambungan tekan: luas bidang kontak antara balok yang disambung/dihubungkan menentukan kemampuan sambungan tersebut menahan gaya tekan. Konstruksi sambungan harus dapat mengamankan agar kedua balok yang saling menekan tidak bergeser ke samping dan terlepas.
- 2) Sambungan tarik: untuk menahan gaya tarik dibuat bentuk sambungan berkait dan dilengkapi dengan baut-mur, atau pelat dan baut-mur untuk menjaga agar balok tidak bergeser ke samping serta terlepas. Pada sambungan ini luas bidang kontak antarkait menentukan kemampuan sambungan menahan gaya tarik. Selain itu, baut bisa dimanfaatkan untuk ikut menahan gaya tarik bekerja sama dengan kait apabila gaya tarik yang bekerja besar. Catatan: untuk menahan gaya tarik tersebut, pada bidang kontak kait dan antara baut dengan permukaan lubang kayu bekerja gaya tekan.

- 3) Sambungan geser: dengan sambungan berkait dilengkapi dengan baut, atau dengan paku/baut.
- 4) Sambungan momen lentur: sambungan dengan balok pengunci dan baut.
- 5) Sambungan puntir: sambungan harus bisa menahan gaya jungkit agar kayu tidak terlepas, bisa dengan baut atau dengan sabuk pelat baja.
- 6) Sambungan dengan alat penghubung lain, seperti: *ring* belah, kokot buldog, paku pelat, dan lain-lain.

Pada dasarnya ada dua teknik konstruksi sambungan:

- 1) Dengan alat penghubung; dan
- 2) Tanpa alat penghubung.

Sambungan tekan pada dasarnya hanya mempertemukan dua permukaan batang kayu yang saling menekan dan memberi pengaman agar masing-masing batang tidak bergeser dan terlepas.

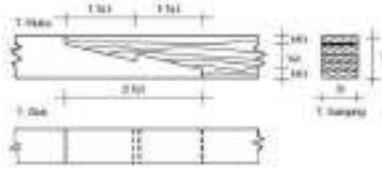


Gambar 14.12 Sambungan Tekan Memanjang

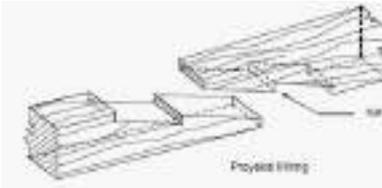
Gambar a dan b adalah sambungan tekan memanjang untuk kolom. Gaya tekan yang bekerja ditahan oleh permukaan bidang temu kolom atas dengan kolom bawah.

Sambungan a menggunakan dua buah baut untuk menjaga agar kolom atas tidak bergeser atau berputar keluar dari sisi yang terbuka.

Sambungan b tidak menggunakan baut karena semua sisi tertutup sehingga kolom atas tidak bisa bergeser atau berputar keluar.

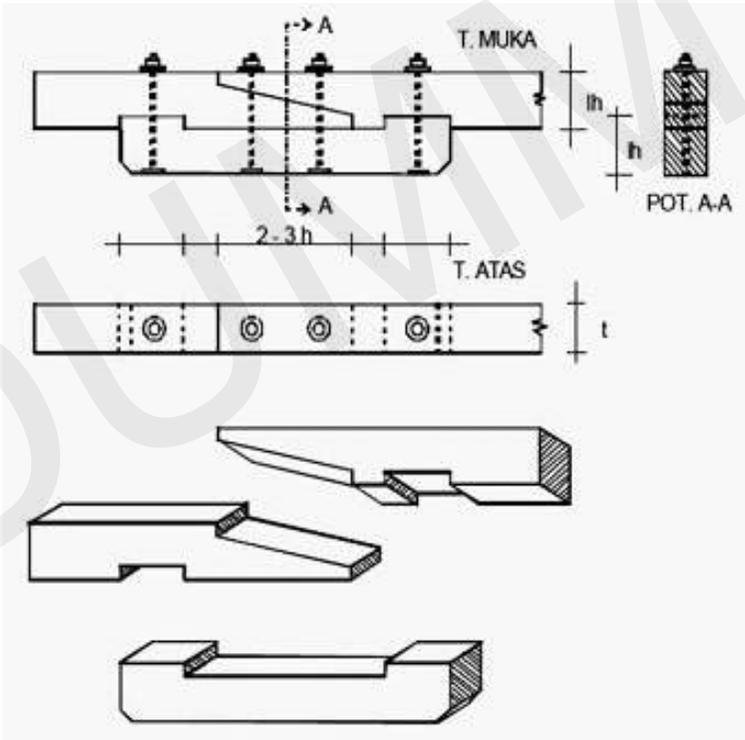


Gaya tarik pada sambungan ditahan oleh permukaan kait (dalam gambar dilingkari), dan oleh bidang temu dua buah baut pada sisi longitudinalnya dengan kayu.

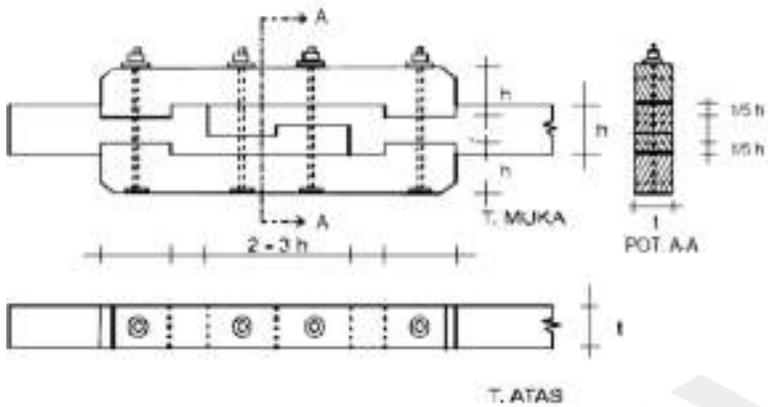


Gambar 14.13 Sambungan Tarik Memanjang

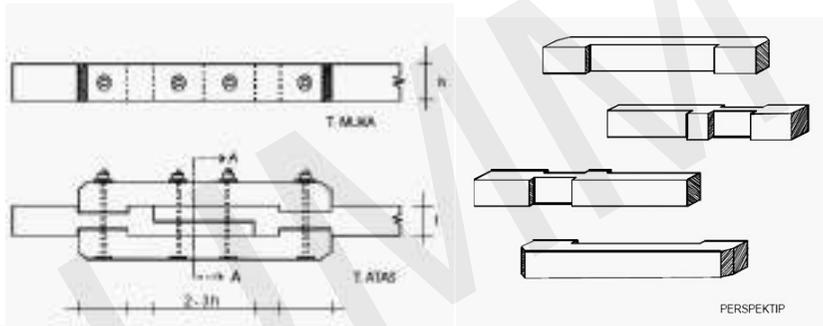
Bidang temu permukaan potongan kayu miring yang menghadap ke atas dan ke bawah juga berperan pada perlawanan tarik tergantung dari besarnya gaya tekan yang dihasilkan dari pengetatan baut dan koefisien gesek kayu.



Gambar 14.14 Sambungan Momen Pengunci Bawah



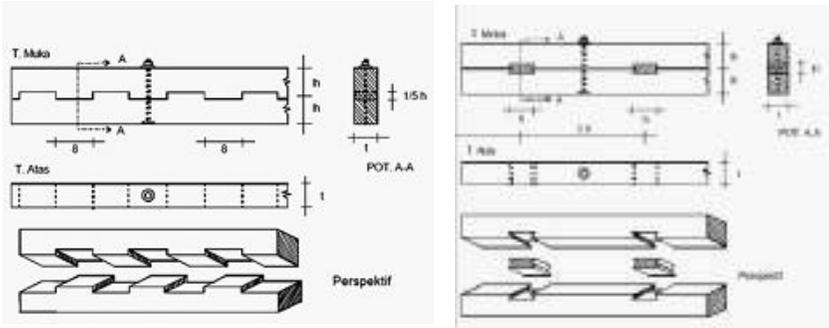
Gambar 14.15 Sambungan Momen Pengunci Atas-Bawah



Gambar 14.16 Sambungan Momen Pengunci Samping

Sambungan momen dengan kelos pengunci bawah lebih sesuai digunakan untuk menyambung balok yang menerima momen positif, karena gaya tarik yang terjadi berada di sisi bawah balok ditahan oleh kelos pengunci.

Sambungan momen dengan kelos pengunci atas-bawah dan kelos pengunci samping sesuai untuk menyambung balok yang menerima momen positif maupun momen negatif.

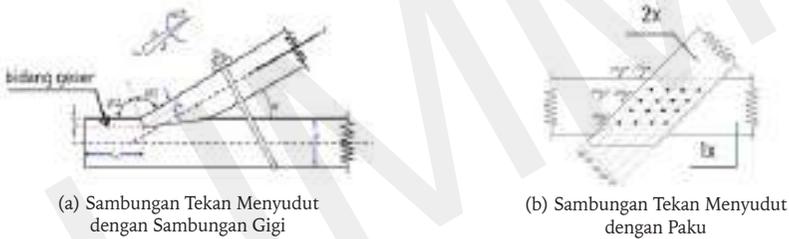


Balok Bersusun dengan Gigi

Balok Bersusun dengan Kelos

Gambar 14.17 Sambungan Balok Bersusun (Geser dan Momen Memanjang)

Sambungan ini untuk mendapatkan balok dengan dimensi yang lebih besar, dengan menumpuk dua buah balok. Gigi dan kelos berfungsi untuk menahan gaya geser memanjang.



(a) Sambungan Tekan Menyudut dengan Sambungan Gigi

(b) Sambungan Tekan Menyudut dengan Paku

Gambar 14.18 Sambungan Tekan Menyudut

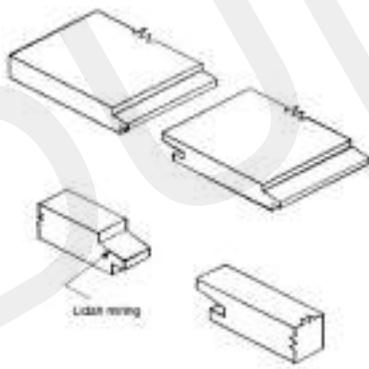
Sumber: <https://www.slideshare.net/LiskaMutiaraSeptiana/kayu-51298009>

Sambungan dapat dikonstruksikan dengan beberapa kemungkinan, contoh sambungan tekan menyudut dapat dikonstruksikan dengan membentuk gigi pada batang kayu yang dihubungkan (a), dapat juga dengan mengapit batang horizontal dengan dua buah batang dan dihubungkan dengan paku (b). Untuk sambungan tipe b paku dapat diganti dengan baut atau dengan ring belahan dan lain-lain.

Pada sambungan tipe a, gaya tekan ditahan oleh bidang temu kayu miring dengan kayu horizontal pada permukaan gigi tegak. Ada persyaratan kedalaman gigi (t_m) = $1/4 h$ sampai dengan $1/6 h$ dan

panjang bidang geser penahan gigi (l_m) ≥ 15 cm. Kedalaman gigi t_m dibatasi agar tidak mengurangi luas penampang batang terlalu banyak, sedangkan panjang bidang geser l_m ditetapkan minimalnya untuk menjaga agar bagian batang kayu horizontal yang menahan gaya tekan tidak mengalami kegagalan geser. Pada sambungan tipe b, gaya tekan ditahan oleh alat penghubungnya (paku/baut/ring belahan atau yang lain). Sambungan tipe ini pengerjaannya lebih praktis.

Sambungan melebar dipakai untuk menghubungkan papan arah melebar untuk membentuk bidang, umumnya untuk lantai, plafon, dan dinding nonstruktural (Gambar 14.19a, Gambar 14.19b, dan Gambar 14.20). Namun, ada sambungan melebar yang menghubungkan balok-balok kayu arah melebar untuk membentuk bidang, tipe ini digunakan untuk mendirikan *log house* di negara barat. Bidang yang terbentuk berfungsi sebagai dinding pemikul beban. Gambar *mock-up* dinding *log house* yang ditampilkan menggunakan bukan kayu gergajian, namun menggunakan *gluelam* (Gambar 14.21 dan Gambar 14.22), gambar tersebut ditampilkan dengan maksud untuk menjelaskan detail sambungannya dan penggunaannya. Bangunan *log-house* konvensional menggunakan kayu gergajian berbentuk glondongan dan disusun dengan metode yang sama.



Gambar 14.19a
Sambungan Lidah



Gambar 14.19b Sambungan Lidah
untuk Lantai

Sumber: <https://www.garrards-timber.co.uk/product/solid-tg-hardwood-unfinished-floorboard-machined-to-order/>



Gambar 14.20 Sambungan Lidah untuk Dinding Nonstruktural

Sumber: <https://eticon.co.id/rumah-kayu/>



Gambar 14.21 Mock-up Dinding Log House

Sumber: <https://www.logspan.com/walls>

Gambar 14.22 Contoh Log House

Sumber: <https://depositphotos.com/photos/wooden-house.html>

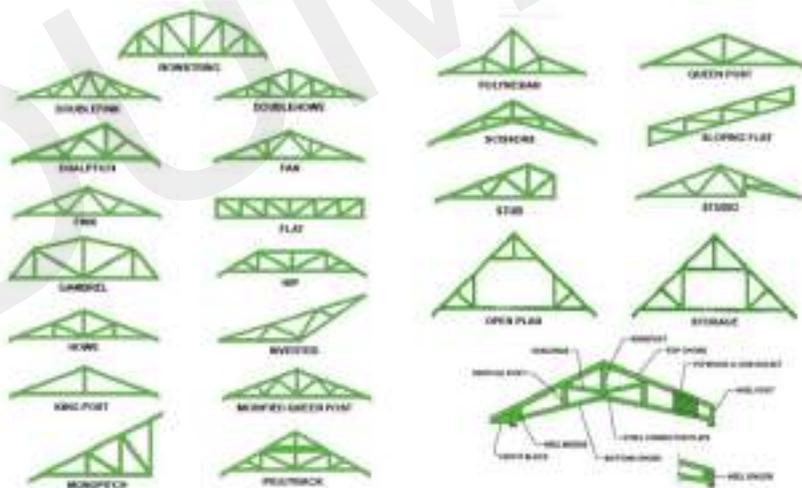
Masih banyak tipe sambungan-sambungan lain yang tidak dibahas dalam buku ini dan dapat dipelajari dari buku-buku yang khusus membahas konstruksi bangunan kayu yang banyak beredar.

c. Kayu Gergajian sebagai Pembentuk Struktur Bangunan

Sebagai elemen konstruksi bangunan, kayu mempunyai keterbatasan, yaitu tidak bisa dilengkungkan terutama yang berbentuk balok. Selain itu, dimensi penampang transversalnya dan dimensi longitudinalnya terbatas pada yang ada di pasaran. Dengan tipe-tipe konstruksi

sambungan yang dibahas di atas, batang kayu yang panjangnya terbatas dapat dirangkai membentuk elemen struktur yang dapat membentang sesuai dengan kebutuhan.

Struktur yang terbentang seperti jembatan, lantai tingkat pada bangunan, atap pada umumnya menggunakan *truss* (rangka batang), di mana *truss* untuk atap disebut kuda-kuda. Pada struktur *truss*, gaya-gaya yang bekerja bila beban terletak tepat di tiap simpul, yaitu gaya tekan atau gaya tarik. Ada beberapa tipe kuda-kuda kayu yang konfigurasinya tergantung dari lebar bentang dan pertimbangan arsitektural, misalnya kalau diperlukan *attic room* dapat digunakan tipe *open-plan* dan *storage*. Banyaknya unit segitiga pada sebuah kuda-kuda berpengaruh pada kapasitas bentang dan dimensi batang-batangnya, semakin banyak jumlahnya, maka kapasitas bentang makin besar serta dimensi batang-batangnya semakin kecil. Setiap pertemuan batang-batang dikonstruksikan dengan sambungan menyudut dan disesuaikan dengan gaya aksial yang bekerja. Sementara itu, untuk batang-batang yang perlu disambung dapat disambung dengan konstruksi sambungan memanjang, dan disesuaikan dengan gaya aksial yang bekerja. Jenis alat penghubung yang dipilih akan menentukan tampilan konstruksi sambungannya.



Gambar 14.23 Beberapa Tipe Kuda-Kuda

Sumber: <https://desainrumaharsitek77.com/macam-macam-kerangka-desain-kuda-kuda>

Keterbatasan panjang batang kayu juga dapat menampilkan bentuk-bentuk yang unik dengan menata batang-batang kayu secara spesifik. Bahkan kayu-kayu potongan sisa tetap dapat digunakan untuk menghasilkan bentuk struktur yang unik dan menarik.



1

Sumber: <https://www.architecturaldigest.in/gallery/most-beautiful-buildings-in-the-world-made-entirely-of-wood/>



2

Sumber: <https://www.archdaily.com/933010/the-future-of-the-old-how-ancient-construction-techniques-are-being-updated/5e36755f3312fdec2600005-the-future-of-the-old-how-ancient-construction-techniques-are-being-updated-image>



3

Sumber: <https://steemit.com/science/a/@ktoosiu/reciprocal-frame-stable-3d-structures-without-any-glue-or-connections>



4

Sumber: <https://rei.iteso.mx/server/api/core/bitstreams/f22fd4a5-e073-437a-ae0b-b975685cf07a/content>



5



6

Sumber: https://www.archdaily.com/578442/creation-of-a-forest-shelter-at-bertrichamp-studiolada-architectes-yoann-saehr-architect/5490c71ee58eced8d000013f01_photo_christophe_aubertin-jpg

Gambar 14.24 Beberapa Ide Kreatif Bentuk Struktur dari Material Kayu

Gambar 1 adalah sebuah *shelter* tempat bermain anak berbentuk iglo yang dibuat dari susunan potongan-potongan balok kayu, Gambar 2 menunjukkan kolom dibuat dari potongan-potongan balok kayu yang ditumpuk secara selang-seling, Gambar 3 dan 4 adalah struktur *reciprocal frame*, yaitu struktur yang dibentuk dari potongan batang-batang yang saling menumpu dan bertumpu (timbang balik), Gambar 5 dan 6 adalah sebuah *shelter* yang kolomnya merupakan kolom majemuk. Kolom tersebut terdiri dari beberapa kolom tunggal berbentuk T (Gambar 6) yang disusun secara sangat unik, sehingga sebuah kolom majemuk membentuk paraboloida hiperbolik tiga dimensi. Kolom-kolom majemuk tersebut berfungsi sebagai pendukung atap dan juga sebagai elemen stabilitas struktur. Beberapa contoh pada Gambar 14.24 menunjukkan peluang menemukan bentuk struktur dari keterbatasan material, seperti kayu bekas potongan-potongan pendek (Gambar 1 s.d. Gambar 3), dan peluang menemukan bentuk struktur kolom yang unik (Gambar 5).

2. *Gluelam (Laminated Wood)*

Gluelam (glued laminated)/laminated wood merupakan kayu berupa papan lapis yang direkayasa dan dikerjakan di pabrik sehingga menjadi komponen konstruksi bangunan, seperti balok, kolom, busur, panel lantai, panel dinding, dan lain-lain yang siap dirakit di lapangan.

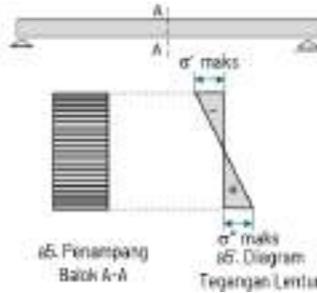
Pembuatan *gluelam* dilakukan dengan menumpuk papan-papan dengan arah yang sama (paralel) dan di antara setiap papan diberi lem, kemudian dipres sehingga papan-papan tersebut menyatu membentuk komponen konstruksi yang direncanakan. Dimensi dan jumlah papan yang ditumpuk disesuaikan dengan dimensi komponen yang akan dibuat, misalnya untuk membuat balok 20/50 cm, maka dipakai 10 lapis papan 5/20 cm.

Dalam konstruksi bangunan, *gluelam* digunakan sebagai elemen-elemen struktural maupun elemen nonstruktural. Dengan material dasar berbentuk papan, maka *gluelam* dapat dibuat melengkung membentuk busur, atau portal dengan sudut melengkung dan bentuk-bentuk lain.

Panel dinding panel lantai atau panel plafon dibuat dengan merangkai balok-balok *gluelam* dengan sambungan melebar (Gambar 14.29 dan Gambar 14.29). Busur lengkung dibuat dengan melengkungkan tumpukan papan yang sudah diberi lem dan ditahan dengan *bracket* baja sambil dipres (Gambar 14.27 dan Gambar 14.30). Setelah lemnya kering, busur *gluelam* dilepas dan dilakukan proses selanjutnya sampai *finish*.

Pada dasarnya apa yang bisa dikonstruksikan dengan kayu gergajian pasti bisa dikonstruksikan juga dengan *gluelam*. Kelebihan *gluelam* dibandingkan kayu gergajian adalah sebagai berikut.

- a. Papan yang digunakan untuk balok *laminated wood* tidak harus dengan mutu yang seragam, bagian sisi paling tepi menggunakan kayu dengan mutu lebih tinggi, yang di bagian tengah bisa dengan kayu mutu lebih rendah karena di sisi paling tepi bekerja tegangan lentur tekan-tarik paling besar.
- b. Bisa mengakomodasi berbagai dimensi penampang melintang maupun panjangnya.
- c. Bisa mengakomodasi berbagai bentuk, lurus maupun melengkung.
- d. Muai susut relatif kecil karena setiap lapisan (papan) telah mengalami proses pengeringan dengan kadar air yang rendah.
- e. Cacat kayu pada tiap lapisan (papan) tersebar dan saling menutupi.
- f. *Gluelam* pada umumnya tidak dibuat dari kayu dengan kelas kuat yang tinggi.



Gambar 14.25 Diagram Tegangan Lentur



Gambar 14.26 Balok *Glulam* dalam Proses di Pabrik

Sumber: <https://kalesnikoff.com/products/mass-timber-glulam-beams/>



Gambar 14.27 Busur *Glulam* dalam Proses di Pabrik

Sumber: https://www.archiproducts.com/en/products/costantini-legno/timber-beam-curved-glulam-beam_652583



Gambar 14.28 Balok dan Panel *Glulam*

Sumber: https://www.archdaily.com/928387/what-is-glued-laminated-wood-glulam/5dcc1ecb3312fde3a30000a8-what-is-glued-laminated-wood-glulam-photo?ad_medium=widget&ad_name=navigation-prev



Gambar 14.29 Sambungan Melebar Panel *Glulam*

Sumber: https://www.google.com/search?q=glulam+panels&sca_esv=34fe19f69faab3a7&rlz=1C1CHBF_enID917ID917&udm=2&biw=1163&bih=539&ei=gmrFZvy1Aabz4-EPlujUyAk&oq=glulam+panels&gs_lp=Egxnd3Mtd2l6LXNlcnAiDWdsdWxhbSBwYW51bHMqAggAMgUQAiABDlGEAAyCBgeSKEwUO4FWMsdAF4AJABAjgBmwGgAfsGqgEDMC42uAEBYAEa-AEBmAIHoAKWB5gDAIgGAZIHAzEuNq-AHoQ8&sclient=gws-wiz-serp#vhid=pP4tHopCisqlaM&vssid=mosaic



Gambar 14.30 Proses Pengepresan Balok Lengkung (Busur) *Gluelam*

Sumber: https://www.glued-laminated-timber.com/glued-laminated-timber/production/mn_43528



Gambar 14.31 Gable Frame dengan Sudut Lengkung *Gluelam*

Sumber: <https://unalam.blogspot.com/2011/01/glulam-by-una-lam-used-extensively-in.html>

Contoh Penerapan *Gluelam* dalam Bangunan:



Gambar 14.32 Struktur Busur *Gluelam*

Sumber: <https://realmuloodi.co.ug/embracing-glulam-as-a-construction-material/>



Gambar 14.33 Kolom *Gluelam* Berbentuk Y

Sumber: <https://www.westernarchrib.com/>



Gambar 14.34 *Grid Shell Gluelam*

Sumber: <https://www.shutterstock.com/search/glulam>



Gambar 14.35 Struktur Busur Berbentuk “S”

Sumber: <https://i.pinimg.com/originals/9b/7d/d3/9b7dd3265b2565e2eabb0ff7660512d8.jpg>



Gambar 14.36 Struktur Tamedia Office Buliding, Zurich

Sumber: <https://shigerubanarchitects.com/works/cultural/tamedia-new-office-building/>



Gambar 14.37 Tamedia Office Building dengan *Second Skin* Kaca

Sumber: <https://www.designboom.com/architecture/shigeru-ban-tamedia-office-building-in-zurich-completed/>

C. *Cross Laminated Timber (CLT)*

CLT merupakan produk kayu hasil rekayasa pabrik yang pertama kali dikembangkan di Eropa, khususnya Austria dan Jerman, kemudian berkembang di negara lain termasuk Indonesia. CLT terdiri dari papan-papan yang disusun bertumpuk dengan arah papan saling tegak lurus setiap lapisannya dan disatukan dengan menggunakan lem struktural, dipres dengan sedemikian rupa sehingga pori-porinya menjadi kecil, berbeda dengan *gluelam* yang disusun bertumpuk dengan arah papan tiap lapis searah. Lapisan CLT umumnya berjumlah ganjil, tiga lapis sampai dengan tujuh lapis sehingga tampilannya apabila diekspos tampak simetri.

Komponen CLT lebih optimal berbentuk bidang/panel, dan dapat digunakan untuk komponen-komponen bangunan struktural maupun nonstruktural, seperti lantai, dinding pemikul beban (*load bearing wall*) maupun dinding geser (*shear wall*), dinding fasad, dan lain-lain. Dalam penerapan dalam konstruksi bangunan, CLT sering dikombinasi dengan *gluelam*, pada umumnya CLT untuk lantai dan dinding, sedangkan *gluelam* untuk kolom.

Sistem struktur bangunan bertingkat menengah yang menggunakan CLT pada umumnya menerapkan sistem struktur dinding pemikul beban (*load bearing wall*), dan struktur *post-plate* (kolom dan pelat) dengan *shear wall/bracing*, *frame-shear wall/bracing*, di mana *shear wall*-nya bisa menggunakan CLT atau beton bertulang. CLT dapat diterapkan untuk bangunan bertingkat rendah sampai dengan bertingkat menengah, bahkan bangunan Mjøstårnet di Norwegia dibangun 18 lantai, setinggi 85,4 m (Gambar 14.40).

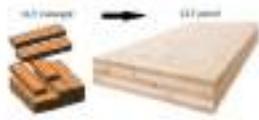
Pembangunan dengan CLT dikerjakan secara pabrikasi, elemen-elemen konstruksi bangunan telah disiapkan di pabrik dengan ukuran yang tepat lengkap dengan lubang-lubang bukaan untuk pintu dan jendela sehingga pelaksanaannya cepat.

Kelebihan CLT adalah sebagai berikut.

1. Sangat kuat dan ringan.
2. Pembangunan dengan menggunakan CLT cepat dan mudah.
3. Baik untuk akustik dan isolasi termal.
4. Tahan api, CLT diproduksi dengan ketahanan api 30, 60, dan 90 menit.
5. Tahan gempa.
6. Minimal limbah padat.
7. Penyimpan karbon sehingga membantu mengurangi dampak emisi rumah kaca.

Walaupun ketahanan CLT terhadap api cukup baik, namun IBC (International Building Code®) menentukan persyaratan *Fire-Resistant Rating* (FRR) yang dikaitkan dengan dengan ketinggian bangunan (https://www.woodworks.org/wp-content/uploads/presentation_slides-COATS-Navigating-Code-Requirements-for-Mass-Timber-WDS-2004_14.pdf). Untuk persyaratan FRR tertentu, CLT perlu ditingkatkan ketahanannya, yakni ada dua tipe material tersebut: (1) diaplikasikan di permukaan; dan (2) disuntikkan (<https://www.woodsafes.com/en/what-is-fire-retardant-treated-woodz>). Ditetapkan juga ketebalan minimal panel CLT, untuk lantai 4", untuk atap 3", dan untuk dinding interior 4".

Di samping kelebihan tersebut, CLT tetap harus dihindarkan terpapar kelembapan, maka komponen-komponen CLT dihindarkan langsung bertemu dengan tanah. Pada bangunan bertingkat menengah, pada umumnya lantai dasarnya menggunakan konstruksi beton bertulang.



Gambar 14.38 Konsep dan Panel CLT

Sumber: <https://insapedia.com/capraz-lamine-ahsap-teknoloji-clt-cross-laminated-timber/>



Gambar 14.39 Skema Struktur *Load Bearing Wall CLT*

Sumber: <https://www.ealconsult.com/cross-laminated-timber/>



Gambar 14.40 Mjøstårnet di Norwegia

Sumber: <https://www.flickr.com/photos/mrpb27/48344244597/in/photostream/>



Gambar 14.41 Bridport House, London

Sumber: <https://continuingeducation.bnpmmedia.com/courses/think-wood/cross-laminated-timber/2/>



Gambar 14.42 Struktur *Cantilever Box CLT the Smile* salah Satu Proyek *Landmark* di Jerman Festival

Sumber: <https://architizer.com/blog/product-guides/product-guide/glulam/>



Gambar 14.43 Struktur Campuran Dinding Pemikul dan Rangka CLT

Sumber: <https://www.raicopacific.com.au/timber/cross-laminated-timber/>



Gambar 14.44 Rumah Awrawikara Bogor

Sumber: <https://woodlamindonesia.com/wp-content/uploads/2020/07/awrwkr3-1024x683.jpg>



Gambar 14.45 Struktur Dinding Pemikul Beban CLT

Sumber: <https://www.buildingdesignindex.co.uk/entry/151725/A-Proctor-Group/CLT-Cross-laminated-timber-solutions/>



Gambar 14.46 Struktur Rangka dengan *Bracing* CLT

Sumber: <https://timberlab.com/news/timberlab-announces-new-cross-laminated-timber-facility-in-oregon>



Gambar 14.47 Struktur *Post-Plate* CLT

Sumber: https://www.siga.swiss/global_en/knowledge/building-solutions/cross-laminated-timber-the-ultimate-guide-to-clt-and-how-to-protect-it

Kayu sebagai material *bi-directional* mampu menahan gaya tekan dan tarik pada arah sumbu yang sama, maka kayu mampu menahan momen lentur. Oleh karena itu, kayu dapat mengakomodasi struktur *form-active* maupun *non form-active*. Hal itu tampak dari contoh-contoh penggunaan kayu untuk balok (menerima momen lentur), busur (menerima gaya tekan), *truss* (batang-batang menerima gaya tekan atau gaya tarik), dan lain-lain. “Busur S” pada Gambar 14.35 menunjukkan busur yang lengkungannya berubah dari lengkung busur menjadi lengkung kabel. Hal ini mengakibatkan pada busur tersebut bekerja momen lentur, gaya tekan dan gaya tarik, serta bentuk seperti ini dapat diakomodasi oleh kayu bila ditinjau dari sifat mekanisnya. Namun, dari segi teknologinya, bentuk busur tersebut dapat dibuat bila menggunakan *gluelam* yang secara teknis dapat menghasilkan bentuk yang beragam, dan tidak dapat dikonstruksikan dengan menggunakan kayu gergajian.

Material kayu lainnya (CLT), dari segi teknologi ada perbedaan dengan *gluelam*, di mana CLT dipersiapkan untuk mampu menahan beban yang berat dan lebih optimal diterapkan sebagai komponen berbentuk bidang/panel. CLT juga tidak sefleksibel *gluelam* dalam mengakomodasi bentuk, pada umumnya lebih condong ke bentuk

bentuk yang tidak lengkung, bentuk lengkungnya dihasilkan oleh lapis-lapis CLT yang lurus. Salah satu contoh bentuk lengkung ada pada Gambar 14.42, *box cantilever*. Hal lain dapat dilihat pada contoh-contoh yang memperlihatkan CLT untuk bangunan tinggi dan bentuk strukturnya kebanyakan lurus atau datar.

Gluelam juga dapat digunakan untuk bangunan bertingkat menengah seperti Tamedia Office (Gambar 14.36 dan Gambar 14.37), namun fasadnya dibuat dari kaca yang berfungsi sebagai *second skin*, dan melindungi *gluelam* dari cuaca. Kalau dibandingkan dengan CLT, bangunan dari CLT dapat langsung diekspos terhadap cuaca, namun dilindungi terhadap kelembapan dari tanah.

D. Baja

Baja mulai digunakan di Inggris sejak ditemukan proses *bessemer* pertengahan abad ke-19. Baja mempunyai tegangan tekan dan tegangan tarik yang tinggi dan sama besar, maka baja mempunyai kemampuan menahan momen sangat baik.

Kelebihan baja untuk konstruksi bangunan adalah sebagai berikut.

1. Kekuatan tarik dan tekan baja sangat tinggi dibanding dengan kayu dan beton, maka untuk mendukung beban dibutuhkan dimensi komponen struktural yang kecil, kalau digunakan untuk konstruksi bangunan, berat sendirinya relatif kecil apabila dibandingkan dengan beton bertulang.
2. Daktilitas baja tinggi, sehingga baja tidak mendadak putus/*collapse* apabila mendapat beban lebih (*over loaded*) atau beban dinamis yang besar yang melampaui kapasitas kekuatan elastisnya. Dengan sifat seperti ini baja baik digunakan untuk bangunan di daerah rawan gempa bumi.
3. Pemasangan komponen-komponen strukturnya relatif mudah saat perakitan di lapangan. Semua komponen konstruksi sudah disiapkan di pabrik/bengkel, termasuk segala bagian dari sambungan, seperti pelat buhul, lubang baut, dan lain-lain.
4. Pelaksanaan pembangunan cepat.
5. Baja merupakan material homogen yang dibuat di pabrik dengan kontrol kualitas yang baik, sehingga keseragaman dan kualitas materialnya terjamin.

6. Batang baja mudah dibentuk, dapat dilengkungkan sehingga dapat mengakomodasi bentuk struktur berbentuk lengkung.
7. Walaupun proses memproduksinya membutuhkan energi yang tinggi, tetapi baja dapat didaur ulang, dan dapat digunakan lagi sebagai komponen konstruksi bila dibongkar, terutama apabila dipelihara dengan baik.

Kekurangan baja untuk konstruksi bangunan adalah sebagai berikut.

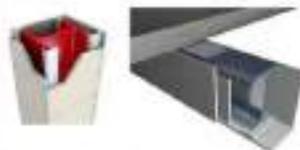
1. Rentan terhadap karat, sehingga selalu perlu perlindungan terhadap karat.
2. Ketahanan terhadap panas 550°C ke atas kurang baik, sehingga diperlukan perlindungan terhadap kebakaran, misalnya: dibungkus dengan papan kalsium silikat, gipsum *board*, semen/*gypsum*, atau dicor dengan beton, atau disemprot dengan bahan serat mineral. Ada tipe pelindung terhadap api yang lain, yaitu lapisan tahan api *intumescent*, berbentuk cat, *foam*, film tipis, atau film tebal. Lapisan *intumescent* tersebut mengembang menjadi jauh lebih tebal bila terkena panas tinggi (<https://www.linkedin.com/pulse/passive-fire-protection-method-steel-structures-raynaldo>).

Kelebihan baja mempunyai kekuatan yang tinggi juga merupakan kelemahannya, karena komponen struktur baja diproduksi dengan dimensi yang tipis dan berbentuk profil untuk mendapatkan kekakuannya. Oleh karena tipisnya profil baja, maka kekakuannya terhadap tekuk kecil.



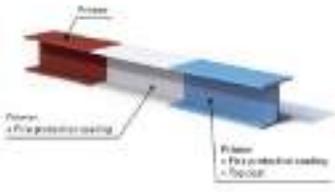
Gambar 14.48 Perlindungan Terhadap Kebakaran dengan Semprot

Sumber: <https://www.carboline.com/solution-spot/posts/a-beginners-guide-to-passive-fire-protection/>



Gambar 14.49 Perlindungan Terhadap Kebakaran dengan Bungkus *Gypsum Board*

Sumber: <https://theconstructor.org/structural-engg/fire-protection-systems-steel-structures/19615/>



Gambar 14.50 Perlindungan Terhadap Kebakaran dengan Cat

Sumber: <https://www.rudolf-hensel.de/en/fire-protection-coating-systems-for-steel/>



Gambar 14.51 Perlindungan Terhadap Kebakaran dengan Cor Beton

Sumber: https://www.steelconstruction.info/File:Reinforced_column.png

E. Macam-macam Baja

Baja dibuat dari biji besi, bahan besi yang diperoleh dari alam disebut besi gubal (*pig iron*). Biji besi terdiri dari kira-kira 90% sampai 95% besi, karbon, belerang, mangan, fosfor, dan sebagainya. Besi gubal tidak dapat dipakai untuk material konstruksi bangunan karena sifatnya lunak dan getas. Untuk dijadikan material konstruksi bangunan, biji besi diolah di pabrik dengan campuran material lain. Proses pengolahan dan material tambahan yang dipakai tersebut berbeda-beda dan menghasilkan material yang mempunyai sifat berbeda-beda juga.

1. Besi Tuang (*Cast Iron*)

Bahan baku dilebur untuk menghasilkan tingkat kandungan karbon 2% sampai 4%, plus material lain seperti mangan, fosfor, belerang, dan silikon. Pembuatannya dilakukan dengan cara menuangkan bahan campuran cair ke dalam cetakan sesuai dengan bentuk yang diinginkan. Untuk memudahkan bahan campuran cair mengalir, ditambahkan sulfur pada saat penuangan. Cetakan dibuat dari pasir silika (atau jenis pasir lain) dicampur dengan bahan pengikat *water glass* atau resin (atau material pengikat lain).

Sifat besi tuang:

- Keras dan mudah melebur/mencair.
- Getas.
- Tidak berkarat.
- Tidak dapat diberi muatan magnet.

- Dapat dikeraskan dengan cara dipanasi kemudian didinginkan secara mendadak.
- Menyusut waktu pendinginan.
- Kuat terhadap gaya tekan, tetapi lemah terhadap gaya tarik. Kuat tekan $\pm 6.000 \text{ kgf/cm}^2$, kuat tarik $\pm 500 \text{ kgf/cm}^2$, baik untuk struktur yang menahan tekan.
- Hanya dapat disambung dengan baut dan sekrup, tidak dapat disambung dengan paku keling atau dilas.

Penggunaan besi tuang:

- Untuk pipa penahan tekanan tinggi.
- Tumpuan sendi dan rol jembatan.
- Komponen struktur yang menerima gaya tekan.

2. Besi Tempa (*Wrought Iron*)

- Besi tempa mengandung sedikit karbon ($< 0,08\%$) dan bahan lain (mangan, fosfor, belerang, dan silikon).
- Bersifat daktail, kuat, dan dapat ditempa.
- Kuat tarik maksimum $\pm 4.000 \text{ kgf/cm}^2$ kuat tekannya $\pm 2.000 \text{ kgf/cm}^2$, sehingga baik untuk struktur yang menahan tarik.
- Dapat dilas.
- Tidak dapat dituang karena sulit mencair.
- Tahan korosi.
- Temperatur luluh sekitar 535°C .

Penggunaan besi tempa:

- Jarang dipakai/jarang diproduksi.
- Bisa untuk paku atau baut-mur.
- Pagar.
- Rel.

3. Baja (*Steel*)

Sifat baja berada di antara besi tuang dan besi tempa. Baja baik untuk struktur yang menahan tekan maupun tarik, maka baik untuk menahan momen.

Bahan dasar baja adalah besi ditambah dengan karbon. Kadar karbon baja berada di antara besi tuang dan besi tempa. Karbon menambah kekerasan dan kekuatan tarik baja, tetapi mengurangi daktilitasnya. Oleh karena itu, untuk struktur bangunan, kadar karbon dibatasi. Untuk meningkatkan sifat mekanisnya, ditambah unsur lain.

besi + karbon + unsur lain = baja-paduan (*alloy steel*)

Baja struktural (*carbon steel*) ada tiga macam, yaitu sebagai berikut.

1. Baja lunak atau baja rendah karbon, kandungan karbon kurang dari 0,3%.
2. Baja kekerasan sedang (*medium carbon steel*), kandungan karbon 0,3% sampai 0,6%.
3. Baja keras atau baja tinggi karbon, kandungan karbon melebihi 0,6%.

F. Jenis Baja untuk Konstruksi Bangunan

Ada tiga jenis baja yang umum dipakai untuk konstruksi bangunan, keduanya berbeda dalam proses/cara pembuatannya, yaitu:

1. *hot rolled* (baja canai panas);
2. *cold rolled*; dan
3. *cold formed*.

Baja dipasarkan dengan bentuk dan dimensi penampang melintang beragam, dengan panjang 12 m.

1. Baja Canai Panas (*Hot Rolled Coil*, Disingkat HRC)

Baja canai panas dibuat dengan cara menggiling secara kontinu bongkahan baja panas yang masih berpijar melewati celah beberapa rol yang telah disusun sesuai bentuk profil baja yang dibuat dan dengan lebar celah yang semakin lama semakin sempit, sampai diperoleh bentuk profil di seluruh panjangnya dan dimensi akhir yang diinginkan. Pemanasannya dilakukan di atas temperatur rekristalisasi.

Ciri-ciri HRC adalah warnanya hitam dan permukaannya kasar, dimensi yang diperoleh tidak seragam serta toleransi dimensi kurang tepat. HRC digunakan untuk komponen-komponen yang tidak perlu presisi ukuran yang tinggi, dan kehalusan permukaan.

Dalam proyek konstruksi bangunan, HRC digunakan untuk komponen-komponen konstruksi bangunan baja, seperti kolom, balok, dan lain-lain, juga untuk komponen-komponen nonstruktural seperti teralis dan sebagainya. Baja canai panas diproduksi dengan berbagai bentuk dan dimensi penampang melintang serta dengan panjang standar 12 m.

2. Baja Canai Dingin (*Cold-Rolled Coil* Disingkat CRC)

CRC adalah baja hasil proses *hot-rolled* yang (baja hitam) digiling ulang dengan suhu di bawah temperatur kristalisasi (lebih rendah dari suhu proses *hot rolled*). Dimensi baja menjadi lebih kecil, lebih halus, baja menjadi lebih kuat, dan warnanya menjadi putih.

3. Baja *Cold-Formed*

Baja *coled -formed* adalah pelat hasil *hot rolled* yang digulung di bawah temperatur ruang sehingga menghasilkan bentuk profil penampang melintang yang diinginkan. Baja tipe ini disebut baja ringan, ketebalannya sangat tipis, ketebalan yang umum di Indonesia 0,4 mm–1 mm. Baja ringan yang digunakan untuk konstruksi atap dilapisi dengan *galvalume* atau *galvanish*. Lapisan *galvalume* mengandung aluminium 55%, seng 43,4%, dan sisanya bahan lain, sedangkan lapisan *galvanish* mengandung seng 97%, aluminium $\pm 1\%$, dan bahan lain, ada yang menyebutkan hanya dilapisi dengan seng. Ketahanan terhadap karat *galvalume* lebih baik daripada *galvanish* (<https://www.hexana.co.id/post/perbedaan-galvanish-dan-galvalume-dalam-baja>; <https://blkp.co.id/blogs/detail/perbedaan-jenis-lapisan-galvalume-dan-galvanish-baja>).

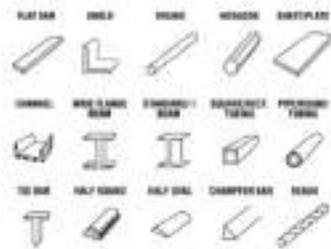
1. Baja Canai Panas

Baja canai panas struktural merupakan baja yang digunakan untuk berbagai komponen konstruksi bangunan gedung maupun jembatan, seperti fondasi tiang baja, kolom, balok, konstruksi atap, dan tulangan beton, untuk komponen-komponen penghubung, seperti baut-mur, pelat buhul, dan lain-lain.

Baja yang digunakan adalah baja lunak (*mild steel*) U-22 dan U-24, artinya tegangan luluhnya adalah 2.200 kgf/cm² dan 2.400 kgf/cm² (<https://ronymedia.wordpress.com/2010/04/25/baja-tulangan/>). Baja lunak

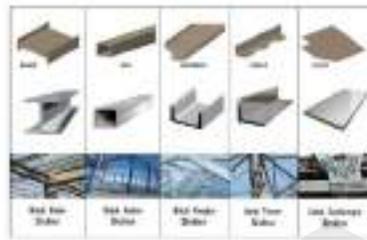
dipilih karena mempunyai daktilitas yang tinggi, dengan kekuatan yang cukup tinggi.

Macam-macam bentuk profil penampang melintang baja struktural adalah sebagai berikut.



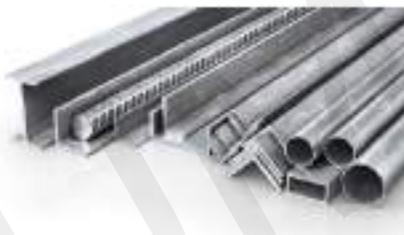
Gambar 14.52 Macam-macam Bentuk Profil Baja

Sumber: <https://www.ruang-sipil.com/2019/09/baja-steel.html>



Gambar 14.53 Macam-Macam Bentuk Profil Baja dan Penggunaannya

Sumber: <https://fretswilsonlosa.blogspot.com/2018/10/struktur-baja-untuk-konstruksi-bangunan.html>



Gambar 14.54 Macam-macam Bentuk Profil Baja (Produk)

Sumber: <https://www.bakersteeltrading.co.uk/structural-steel-mild-steel-differences/>

Alat penghubung konstruksi baja canai panas:

- Alat penghubung untuk sambungan-sambungan konstruksi baja canai panas;
- Baut, seperti baut-mur, *hollo bolt*, dan baut angker;
- Paku keling; dan
- Las.

Ada dua klasifikasi baut sebagai alat penghubung yang digunakan untuk konstruksi baja:

- a. Baut normal A307; serta
- b. Baut mutu tinggi A325 dan A490.

Baut A325 terbuat dari baja karbon dengan kuat luluh 560–630 MPa ($5'710,41 \text{ kgf/cm}^2 - 6.424,21 \text{ kgf/cm}^2$), dan baut A490 terbuat dari baja *alloy* dengan kuat luluh 790–900 MPa ($8.055,76 \text{ kgf/cm}^2 - 9.177,44 \text{ kgf/cm}^2$). Konstruksi harus menggunakan baut mutu tinggi, yang umum digunakan adalah baja A325.



Gambar 14.55 Baut-Mur

Sumber: <https://kreasimudaindonesia.com/mengenal-macam-sambungan-pada-sebuah-konstruksi-baja/>



Gambar 14.56 *Hollo-Bolt*

Sumber: <https://simplifiedbuilding.ie/projects/structures/boxbolt-expansion-anchor-saving-time-saving-money>



Gambar 14.57 Baut Angker

Sumber: <https://www.directindustry.com/prod/spit-impex/product-12325-125558.html>



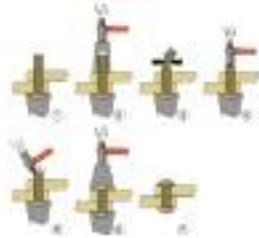
Gambar 14.58 Baut Angker Posisi Tertanam

Sumber: <https://www.directindustry.com/prod/spit-impex/product-12325-125558.html>



Gambar 14.59 Angker *Base-Plate* Kolom

Sumber: <https://www.mbtsteel.com/kenali-base-plate-material-kecil-yang-berguna-untuk-konstruksi/>



Gambar 14.60 Paku Keling

Sumber: <https://kreasimudaindonesia.com/mengenal-macam-sambungan-pada-sebuah-konstruksi-baja/>

Gambar 14.61 Cara Pemasangan Paku Keling



Gambar 14.62 Sambungan dengan Las

Sumber: <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=LwJEQQhodH4>



Gambar 14.63 Konstruksi Join Kolom-Blok-Bracing

Sumber: <https://engineersblog.net/what-is-bolted-joint/>



Gambar 14.64 New "Re Teodorico" Entrance, Verona Exhibition Centre, Italy

Sumber: <https://blog.blmgroupp.com/architecture-new-technologies-for-steel-constructions>



Gambar 14.65 Busur

Sumber: https://www.brainkart.com/subject/Design-of-Steel-Structural-Elements_369/



Gambar 14.66 Kantilever Lengkung Pipa Baja

Sumber: <https://www.indiamart.com/proddetail/cantilever-tensile-structures-22462129773.html>



Gamabr 14.67 The Dubai Harbour Yacht Club

Sumber: <https://www.designboom.com/architecture/steel-finned-roof-ama-dubai-harbour-yacht-club-10-05-2023/>



Gambar 14.68 Joe & Rika Mansueto Library, University of Chicago

Sumber: <https://www.archdaily.com/143532/joe-and-rika-mansueto-library-murphy-jahn/5720a24ee58ece84a300000b-joe-and-rika-mansueto-library-murphy-jahn-image>



Gambar 14.69 Detail Konstruksi Pertemuan

Sumber: https://www.researchgate.net/publication/349924405_The_Mansueto_Library_-_notes_on_a_glazed_steel_grid_shell_from_design_to_construction

Sebagai material *bi-directional* dan dengan kekuatan tekan serta tarik yang tinggi, baja dapat mengakomodasi berbagai bentuk, baik *form-active*, semi *form-active*, maupun *non form-active*, dan dapat mengakomodasi bentang-bentang yang lebar. Metode pengerjaan *joint* konstruksi baja relatif mudah sehingga memungkinkan beberapa batang bertemu pada sebuah *joint*, seperti cabang-cabang kolom pada Gambar 14.64. Gambar 14.65 s.d. Gambar 14.68 menunjukkan kemungkinan baja mengakomodasi berbagai bentuk. Gambar 14.64 bentuk pohon dengan *joint* pertemuan antara cabang-cabangnya sangat sederhana dengan las. Gambar 14.65 sepasang batang baja kotak yang dilengkungkan membentuk busur dengan lengkung positif dan negatif menunjukkan kapasitasnya untuk dibentuk serta menerima gaya tekan dan gaya tarik serta momen.

Gambar 14.66, *shelter* sederhana yang menunjukkan kekuatannya yang besar dan kapasitas untuk dibentuk. *Shelter* tersebut memang kecil, tetapi dimensi batang dengan relatif kecil dibandingkan dengan panjang kantilever lengkungnya, juga detail tumpuan jepitnya sangat

sederhana. Gambar 14.67 menunjukkan kekuatan baja untuk terbentang lebar, dimensi bilah-bilah kantilever tanpa penutup atapnya sangat kecil dibanding dengan bentangnya dan tampak tidak terjadi deformasi lendutan yang signifikan. Hal ini disebabkan karena bagian di luar bangunan bilah-bilah kantilever tersebut tidak ditutup dengan atap, maka di bagian tersebut kantilever hanya memikul berat sendirinya. Gambar 14.68 menunjukkan struktur *grid-shell* baja yang melingkupi denah oval dengan dimensi 120 feet x 240 feet (36,6 m x 73,2 m). Bentang tersebut termasuk kecil untuk material baja, banyak contoh *grid-shell* baja dengan bentang yang besar, yang mau diekspos adalah detail konstruksi pertemuan antarpipa baja struktural dan pertemuannya dengan rangka kaca yang sangat sederhana serta bersih. Hal itu dimungkinkan karena baja dapat disambung dengan menggunakan las, dibandingkan dengan detail konstruksi sambungan pada *grid-shell* kayu.

2. Cold Formed Steel

Cold formed steel disebut juga baja ringan dibuat dari pelat baja tipis berbentuk pita yang dibentuk melalui penggilingan dalam suhu ruang, menghasilkan bentuk dengan profil tertentu. Bentuk profil tersebut adalah hasil dari “melipat” pelat tipis tersebut untuk memperoleh kekakuannya.

Proses pembuatan profil baja ringan dilakukan dengan cara menggiling pelat baja tipis melalui celah beberapa rol yang disusun berjenjang di mana rol paling depan menghasilkan lipatan paling kasar, rol berikutnya dan seterusnya menghasilkan lipatan yang semakin halus.

Kelebihan baja ringan, yakni sebagai berikut.

- Tahan karat.
- Tahan terhadap rayap.
- Bobot ringan.
- Pengerjaan mudah dan bisa cepat.
- Dapat didaur ulang.
- Tampilan tidak estetik.

Kekurangan baja ringan, yakni sebagai berikut.

- Bobotnya yang ringan rentan terbawa angin yang besar.
- Kekuatan tariknya besar, namun kekakuan materialnya kecil, sehingga rentan mengalami keruntuhan terhadap beban yang tidak terencana. Hal ini terutama dapat terjadi pada saat pelaksanaan.
- Penghantar listrik.
- Baja ringan tidak bisa dilengkungkan.

Penggunaan baja ringan, yakni sebagai berikut.

- Konstruksi bangunan: kolom, balok, dan rangka atap.
- Rangka dinding-dinding nonstruktural.
- Rangka plafon.

Alat penghubung baja ringan, yakni sebagai berikut.

- *Self-Drilling Screw* (SDS).
- *Dyna bolt*.



Gambar 14.70 *Self-Drilling*

SDS terbuat dari metal tahan karat. SDS dapat dikatakan sebagai sekrup pengeboran mandiri. Ujungnya berbentuk mata bor yang tajam sehingga ketika sekrup diputar dapat masuk ke dalam

dinding baja ringan tanpa harus dibuatkan lubang terlebih dahulu dan menghasilkan ikatan yang kuat antara sekrup dengan dinding baja ringannya.

SDS digunakan untuk menghubungkan batang-batang baja ringan, seperti batang-batang pada rangka kuda-kuda, menghubungkan reng dengan kuda-kuda dan lain-lain. Sementara *dyna bolt* digunakan untuk menghubungkan kuda-kuda ke tumpuan (kolom atau *ring* balik).

Macam-macam profil baja ringan adalah sebagai berikut.



Gambar 14.71 Tipe-tipe Bentuk Penampang Melintang Baja Ringan

Penggunaan jenis profil baja ringan disesuaikan dengan fungsinya pada konstruksi, misalnya: profil C dan Z biasa digunakan untuk rangka batang kuda-kuda, profil reng untuk reng, profil kotak atau *hollow* untuk rangka plafon.



Gambar 14.72 Detail Pertemuan Kuda-Kuda dengan Ring Balk



Gambar 14.73 Detail Pertemuan Antabatang Kuda-Kuda

Contoh Bangunan dengan Konstruksi Baja Ringan:



Gambar 14.74 Baja Ringan untuk Kanopi

Sumber: <https://www.kompasiana.com/mas35395/626fd907bb4486493d0982a2/hitung-biaya-pasang-kanopi-baja-ringan>



Gambar 14.74 Baja Ringan untuk Bangunan 1 Lantai

Sumber: <https://mastertukang.co.id/tips-memilih-atap-baja-ringan/>



Gambar 14.75 Baja Ringan untuk Bangunan 2 Lantai

Sumber: <https://blkp.co.id/blogs/detail/yuk--ketahui-5-struktur-baja-ringan-yang-sering-kita-gunakan>

Konstruksi baja ringan mempunyai keterbatasan untuk dibentuk dan tampilannya tidak estetik. Bentuk yang dihasilkan tidak sebarang material baja lunak. Penggunaannya lebih dipertimbangkan dari segi ekonomis, keawetan karena tidak dimakan rayap. Baja ringan umumnya digunakan untuk bangunan satu lantai dan dua lantai.

G. Beton

Beton adalah material yang terbentuk dari campuran antara hal berikut.

1. *Portland Cement* (PC) yang berfungsi sebagai material pengikat.
2. Agregat yang berfungsi sebagai material pengisi:
 - o agregat halus (ukuran < 5 mm) → pasir; dan
 - o agregat kasar → kerikil.
3. Air.

Kalau ada persyaratan tertentu, bisa ditambahkan *additive/admixture*, misalnya untuk menambah kelecakan beton segar, mempercepat atau memperlambat proses pengikatan.

Pembuatan beton dilakukan dengan mencampur material-material tersebut, dan diaduk sehingga benar-benar menyatu. Komposisi perbandingan berat material-material tersebut menentukan kualitas beton.

Urutan pekerjaan beton sebagai berikut.

1. Penakaran (*batching*).
2. Pencampuran (*mixing*).
3. Pengangkutan (*transporting*).
4. Pengecoran.
5. Pemasatan.
6. *Finishing*.
7. Perawatan (*curing*).

Proses pekerjaan penakaran dan pencampuran dapat dilakukan di pabrik beton atau dapat juga di lapangan.

1. Penakaran (*Batching*)
 - Mengukur berat dengan menimbang masing-masing material menurut komposisinya.
 - Proporsi berat tiap material direncanakan dengan *mix design*.
2. Pencampuran
 - Agregat, PC, dan air diaduk sampai menjadi beton siap dituang (*cor*).
3. Pengadukan Manual
 - Pengadukan secara manual pada umumnya digunakan untuk proyek-proyek kecil. Mutu beton yang dihasilkan tidak dapat dijamin kualitasnya.
 - Pengadukan dilakukan di dalam bak, pada umumnya dibuat bak dari papan-papan kayu.
 - Setelah adukan rata, adukan tersebut diangkut ke tempat pengecoran oleh pekerja dengan menggunakan ember *cor* secara estafet atau dengan kereta, kemudian dituangkan ke

dalam cetakan (*bekisting*) yang telah disiapkan baja penulangan di dalamnya.

4. Pengadukan dengan Beton Molen Kecil

- Beton molen pada umumnya digunakan pada proyek-proyek kecil. Mutu beton yang dihasilkan lebih terjamin daripada cara manual, dengan catatan komposisi berat materialnya sesuai dengan yang direncanakan, dan dikerjakan dengan cara yang benar.
- Kerikil, pasir, dan PC dimasukkan ke dalam molen, kemudian diberi air serta molen diputar.
- Setelah adukan merata, adukan matang diangkut dan dituang sama dengan pengadukan manual.

5. Beton *Ready Mix*

- Beton *ready mix* dibuat di pabrik beton dengan mengoperasikan *batching plant*.
- Campuran beton ditakar di *batching plant*, kemudian diaduk dengan *pan mixer* dan dituang ke dalam *truck mixer*.
- Beton diangkut dengan *truck mixer* dari pabrik beton ke proyek. Selama perjalanan dari pabrik beton sampai beton tiba di lapangan dan selama menunggu beton dituang, tanki *mixer* diputar terus agar adukan beton tidak mengalami *setting* dan pengerasan.

Pengecoran beton *ready mix* ke dalam *bekisting* dapat dilakukan dengan beberapa cara menurut kebutuhan, yakni sebagai berikut.

1. Menggunakan pompa beton: adukan beton dari *truck mixer* dituang ke dalam corong *truck* pompa beton, kemudian adukan beton tersebut dipompa dan disemprotkan ke dalam *bekisting*.
2. Menggunakan *concrete bucket*: dari *truck mixer* beton dituang ke dalam *bucket*, kemudian *bucket* tersebut diangkat dengan bantuan *tower crane* diarahkan ke posisi yang dituju. Kemudian, dari *concrete bucket* dituang ke dalam *bekisting*, melalui *tremie* (pipa yang berfungsi seperti corong). Penggunaan *concrete bucket* pada umumnya diterapkan untuk pengecoran kolom konstruksi bangunan besar/tinggi dan untuk pengecoran, lantai-lantai yang tinggi.

3. Langsung dituang ke dalam *bekisting* dari *truck mixer*, biasanya untuk fondasi, basemen, jalan, kolam, dan beton pracetak yang letaknya di bawah.
4. Bisa juga dengan cara seperti penggunaan beton molen kecil, pada umumnya untuk proyek-proyek kecil seperti rumah tinggal.

Sebelum proses pengecoran dilakukan, terlebih dahulu *slump test* untuk menguji tingkat kekakuan adukan beton. Ada beberapa macam *tipe concrete pump* menurut jangkauan ketinggiannya, yakni sebagai berikut.

1. *Concrete pump standard*, jangkauan ketinggian di bawah 20 meter.
2. *Concrete pump long boom*, jangkauan ketinggian di atas 20 meter s.d. 40 meter.
3. *Concrete pump super long boom*, jangkauan ketinggian di atas 40 meter s.d. di bawah 60 meter.
4. *Concrete pump double long boom*, jangkauan ketinggian di atas 60 meter.
5. *Concrete pump portable* (pompa kodok), jarak jangkauan 120 meter s.d. 170 meter.
6. *Concrete pump beton minimix*, jangkauan ketinggian s.d. lantai dua bangunan.

Untuk proyek-proyek besar yang membutuhkan volume beton banyak dan luas lahannya cukup luas, atau lokasinya jauh dari “pabrik” beton, *batching plant* bisa ditempatkan di lahan proyek. Hal ini dapat mempersingkat waktu perjalanan beton ke tempat beton dituang.

Penggunaan *batching plant*, untuk pembuatan beton *ready mix* maupun pembuatan beton di lapangan proyek bertujuan untuk dapat menghasilkan dan menjaga keseragaman kualitas beton sesuai dengan yang direncanakan.



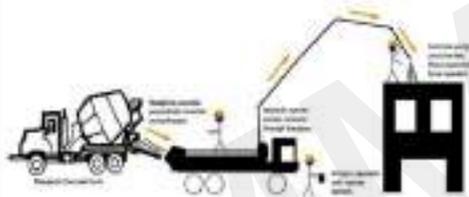
Gambar 14.76 Batching Plant

Sumber: https://www.sanyglobal.com/id_id/batching-plant/436.html



Gambar 14.77 Bagian-bagian Batching Plant

Sumber: <https://www.linkedin.com/pulse/concrete-batching-plant-components-nydia-hou-1ownc>



Gambar 14.78 Proses Pemompaan Beton

Sumber: <https://hadimjm.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/09/ilustrasi-pompa-beton-yang-sedang-memindahkan-beton-ke-lokasi-cor.jpg>

1. Kekakuan Beton

Kekakuan/konsistensi beton berpengaruh pada kemudahan pengerjaan (*workability*). Kalau beton terlalu kaku, berarti airnya sangat sedikit, akibatnya beton sulit mengalir ke dalam cetakan, sebaliknya kalau air terlalu banyak kekuatan betonnya berkurang. Kekakuan beton dapat dikontrol dengan melakukan *slump test*. Besarnya *slump* (dalam cm) diukur dengan meteran. Bila hasilnya terlalu kecil berarti beton terlalu kaku, sebaliknya kalau terlalu besar berarti beton terlalu lecek.

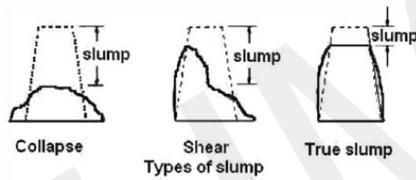


Gambar 14.79 Peralatan *Slump Test*

Sumber: <https://www.globalgilson.com/blog/concrete-slump-guide>



Gambar 14.80 Proses *Slump Test*



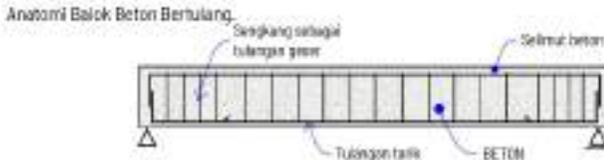
Gambar 14.81 Bentuk Hasil *Slump Test* dan Tabel *Slump Test*

<https://kuliahinsinyur.blogspot.com/2012/06/concrete-slump-test-uji-slump-beton.html>

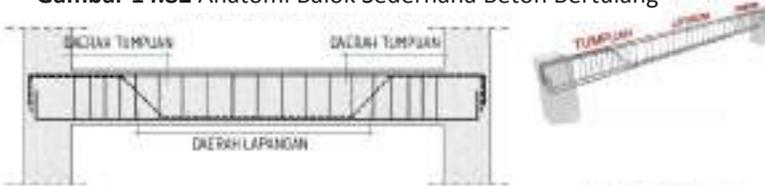
PERATURAN BETON BERTULANG INDONESIA 1971		
	kelas	kelas
beton bertulang	10,0	15
beton bertulang dengan tulangan		
beton bertulang dengan tulangan	10	15
beton bertulang dengan tulangan		
beton bertulang dengan tulangan	10	15
beton bertulang dengan tulangan		
beton bertulang dengan tulangan	10	15
beton bertulang dengan tulangan		
beton bertulang dengan tulangan	10	15
beton bertulang dengan tulangan		

2. Beton Bertulang

Beton polos (beton tanpa penulangan) merupakan material *mono-directional*, di mana kekuatan tekan jauh lebih besar daripada kekuatan tarik. Bila digunakan untuk struktur penahan momen, beton diberi tulangan baja menjadi material komposit yang disebut beton bertulang (*reinforced concrete*) yang bersifat *bi-directional*. Tulangan tersebut berfungsi untuk menahan gaya tarik, sedangkan gaya tekan ditahan oleh betonnya.



Gambar 14.82 Anatomi Balok Sederhana Beton Bertulang



Gambar 14.83 Anatomi Balok Rangka Pemikul Momen Beton Bertulang (Sengkang Balok di dalam Kolom Tidak Tergambar)

Sumber: <https://www.facebook.com/indobuilds/videos/media-pembelajaran-penulangan-balok-beton-animasi-3d/493876824318045/>

Balok sederhana (Gambar 14.82), ketika menerima momen positif, bagian atasnya mengalami tegangan tekan, ditahan oleh beton sendiri dan bagian bawahnya mengalami tegangan tarik, ditahan oleh baja tulangan. Sengkang berfungsi menahan gaya geser, namun apabila luas penampang sengkang tidak cukup, dipasang tulangan geser (diagonal).

Balok rangka pemikul momen (Gambar 14.83), ketika menerima momen lentur, di daerah tumpuan mengalami momen negatif, sedangkan di daerah lapangan menerima momen positif. Maka, di daerah tumpuan sisi atas balok menerima tegangan tarik dan sisi bawah menerima tegangan tekan, di daerah lapangan sisi atas menerima tegangan tekan dan sisi bawah menerima tegangan tarik. Gambar 14.83 menunjukkan contoh penulangan di daerah tumpuan, sisi atasnya ada tiga buah tulangan, sedangkan sisi bawahnya ada dua buah tulangan, dan di daerah lapangan sisi bawahnya ada tiga buah tulangan serta sisi atasnya ada dua buah tulangan. Sering baja tulangan di daerah tumpuan di sisi bawah tulangnya diperhitungkan untuk menahan gaya tekan sehingga tegangan tekan yang diterima beton lebih kecil. Selain itu, Gambar 14.83 dan Gambar 14.83' menampilkan tulangan miring, tulangan ini diperlukan apabila terjadi gaya geser yang besar sehingga kapasitas geser sengkang dilampaui. Jumlah luas penampang melintang semua tulangan longitudinal diperhitungkan sesuai dengan besarnya gaya tarik yang bekerja di masing-masing posisi.

H. Baja Tulangan

Baja tulangan adalah batang baja dengan penampang melintangnya berbentuk lingkaran yang digunakan untuk penulangan beton.

Ada dua macam bentuk permukaan baja tulangan:

1. Baja tulangan polos (BJTP); dan
2. Baja tulangan sirip/ulir atau *deform* (BJTS) 405 MPa.

Tulangan polos dibuat dengan tegangan luluh (f_y) sebesar 280 MPa, maksimal 405 MPa, disebut BJTP-280. Ada beberapa dimensi tulangan polos, yang umum digunakan untuk sengkang: P6, P8, dan P10 (dahulu dituliskan $\emptyset 6$, $\emptyset 8$).

Tulangan sirip/ulir dibuat dengan tegangan luluh (f_y) sebesar minimal 280 MPa, maksimal 405 MPa disebut BJTS -280. Tulangan ulir mempunyai enam kelas dengan tegangan luluh yang berbeda-beda, yaitu BJTS -280, BJTS -420A, BJTS -42B, BJTS -520, BJTS -550, dan BJTS -700. BJTS 420A dan 420 tegangan luluhnya sama, yang berbeda adalah regangannya (SNI 2052, 2017). Tulangan ulir digunakan untuk tulangan longitudinal atau tulangan memanjang. Sebutan untuk diameter tulangan sirip adalah BJTS (dulu dituliskan BJTD), misalnya BJTS 16.



Gambar 14.84 Baja Tulangan Polos

Sumber: <https://www.besibeton.net/news/fungsi-besi-beton-polos/>



Gambar 14.85 Baja Tulangan Sirip

Sumber: <https://www.smsperkasa.com/blog/kualifikasi-besi-beton-sni>

I. Pelaksanaan Konstruksi Beton Bertulang

Pembuatan komponen konstruksi bangunan dari beton bertulang dilakukan dengan cara menuangkan beton mentah ke dalam cetakan (*bekisting*) yang telah ada rangkaian baja tulangan beton.

Ada dua macam teknik pelaksanaan konstruksi bangunan beton bertulang:

1. cor di tempat (*cast in-situ concrete*); dan
2. pracetak (*pre-cast concrete*).

Proses pengerjaan dan detail konstruksi bangunan yang menggunakan beton *in-situ* berbeda dengan beton pracetak. Pekerjaan beton *in-situ* semua pengecorannya dilakukan di tempat pekerjaan di mana beton mentah dituangkan pada *bekisting* yang sudah diset pada posisi yang tetap. Beton pracetak dikerjakan sampai menjadi komponen konstruksi bangunan di luar area pekerjaan konstruksi bangunan, yaitu di pabrik atau di lapangan pekerjaan di tempat yang terpisah dari area pekerjaan konstruksi. Setelah komponen-komponen tersebut jadi, diangkut ke area pekerjaan konstruksi untuk dirakit.

Konstruksi beton *in-situ* menghasilkan konstruksi bangunan yang menyatu/monolit, di mana kolom, balok, dan pelat lantai menyatu secara utuh. Sementara pada konstruksi beton pracetak, komponen-komponen, seperti kolom, balok, serta pelat lantai, terpisah-pisah dan dihubungkan dengan detail pertemuan khusus.

1. Proses Pekerjaan Konstruksi Beton *In-Situ*

Urutan semua pekerjaan komponen struktural yang berbentuk batang (*sloof*, kolom, dan balok), sebagai berikut.

- a. Diawali dengan membuat rangkaian tulangan.
- b. Rangkaian tulangan diset di tempat sesuai dengan rencana.
- c. *Bekisting* dipasang.
- d. Membuat adukan beton.
- e. Adukan beton dituang ke dalam *bekisting*, untuk kolom pengecoran dihentikan sebelum mencapai dasar tulangan balok, adalah agar beton pada pertemuan kolom-balok dapat menyatu.
- f. Pelepasan bekisting. Untuk kolom, dan semua komponen vertikal bisa dilakukan setelah 8 jam setelah selesai pengecoran.

Pekerjaan pelat lantai dan atap beton bertulang, sebagai berikut.

- a. *Bekisting* pelat dan balok diset pada posisinya.
- b. Tulangan balok dirangkai dan dimasukkan ke dalam *bekisting* balok.
- c. Tulangan pelat dipasang dan dirangkai di atas *bekisting* pelat.
- d. Membuat adukan beton.
- e. Adukan beton dicor ke dalam *bekisting* balok dan di atas *bekisting* pelat.
- f. Perawatan (*curing*) beton dengan merendam atau membasahi permukaan beton.
- g. Pelepasan/pembongkaran *bekisting* pelat dan balok lantai menurut PBI 71: *bekisting* boleh dibongkar setelah beton berumur 3 minggu, atau kalau dijamin setelah *bekisting* dibongkar beban kerja tidak melampaui 50% beban rencana, maka pembongkaran *bekisting* dapat dilakukan setelah beton berumur 2 minggu.

Dengan proses pengerjaan tersebut, maka beton bertulang menjadi monolit. Fondasi *sloof*, kolom, dan balok menjadi satu kesatuan yang utuh. Hal ini dapat dibayangkan dari Gambar 14.87 dan Gambar 14.88, di mana ketika adukan beton mengisi *bekisting* balok dan seluruh pelat, maka semua beton bersama tulangnya menjadi satu kesatuan, dan menjadi kuat setelah mengeras.



Gambar 14.86 Proses Pelaksanaan Bangunan Betingkat Banyak, Lantai Atas Sedang menata Bekisting Pelat Lantai

Sumber: <https://alat-ukur-indonesia.com/tahap-pembangunan-gedung-bertingkat/>



Gambar 14.87 Tulangan Terpasang di atas Bekisting Pelat dan di dalam Bekisting Balok

Sumber: <https://www.situstekniksipil.com/2017/02/perhitungan-balok-dan-plat-lantai.html>



Gambar 14.88 Pengecoran Pelat dan Balok

Sumber: <https://medium.com/@info.epoxycoating/jasa-cor-beton-kediri-9f8289598f74>



Gambar 14.89 Contoh Bangunan Bertingkat Banyak Beton Bertulang *In-Situ*

Sumber: <https://alat-ukur-indonesia.com/tahap-pembangunan-gedung-bertingkat/>

Dalam konstruksi bangunan bertingkat, proses pengecoran dimulai dari lantai terbawah, kemudian dilanjutkan pemasangan *bekisting* dan tulangan lantai di atasnya, baru kemudian dilakukan pengecoran lantai di atasnya. Maka, ada pekerjaan penyambungan tulangan kolom bawah dengan tulangan kolom di atasnya. Ada tiga cara penyambungan tulangan, yaitu sambungan lewatan (*lap splice*), sambungan las (*welded splice*), dan sambungan mekanis (*mechanical splice*). Setelah tulangan disambung dengan benar, maka kolom tersebut menjadi kesatuan yang utuh.



Gambar 14.90 Sambungan Tulangan Lewatan

Sumber: https://www.facebook.com/photo.php?fbid=764578145814706&id=100067875819759&set=a.407311968207994&locale=el_GR



Gambar 14.91 Sambungan Tulangan *Mechanical-Splice*

Sumber: <https://www.elhifa.co.id/jasa-rebar-coupler-splice-di-indonesia/?v=d62a8d1683e6>

Penggunaan beton bertulang *in-situ* pada bangunan sebagai berikut.

- a. Elemen struktural: kolom, balok, pelat lantai, pelat atap, dinding pemikul beban (*load bearing wall*), dinding geser (*shear wall*), dan fondasi.
- b. Elemen nonstruktural: dinding fasad, dinding interior, tangga, tembereng, kolom praktis, dan lain-lain.

Beton bertulang *in-situ* untuk dinding, baik struktural maupun nonstruktural sering ditampilkan ekspos tanpa *finishing* penutup. Beton ekspos bisa ditampilkan polos/halus atau bertekstur dengan kekasaran yang beragam tergantung cara penanganannya. Teknik penanganan permukaan beton ekspos, antara lain, dengan disikat, dengan *sand-blasting*, atau dengan teknik lain (untuk mendalami, dapat dipelajari dari referensi lain). Untuk beton ekspos polos/halus dikerjakan dengan menuang beton ke dalam *bekisting* yang terbuat dari panel tripleks dengan rangka kayu, atau pelat baja dengan rangka baja, di mana permukaan dalam *bekisting* tersebut disapu dengan material yang memudahkan pelepasan *bekisting*. Di antara panel-panel *bekisting* tersebut diberi pengikat (Gambar 14.92 dan Gambar 14.93) untuk menghindarkan panel *bekisting* menggelembung terdorong adukan beton ketika dilakukan pengecoran. Kedua ujung pengikat tersebut dipasang pada panel *bekisting*, dan ketika *bekisting* dilepas menyisakan lubang-lubang (*tie holes*) pada permukaan dinding tersebut. Luang-lubang ini memberikan tampilan yang unik pada permukaan beton ekspos (Gambar 14.94).



14.92



14.93. Concrete wall ties



14.94. Tampilan Beton Ekspos

Contoh Bangunan Beton *In-situ*:



Gambar 14.92

Tower Jakarta

Sumber: <https://www.artstreetecture.com/streetview/post/660-intiland-tower-jakarta-paul-rudolph>



Gambar 14.93

Concrete Wall Ties

Sumber: <https://vds210158-env-6616231.j.layershift.co.uk/2014/02/19/mun-jeong-heon-house-by-a-m-architects-surrounded-by-huge-concrete-frame/>



Gambar 14.94

Tampilan Beton Ekspos



Gambar 14.97 Capela Bosjes, Afrika Selatan

Sumber: <https://www.archdaily.com.br/br/877207/capela-bosjes-steyn-studio>



Gambar 14.98 The Station Car Park di Aarau

Sumber: <https://www.architonic.com/fr/story/susanne-fritz-concrete-in-architecture-1-a-material-both-stigmatised-and-celebrated/7000525>

Gambar 14.95 menunjukkan penggunaan beton bertulang *in-situ* untuk struktur rangka, di mana seluruh permukaan beton dilapisi dengan keramik. Gambar 14.96 menunjukkan penggunaan beton bertulang *in-situ* ekspos berupa struktur bidang yang membentuk portal dan dinding, di mana pada permukaan betonnya tampak lubang-lubang pengikat *bekisting*. Garis-garis yang membentuk pola kotak-kotak adalah garis panel *bekisting*. Gambar 14.97 menunjukkan penggunaan beton bertulang *in-situ* untuk struktur *shell* tipis, dan Gambar 14.98

menunjukkan penggunaan beton bertulang *in-situ* untuk dinding yang diekspos tanpa lapisan *finishing* serta permukaannya dikasarkan. Keempat contoh tersebut memperlihatkan kemampuan beton mengakomodasi sistem struktur *form-active* maupun *non form-active*, dan secara teknologi mampu mengakomodasi beragam bentuk serta memberi karakter tampilan pada permukaan betonnya.

2. Beton Pracetak (*Pre-Cast Concrete*)

Menurut SNI 7833-2012, beton pracetak adalah elemen atau komponen beton tanpa atau dengan tulangan yang dicetak terlebih dahulu sebelum dirakit menjadi bangunan. Pembuatan komponen beton pracetak bisa dilakukan di pabrik, kemudian diangkut ke lapangan untuk dirakit. Selain itu, bisa juga membuat “pabrik” sementara di lapangan untuk memproduksi komponen-komponen pracetak. Komponen-komponen beton pracetak dapat diproduksi secara massal sehingga dapat menekan biaya cetakan. Agar biaya cetakan dapat ditekan, diperlukan pembatasan variasi bentuk dan dimensi komponen pracetak tersebut untuk sebuah proyek. Untuk proyek tertentu dengan volume pekerjaan yang besar, beton pracetak dapat dibuat dengan bentuk menurut permintaan (*custom*) dengan perhitungan biaya tersendiri. Dimensi panjang dan lebar komponen beton pracetak diusahakan sebesar mungkin sebatas kapasitas alat angkut dan angkat, untuk menghemat pekerjaan penyambungan di lapangan. Mutu komponen beton pracetak dapat diandalkan karena pengerjaannya di ruang terlindung dari cuaca, dan dapat dilakukan kontrol kualitas yang baik, mulai dari persiapan, pengerjaan, perawatan, pengangkatan, dan penyimpanan. Penggunaan beton pracetak mempercepat proses pembangunan di lapangan, dan pekerjaan relatif bersih.

Oleh karena komponen-komponen beton pracetak merupakan unit-unit lepas, maka strukturnya secara keseluruhan tidak monolit seperti beton *in-situ*. Namun, keutuhan (*integritas*) struktur harus dapat dihasilkan dengan merencanakan dan melaksanakan detail pertemuan antarkomponen-komponen strukturalnya dengan baik dan benar sesuai dengan standar SNI 7833-2012. Selain pertimbangan dari segi kekuatan, dalam merencanakan *joint* konstruksi pertemuan antarkomponen-

komponen struktural, kemudahan pekerjaan konstruksi sambungan juga sangat penting untuk mendapat perhatian.

Ada dua jenis sambungan beton pracetak:

- a. Sambungan kering; dan
- b. Sambungan basah.

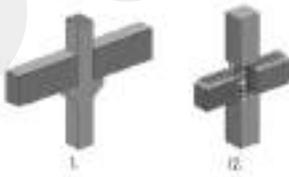
Sambungan kering menggunakan sambungan mekanis, yang umum adalah dengan pelat baja dan baut atau las. Pelat baja telah siap dijangkar pada komponen pracetak yang akan disambung, kemudian di lapangan dibaut, dilas atau dicor (Gambar 14.99, Gambar 14.100, Gambar 14.101).

Sambungan basah menggunakan adukan beton atau *grouting* yang dituang pada pertemuan antarkomponen pracetak, di mana tulangan yang telah diset untuk sambungan masih belum tertutup oleh beton (Gambar 14.99).

Material cetakan beton pracetak yang umum digunakan adalah kayu, pelat baja, plastik, dan material sintetis. Material-material tersebut dapat mengakomodasi berbagai bentuk termasuk bentuk-bentuk lengkung.

Penggunaan beton pracetak dalam konstruksi bangunan:

- a. Elemen struktural: kolom, balok, pelat lantai, pelat atap, dinding pemikul beban (*load bearing wall*), dinding geser (*shear wall*), dan struktur boks modular.
- b. Elemen nonstruktural: dinding fasad, dinding interior, tangga, *bekisting* permanen, dan lain-lain.



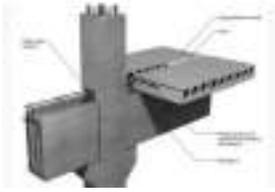
Gambar 14.99 (1) Sambungan Kering; (2) Sambungan Basah

Sumber: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Bolted-Moment-Connection-Model-for-Precast-Joint-Pul-%C5%9Eent%C3%BCrk/51e500b3334959f80c76580883859e7a7adca24c/figure/0>



Gambar 14.100 (1) Sambungan Kering Antardinding; (2) Sambungan Kering Antarkolom

Sumber: <https://www.moment-solutions.com/products/precaster-technologies/>



Gambar 14.101 Join Kolom-Balok-Pelat Beton Pracetak

Sumber: <https://www.builder.id/sambungan-beton-pracetak/>



Gambar 14.102 Pelaksanaan Perakitan Kolom dan Balok Beton Pracetak

Sumber: <https://www.msprecast.com/blog/2023/2/7/why-do-i-love-precast-let-me-count-the-ways>



Gambar 14.103 Pelaksanaan Perakitan *Bearing Wall* Pracetak

Sumber: https://www.cpci.ca/en/precast_solutions/total_precast/



Gambar 14.104 Pelaksanaan Perakitan Struktur Boks Modular

Sumber: <https://www1.bca.gov.sg/buildsg/productivity/design-for-manufacturing-and-assembly-dfma/prefabricated-prefinished-volumetric-construction-ppvc>

Contoh penggunaan beton pracetak dalam bangunan, yakni sebagai berikut.



Gambar 14.105 Fasad Beton Pracetak *Burnwood School*

Sumber: <https://www.buildingcentre.co.uk/news/articles/burntwood-school>



Gambar 14.106 Perakitan Fasad *Burnwood School*

Sumber: https://www.buildingcentre.co.uk/product_finder/company/techrete-uk-ltd/article/precast-concrete-facade-panels-at-burntwood-school



Gambar 14.107

Sumber: <https://i.pinimg.com/originals/10/3b/19/103b194994dc5db50da755341b05a1a1.jpg>



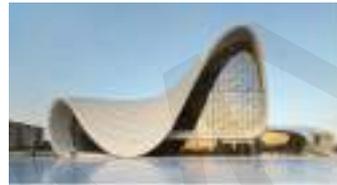
Gambar 14.108

Sumber: <https://www.designboom.com/architecture/batay-csorba-precast-concrete-toronto-01-01-2017/>



Gambar 14.109 Perot Museum of Nature and Science in Victory Park

Sumber: <https://www.archdaily.com/877871/how-one-concrete-manufacturer-helps-architects-reduce-project-costs-with-an-in-house-design-team>



Gambar 14.110 Cultural Center in Baku

Sumber: <https://www.precastconcretemagnet.com/info/impressive-precast-concrete-buildings-from-aro-84648861.html>



Gambar 14.111 Academy Museum of Motion Pictures

Sumber: <https://www.nbmw.com/product-technology/precast/a-sight-to-see-precast-concrete-enhances-the-beauty-of-the-academy-museum-of-motion-pictures.html>



Gambar 14.112 Habitat 67, Montreal

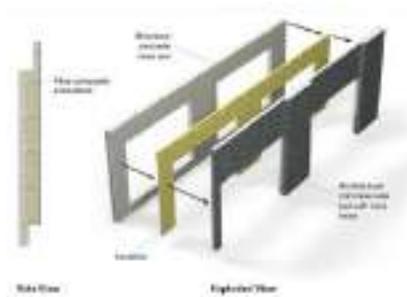
Sumber: <https://www.atlasobscura.com/places/habitat-67>



Gambar 14.113 One Thousand Museum Residence, Miami

Sumber: <https://brickell.com/1000-museum-condos>; <https://www.skyscrapercenter.com/building/one-thousand-museum/15188>

Gambar 14.105 menunjukkan penggunaan panel beton pracetak untuk fasad bangunan, Gambar 14.106 menunjukkan proses perakitan panel fasad tersebut. Gambar 14.107, Gambar 14.108, dan Gambar 14.109 menunjukkan kemungkinan yang luas beton pracetak mengakomodasi variasi bentuk fasad. Selain itu, sebagai panel fasad, beton pracetak juga diproduksi dengan *finishing* yang beragam, misalnya dilapisi dengan bata atau batu alam, permukaan diberi lapisan yang kasar, dan lain-lain. Gambar 14.110 dan Gambar 14.111 menunjukkan penggunaan beton pracetak untuk fasad bangunan dengan bentuk lengkung dengan unit-unit panel berbentuk lengkung. Gambar 14.112 menunjukkan penggunaan beton pracetak untuk struktur bangunan boks modular, Gambar 14.113 menunjukkan beton pracetak sebagai *bekisting* permanen pada bangunan One Thousand Museum, Miami. *Bekisting* beton pracetak tersebut berbentuk unit-unit panel menggunakan tulangan serat kaca.



Gambar 14.114 Susunan Pelapisan *Finishing* Beton Pracetak

Sumber: <https://www.forterra.co.uk/bison/architectural-precast/>



Gambar 14.115 Panel Beton Pracetak dengan *Finishing* Bata

Sumber: <https://www.linkedin.com/pulse/preglazing-integrating-windows-precast-panels-rabbat-m-eng-pmp>



Gambar 14.116 Panel Beton Pracetak dengan Pola Geometris

Sumber: <https://premierprecast.com/products/architectural-precast-concrete-panels/>



Gambar 14.117 Panel Beton Pracetak dengan *Finishing* Garis dan Polos

Sumber: <https://gateprecast.com/systems/gatestone/>



Gambar 14.118 Panel Beton Pracetak dengan *Finishing* Permukaan Kasar

Sumber: <https://archello.com/product/stoneo-look>



Gambar 14.119 Panel Beton Pracetak *Finishing* Granit pada Sebuah Bangunan

Sumber: <https://www.kafkagranite.com/blog/benefits-architectural-precast-concrete/>

DUMMY

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 15

EFISIENSI DAN BENTUK STRUKTUR

Efisiensi adalah ketepatan cara (usaha dan kerja) dalam menjalankan sesuatu (dengan tidak membuang waktu, tenaga, dan biaya); kedayagunaan; ketepatangunaan; kesangkilan (KBBI). Efisiensi mencakup berapa hal, seperti efisiensi waktu, efisiensi biaya, efisiensi material, dan lain-lain. Pembahasan dalam buku ini fokus pada efisiensi yang dikaitkan dengan bentuk bangunan atau bentuk elemen struktural. Bentuk yang dikaitkan dengan efisiensi struktural tersebut berpotensi menghasilkan estetika yang unik. Beberapa arsitek yang karyanya bertolak dari pemikiran ini, antara lain, Pier Luigi Nervi, Felix Candella, Eduardo Torroja, Frei Otto, Santiago Callatrava, Norman Foster, dan Richard Rodgers.

Dalam kaitannya dengan bentuk, efisiensi dapat ditinjau dari dua aspek, yaitu efisiensi struktural dan efisiensi teknologis.

1. Efisiensi struktural dikaitkan dengan perbandingan antara berat sendiri struktur dibanding dengan besarnya beban yang dapat dipikul, di mana struktur yang berat materialnya kecil (minimal), namun kapasitas dukung bebannya besar (maksimal) adalah struktur yang efisien.

2. Efisiensi secara teknologi dikaitkan dengan kemudahan pengonstruksian (pengerjaan) struktur bangunan, di mana struktur yang pengerjaannya mudah atau tidak kompleks adalah struktur yang secara teknologi efisien.

A. Efisiensi Struktural

Jenis gaya dalam yang bekerja di dalam suatu struktur tergantung dari bentuk struktur dan pola pembebanannya. Struktur dengan bentuk tertentu apabila dibebani dengan pola pembebanan tertentu, di dalam struktur tersebut akan bekerja gaya aksial tekan saja atau gaya aksial tarik saja (struktur *form-active*); ada struktur dengan bentuk yang lain dan dibebani dengan pola pembebanan tertentu, di dalam strukturnya bekerja momen lentur (struktur *non form-active*), dan ada struktur dengan bentuk yang lain lagi dan dibebani dengan pola pembebanan tertentu, di dalam strukturnya bekerja momen lentur dan gaya aksial (struktur *semi form-active*). Dari tiga tipe bentuk struktur tersebut, struktur *form-active* adalah yang paling paling efisien karena hanya menahan gaya aksial, berikutnya adalah struktur *semi form-active*, dan yang paling tidak efisien adalah struktur *non form-active* karena pada struktur bekerja momen lentur sehingga pada arah sumbu yang sama di dalam komponen struktur tersebut bekerja tegangan tekan dan tegangan tarik secara simultan.

Bentuk struktur bangunan dapat ditinjau secara keseluruhan seluruh bangunan utuh atau bagian dari bangunan seperti atap secara utuh disebut (a) bentuk global, dan dapat ditinjau secara parsial per elemen atau komponen struktur disebut (b) bentuk lokal.

1. Bentuk Global

Ditinjau dari bentuk global, struktur efisien apabila:

- a. berbentuk *form active*, berarti hanya menerima gaya aksial saja; dan
- b. struktur yang menerima gaya aksial tarik relatif lebih efisien daripada struktur yang menerima aksial gaya tekan.

Beberapa contoh berikut menunjukkan bentuk global berbentuk *form-active* yang sangat efisien.

a. Hipódromo De La Zarzuela



Gambar 15.1 Uji beban pada Shell Hypar

Sumber: <https://www.subtilitas.site/post/14624003336/testing-the-structural-integrity-of-thin-shell>



Gambar 15.2 Hipódromo de la Zarzuela, Eduardo Torroja (1935)

Sumber: <https://quizlet.com/208363520/art-of-structural-design-2-flash-cards/>

Hipódromo de la Zarzuela adalah tribun penonton balap kuda yang didesain oleh Eduardo Torroja (1935). Struktur atap bangunan ini adalah *shell* tipis berbentuk *hyperbolic paraboloid* (*hypar*) dari beton bertulang. Gambar 15.1 menunjukkan satu unit struktur *shell hypar* yang sangat tipis yang sedang diuji beban. Struktur *shell hypar* tersebut sangat tipis bila dibandingkan dengan panjang bentang kantilevernya yang besar, namun mampu memikul beban berat di atasnya. Ditinjau dari bentuk global, hal ini menunjukkan struktur atap tersebut sangat efisien. Unit *shell hypar* pada Gambar 15.1 apabila dipasangkan dengan unit yang sama di sebelahnya secara berulang akan menghasilkan bentuk seperti atap Hipódromo de la Zarzuela (Gambar 15.2).

b. Palazzetto Delo Sport Roma, Italia 1956–1958



Gambar 15.3 Palazzetto Dello Sport, Italia

Sumber: https://p1.liveauctioneers.com/375/26301/9815488_1_x.jpg?version=1315340116&width=1600&format=pjpg&auto=webp



Gambar 15.4 Rib-rib dan Ring pada Struktur Shell Kubah Palazzetto Dello Sport

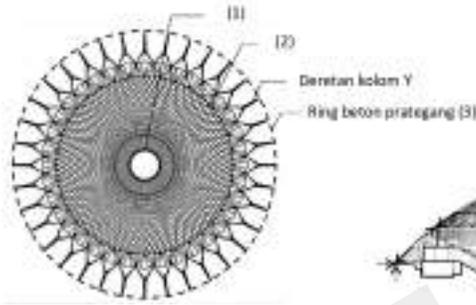
Sumber: <https://www.archdaily.com/644580/spotlight-pier-luigi-nervi-2>

Palazzetto Dello Sport adalah stadion di Roma Italia didesain oleh Pier Luigi Nervi pada 1956–1958. Atap stadion berbentuk kubah dengan diameter sekitar 60 m, menggunakan struktur *shell* kubah tipis yang diperkaku dengan *rib-rib*. Dari segi bentuknya, atap kubah dan deretan melingkar kolom Y dapat ditinjau secara terpisah, yaitu atap ditinjau sebagai bentuk global, dan deretan kolom Y sebagai bentuk lokal.

Gaya-gaya yang bekerja di dalam kulit atap *shell* kubah tersebut adalah gaya meridian tekan dan gaya *hoop* tekan. Dalam kubah ini tidak ada gaya *hoop* tarik karena kelengkungan segmen kubah tersebut “tipis” (baca Bab 13, *dome*). Maka, struktur kubah bangunan ini merupakan struktur *form-active* tekan. Kubah tersebut dikonstruksikan dengan menggunakan elemen-elemen *pre-cast ferro cement* berbentuk belah ketupat sebagai cetakan permanen, kemudian di atasnya dicor dan menyatu dengan beton. Beban mati struktur *shell* dengan insulasi dan penutup atap adalah 80 psf (= 391 kgf/m²), sedangkan berat sendiri *shell* termasuk *rib*-nya saja adalah 60 psf (293 kgf/m²), berat ini setara dengan pelat beton bertulang tanpa *rib* setebal 12,2 cm. Ketebalan struktur tersebut sangat tipis dibandingkan dengan bentang sekitar 60 m, dan hal ini menunjukkan bahwa struktur kubah Palazzetto Dello Sport sangat efisien.

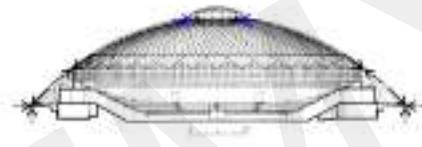
Gaya tekan meridian yang menuju ke tumpuan membentuk sudut terhadap sumbu vertikal, dan menghasilkan gaya dorong horizontal ke arah luar, sehingga membutuhkan *ring* tarik di sekeliling dasar kubah (Gambar 15.4). Nervi tidak memasang *ring* keliling tepat di dasar kubah, namun *ring* tarik tersebut diletakkan berjarak terhadap dasar kubah (*ring* 2), *rib-rib* yang sampai pada *ring* tarik 2 dikumpulkan menjadi 4 buah batang *rib* besar menuju ke masing-masing puncak kolom berbentuk Y yang berfungsi sebagai tumpuan kubah. Kolom-kolom Y tersebut mengelilingi lingkaran tepi kubah dan posisinya miring terhadap bidang horizontal membentuk sudut kemiringan sama dengan sudut kemiringan resultan gaya meridian kubah. Pada fondasi kolom penopang tersebut dipasang *ring* beton prategang, dengan demikian gaya tekan yang menekan kolom Y miring tersebut ditahan oleh kolom penopang tersebut dan *ring* tarik beton prategang (*ring* 3), sehingga kolom-kolom penopang yang diletakkan melingkar tersebut bersama dengan *ring* balok

prategang berfungsi sebagai *ring* tarik. Lubang di puncak kubah diberi *ring* tekan (1) untuk menahan gaya meridian yang menekan *ring* tersebut ke arah pusat lingkaran puncak tersebut. Bagian tepi *shell* kubah di antara ujung-ujung kolom penopang Y, pelat *shell*-nya dilipat ke atas sehingga gaya tekan meridian dari kubah dan gaya tekan *truss* dari bidang lipat dapat langsung diarahkan menuju ke puncak kolom Y (Gambar 15.7). Bentuk kolom Y ini selanjutnya dibahas dalam bentuk lokal.



Gambar 15.5 Kolom Penopang Keliling Kubah Palazzetto Dello Sport

Sumber: https://www.researchgate.net/figure/The-design-drawings-of-Palazzetto-dello-Sport-Picture-source_fig2_341179278, diunduh September 2022



Gambar 15.6 Potongan Kubah Palazzetto Dello Sport

Sumber: https://www.researchgate.net/figure/The-design-drawings-of-Palazzetto-dello-Sport-Picture-source_fig2_341179278, diunduh September 2022



Gambar 15.7 Penyaluran Gaya pada Lipatan Tepi *Shell* Palazzetto Dello Sport

Sumber: <https://structurae.net/en/structures/palazzetto-dello-sport>

c. The 1967 International and Universal Exposition or Expo 67, 1967, Montreal, Canada



Gambar 15.8 The 1967 International and Universal Exposition or Expo 67, 1967, Montreal, Canada

Sumber: <https://www.re-thinkingthefuture.com/know-your-architects/a401-15-landmark-projects-by-frei-otto/#97744416aa26b94650020be23e491f19cbc77f52#91230>, diunduh November 2022



Gambar 15.9 Birds Eye View The 1967 International and Universal Exposition or Expo 67, 1967, Montreal, Canada

Sumber: <http://montrealjemesouviens.blogspot.com/2012/09/exposition-universelle-1967-les.html>, diunduh November 2022

The International and Universal Exposition or Expo 67 ini adalah Paviliun Jerman untuk Pameran Dunia 1967 di Montreal, Kanada yang didesain oleh Frei Otto. Frei Otto adalah seorang arsitek dan juga insinyur sipil, yang sangat progresif. Dia telah berpikir tentang sistem struktur dan meterial yang bersifat berkelanjutan, maka minatnya sangat besar untuk mendesain bangunan yang tidak permanen yang bersifat ringan, mudah dipasang/dibongkar, dan minim material. Dia merupakan salah seorang arsitek yang desainnya mengutamakan penggunaan material seringan mungkin untuk dapat menaungi bentang sebesar mungkin, dan ini merupakan dasar dari efisiensi struktural yang kita bahas dalam buku ini. Dialah yang pertama memperkenalkan penggunaan struktur tenda tarik untuk bangunan berskala besar.

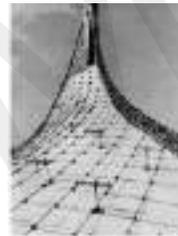
Paviliun Ekspo ini luasnya 8.000 m², dengan panjang maksimal denahnya adalah 427 ft (130 m), dan lebar maksimal denahnya adalah 345 ft (105 m). Atap paviliun ini berbentuk lengkung dua arah antiklastik, menggunakan sistem struktur jaring (*net*) kabel baja yang ditutup dengan material poliester fleksibel. Ada delapan buah kolom baja sebagai penopang atau tumpuan bagian atas kabel-kabel baja tersebut dengan jarak tidak beraturan. Dari puncak kolom tersebut, kabel utama ditarik ke bawah dengan konfigurasi yang tidak seragam, ada yang menerus ke bawah dan dijangkar di fondasi, ada yang turun melengkung ke bawah membentuk lengkung tetesan air, kemudian

baru ditarik ke fondasi, serta konfigurasi yang lain. Di antara dua buah tumpuan bawah dipasang kabel tepi berbentuk lengkung. Konfigurasi kabel-kabel utama tersebut menghasilkan bentuk yang sangat unik dan menarik, baik eksterior maupun interiornya. Di antara kabel-kabel utama dan kabel-kabel tepi dipasang jaring kawat baja saling bersilangan dari atas ke bawah (lengkung kabel), dan arah tegak lurusnya (lengkung busur). Stabilitas dan kekakuan jaring diperoleh dari kabel yang ditegangkan (diberi gaya tarik).

Kabel-kabel utama yang ditarik ke fondasi memberikan gaya tekan besar pada kolom baja sehingga ada potensi kolom baja mengalami tekuk. Otto mendesain kolom tersebut dengan bentuk yang efisien, di mana dimensi penampang melintang kolom di tengah panjangnya lebih besar daripada bagian ujung-ujung yang tertumpu, sesuai dengan deformasi tekuknya.



Gambar 15.10a Struktur Kabel dan Jaring



Gambar 15.10b Struktur Kabel dan Jaring (Lebih Detail)

Sumber: <https://cdn.filepicker.io/api/file/QyjcjD7QqfArngvfvVHA?&fit=max>, diunduh November 2022



Gambar 15.11 Interior

Sumber: <https://twitter.com/gcarabi/status/1050803863324905476>, diunduh November 2022



Gambar 15.12 Gaya-gaya pada Kabel dan Kolom

Sumber: <https://cdn.filepicker.io/api/file/QyjcjD7QqfArngvfvVHA?&fit=max>, diunduh November 2022

Desain Paviliun Ekspo 76 ini memperlihatkan desain Frei Otto yang sangat kreatif, di mana dia memanfaatkan efisiensi struktural untuk mendapatkan bentuk bangunan yang unik dan artistik. Estetikanya dapat dilihat dari eksterior maupun interior bangunannya. Kemudahan pemasangan paviliun ini dibuktikan dengan cepatnya proses pembangunannya, yaitu hanya dalam waktu enam minggu, waktu yang sangat cepat dibandingkan dengan luas bangunannya.

Perlu digaribawahi bahwa ada batas besaran/dimensi struktur yang secara struktural efisien untuk menggunakan struktur *form active*. Misalnya bangunan yang kecil tidak efisien menggunakan struktur *shell* beton bertulang, karena persyaratan ketebalan beton bertulang menurut SNI 2847:2013 minimal adalah 12 cm, sedangkan ketebalan *shell* menurut Shueller adalah 1/500 jari-jari. Selain itu, ada keterbatasan dalam pelaksanaan pekerjaan beton bertulang, di mana dimensi tulangan yang disusun dua arah saling bersilang ditambah ketebalan selimut beton perlu ketebalan kurang lebih 5 sampai 8 cm tergantung dimensi tulangannya. Misalnya, bangunan dengan denah lingkaran diameter 10,00 m, atap berbentuk kubah dengan jari-jari 5,00 m, maka ketebalan $shell = 1/500 \times 500 \text{ cm} = 1 \text{ cm}$ (ini adalah ketebalan yang efisien). Kalau mengikuti persyaratan ketebalan 12 cm *shell* harus dilaksanakan dengan tebal minimal 12 cm atau 5–8 cm, jauh lebih tebal dari ketebalan efisien 1 cm. Maka, penggunaan struktur *shell* kubah dalam contoh ini bukan bertujuan untuk mendapatkan bentuk dari efisiensi strukturalnya, namun dari pertimbangan arsitektural yang lain.

2. Bentuk Lokal

Struktur (secara lokal) efisien apabila terdapat hal berikut.

- a. Batang struktur memiliki penampang yang optimal, artinya batang struktur diletakkan pada posisi penampang melintang yang menghasilkan kekakuan lentur terbesar $\rightarrow W/A$ maksimal. Ini adalah kondisi paling mendasar dalam menempatkan komponen struktural yang memperhatikan efisiensinya.

- 1) Terhadap momen lentur, penampang melintang menghasilkan kekakuan lentur terbesar, berarti W/A maksimal (W = momen tahanan penampang, A = luas penampang). Untuk menghasilkan W yang maksimal, maka sumbu kuat diletakkan tekak lurus terhadap arah bekerjanya momen. Hal ini berlaku untuk balok maupun kolom yang menerima momen (Gambar 15.13 dan Gambar 15.14).
 - 2) Terhadap gaya aksial, kekakuan terhadap tekuk kedua arah penampang sama. Kekakuan batang tekan terhadap tekuk tergantung dari jenis material, Momen Inersia (I) dan panjang batang/panjang tekuk (serta kondisi tumpuannya).¹ Maka, agar kekakuan terhadap tekuk kedua arah sama, I_x harus sama dengan I_y . Penampang ideal untuk batang tekan adalah berbentuk lingkaran dan bujur sangkar (Gambar 15.13 dan Gambar 15.14).
- b. Efisiensi struktur lebih lanjut dapat dilakukan dengan mengartikulasikan penampang komponen struktur, yaitu dengan:
- 1) Membentuk batang struktural mengikuti variasi tegangan pada seluruh panjangnya;
 - 2) Membuat triangulasi/struktur *truss*;
 - 3) Meningkatkan kekuatan dengan melakukan pra-tegang (*pre-stressed*);
 - 4) Pelat lantai menggunakan *ribbed-slab* berpola garis isostatik; dan
 - 5) *Stress-skin structure*.

Dengan mengartikulasikan penampang komponen struktur, maka diperoleh efisiensi struktural yang semakin tinggi.

¹Rumus gaya tekan terhadap tekuk $P_{kr} = p^2.E.I/L^2$



Gambar 15.13 Balok Kayu Diletakkan pada Sumbu Kuat, Kekakuan Tekuk Kolom ke Dua Arah Sumbu Sama (Penampang Bujur Sangkar)

Sumber: <https://www.benjamin-co.com/portfolio/blackwood-house/>, diunduh November 2022



Gambar 15.14 Balok Baja I Diletakkan pada Sumbu Kuat, Kekakuan Tekuk Kolom *Hollow Square Section* (HSS) ke Dua Arah Sumbu Sama

Sumber: <https://www.rostarchitects.com/articles/2019/8/19/ten-modern-home-design-tips>, diunduh November 2022

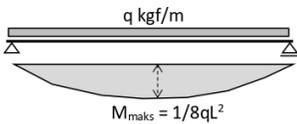
a. Struktur Rangka yang Menerima Momen Lentur

Dimensi penampang struktur rangka diartikulasikan mengikuti besarnya tegangan-tegangan lentur pada setiap posisi penampang, di mana besarnya tegangan lentur di setiap penampang tergantung dari besarnya momen pada tiap penampang tersebut yang digambarkan dalam bentuk diagram momen. Variasi/gradasi besarnya momen pada diagram momen tersebut tergantung dari bentuk/susunan rangka dan sistem strukturnya (tumpuan dan sistem join pertemuan antarkolom-balok). Untuk menyederhanakan pembahasan, sebagai contoh dijelaskan bagaimana mengartikulasikan penampang memanjang dari dua tipe sistem struktur balok.

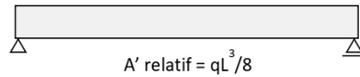
Balok sederhana, yaitu balok yang ditumpu di kedua ujungnya, satu sisi dengan tumpuan sendi, sisi yang lain dengan tumpuan rol. Momen maksimal di tengah bentang adalah $M_{maks} = qL^2/8$, dan momen di tumpuan = 0 (Gambar 15.15).

Balok sederhana yang dimensinya dibuat seragam (Gambar 15.16), luas penampang melintangnya (A) diperoleh dari momen maksimal, dapat dikatakan luas penampang melintang A relatif diwakili oleh M_{maks} . Untuk seluruh panjang bangunan A' relatif = $qL^2/8 \times L = qL^3/8$. A' relatif ini mewakili volume balok. Balok tersebut tidak efisien karena pada posisi momen yang lebih kecil sampai dengan momen sebesar 0, luas penampangnya ditentukan berdasarkan M_{maks} .

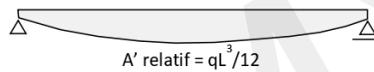
Balok yang dimensinya mengikuti besarnya momen di setiap penampangnya (Gambar 15.17) bila dihitung dengan prinsip yang sama, menurut Sandaker (2008) A' relatifnya = $qL^3/12$, lebih kecil daripada A' relatif balok yang pertama. Hal ini menunjukkan bahwa balok yang diartikulasikan berdasarkan besarnya momen lebih efisien daripada yang tidak.



Gambar 15.15 Diagram Momen Balok Sederhana terhadap Beban Merata

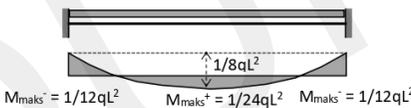


Gambar 15.16 Balok Sederhana dengan Dimensi Seragam

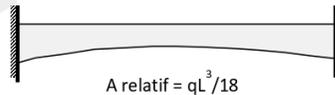


Gambar 15.17 Balok Sederhana dengan Dimensi Mengikuti Diagram Momen

Balok ditumpu dengan tumpuan jepit di kedua ujungnya bila dimensinya mengikuti besarnya momen di setiap penampangnya merupakan balok yang paling efisien, menurut Sandaker (2008) A' relatifnya = $1/18qL^3$ (Gambar 15.18 dan Gambar 15.19).



Gambar 15.18 Diagram Momen Balok Terjepit terhadap Beban Merata



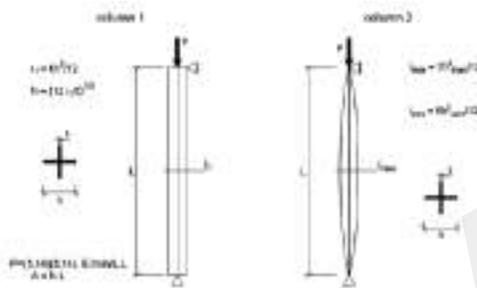
Gambar 15.19 Balok Terjepit dengan Dimensi Mengikuti Diagram Momen

b. Batang Tekan

Problem batang tekan adalah gejala tekuk, yaitu gejala yang terjadi pada batang yang menerima gaya tekan *centris*, tetapi sebelum kapasitas tegangan tekannya tercapai batang tersebut tertekuk. Oleh karena itu, batang tekan selalu diperhitungkan kekuatannya dan kekakuan terhadap tekuk. Kekakuan batang selalu berkaitan dengan momen inersianya.

Sandaker membuat perbandingan efisiensi batang tekan dengan penampang melintang berbentuk +, model pertama dimensi penampang

melintangnya seragam di seluruh panjang batang, model yang kedua dimensi penampangnya tidak seragam di seluruh panjang batang dengan dimensi di tengah panjang batang mempunyai dimensi maksimal dan dimensi di kedua ujung yang tertumpu dengan sendi mempunyai dimensi minimal, sehingga batang berbentuk meruncing (Gambar 15.20).

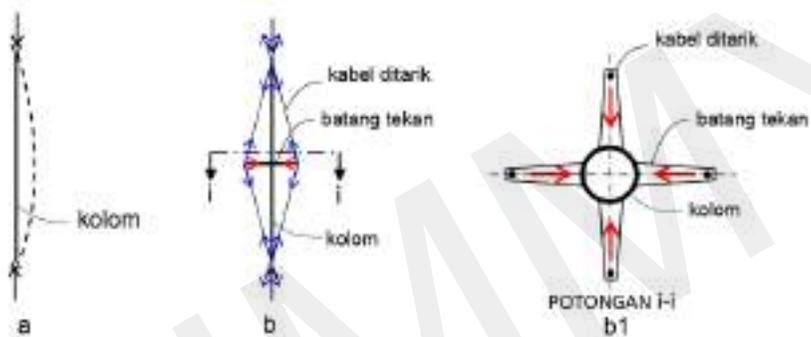


Gambar 15.20 Model Perbandingan Batang Tekan

Gradasi dimensi kolom yang meruncing ditentukan berdasarkan besarnya momen inersia (I). Ketebalan (t) kedua model dibuat sama besar, sedangkan dimensi kolom meruncing di tengah panjangnya (h_2) dibuat lebih besar daripada h_1 model kolom 1 agar kapasitas dukung beban model kolom 2 sama dengan model kolom 1, diperoleh $h_2 = 1,12h_1$, sedangkan dimensi h_2' di ujung batang dianggap sama dengan $t = 0,38h_1$. Momen inersia minimal dibanding momen inersia maksimal model 2 adalah 1:25. Perbandingan efisiensi kedua model tersebut dapat diketahui dari perbandingan beratnya, dan bisa diwakili oleh luas permukaan batangnya. Bila luas permukaan batang model 1 = hL , diperoleh luas permukaan batang model 2 = $0,87hL$. Hal ini menunjukkan batang tekan model 2 lebih efisien karena mempunyai berat yang lebih kecil daripada model 1, namun kapasitas dukung bebannya sama.

Pemecahan lain untuk gejala tekuk pada kolom tekan adalah dengan “memperpendek” panjang tekuk kolom. Agar kolom dapat berdiri sepanjang tingginya tanpa terganggu oleh balok, pemendekan kolom dapat dilakukan dengan memberi gaya tekan di sekeliling kolom pada jarak tertentu melalui kabel tarik (Gambar 15.21). Kolom akan

mengalami tekuk bila mendapat gaya tekan yang melampaui tegangan tekuknya. Pada kolom b, di 4 sisi kolom dipasang kabel baja yang dihubungkan dengan kolom melalui batang tekan. Bila kabel diberi gaya tarik secara aktif, batang tekan akan menerima gaya tekan dan menekan 4 sisi kolom (Gambar 15.21b). Pada posisi gaya tekan ini, deformasi tekuk tertahan sehingga panjang tekuk kolom menjadi $\frac{1}{2}$ tinggi kolom. Gambar 15.21b1 adalah potongan melintang di bagian batang tekan. Bila kolom sangat tinggi atau dikehendaki kolom yang langsing, jumlah batang tekan dapat ditambah untuk memperpendek panjang tekuk kolom.



Gambar 15.21 Memperkaku Kolom terhadap Tekuk

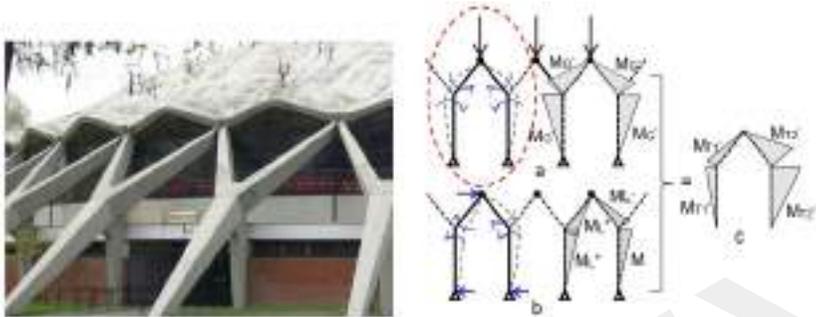
c. Kolom Y Palazzetto Dello Sport

Gambar 15.22a dan Gambar 15.22b menunjukkan bahwa pada rangkaian kolom-kolom Y bagian yang dilingkari merupakan portal 3 sendi. Bila ditinjau sebuah portal 3 sendi secara individual, ketika menerima beban gravitasi terpusat di puncaknya di dalam batang-batangnya terjadi lenturan portal dan bekerja momen negatif (M_G^-) seperti pada Gambar 15.22a kanan.

Gambar B15.22b menunjukkan bahwa ketika mendapat beban lateral ke arah kanan, maka terjadi lenturan portal dan pada leher kolom Y bekerja momen maksimal positif (M_L^+) dan momen maksimal negatif (M_L^-).

Gambar 15.22c menunjukkan diagram momen total $M_G + M_L$, hasilnya momen total M_T^1 dan M_T^2 , untuk gaya lateral ke arah kanan.

M_{T1}^- adalah hasil = penjumlahan $M_G^- + M_L^+$, sedangkan M_{T2}^- adalah hasil = penjumlahan $M_G^- + M_L^-$. Bila arah gaya lateral berbalik ke arah kiri, M_{T1}^- lebih besar daripada M_{T2}^-



Gambar 15.22 Kolom Palazzetto Dello Sport: (a) Deformasi Lentur Portal (Kiri), dan Diagram Momen terhadap Gaya Gravitasi (Kanan); (b) Deformasi Lentur Portal (Kiri), dan Diagram Momen terhadap Gaya Lateral (Kanan); (c) Diagram Momen Total terhadap Beban Gravitasi dan Lateral ke Arah Kanan

Sumber: <https://cityseeker.com/rome/394388-palazzetto-dello-sport>

Untuk bentuk lokal bangunan Palazzetto Dello Spor ini, Nervi mengartikulasikan bentuk kolom Y tersebut mengikuti diagram momennya, di mana dimensi tiap penampang kolom disesuaikan dengan besarnya momen yang bekerja, sehingga dihasilkan dimensi terbesar terletak pada leher kolom Y, dan dimensi pada tumpuan sendi serta join sendi di puncak kolom adalah paling kecil.

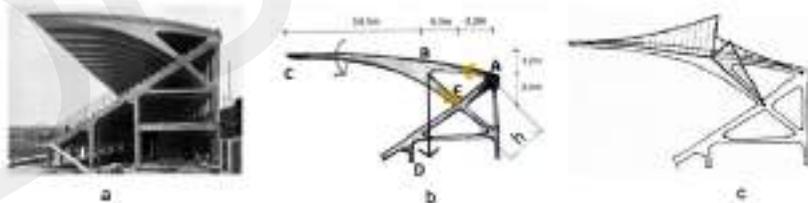
Desain kolom Y pada bangunan Palazzetto Dello Sport ini menunjukkan bagaimana efisiensi struktural dapat menampilkan estetika kolomnya.

The Giovanni Berta Sports Stadium atau “Artemio Franchi” Florence Municipal Stadium, Pier Liugi Nervi Sekitar 1930

Struktur atap tribun penonton The Giovanni Berta Sports Stadium terdiri dari 15 buah kantilever besar yang terbentang sepanjang 14,5 m ke “depan” dan 7,5 m ke “belakang”, dan struktur penutup atapnya adalah *barrel shell* beton bertulang dengan kelengkungan yang tipis,

bertumpu pada deretan kantilever- kantilever tersebut dengan ketebalan sekitar 10 cm. Struktur atap didesain terintegrasi dengan struktur tribunnya sebagai kesatuan yang utuh (Gambar 15.23 a dan b). Bentuk kantilever yang menebal di bagian tumpuannya merupakan artikulasi dari diagram momen pada kantilever tersebut dan tegangan lentur di dalamnya. Bila ditinjau dari titik E, panjang bentang kantilever sangat besar, yaitu 18,5 m. Maka, besar momen maksimal kantilever tersebut sangat besar. Ide Nervi untuk “memecah” balok kantilever dari titik B menjadi 2 batang yang mengecil menuju ke titik tumpuan A dan E adalah untuk memperoleh kedalaman struktur (h) yang besar sehingga tegangan tarik dan tekan karena momen kantilever menjadi kecil dan dibutuhkan batang tarik serta tekan yang kecil (Gambar 15.23b). Dengan konfigurasi tersebut, resultan gaya berat sendiri struktur keseluruhan berada di dalam bentang kolom-kolom yang tertumpu fondasi, sehingga tidak menghasilkan reaksi tarik (*up-lift*) dan tidak perlu penjangkaran fondasi.

Penyesuaian dimensi balok kantilever dengan besarnya tegangan lentur di setiap penampang melintangnya dan bentuk portal tersebut, diperoleh struktur yang efisien, di mana jumlah material minimal (sesuai dengan kebutuhannya) dan mampu memikul beban kantilever yang besar. Contoh ini menunjukkan bahwa efisiensi struktur yang dieksplorasi dari mekanika gaya dapat menghasilkan bentuk kreatif yang estetik.



Gambar 15.23 Artemio Franchi Florence Municipal Stadium Didesain oleh Pier Luigi Nervi Sekitar 1930

Sumber: <https://formfindinglab.wordpress.com/2019/02/08/pier-luigi-nervi-in-italy-part-2-cantilevering-stadium-roofs/>, diunduh November 2022

d. Kolom/Batang Tekan Meruncing dan Prategang



Gambar 15.24 Kolom Tekan Berbentuk Meruncing



Gambar 15.25 Kolom Tekan dengan Pengaku Kabel Prategang

Gambar 15.24 menunjukkan contoh kolom tekan berbentuk meruncing, Gambar 15.25 menunjukkan kolom tekan yang perkakuan terhadap tekuk dilakukan dengan memberi gaya tekan aktif di sekeliling kolom dengan menggunakan kabel yang ditarik (prategang) sehingga memberi tekanan pada kolom melalui batang penghubung kabel dengan kolom.

1) International Terminal Waterloo

International Terminal Waterloo didesain oleh Sir Nicholas Grimshaw, adalah stasiun kereta api yang pada dasarnya berfungsi seperti bandara yang dapat melayani 15 juta penumpang kereta api internasional per tahun dan menjadi tempat persimpangan beberapa jurusan kereta api, terletak di pusat kota London, di lingkungan perkotaan terbatas yang dapat diakses melalui jalan darat dan kereta api (https://en.wikipedia.org/wiki/Waterloo_International_railway_station, diunduh Desember 2022).

Bangunan ini mempunyai lima buah peron dengan panjang 394 m, cukup untuk menampung 20 gerbong kereta. Di bawah lantai peron terdapat 3 buah lantai, yaitu *lobby* keberangkatan, *lobby* kedatangan, dan lantai parkir di basemen. Bangunan 3 lantai di bawah peron tersebut menggunakan struktur rangka pemikul momen dengan material beton bertulang. Atap bangunan berbentuk lengkung busur asimetri apabila dilihat dari arah masuknya kereta, membentuk “terowongan” untuk menaungi peron. Penutup atap bagian barat adalah kaca untuk memberikan pemandangan dan penerangan pada peron.

Sistem struktur atapnya adalah busur 3 sendi asimetri, di mana

lengkung yang tajam berada di sebelah barat (dalam Gambar 15.26 dan Gambar 15.30 di sebelah kiri), dan lengkung yang landai berada di sebelah timur. Dalam analisis struktur, beban mati bekerja sebagai beban merata penuh (q_1), sedangkan beban hujan/salju (q_2) diambil yang paling merugikan struktur, yaitu dianggap bekerja secara asimetri, dan beban angin (q_3) bekerja sebagai gaya lateral. Maka, terjadi lenturan seperti pada Gambar 15.30a, dan diagram momen seperti pada Gambar 15.30b. Besarnya momen di masing-masing tumpuan sendi dan di join sendi puncak busur adalah nol, momen negatif terbesar berada di tengah lengkung busur antara tumpuan sendi sebelah kiri dan sendi di puncak busur, momen positif terbesar berada di tengah lengkung busur antara tumpuan sendi sebelah kanan dan sendi di puncak busur.



Gambar 15.26 Eksterior Waterloo International Station

Sumber: https://zh.wikipedia.org/wiki/File:London_Waterloo_former_Eurostar_station.JPG



Gambar 15.27 Interior Waterloo International Station

Sumber: https://www.researchgate.net/figure/The-Waterloo-International-Railway-Station-design-by-Nickolas-Grimshaw-Conceived-as-a_fig4_320926142



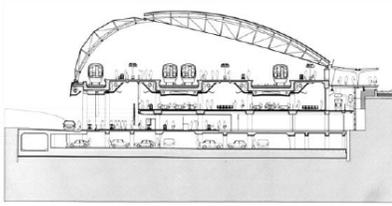
Gambar 15.28 Atap Metal dan Kaca

Sumber: <https://architectuul.com/architecture/waterloo-international-railway-station>



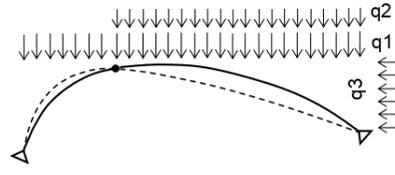
Gambar 15.29 Struktur Busur *Space Truss*

Sumber: <https://cargocollective.com/abovebelowdesign/STRUCTURAL-ANALYSIS-WATERLOO-INTERNATIONAL-TERMINAL-2007>



Gambar 15.30a Potongan International Terminal Waterloo, London

Sumber: <https://miesarch.com/work/2647>, diunduh November 2002



Gambar 15.30b Pembebanan dan Lenturan Busur



Gambar 15.30c Diagram Momen

Struktur busur tersebut menggunakan *space truss* yang terdiri dari 1 lajur batang tekan dari pipa baja dan 2 lajur batang tarik dari baja padat (bar) yang langsing. Bentuk *truss* tersebut didesain mengikuti diagram momennya, yaitu di posisi momen nol jarak antara batang tekan dan batang tarik adalah nol, sedangkan di posisi momen terbesar jarak antara batang tekan serta batang tarik adalah paling jauh, sehingga diperoleh efisiensi struktur yang maksimal. Batang tekan dan batang tarik secara visual tampak dengan jelas, di mana batang tekan berdimensi lebih besar sesuai dengan sifat batang tekan yang berpotensi mengalami perilaku tekuk, dan batang tarik berdimensi langsung sesuai dengan sifat batang tarik yang tidak mengalami perilaku tekuk.

Sir Nicholas Grimshaw telah mengartikulasikan bentuk lokal dari busur *space truss* dengan memanfaatkan efisiensi struktural dan menghasilkan bentuk busur yang menarik.

2) Richard Rogers Drawing Gallery



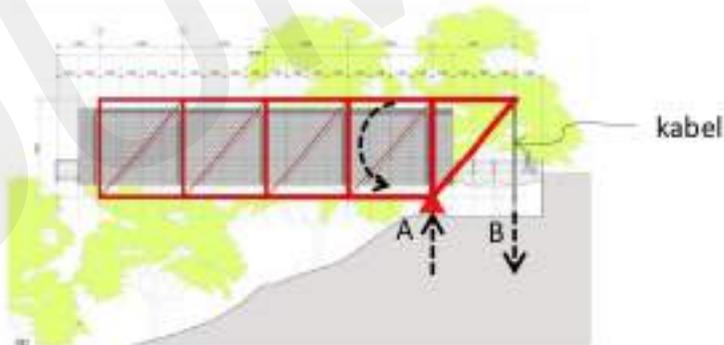
Gambar 15.31a Richard Rogers Drawing Gallery, Kantilever Space Truss



Gambar 15.31b Richard Rogers Drawing Gallery, Tumpuan Tekan dan Kabel Tarik

Sumber: <https://www.archdaily.com/957660/the-richard-rogers-drawing-gallery-rogers-stirk-harbour-plus-partners>, diunduh Desember 2022

Richard Rogers Drawing Gallery adalah ruang galeri seluas 120 m², terletak di kebun anggur Château La Coste di lereng bukit dan di antara pepohonan menghadap ke reruntuhan kuno La Quille dan Taman Nasional Luberon. Bangunan didesain berbentuk kantilever yang membentang 27 m di atas lereng bukit dan tumpuannya diusahakan seminimal mungkin mencederai tanahnya.



Gambar 15.31c Richard Rogers Drawing Gallery, Prinsip Struktur

Struktur bangunannya terkesan ringan seperti melayang. Rogers mendesain kantilever panjang tersebut dengan melakukan triangulasi, yaitu menggunakan struktur *space truss* dari pipa baja. Bangunannya berbentuk kotak panjang yang berada di dalam dan dipikul oleh *space truss* tersebut. *Space truss* tersebut ditumpu di 2 buah titik tumpuan tekan (A) tepat di tepi lereng, dan untuk melawan momen kantilever yang besar, di bagian sisi berlawanan dengan kantilever dipasang kabel baja yang ditarik dan dijangkar ke dalam tanah di 2 buah titik tumpuan (B) berjarak 6 meter terhadap tumpuan tekan, sehingga hanya ada 4 buah titik yang mencederai tanah. Arah batang diagonal dipilih arah yang menghasilkan gaya tarik sehingga dimensinya kecil.

Dilihat dari proporsinya, tampak dimensi batang-batang sangat kecil dibandingkan dengan panjang kantilevernya. Hal ini menunjukkan bahwa triangulasi dapat menghasilkan struktur yang efisien secara struktural.

e. Prategang

Balok prategang adalah balok yang diberi tegangan tekan awal untuk meningkatkan kekuatannya. Pada awalnya digunakan untuk konstruksi beton, disebut balok prategang. Prinsip pemberian tegangan tekan awal tersebut dilakukan dengan memasang tendon baja di dalam balok beton, kemudian tendon tersebut diberi gaya tarik, dan ketika sudah dicapai tegangan tarik yang direncanakan, tendon tersebut “dikunci” di kedua ujungnya dan tarikan pada tendon dilepas. Oleh karena tendon terkunci, maka ketika akan kembali ke panjang asalnya akan mentransfer gaya tekan ke dalam balok beton. Tendon tersebut diletakkan pada posisi daerah tarik balok beton, sehingga di dalam balok beton prategang bekerja dominan tegangan tekan + tegangan tarik yang kecil, atau di seluruh penampangnya hanya bekerja tegangan tekan saja.

Oleh karena beton merupakan material tekan, maka kapasitas tekannya efektif bekerja secara optimal, dan dimensi balok menjadi kecil. Ada tiga macam *layout* tendon seperti pada Gambar 15.32, Gambar 15.33, Gambar 15.34, tendon lurus, melengkung parabolik, dan poligan. Secara prinsip, *layout* tendon parabolik dan poligon memberikan gaya angkat mengimbangi beban gravitasi sehingga lendutan balok menjadi kecil. Namun, materi ini tidak dibahas lebih jauh dalam buku ini. Materi

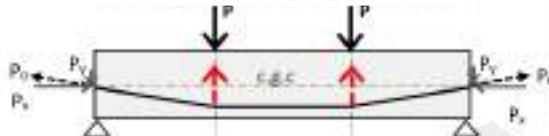
beton prategang dapat dipelajari di dalam buku *Struktur Bangunan Tinggi* (Maer, B.W., et al., t.t.).



Gambar 15.32 Balok Prategang Tendon Lurus



Gambar 15.33 Balok Prategang Tendon Parabolik

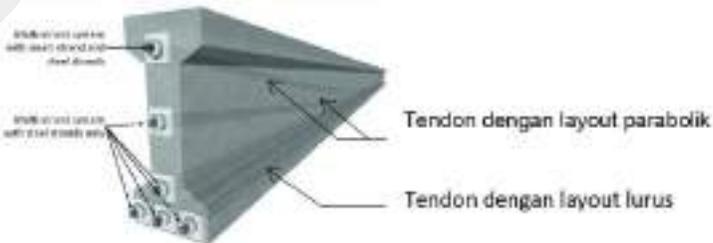


Gambar 15.34 Balok Prategang Tendon Poligon

Keterangan:

- P_0 = Gaya tarik prategang pada tendon
- P_x dan P_y = Transfer gaya tekan pada balok
- Untuk tendon lurus P_0 dan P_x berimpit, tergambar P_x saja

Penggunaan beton prategang tidak terbatas untuk balok saja, namun juga diterapkan untuk rangka portal (pada kolom dan baloknya) dan untuk pelat lantai/atap. Selain itu, prategang juga tidak terbatas hanya diterapkan untuk konstruksi beton saja, namun juga untuk konstruksi baja. Balok baja prategang pada umumnya menerapkan tendon dengan *layout* poligon untuk meminimalkan lenturan/lendutan balok dengan memberikan gaya angkat. Gambar 15.36 menunjukkan balok baja prategang yang mampu memikul beban yang sangat berat, 1 blok beban beton kurang lebih 1 m^3 , sekitar 2,4 ton. Uji coba balok baja prategang ini menunjukkan pemberian prategang dapat meningkatkan kapasitas dukung beban dan efisiensi balok.



Gambar 15.35 Contoh Girder Jembatan Prategang Multiple Tendon

Sumber: https://www.researchgate.net/figure/Prestressed-concrete-PSC-girder-with-multiple-tendons_fig3_321933178, diunduh Desember 2022



Gambar 15.36 Uji Pembebanan Balok Baja Prategang Tendon Poligon

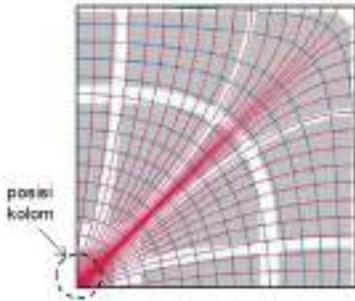
f. Pelat Lantai Menggunakan *Ribbed-Slab* Berpola Garis Isostatik

Garis isostatik pada pelat lantai adalah garis tegangan utama maksimum dan garis tegangan sekunder yang terbentuk karena bekerjanya momen lentur. Ada beberapa macam *ribbed slab*, seperti *one-way rib*, *two-way rib* (*waffle-slab*), *skew grid ribbed-slab*, dan yang paling efisien adalah *ribbed-slab* berpola garis isostatik. Pada sistem *ribbed-slab* berpola garis isostatik, *rib-rib* diletakkan pada garis isostatik tersebut. Pola garis isostatik tergantung dari: bentuk tumpuan (kolom atau dinding/balok), jumlah tumpuan, tata letak tumpuan (mengikuti *grid* yang teratur atau penempatan bebas), dan proporsi denah. Sistem ini pertama kali diterapkan pada lantai bangunan Gatti Wool Factory Warehouse, Pier Luigi Nervi (1953, Rome). Gambar 15.37 dan Gambar 15.38 adalah struktur lantai *ribbed-slab* berpola garis isostatik pada bangunan Palace of Labor dan Large Sports Palace. Pola alur *rib* pada struktur lantai 3 buah bangunan tersebut berbeda-beda. Masing-masing struktur *ribbed-slab* tampil estetik, dan secara struktural efisien.

1) Gatti Wool Factory Warehouse

Lantai bangunan ini menggunakan sistem *ribbed-slab* berpola garis isostatik. Jarak antarkolom adalah 5m, struktur lantai ini memikul beban mesin yang berat. Gambar 15.37a menggambarkan pola garis isostatik 1/4 pelat lantai Gatti Wood Factory. Garis merah menunjukkan garis tegangan utama terhadap momen lentur, sedangkan garis warna biru menunjukkan garis tegangan sekunder. Garis blok putih adalah

perkiraan posisi *rib* mengikuti pola isostatiknya. Gambar 15.37a dan b, Gambar 15.38, serta Gambar 15.39 menunjukkan penerapan *ribbed-slab* pola garis isostatik pada struktur lantai Gatti Wood Factory, Place of Labor, dan Large Sport Place.



Gambar 15.37a Pola garis Isostatik Hasil Percobaan Laboratorium, Gatti Wood Factory



Gambar 15.37b Struktur Lantai *Ribbed-Slab* Berpola Garis Isostatik, Gatti Wood Factory

Sumber: http://formfindinglab.princeton.edu/wp-content/uploads/2011/09/Nervi_ribbed_floors.pdf, diunduh Des 2022



Gambar 15.38 Struktur Lantai *Ribbed-Slab* Berpola Garis Isostatik Palace of Labor



Gambar 15.39 Struktur Lantai *Ribbed-Slab* Berpola Garis Isostatik Large Sports Palace

2) *Stressed Skin Structures*

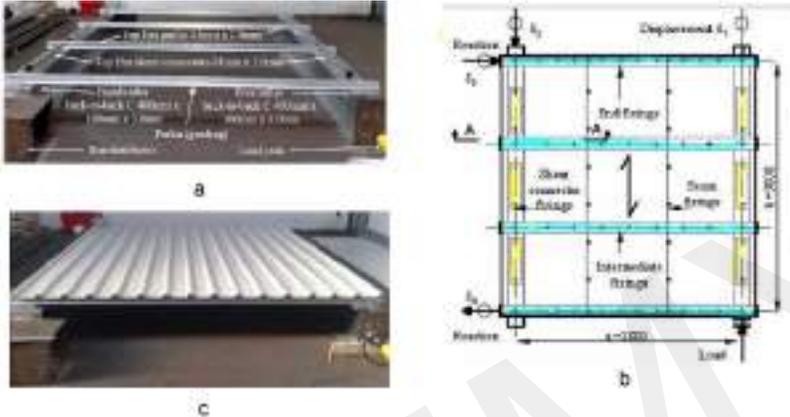
Stressed skin structure adalah struktur lembaran/pelat tipis yang bersama dengan rangka bekerja menahan tegangan geser pada bidangnya sebagai diafragma. Material yang digunakan untuk pelatnya pada umumnya adalah: *plywood*, pelat aluminium, pelat gelombang baja ringan; sedangkan material untuk rangkanya adalah kayu, batang aluminium, batang baja ringan dengan tipe-tipe profil, antara lain, *hollow*

square, tipe Z, atau tipe *top-hat* (U bersayap), atau tipe C, tergantung penggunaannya. *Stressed skin structure* banyak digunakan untuk membuat badan dan sayap pesawat terbang, di mana material yang umum digunakan adalah *plywood* dengan rangka kayu, atau pelat aluminium dengan rangka aluminium/baja. Sementara itu, pada bangunan, lebih banyak digunakan untuk selubung bangunan rendah, seperti pabrik atau gudang yang dibangun dengan konstruksi baja, sebagai elemen dinding dan atap. Oleh karena *stressed skin structure* sudah merupakan diafragma, maka tidak diperlukan *bracing diagonal* untuk menstabilkan struktur. Untuk *gording* bisa digunakan baja ringan tipe profil C, Z, atau *top-hat*. Dari tiga tipe tersebut, *top-hat* mempunyai kekakuan terhadap geser pada *panel stressed skin* yang paling besar.

Pemasangan pelat metal gelombang pada konstruksi atap baja ringan dapat dijelaskan dari Gambar 15.40 a, b, dan c. Gambar tersebut adalah model uji coba geser pada *panel stressed skin*, namun dapat dimanfaatkan untuk menjelaskan pemasangan tersebut karena konstruksinya sama dengan konstruksi *stresses skin structure* pada atap bangunan. Susunan komponen-komponennya: paling bawah adalah *rafter* atau kuda-kuda, di atasnya adalah *gording* (*purlin*), di atas *rafter*/kuda-kuda dipasang *shear connector*, dan yang paling atas adalah pelat metal gelombang. Untuk konstruksi *stressed skin*, pelat metal gelombang diikat pada *gording* dan *shear connector* dengan *self tapping screw*, serta pertemuan tiap pelat metal gelombang yang sejajar dengan *rafter* diikat dengan paku keling (*rivet*). Pemasangan *self tapping screw* diletakkan di lembah gelombang, agar mampu menahan tegangan geser dengan baik. Dengan diikat di keempat sisinya, dan pemasangan *self tapping screw* tersebut, maka pelat metal gelombang bersama dengan *gording*, dan *rafter* dapat bersinergi menahan tegangan geser pada bidangnya. Pemasangan tersebut berbeda dengan pemasangan pelat metal gelombang *non-stressed skin*, di mana pelat metal gelombangnya hanya diikat pada *gording* saja, dan *self tapping screw* ditempatkan di puncak gelombang untuk mengurangi risiko bocor terhadap air hujan. Prinsip pemasangan dinding pelat metal gelombang *stressed skin* sama dengan pemasangan penutup atap.

Vacev, Todor, *et al.* (2020), membuat penelitian perbandingan antara selubung *stressed skin steel* dengan *bracing* sebagai elemen penstabil

dan pengaku konstruksi rangka baja terhadap gaya *lateral*. Diperoleh kesimpulan bahwa *stressed skin structure* menguntungkan bila ditinjau dari tegangan yang bekerja, dari deformasi yang terjadi, dan dari segi ekonomis.



Gambar 15.40 Model Uji Coba Susunan Panel Atap *Stressed Skin Steel*

Sumber: Wrzesien A.M., *et al.*, 2018; <https://core.ac.uk/download/pdf/229302778.pdf>, diunduh Desember 2022

Dari enam teknik mengartikulasikan penampang komponen struktur yang diuraikan di atas, tampak bahwa tidak semuanya memberikan dampak pada bentuk/tampilan struktur. Struktur prategang dan *stressed skin structure* lebih berpengaruh pada besarnya dimensi struktur; pelat lantai *ribbed slab* berpola garis isostatik memberikan tampilan yang unik di dalam interior bangunannya; triangulasi memberikan ekspresi ringan dan kuat; sedangkan bentuk struktur mengikuti variasi tegangan pada seluruh panjangnya paling menyatu dengan bentuknya dan menampilkan ekspresi yang unik.

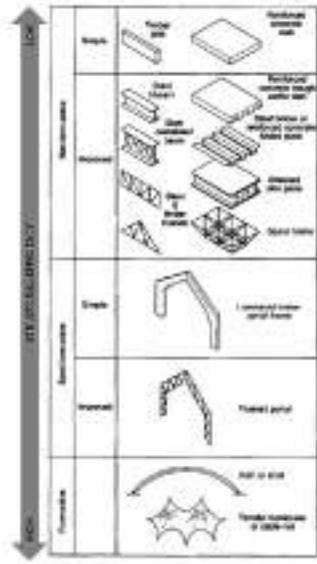
B. Efisiensi dari Segi Teknologi

Efisiensi teknologi terkait dengan tingkat kerumitan atau kompleksitas pengerjaan konstruksi bangunannya. Struktur efisien secara teknologi apabila tingkat kerumitan/kompleksitas pengerjaannya rendah.

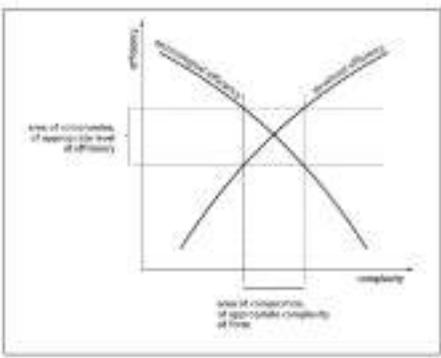
Hal yang memengaruhi efisiensi secara teknologi adalah tingkat kompleksitas pelaksanaan bangunan sebagai berikut.

1. Bentuk geometri penampang melintang maupun membujur komponen/elemen struktur yang sederhana mempunyai tingkat kompleksitas lebih kecil dibandingkan dengan bentuk geometri yang rumit/tidak beraturan. Contohnya, balok dengan penampang persegi panjang tingkat kompleksitas pengerjaannya lebih rendah dibandingkan dengan balok dengan bentuk penampang I, dan rangka batang.
2. Bentuk geometri struktur/elemen struktur yang lurus mempunyai tingkat kompleksitas lebih kecil dibandingkan bentuk yang lengkung. Contohnya, balok lurus tingkat kompleksitasnya lebih rendah dibandingkan balok berbentuk busur lengkung.
3. Bentuk geometri struktur/elemen struktur yang datar mempunyai tingkat kompleksitas lebih kecil dibandingkan bentuk yang lengkung atau bergelombang. Contohnya, struktur pelat datar tingkat kompleksitasnya lebih rendah dibandingkan struktur *vault* dan *barrel shell*.
4. Bentuk geometri struktur/elemen struktur lengkung satu arah tingkat kompleksitasnya lebih kecil dibandingkan dengan lengkung dua arah. Contohnya, elemen struktur pelat *barrel shell* tingkat kompleksitasnya lebih rendah dibandingkan struktur kubah.
5. Struktur yang menuntut geometri dengan presisi yang tinggi tingkat kompleksitasnya tinggi. Contohnya, struktur membran.

Tingkatan efisiensi struktural dari tipe-tipe struktur dapat dilihat dalam Gambar 5.41. Efisiensi struktural dan efisiensi secara teknologi saling bertolak belakang, di mana semakin tinggi efisiensi strukturalnya, semakin rendah efisiensi secara teknologinya (Gambar 5.42). Sering kali dalam desain arsitektur, untuk mengurangi berat struktur hanya dapat dicapai melalui teknologi yang tingkat kompleksitasnya tinggi, untuk hal tersebut arsitek perlu mencari solusi yang kompromistis (lihat Gambar 5.42).



Gambar 5.41 Tingkat Efisiensi Struktural
 Sumber: Macdonald, J., 2001.



Gambar 5.42 Grafik Konflik antara Efisiensi Struktural vs. Efisiensi secara Teknologi
 Sumber: Sandeker, 2008.

DUMMY

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR PUSTAKA

- Engel, Heino. 1977. *Structure Systems*. Germany: Suddeutsche Verlagsanstalt, Ludwigsburg. ISBN 3-421-02134-1.
- Garrison, Philip. 2005. *Basic Structures for Engineers and Architects*. Blackwell Publishing Ltd. ISBN 10 1-4051-2053-3.
- Greenspec. Crosslam Timber / CLT- Fire Resistance and Rating, <https://www.greenspec.co.uk/building-design/crosslam-timber-fire-resistance-and-rating/#:~:text=One%20of%20the%20major%20advantages,30%2C%2060%20and%2090%20minutes>.
- ICC Digital Codes. 2021 Mass Timber Buildings and the IBC® (IBC®), <https://codes.iccsafe.org/content/MTBIBC2021P2>.
- Lestari, Ratri Yuli. CLT (Cross Laminated Timber): Produksi, Karakteristik dan Perkembangannya, <https://www.scribd.com/document/431929233/CLT>.
- Lin, T.Y., Stotesbury, Sidney D. 1981. *Structural Concepts and Systems for Architects and Engineers*. USA: John Wiley & Sons.
- Macdonald, Angus J. 2001. *Structure and Architecture*. 2nd Edition. Architectural Press. ISBN 0-7506-4793-0.

Moore, Fuller. 1999. *Understanding Structures*. USA: WCB/McGraw-Hill. ISBN 0-07-043253-8.

Sandaker, Byorn Norman. 2008. *On Span and Space, Exploring Structure in Architecture*. New York: Routledge. ISBN 0-203-00394-2, Master E-Book ISBN.

Schueller, Wolfgang. 1983. *Horizontal Span Building Structures*. John Wiley & Sons. ISBN-10: 0-471-86756-X.

BIODATA PENULIS



Bisatya W. Maer, lahir di Surabaya pada tahun 1949. Pada tahun 1976, menerima gelar Insinyur dari Fakultas Teknik Arsitektur Institut Teknologi 10 Nopember Surabaya; pada tahun 2010, menerima gelar Magister Teknik dari Program Pascasarjana Universitas Kristen Petra, Surabaya.

Karier sebagai dosen di Jurusan Teknik Arsitektur Universitas Kristen Petra Surabaya dimulai sejak tahun 1980 hingga sekarang. Pernah mengampu mata kuliah merancang di semester 2 dan semester 7, mata kuliah struktur bangunan bertingkat tinggi, struktur bangunan bentang lebar, struktur bangunan bertingkat rendah, struktur bangunan bertingkat menengah, dan bentuk-struktur-material.

Posisi akademik saat ini adalah Lektor pada Program Studi Arsitektur Universitas Kristen Petra, Surabaya, Indonesia. Penulis pernah memublikasikan beberapa tulisan di Jurnal Nasional. Di bidang administrasi universitas, pernah menjabat sebagai Ketua Jurusan Arsitektur dan Kepala Bidang Struktur Bangunan. Di bidang

professional, pernah mendesain dan melaksanakan pembangunan beberapa bangunan, seperti kantor, sekolah, rumah tinggal, *resort*, kolam renang, serta renovasi bangunan gereja.



Agus Dwi Hariyanto, lahir di Surakarta pada tahun 1973. Pada tahun 1998, menerima gelar Sarjana Teknik dari Jurusan Teknik Arsitektur Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada Yogyakarta; pada tahun 2005, menerima gelar *Master of Science (Building Science)* dari Department of Building National University of Singapore; pada tahun 2022, menerima gelar Doktor dari Sekolah Arsitektur, Perencanaan, dan Pengembangan Kebijakan (SAPPK) Institut Teknologi Bandung; dan pada tahun 2024, menerima gelar profesi Insinyur dari Program Profesi Insinyur Universitas Kristen Petra, Surabaya.

Karier sebagai dosen di Program Studi Arsitektur FTSP Universitas Kristen Petra Surabaya dimulai sejak tahun 1999 hingga sekarang. Sebagai dosen, pernah mengampu mata kuliah struktur di semester 1, merancang di semester 4 dan semester 7, mata kuliah bentuk-struktur-material, dan mata kuliah struktur bangunan bertingkat rendah. Selain itu, penulis juga mengajar sebagai dosen di Program Magister Arsitektur Universitas Kristen Petra, dengan mengampu mata kuliah *workshop* dan *green building technology*.

Jabatan akademik saat ini adalah Lektor pada Program Studi Arsitektur Universitas Kristen Petra, Surabaya, Indonesia. Publikasi ilmiah di berbagai jurnal nasional dan internasional. Penulis juga pernah menjabat sebagai Ketua Program Studi Arsitektur Universitas Kristen Petra periode 2006–2013 dan saat ini menjabat sebagai Ketua Program Studi Magister Arsitektur Universitas Kristen Petra periode 2021–2025. Di bidang profesional pernah mendesain beberapa bangunan public, seperti Gerbang Kota dan Menara Pandang Kota Bima, Kawasan Wisata Pantai Lawata Kota Bima, Masjid Terapung Kota Bima, Gedung Pastori GKI Sidoarjo, dan Pengembangan SMP Teologi Pelangi Kristus.