

BAB 2

TINJAUAN KEPUSTAKAAN

2.1 Jembatan Komposit

Jembatan adalah sarana transportasi yang menghubungkan dua bagian jalan yang terputus oleh adanya rintangan-rintangan seperti lembah yang dalam, alur sungai, saluran irigasi dan pembuang, jalan yang melintang tidak sebidang, dan lain-lain (Sembiring Lea). Berbagai jenis jembatan telah dikembangkan dengan beragam desain dan bahan konstruksi. Setiap jenis jembatan didesain sesuai dengan kekuatan yang akan dipikul oleh jembatan, semakin banyak dan besar beban yang akan dipikul oleh jembatan semakin rumit struktur jembatan tersebut.

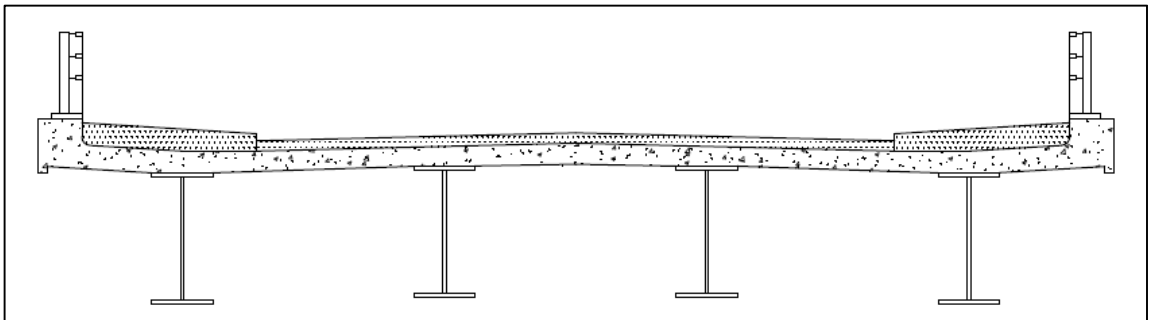
Jembatan komposit adalah jembatan yang mengkombinasikan dua material atau lebih dengan sifat bahan yang berbeda dan membentuk satu kesatuan sehingga menghasilkan sifat gabungan yang lebih baik. Jembatan komposit yang umum digunakan adalah kombinasi antara bahan konstruksi baja dengan beton bertuang, yaitu dengan mengkombinasikan baja sebagai *deck* (gelagar) dan beton bertulang sebagai plat lantai jembatan. Gelagar komposit baru berfungsi sebagai komposit apabila beton yang berada di atas gelagar tersebut mengeras dan bekerja sama dengan gelagar menjadi satu kesatuan dalam suatu struktur.

Ada dua jenis tipe jembatan komposit yang umum digunakan sebagai desain, yaitu tipe *multi girder bridge* dan *ladder deck bridge*, lebih lanjut mengenai kedua tipe jembatan tersebut akan dibahas dalam sub-bab selanjutnya. Penentuan pemilihan jenis jembatan yang akan digunakan tergantung pada pertimbangan ekonomi dan faktor

spesifik dari medan konstruksi seperti akses transportasi menuju lapangan dan jenis dari tiang penyangkang yang berada di tengah bentang.

2.1.1 *Multi-girder bridge*

Jembatan dengan *multi-girder deck* menggunakan beberapa baja *girder* memanjang (*longitudinal girder*) yang ukuran dan jenisnya sama disusun dengan jarak yang sama sepanjang lebar jembatan seperti yang terlihat pada gambar 2.1 dibawah ini. Plat lantai dari beton bertulang membentang secara tranfersal diatas baja *girder* dan pada kedua sisi ujung membentuk kantilever yang berguna sebagai trotoar. Aksi komposit antara plat lantai beton bertulang dan *longitudinal girder* terbentuk oleh *sear conector* yang dilas disisi atas *flange* profil baja *girder* dan dicor menyatu dengan plat lantai. Konstruksi jembatan *Multi-girder* hanya digunakan untuk jembatan jenis *single spans continuous multiple spans*. dan *continuous multiple spans*.



Sumber: *Composite Highway Bridge Design*

Gambar 2.1 Potongan melintang dari *multi-girder bridge*

Susunan dari jembatan *multi-girder* seperti yang terlihat digambar 2.1 adalah umum digunakan sebagai desain. Pada desain diatas digunakan 4 buah *longitudinal girder* disusun dengan jarak yang sama sepanjang lebar jembatan. Jumlah *longitudinal girder* bisa berkurang atau bertambah sesuai dengan lebar jembatan dan serta mutu baja

girder yang digunakan. Lebih lanjut mengenai setiap komponen (bagian) dari jembatan *multi-girder* adalah sebagai berikut:

a. Girder Utama (*Longitudinal Girder*)

Girder utama pada umumnya menggunakan plate *girder* profil I, namun untuk jembatan dengan bentang yang kecil memungkinkan juga untuk menggunakan *Univesal Beam* yaitu baja dengan profil yang memiliki dimensi yang universal dan biasa dipabrikan oleh berbagai perusahaan baja. Desain jembatan yang didesain oleh bina marga pada umumnya menggunakan *Univesal Beam* dan biasa diaplikasikan di daerah pegunungan yang daerahnya banyak terputus oleh jurang-jurang kecil.



Sumber: courtesy of Corus - Westgate bridge, Gloucester

Gambar 2.2 Jembatan *multi-girder* dengan menggunakan *plate girder*

Univesal beam yang bisa didapat dengan mudah dipasaran memiliki tinggi maksimum 914 mm namun hingga saat ini banyak pabrik yang mulai memproduksi dengan tinggi maksimum 1016 mm. Balok *girder* universal cukup kuat menahan

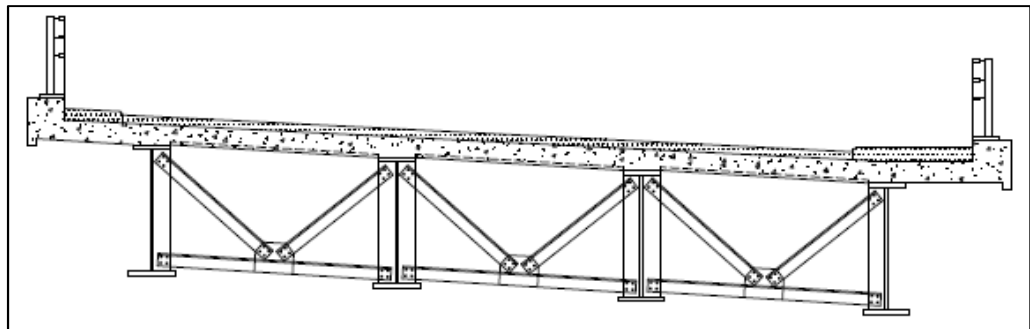
lendutan bila digunakan pada jembatan *single span* dengan bentang kurang dari 30 m dan untuk *continous span* hingga mencapai 25 m. Bila *universal beam* akan digunakan untuk jembatan dengan beban hidup yang rendah seperti jembatan penyebrangan orang atau jembatan akses untuk daerah pertanian, dapat digunakan *univesal beam* dengan ukuran *web* dan *flange* yang lebih kecil.

b. Perkuatan (*Bracing*)

Ada tiga jenis perkuatan yang dimiliki oleh *multi-girder bridge*. Berikut penjelasan mengenai ketiga jenis perkuatan tersebut:

- *Support bracing*

Support bracing adalah perkuatan yang berada di kedua ujung jembatan yaitu di daerah perletakan, teknis perkuatan dengan biasa menggunakan profil baja L yang disusun melintang menghubungkan antara satu *girder* dengan *girder* yang lainnya. Fungsi dari perkuatan ini adalah untuk stabilitas jembatan dan alat transfer beban horizontal (beban angin dan gaya selip) ke bantalan yang menyediakan tahanan transversal yang terletak pada daerah perletakan jembatan.



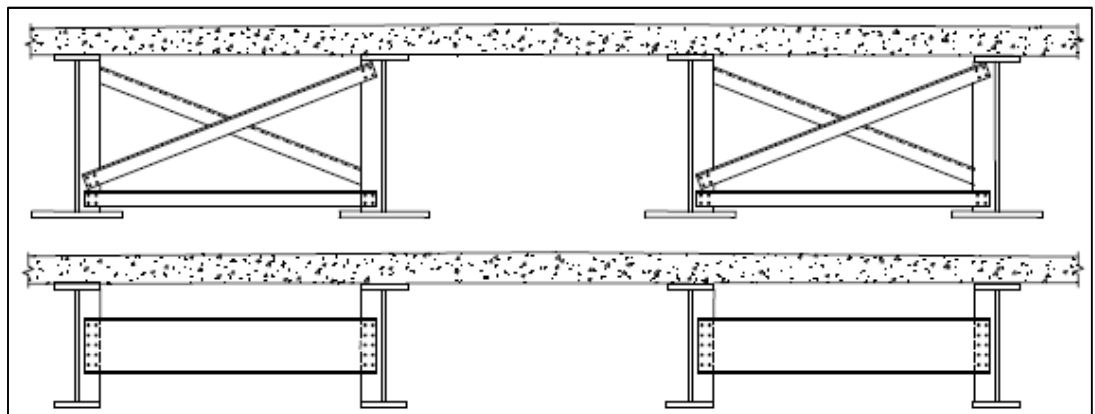
Sumber: *Composite Highway Bridge Design*

Gambar 2.3 Detail dari *Support Bracing* pada ujung perletakan jembatan

- *Intermediate Bracing*

Intermediate bracing biasa disebut juga dengan diafragma jembatan yaitu berupa pelat yang menghubungkan antar *girder* pada arah memanjang jembatan. Fungsi dari diafragma adalah untuk menjaga *girder* supaya tidak menekuk atau memuntir akibat dari beban yang dipikul oleh baja *girder*.

Sistem *bracing* yang digunakan pada *intermediate bracing* menggunakan sistem rangka segitiga yaitu dengan menyusun baja profil L membentuk susunan segitiga diantara 2 balok *girder* yang berdekatan. System *bracing* rangka segitiga dapat mengakibatkan kekangan yang sangat kaku pada bidang pelat dek sampai ke bagian bawah *flens*, namun bila system ini tidak dikombinasikan dengan plan bracing dapat mengakibatkan munculnya gaya torsi. Untuk mengatasi masalah tersebut maka digunakan *intermediate bracing* dengan menggunakan baja profil *channel* karena baja profil *channel* lebih kaku dan dapat membentuk koneksi yang kaku dengan balok-balok *girder* utama.

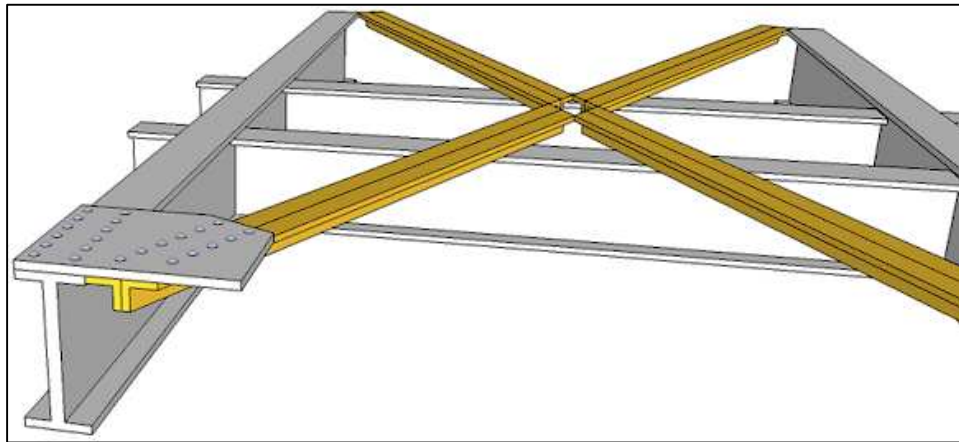


Sumber: *Composite Highway Bridge Design*

Gambar 2.4 *Intermediate Bracing* sistem rangka segitiga dan system baja *channel*

- *Plan Bracing*

Plan bracing biasa disebut dengan ikatan angin adalah ikatan menyilang pada bagian bawah jembatan, dua lokasi kemungkinan peletakan *plan bracing* berada di atas flens atas (terhubung ke cleat pada flens atas) dan di bawah flens atas. Fungsi dari *plan bracing* adalah untuk meningkatkan keseluruhan kekakuan torsional jembatan sehingga dapat mengurangi permasalahan ketidakstabilan aerodinamis.



Sumber: *Composite Highway Bridge Design*

Gambar 2.5 *Plan-Cross Bracing* pada jembatan komposit

c. *Crosshead girders*

Crosshead girders adalah *girder* melintang tambahan yang menghubungkan dua buah *girder* utama dan berfungsi sebagai perletakan pada tengah bentang *continuous multiple spans*. *Crosshead girders* bukan merupakan komponen yang wajib dimiliki oleh jembatan *multi-girder* akan tetapi terkadang dibutuhkan untuk mengurangi jumlah kolom dan bantalan.

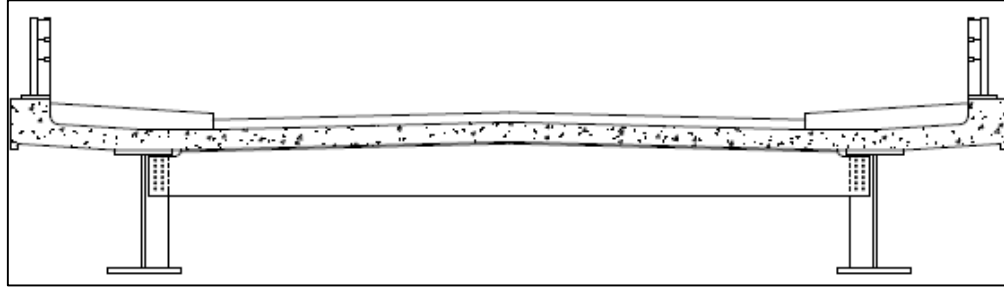


Sumber: *Mabey Bridge*

Gambar 2.6 *Crosshead girder* pada *multi-girder bridge*

2.1.2 Ladder Deck Bridges

Ladder deck bridge adalah modifikasi dari *multi girder bridge* yaitu dengan hanya menggunakan dua buah *girder* utama dengan *cross-girder* sebagai *support* (perkuatan). *Cross-girder* dipasang melintang diantara kedua *girder* utama searah lebar jembatan. Plat lantai beton bertulang dipasang searah longitudinal diatas *cross-girder*. Karena konfigurasi rencana dari *girder* dan *cross-girder* yang mirip dengan *stringer* dan anak tangga maka konstruksi ini disebut dengan *ladder deck* (dek tangga). Konfigurasi jembatan dengan *ladder deck* sangat cocok dan ekonomis bila diaplikasikan pada jembatan bentang pendek dengan lebar jembatan yang memadai untuk jalur lalu lintas dua jalur ganda.



Sumber: *Composite Highway Bridge Design*

Gambar 2.7 Potongan melintang *Ladder deck bridge*



Sumber: *courtesy of Mabey Bridge*

Gambar 2.8 Konfigurasi *girder* yang membentuk tangga pada *ladder deck bridge*.

Pada jembatan jenis *ladder deck*, *girder* utama dan *cross-girder* semuanya dilengkapi dengan *shear connector* untuk membuat aksi komposit. *Cross-girder* dihubungkan dengan *girder* utama dengan menggunakan baut dan pengaku melintang web ditambahkan pada setiap sambungan. Lebih lanjut mengenai setiap komponen (bagian) dari jembatan *ladder deck* adalah sebagai berikut:

a. Gelagar Utama (*Main Girder*)

Gelagar utama dalam jembatan *ladder deck* selalu menggunakan *plate girder*, karena *girder* dengan penampang universal walaupun dengan luas penampang maximum tidak akan cukup kuat, walaupun digunakan untuk bentang yang sederhana. Karena hanya menggunakan dua *girder* utama maka tebal *web girder* harus lebih tebal dari *web girder* yang digunakan pada jembatan *multi-girder*. Walaupun kelangsingan *girder* lebih rendah namun kelangsingan yang dimiliki *plate girder* memungkinkan untuk menahan perlawanan geser (*shear resistance*) tanpa menggunakan pengaku *web*. Selain itu pengaku *web* tidak dibutuhkan karena sudah menggunakan perkuatan dengan *cross-girder*.

Untuk jembatan dengan bentang yang cukup panjang dibutuhkan flens, khususnya flens bawah *girder* dengan ukuran yang cukup lebar dan tebal. Oleh sebab itu desainer pada tahap desain harus memperhatikan tingkat ketangguhan baja dan ketersediaan bahan plat baja yang cocok untuk digunakan sebagai flens *plate girder*.

b. *Cross-Girder* (Gelagar Silang)

Cross-girder biasanya dipasang dengan jarak 3,5 meter untuk menahan besarnya beban plat lantai setebal 250mm. Untuk tujuan struktural, jembatan dengan bentang 2 atau 3, dengan jarak antar *girder* utama antara 7-10 meter dapat menggunakan *cross-girder* dengan penampang universal akan tetapi penggunaan plat *girder* lebih mungkin untuk digunakan.

Pada jembatan bentang menerus diperlukan perletakan ditengah bentang, sehingga *cross-girder* yang digunakan pada dudukan harus berukuran lebih besar dari pada

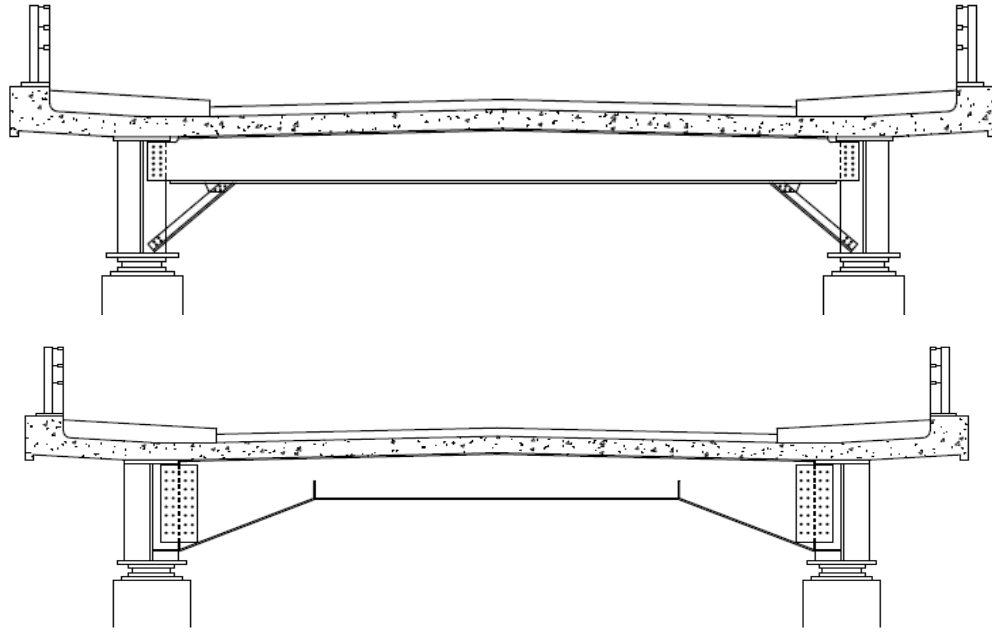
cross-girder lainnya. Ukuran *cross-girder* yang lebih besar dimaksudkan untuk mentransfer beban pada perletakan jembatan. Hal penting yang harus diperhatikan adalah *cross-girder* yang digunakan pada perletakan tengah dimensinya harus lebih kecil dari *girder* utama sehingga tidak terjadi konflik dan kontak langsung dengan flens bawah dari *main girder*.



Sumber: *Composite Highway Bridge Design*

Gambar 2.9 Potongan melintang perletakan tengah jembatan *ladder-deck*

Sebagai solusi untuk penggunaan *cross-girder* yang terlalu besar pada perletakan tengah, bisa menggunakan *knee bracing* (perkuatan lutut) atau *haunched cross-girder*. Sistem *knee bracing* dan *haunched cross-girder* mampu membuat rangka jembatan menjadi lebih kaku dan mengurangi besarnya gaya momen yang harus ditransfer melalui *cross-girder*. Dalam aplikasinya penggunaan *knee bracing* jarang digunakan karena lebih mahal dibanding dengan menggunakan *cross-girder* dengan penampang yang lebih besar. Begitu pula jika ingin menggunakan *haunched cross-girder*, desainer harus berkonsultasi dengan perusahaan pabrikasi *girder* karena jarang ada pabrikasi yang mampu memproduksi *haunched cross-girder*. Pada akhirnya penggunaan *haunched cross-girder* akan membutuhkan biaya yang jauh lebih besar.



Sumber: *Composite Highway Bridge Design*

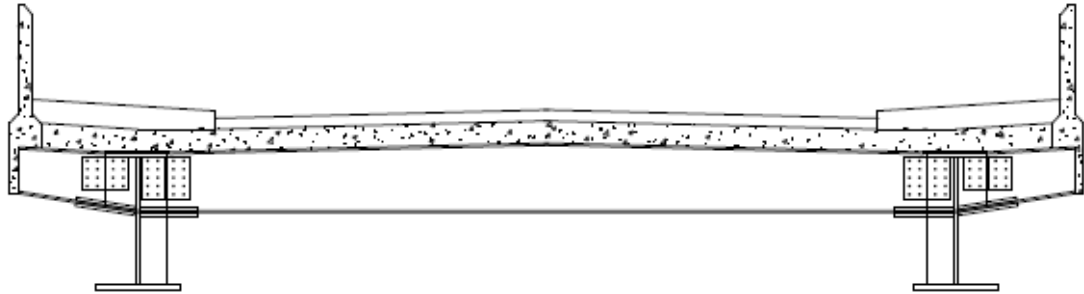
Gambar 2.10 Potongan melintang *knee bracing* (atas) dan *haunched cross-girder*

c. *Cantilever Girder*

Cantilever girder adalah *girder* tambahan diluar *girder* utama sebagai bantalan untuk trotoar jalan. Namun bila trotar jalan tidak terlalu lebar maka tidak perlu menggunakan *cantilever girder* karena momen yang timbul masih mampu ditahan oleh plat lantai, seperti konfigurasi pada jembatan *multi-girder*. Penggunaan *cantilever girder* hanya digunakan bila plat *cantilever* yang berada diluar *girder* utama lebarnya lebih dari 1,5 meter.

Walaupun penggunaan *kantilever girder* memungkinkan untuk membuat plat lantai kantilever yang cukup lebar, akan tetapi pertimbangan dari penggunaan *kantilever girder* biasanya dikarenakan untuk menghindari penggunaan perancah saat masa konstruksi. Dengan penggunaan *cantilever girder* pekerjaan kontraktor akan lebih

ringan karena tidak perlu melakukan bongkar pasang perancah pada plat lantai kantilever saat masa konstruksi.



Sumber: *Composite Highway Bridge Design*

Gambar 2.11 *Ladder deck* dengan menggunakan *cantilever girder*

2.1.3 Plat Lantai

Desain plat lantai cenderung sama baik untuk jembatan *ladder deck* maupun *multi-girder*. Untuk menahan efek gabungan dari beban lentur lokal dan global (terutama, untuk *ladder deck*, karena tekuk global dalam menahan daerah momen menghasilkan kekuatan tarik pada slab) sehingga dibutuhkan plat lantai yang cukup tebal kira-kira 240-260mm. Penulangan plat lantai biasanya menggunakan besi D20 dengan jarak antara tulangan serat atas dan serat bawah adalah 150mm. Untuk mempermudah pemasangan bekisting untuk plat lantai, maka plat lantai didesain dengan ketebalan yang seragam.

2.2 Sifat Bahan Material Struktur Komposit

2.2.1 Sifat Bahan Material Baja

Baja adalah logam paduan, logam besi sebagai unsur dasar dengan karbon sebagai unsur paduan utamanya. Kandungan unsur karbon dalam baja berkisar antara 0.2% hingga 2.1% berat sesuai grade-nya. Fungsi karbon dalam baja adalah sebagai unsur penguat dengan mencegah dislokasi bergeser pada kisi kristal (*crystal lattice*) atom besi. Unsur paduan lain yang biasa ditambahkan selain karbon adalah (*titanium*), krom (*chromium*), nikel, vanadium, kobalt dan tungsten (*wolfram*). Dengan memvariasikan kandungan karbon dan unsur paduan lainnya.

Setiap bahan konstruksi memiliki kemampuan dan kekuatan ketika menahan beban eksternal yang diberikan, hal ini disebut sifat mekanis material. Pada baja sifat-sifat mekanis yang dimiliki adalah sebagai berikut:

a. kekuatan

Baja mempunyai daya tarik, lengkung, dan tekan yang sangat besar. Pada setiap partai baja, pabrikan baja menandai beberapa besar daya kekuatan baja itu. Pabrikan baja misalnya, memasukan satu partai baja batangan dan mencatumkan pada baja itu Fe 360. di sini Fe menunjukkan bahwa partai itu menunjukkan daya kekuatan (minimum) tarikan atau daya tarik baja itu. Yang dimaksud dengan istilah tersebut adalah gaya tarik N yang dapat dilakukan baja bergaris tengah 1 mm^2 sebelum baja itu menjadi patah. Dalam hal ini daya tarik itu adalah 360 N/mm^2 . dahulu kita mencantumkan daya tarik baja itu Fe 37, karena daya tariknya adalah 37 kgf/mm^2 . karna mengandung sedikit kadar karbon, maka semua jenis baja mempunyai daya

tarik yang kuat. Oleh karena daya tarik baja yang kuat maka baja dapat menahan berbagai tegangan, seperti tegangan lentur.

b. Keuletan (*Ductility*)

Kemampuan baja untuk berdeformasi sebelum baja putus. Keuletan berhubungan dengan besarnya regangan (*strain*) yang permanen sebelum baja putus dan terkait erat dengan kemudahan saat dibentuk (sifat dapat dikerjakan). Untuk menguji keuletan dilakukan dengan menggunakan uji tarik.

c. Kekerasan

Kekerasan adalah ketahanan baja terhadap besarnya gaya external yang dapat menembusnya. Cara yang biasa dilakukan dalam pengujianya adalah dengan menggunakan uji *Brinell*, *Rockwell*, dan *Ultrasonic*.

d. Ketangguhan (*Thougness*)

Ketangguhan adalah hubungan antara energi yang diserap oleh baja hingga baja tersebut putus. Semakin kecil energi yang mampu diserap oleh baja maka semakin rapuh dan semakin kecil ketangguhannya. Cara pengujianya adalah dengan memberikan pukulan mendadak (*impact/pukul tarik*).

Baja untuk bahan struktur termasuk ke dalam baja yang persentase zat arang ringan (*mild carbon steel*), semakin tinggi kadar zat arang yang terkandung di dalamnya, maka semakin tinggi nilai tegangan lelehnya. Sifat-sifat bahan struktur yang paling penting dari baja adalah sebagai berikut:

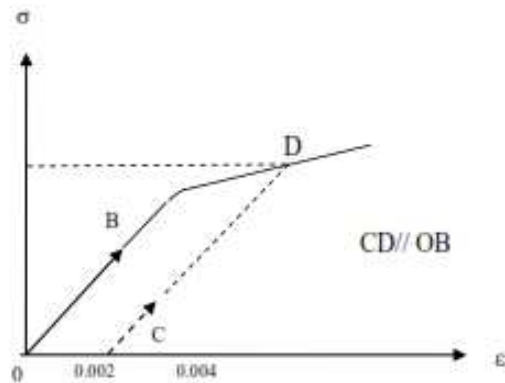
- Modulus Elastisitas (E) berkisaran antara 193000 Mpa sampai 207000Mpa. Nilai untuk lazimnya diambil 200000 Mpa.
- Modulus geser (G) dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dari persamaan tersebut, μ merupakan angka *poisson ratio*, dengan mengambil $\mu = 0.30$ dan $E = 200000$ Mpa, akan memberikan $G = 80000$ Mpa

- Koefisien ekspansi (α), diperhitungkan sebesar 12×10^{-6} per $^{\circ}\text{C}$.
- Berat jenis baja (γ), berat jenis baja diambil 7.85 ton/m^3 .

Tegangan leleh adalah tegangan yang terjadi pada saat baja mulai meleleh. Dalam kenyataannya, sulit untuk menentukan besarnya tegangan leleh, sebab perubahan dari elastisitas menjadi plastis seringkali besarnya tidak tetap. Sebagai standar menentukan besarnya tegangan leleh dihitung dengan menarik garis sejajar dengan sudut kemiringan elastisitasnya, dari regangan sebesar 0.2 % dapat dalam grafik dibawah ini:



Gambar 2.12 Grafik perbandingan tegangan dan regangan (Modulus Elastisitas)

Dari titik regangannya 0.2% ditarik garis sejajar dengan garis OB sehingga memotong grafik tegangan-regangan. Tegangan yang diperoleh ini disebut dengan tegangan leleh. Tegangan-tegangan leleh dari bermacam-macam baja bangunan diperlihatkan pada tabel di bawah ini:

Tabel 2.1 Tegangan leleh dari baja

Mutu Baja	Tegangan Leleh	
	Kg/Cm ²	Mpa
Bj 34	2100	210
Bj 37	2400	240
Bj 41	2500	250
Bj 44	2800	280
Bj 50	2900	290
Bj 52	3600	360

2.2.2 Sifat Bahan Material Beton

Beton sendiri adalah merupakan campuran yang homogen antara semen, air, agregat dan zat *admixture* sebagai bahan tambahan. Agregat yang digunakan terdiri dari agregat halus (pasir) dan agregat kasar (Krikil). Karakteristik beton adalah mempunyai kuat tekan tekan yang namun memiliki kuat tarik yang rendah. Untuk mendisain beton dengan kekuatan tertentu diperlukan kombinasi semua komponen material yang sesuai dan dihitung menggunakan standar *mix design* yang berlaku.

Saat ini beton masih menjadi pilihan utama sebagai bahan konstruksi, hal ini dikarenakan material yang dibutuhkan untuk membuat beton sangat mudah didapatkan. Faktor lain yang menjadikan beton sebagai bahan konstruksi adalah karena beton sangat mudah dibentuk menjadi beragam bentuk sesuai dengan desain dan kebutuhan yang diinginkan.

Sifat-sifat penting dari beton adalah kakuatan karakteristik, kekuatan tekan, tegangan dan regangan, susut dan rangkai, reaksi terhadap temperatur, keawetan dan

kekedapan terhadap air . Dari semua sifat tersebut yang terpenting adalah kekuatan tekan beton, karena merupakan gambaran dari mutu beton yang ada kaitannya dengan struktur beton. Berbagai test uji kekuatan dilakukan pada beton keras ini antara lain, Uji kekuatan tekan (*compression test*), Uji kekuatan tarik belah (*splitting tensile test*), Uji kekuatan lentur, Uji lekatan antara beton dan tulangan, Uji Modulus Elastisitas dan lain sebagainya.

Penggunaan material beton sebagai bahan konstruksi tentu harus memperhatikan banyak hal. Sebagai bahan konstruksi beton memiliki berbagai keunggulan dan kekurangan dibanding dengan material lainnya, berikut adalah keunggulan beton:

- Dapat dibentuk sesuai keinginan dan kebutuhan konstruksi.
- Mampu menahan beban tekan yang tinggi.
- Tahan terhadap temperatur yang tinggi.
- Tidak banyak membutuhkan perawatan (biaya perawatan rendah).

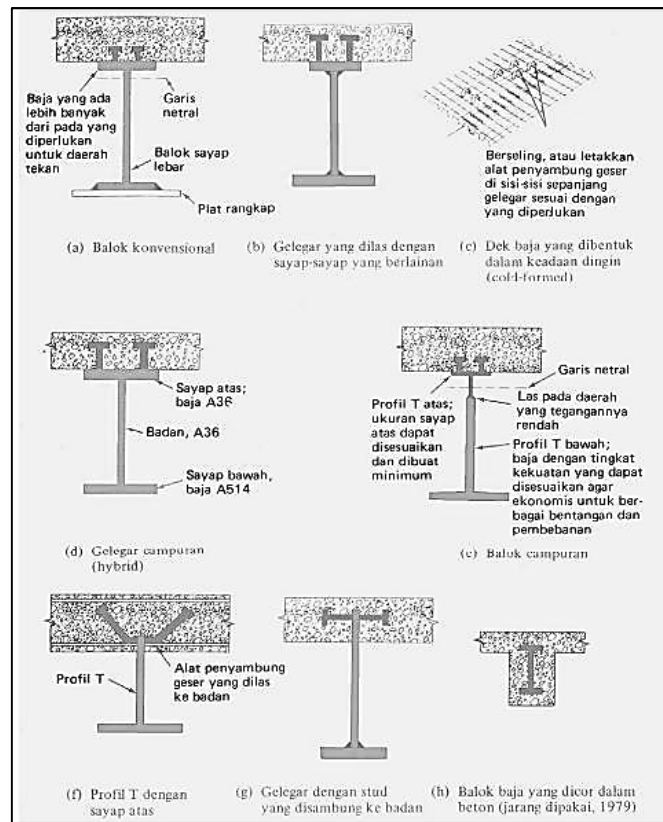
Kekurangan beton:

- Bentuk yang telah dibentuk tidak bisa dirubah kebentuk lain.
- Pelaksanaan pekerjaan membutuhkan ketelitian dan pengawasan yang ketat.
- Memiliki berat sendiri yang besar.
- Memiliki daya pantul suara yang tinggi.
- Diperlukan cetakan (beking) untuk membentuk beton.
- Tidak memiliki kekuatan tarik.
- Setelah dicampur beton segera mengeras dan beton yang mengeras sebelum pengecoran, tidak bisa didaur ulang.

2.3 Konstruksi Komposit Baja-Beton

2.3.1 Latar Belakang Sejarah

Balok baja yang menahan plat beton bertulang pada awalnya didesain dengan asumsi bahwa kedua komponen tersebut bertindak sendiri-sendiri dalam menahan beban. Tidak ada perkiraan untuk memberikan aksi komposit antara balok baja dengan plat beton bertulang dalam konstruksi tersebut. Hal tersebut dikarenakan tidak adanya anggapan bahwa plat lantai beton dan balok baja tidak dapat disatukan menjadi struktur komposit. Namun seiring dengan perkembangan teknologi pengelasan, berkembang pula teknologi mekanis shear connector (penghubung geser) untuk menahan gaya geser horizontal yang terjadi saat terjadi gaya tekuk.



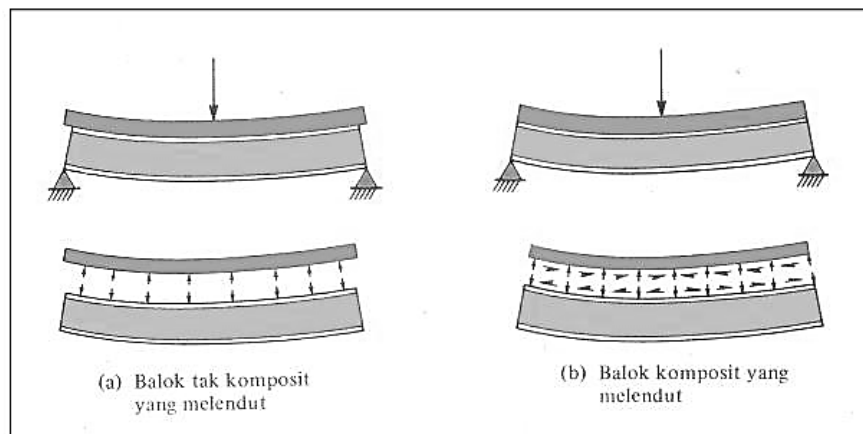
Sumber: Salmon dkk, 1991

Gambar 2.13 Berbagai tipe bentuk struktur komposit

Balok baja terbungkus beton secara luas digunakan dari awal 1900-an sampai perkembangan bahan material ringan untuk pencegahan bahaya kebakaran beberapa tahun kemudian. Sejak saat itu beberapa konstruksi mulai dibangun menggunakan konstruksi komposit, dan pada awal tahun 1930-an konstruksi komposit mulai digunakan pada jembatan. Hingga pada awal tahun 1960-an konstruksi komposit lebih ekonomis bila diaplikasikan pada konstruksi gedung namun saat ini aksi komposit mulai digunakan dalam berbagai situasi saat terjadi kontak antara beton dengan baja baik itu untuk jembatan maupun gedung.

2.3.2 Aksi Komposit

Aksi komposit timbul bila dua struktural pemikul beban seperti konstruksi lantai beton dan balok baja penyangga disambung secara integral dan melendut secara satu kesatuan. Contoh penampang lintang komposit yang umum diperlihatkan pada Gambar 2.14. Besarnya aksi komposit yang timbul bergantung pada penataan yang dibuat untuk menjamin regangan linear tunggal dari atas plat beton sampai muka bawah penampang baja.



Sumber: Salmon dkk, 1991

Gambar 2.14 Perbedaan lendutan struktur non-komposit dan struktur komposit

2.3.3 Kelebihan dan Kekurangan Struktur Komposit

Kelebihan dasar yang dihasilkan dari desain struktur komposit adalah sebagai berikut:

- Dapat mereduksi berat profil baja yang dipakai.
- Tinggi profil baja yang dipakai dapat dikurangi.
- Meningkatkan kekakuan plat lantai.
- Dapat menambah panjang bentang layan dari suatu struktur.

Dengan menggunakan sistem komposit penuh dapat mereduksi kebutuhan dari berat baja sekitar 20-30%. Dengan adanya reduksi dari berat baja secara otomatis kebutuhan dari tinggi profil baja yang dibutuhkan juga akan berkurang. Jika diaplikasikan untuk bangunan gedung berkurang nya tinggi profil baja secara otomatis mengurangi tinggi bangunan juga, sehingga mampu menghasilkan penghematan pada jumlah anak tangga yang dibutuhkan untuk akses antar lantai.

Kekakuan dari plat lanai komposit pada dasarnya lebih besar dari pada kekakuan plat beton dan balok baja yang beraksi non-komposit. Secara normal pelat beton berperilaku sebagai pelat satu arah yang membentang diantara balok-balok penopang. Dalam desai komposit, momen inersia dari balok akan meningkat sehingga kekakuan dari struktur komposit akan meningkat. Meningkatnya kekakuan memberikan keuntungan yaitu lendutan yang terjadi akibat beban hidup akan berkurang. Disamping itu dengan menggunakan asumsi desain komposit, maka kapasitas penampang dalam menahan beban akan lebih besar dibanding dengan struktur non-komposit.

Kekurangan dari struktur komposit adalah terjadi defleksi yang cukup besar dalam jangka panjang yang disebabkan karena rangkai susut pada beton. Ketika beton

mengalami rangkai maka kekuatan dari beton akan berkurang sehingga timbul defleksi yang cukup besar dalam struktur.

2.3.4 Lebar Efektif.

Dalam struktur komposit, konsep lebar efektif slab dapat diterapkan sehingga akan memudahkan perencanaan. Spesifikasi AISC/LRFD telah menetapkan lebar efektif untuk slab beton yang bekerja secara komposit dengan balok baja, sebagai berikut :

- a. Untuk gelagar luar (tepi).

$$b_{eff} \leq L/8 \quad \text{dengan } L = \text{Panjang bentang.}$$

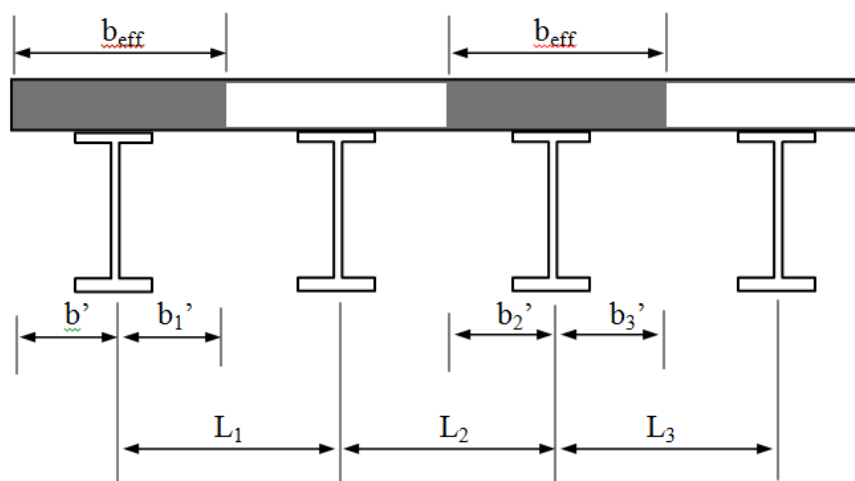
$$b_{eff} \leq L_1/2 + b' \quad \text{dengan } b' = \text{jarak dari as balok ke tepi slab.}$$

- b. Untuk gelagar dalam.

$$b_{eff} < L/4 \quad \text{dengan } L = \text{Panjang bentang.}$$

$$b_{eff} < (L_1 + L_2)/2 \quad \text{dengan } L_1 = \text{jarak antar as balok.}$$

Lebar efektif yang dipakai dipilih yang terkecil.



Gambar 2.15 Lebar Efektif Struktur Komposit.

2.3.5 Metode Pelaksanaan Struktur Komposit.

Perancangan balok komposit disesuaikan dengan metode yang digunakan di lapangan. Ada dua metode yang biasanya digunakan dalam pelaksanaan dilapangan yaitu dengan perancah dan atau tanpa perancah. Jika tanpa perancah, balok baja akan mendukung beban mati primer selama beton belum mengeras. Beban mati sekunder serta beban-beban lain akan didukung oleh balok komposit yang akan berfungsi jika beton telah mengeras dan menyatu dengan baja. Bila menggunakan perancah, selama beton belum mengeras beban mati primer akan dipikul oleh pendukung. Setelah beton mengeras dan penunjang dilepas maka seluruh beban akan didukung oleh balok komposit.

2.3.6 Kekuatan Batas Penampang Komposit.

Kuat lentur nominal dari suatu komponen struktur komposit (untuk momen positif), menurut SNI 03-1729-2002 pasal 12.4.2.1 ditentukan sebagai berikut:

a. Untuk $\frac{h}{t_w} \leq \frac{1680}{\sqrt{f_{yf}}}$

M_n kuat momen nominal yang dihitung berdasarkan distribusi tegangan plastis pada penampang komposit.

$$\phi_b = 0.85$$

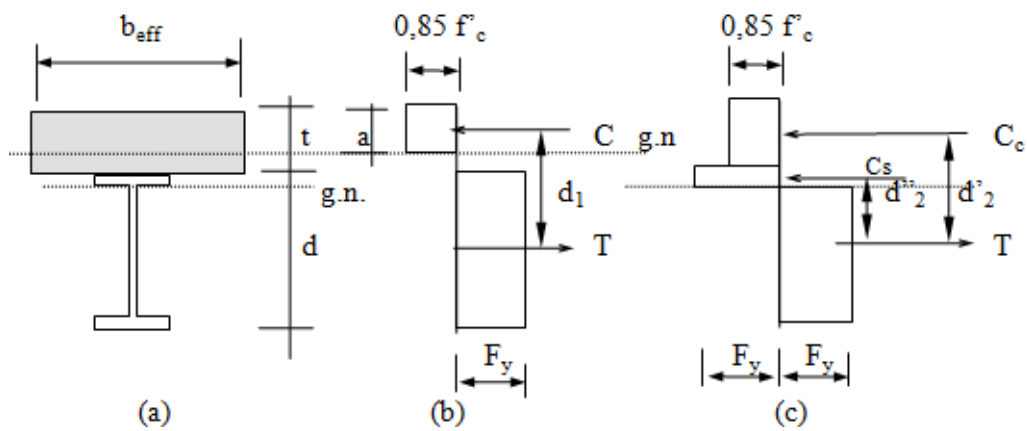
b. Untuk $\frac{A_s \cdot f_y}{0.85 \cdot f_c \cdot t_c \cdot b_E}$

M_n kuat momen nominal yang dihitung berdasarkan superposisi tegangan-tegangan elastis yang memperhitungkan pengaruh tumpuhan sementara (perancah).

$$\phi_b = 0.90$$

Kekuatan batas penampang komposit bergantung pada kekuatan leleh dan sifat penampang balok baja, kekuatan *slab* beton dan kapasitas interaksi alat penyambung geser yang menghubungkan balok dengan *slab*. Kekuatan batas yang dinyatakan dalam kapasitas momen batas memberi pengertian yang lebih jelas tentang kelakuan komposit dan juga ukuran faktor keamanan yang tepat. Faktor keamanan yang sebenarnya adalah rasio kapasitas momen batas dengan momen yang sesungguhnya bekerja.

Untuk menentukan besarnya kekuatan batas beton dianggap hanya menerima tegangan desak, walaupun sesungguhnya beton dapat menahan tegangan tarik yang terbatas. Prosedur untuk menentukan besarnya kapasitas momen ultimit, tergantung apakah garis netral yang terjadi jatuh pada *slab* beton atau jatuh pada gelagar bajanya. Jika jatuh pada *slab* dikatakan bahwa *slab* cukup untuk mendukung seluruh gaya desak, dan apabila garis netral jatuh pada gelagar baja dikatakan *slab* tidak cukup mendukung beban desak, atau dengan kata lain bahwa *slab* hanya menahan sebagian dari seluruh gaya desak dan sisanya didukung oleh gelagar baja.



Gambar 2.16 Distribusi tegangan pada kapasitas momen ultimit

- c. Garis netral jatuh pada plat beton.

Dengan mengacu pada pada Gambar 2.16.b, maka besarnya gaya tekan C adalah sebagai berikut:

$$C = 0.85 \times f'_c \times b_{eff} \times a \dots\dots\dots(2.2)$$

Harga gaya tarik T batas pada profil baja adalah:

$$T = A_s \cdot F_y \dots\dots\dots(2.3)$$

Dengan menyamakan antara harga C dan T maka didapat harga a, yaitu sebesar:

$$a = \frac{A_s \cdot F_y}{0.85 \cdot f'_c \cdot b_e} < t \dots\dots\dots(2.4)$$

Dengan demikian didapat kapasitas Momen Batas adalah sebagai berikut:

$$M_n = C \cdot d_1 \dots\dots\dots(2.5)$$

$$M_n = T \cdot d_1 = A_s \cdot f_y \left(\frac{d}{2} + t_s - \frac{a}{2} \right) \dots\dots\dots(2.6)$$

dimana :

C = gaya tekan pada balok baja.

f'_c = tegangan ijin tekan beton

b_e = lebar efektif plat.

t = tebal plat.

- d. Garis netral jatuh pada profil baja.

Jika tinggi blok tegangan a yang diperoleh melampaui tebal plat (t) distribusi tegangan akan seperti Gambar 2.16.c, dengan demikian didapat gaya tekan batas pada plat beton sebesar :

$$C_c = 0,85 \cdot f'_c \cdot b_{eff} \cdot t \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana:

C_c = gaya tekan pada balok baja.

f'_c = tegangan ijin tekan beton

b_{eff} = lebar efektif plat.

t = tebal plat.

Dari keseimbangan gaya, diperoleh hubungan:

$$T' = C_c + C_s \dots\dots\dots (2.8)$$

Besarnya T' sekarang lebih kecil dari pada $A_s \cdot f_y$, yaitu sebesar:

$$T' = A_s \cdot f_y - C_s \dots\dots\dots (2.9)$$

Dengan menyamakan persamaan 2.8 dan 2.9 maka diperoleh:

$$C_s = \frac{A_s \cdot f_y - C_c}{2} \dots\dots\dots (2.10)$$

Atau dengan mensubstitusikan persamaan 2.7, diperoleh bentuk bersamaan sebagai berikut:

$$C_s = \frac{A_s \cdot f_y - 0,85 \cdot f'_c \cdot b_{eff} \cdot t}{2} \dots\dots\dots (2.11)$$

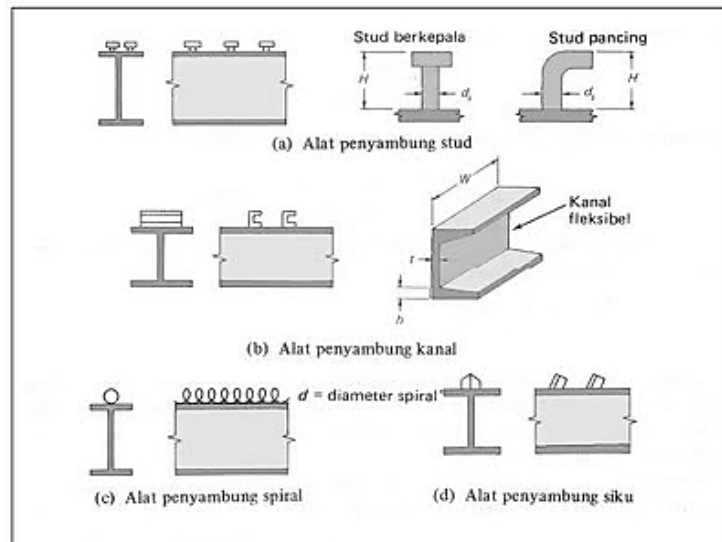
Dengan demikian didapat kapasitas Momen Batas adalah sebagai berikut:

$$M_n = C_c \cdot d'_2 + C_s \cdot d''_2 \dots\dots\dots (2.12)$$

2.3.7 Alat Penyambung Geser (*Shear Connector*).

Gaya geser horisontal yang timbul antara *slab* beton dan balok baja selama pembebanan harus ditahan agar penampang komposit bekerja secara monolit, atau

dengan kata lain agar terjadi interaksi antara *slab* beton dan balok baja. Untuk menjamin adanya lekatan antara beton dan balok baja maka harus dipasang alat penyambung geser mekanis (*shear Connector*) diatas balok yang berhubungan dengan *slab* beton. Disamping itu fungsi dari pada *shear Connector* adalah untuk menahan / menghindari terangkatnya *slab* beton sewaktu dibebani.



Sumber: Salmon dkk, 1991

Gambar 2.17 Berbagai jenis *Shear Connector* dan bentuknya

Dalam merencanakan alat sambung geser dapat dilaksanakan berdasarkan :

a. Kuat desak beton : $C_{max} = 0,85 f'_c \cdot b_{eff} \cdot t_s$

b. Kuat tarik baja : $T_{max} = A_s F_y$

dipilih yang terbesar sehingga menghasilkan jumlah alat sambung geser yang lebih banyak. Banyaknya alat sambung geser yang dibutuhkan dapat dihitung dengan rumus :

$$N = \frac{C_{max}}{Q_n} = \frac{T_{max}}{Q_n} \dots\dots\dots(2.13)$$

dengan Q_n adalah kekuatan satu alat sambung geser.

Macam-macam *shear Connector* yang ada dipasaran sampai dengan saat ini sangat banyak macam dan bentuknya, diantaranya adalah :

- a. *Connector* dari ‘*Stud*’ baja berkepala (Gambar 2.6.a).

$$Q_n = 0,5 \cdot A_{sc} \cdot \sqrt{f'_c \cdot E_c} \leq A_{sc} \cdot F_{bu} \dots\dots\dots (2.14)$$

Dimana:

$$\begin{aligned} Q_n &= \text{Kekuatan satu stud (kips).} & F_{bu} &= \text{Kuat tarik stud (ksi).} \\ A_{sc} &= \text{Luas penampang stud (inci}^2\text{).} & f'_c &= \text{Kuat tekan beton (ksi).} \\ E_c &= \text{Modulus Elastis Beton (ksi).} \end{aligned}$$

- b. *Connector* berbentuk ‘*Cannel*’ (Gambar 2.6.b).

$$Q_n = 0,3(t_f + 0,5t_w)L_c\sqrt{f'_c \cdot E_c} \dots\dots\dots (2.15)$$

Dimana:

$$\begin{aligned} Q_n &= \text{Kekuatan satu stud (kips).} & F_{bu} &= \text{Kuat tarik stud (ksi).} \\ L_c &= \text{Panjang kanal (inci).} & f'_c &= \text{Kuat tekan beton (ksi).} \\ t_f &= \text{Tebal flen kanal (inci).} & E_c &= \text{Modulus Elastis Beton (ksi).} \\ t_w &= \text{Tebal badan kanal (inci)} \end{aligned}$$

2.3.8 Desain dengan LRFD (Load dan Resistance Factor Design).

Untuk sebuah balok komposit berlaku $M_u < \phi M_n$ dengan $\phi = 0,85$. Secara umum, desain harus dimulai dengan mengasumsikan letak garis netral berada pada *slab* beton, dengan demikian luas A_s yang dibutuhkan untuk penampang baja tersebut adalah :

$$A_s = \frac{M_n}{\phi \cdot F_y \left(\frac{d}{2} + t_s - \frac{a}{2} \right)} \dots\dots\dots (2.16)$$

2.4 Korosi pada Baja *Girder*

Korosi berasal dari bahasa latin “*corrodere*” yang artinya perusakan logam atau berkarat akibat lingkungannya. Korosi adalah suatu reaksi redoks antara logam dengan berbagai zat yang ada dilingkungannya, sehingga menghasilkan senyawa-senyawa yang tidak dikehendaki. Peristiwa korosi dapat menggerus permukaan logam dan secara perlahan logam akan menipis dan menjadi rapuh.

Korosi merupakan salah satu penyebab paling penting dari penurunan (deteriorasi) kekuatan pada jembatan komposit (baja-beton). Karena korosi, ketahanan jembatan adalah suatu variabel yang tergantung terhadap waktu, semakin tua usia jembatan semakin berkurang kekuatannya. Karena masalah korosi tersebut sehingga diperlukan kriteria rasional untuk penentuan kekuatan aktual dan sisa pakai jembatan komposit yang ada.

Penyebab utama dari korosi pada jembatan komposit adalah akumulasi air dan garam (agen *deicing*) pada permukaan baja. Air yang telah berakumulasi dengan garam-garaman ataupun zat-zat asam dapat mengalir melalui dek yang bocor, persendian jembatan yang rusak dan lain sebagainya. Pada daerah pegunungan yang bersuhu rendah seringkali terjadi pengembunan pada *girder* jembatan disetiap pagi hari, peristiwa pengembunan dan kelembapan udara juga dapat mengakibatkan korosi. Lokasi korosi pada *girder* sebagian besar tergantung pada sumber air, dan laju korosi tergantung pada kontaminasi pada kelembaban dan suhu lingkungan.

2.4.1 Perkembangan dan Berbagai Bentuk Korosi

Beragam penelitian mengenai terkait dengan korosi telah dilakukan dari masa-kemasa. Pada tahun 1936 McKay dan Worthington menuliskan penelitian mereka tentang korosi dalam sebuah buku berjudul “*Corrosion Resistance of Metals*”. Pada tahun 1923 Alan Pollitt juga telah berhasil mempublikasikan penelitiannya tentang korosi. Dan akhirnya pada tahun 1963 Fontana dan Greene berhasil mempublikasikan buku mereka dengan judul “*Corrosion Engineering*”.

Ada berbagai bentuk korosi dan secara umum diklasifikasikan sesuai dengan bagaimana korosi menyerang logam. Menurut Fontana dan Greene ada delapan bentuk korosi yang terjadi pada baja yaitu: (1) korosi homogeny (*uniform corrosion*), (2) korosi galvanis (*galvanic corrosion*), (3) korosi celah (*crevice corrosion*), (4) korosi sumur (*pitting corrosion*), (5) korosi antar butir (*intergranular corrosion*), (6) korosi selektif (*selective corrosion*), (7) korosi erosi (*erosion corrosion*), (8) korosi tegangan (*stress corrosion*).

Pengaruh korosi pada kinerja struktural komponen jembatan dapat berbeda tergantung pada jenis korosi yang terjadi. Dalam penulisan ini, hanya korosi seragam dianggap terjadi pada *girder* jembatan karena korosi seragam adalah bentuk paling umum dari korosi yang pada umumnya didefinisikan sebagai hilangnya bahan permukaan *girder* secara perlahan. Korosi seragam memberikan dampak kerusakan paling besar dan paling berbahaya bagi struktur dibandingkan dengan jenis korosi yang lain. Namun pengaruh dari jenis lain korosi juga dapat dilakukan dengan menggunakan pendekatan yang sama yang diterapkan pada korosi seragam. Prosedur ini didasarkan

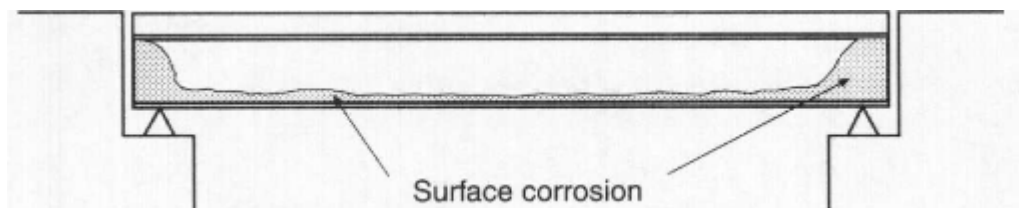
pada pertimbangan suatu komponen melemah atau berkurangnya kekuatan yang diakibatkan oleh korosi yang terjadi.



Gambar 2.18 Korosi seragam pada permukaan baja *girder*

2.4.2 Lokasi dan Tingkat Korosi

Berbagai data telah dikumpulkan oleh Kayser (1998) terkait dengan pengaruh korosi pada jembatan baja. Dari hasil penelitiannya, korosi terjadi dimana air terakumulasi. Untuk jembatan dengan gelager baja, bagian yang mengalami korosi paling parah terjadi pada persendian yang mengalami kebocoran, pada permukaan atas flens bawah dan semperempat bagian bagian web seperti terlihat pada gambar 2.19 dibawah ini. Korosi yang terjadi pada jembatan komposit sangat dipengaruhi oleh lingkungan yaitu akumulasi uap air diudara (kelembapan) dan kadar garam diudara.



Gambar 2.19 Penampang balok *girder* yang mengalami korosi

Ada banyak faktor yang dapat mempengaruhi laju korosi pada baja, akan tetapi data statistik yang tersedia tidak cukup untuk merumuskan model-model analitis. Oleh karena itu sangat sulit untuk memperkirakan laju korosi secara akurat, sehingga yang dapat dilakukan adalah melakukan pendekatan dengan menggunakan rumus-rumus empiris. Berikut adalah beberapa persamaan mengenai laju korosi yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti:

a. Persamaan korosi menurut Komp.M.E.

Dari hasil studi yang telah dilaksanakan oleh Komp.M.E. (1987) didapatkan bahwa penetrasi korosi dapat diperhitungkan dengan persamaan eksponensial sebagai berikut :

$$C = A \times t^B \dots\dots\dots(2.17)$$

Dimana :

C = Penetrasi korosi rata – rata (dalam μm).

t = Tahun umur elemen struktur baja, sedangkan nilai.

A dan B = Koefisien regresi secara numerik dari data eksperimental.

Parameter A dan B telah diklasifikasikan oleh Albrecht dan Naeemi (1984) berdasarkan pada lingkungan di mana jembatan berada. Dalam studinya Albrecht dan Naeemi (1984), pengaruh korosi pada berbagai lingkungan diklasifikasikan sebagai antara lain pedesaan (*Rural*), perkotaan (*Urban*), atau daerah tepi laut (*Marine*). Rata-rata nilai untuk A dan B adalah tercantum dalam Tabel (2.2) untuk baja karbon (*Carbon steel*) dan baja terekspose (*Weathering steel*).

Tabel 2.2 Koefisien regresi secara numerik dari data eksperimental

<i>Parameter</i>	<i>Carbon Steel</i>		<i>Weathering Steel</i>	
	A	B	A	B
<i>a. Rural Environment</i>				
<i>Mean Value</i>	34	0.65	33.3	0.489
<i>Coefficient of Variation</i>	0.09	0.1	0.34	0.09
<i>Coefficient Of Correlation</i>	-	-	-0.05	-
<i>b. Urban Environment</i>				
<i>Mean Value</i>	80.2	0.593	50.7	0.567
<i>Coefficient of Variation</i>	0.42	0.4	0.3	0.37
<i>Coefficient Of Correlation</i>	0.68	-	0.19	-
<i>c. Marine Environment</i>				
<i>Mean Value</i>	70.6	0.789	40.2	0.557
<i>Coefficient of Variation</i>	0.66	0.49	0.22	0.1
<i>Coefficient Of Correlation</i>	0.31	-	0.45	-

b. Persamaan korosi menurut Clinton J. Schulz

Penelitian yang dilakukan oleh Clinton J. Schulz menggunakan sumber data korosi yang berada di kota Corpus Christi, Texas dan telah dikumpulkan datanya sejak tahun 1975. Dari penelitian yang telah dilakukan diambil kesimpulan bahwa korosi sangat dipengaruhi oleh temperatur (suhu) udara dimana logam berada. Dari data yang telah dikumpulkan olehnya didapatkan sebuah persamaan eksponensial untuk menghitung laju korosi sebagai berikut:

$$CR = e^{(21,267 - \frac{7373}{T+273})} \dots\dots\dots (2.18)$$

Dimana:

CR = Corrosion Rate dalam mm/tahun.

T = Suhu rata-rata udara dilingkungan sekitar dalam drajat *celcius*.

c. Menurut *NACE Corrosion Engineer's Reference Book*

NACE (*The National Association of Corrosion Engineers*) adalah organisasi profesional untuk industri pengendalian korosi yang didirikan pada tahun 1943. Pada Januari 2012, ada lebih dari 28.300 anggota NACE di lebih dari 100 negara. NACE International terlibat dalam setiap industri dan bidang pencegahan korosi dan kontrol dari pengolahan kimia dan sistem air, untuk transportasi dan perlindungan infrastruktur. Fokus utama dari kegiatan NACE mencakup perlindungan katodik, pelapis untuk industri dan pemilihan material untuk ketahanan kimia yang spesifik.

Menurut buku panduan yang dikeluarkan oleh NACE International laju korosi akibat pengaruh atmosfer atau udara sekitar adalah sebagai berikut:

Tabel 2.3 *Atmospheric Corrosion Rate* menurut NACE International ($\mu\text{m}/\text{Tahun}$)

Corrosion Class	Steel		Weathering Steel	
	ST	LT	ST	LT
Very low	< 0,5	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Low	0,5 - 2	0,1 - 1,5	0,1 - 2	0,1 - 1
Medium	2 - 10	1,5 - 6	2 - 8	1 - 4
High	10 - 35	6 - 20	8 - 15	4 - 10
Very high	> 35	> 20	> 15	> 10

Keterangan:

ST : *Corrosion Rate* rata-rata selama 10 tahun pertama terekspose dalam udara luar.

LT : Kondisi tetap *corrosion rete* dalam jangka panjang .

2.4.3 Efek Destruktif Korosi

Potensi kerusakan struktur akibat korosi adalah suatu pertimbangan penting dalam desain jembatan komposit baja-*girder*. Efek dari korosi dapat bervariasi dari masalah-masalah ringan seperti perawatan nonstruktural dan kegagalan lokal atau bahkan yang paling membahayakan yaitu keruntuhan secara keseluruhan. Efek yang paling umum dari korosi adalah hilang atau berkurangnya suatu material dari logam. Pengurangan suatu material logam dapat berupa pengurangan seragam yaitu ketika korosi mempengaruhi area besar komponen jembatan, atau pengurangan lokal dalam bentuk lubang. Demikian juga, kehilangan bagian dari beberapa komponen yang mungkin memiliki sedikit atau bahkan tidak berpengaruh pada kapasitas keseluruhan jembatan, sedangkan kerusakan dari komponen lain dapat memiliki efek yang cukup signifikan. Oleh karena itu, sangat penting untuk membuat perbedaan antara korosi lokal, terkait dengan perilaku suatu bagian kecil dari struktur, dan kerusakan komponen yang mempengaruhi kinerja struktur jembatan secara keseluruhan.

Lepasnya partikel-partikel dari baja mengakibatkan luas penampang netto dari *girder* berkurang sehingga kemampuan *girder* dalam menahan beban yang bekerja pada jembatan juga menjadi berkurang. Efek dari korosi juga mengakibatkan ketahanan lelah, tekuk dan fraktur menjadi berkurang sehingga struktur akan runtuh sebelum waktunya. Secara umum, pengurangan kekuatan dari baja *girder* disebabkan karena hilangnya suatu bagian yang mengakibatkan penurunan terhadap parameter geometris *girder* seperti momen inersia dan jari-jari girasi.

Jenis korosi yang sering terjadi pada struktur jembatan adalah korosi teganga (*stress Corrosion*) yang disebabkan oleh terjadinya simultan dari tegangan tarik dan

lingkungan yang korosif. Tegangan tarik dapat disebabkan oleh beban yang bekerja pada jembatan, tegangan sisa dari proses manufaktur, tegangan termal, tegangan yang dihasilkan oleh penumpukan produk korosi, atau kombinasi dari pengaruh-pengaruh tersebut. Pengelasan pada sambungan baja juga menghasilkan tegangan sisa yang signifikan yang dapat mengakibatkan korosi, namun seringkali diremehkan. Korosi tegangan menyebabkan diskontinuitas dalam logam bertindak sebagai pengumpulan tegangan, yang dapat menyebabkan keretakan tunggal atau keretakan bercabang. Walaupun korosi tegangan memberikan dampak yang cukup signifikan namun dalam penulisan kali ini hanya akan difokuskan pada korosi seragam saja.

2.5 Parameter Dinamis

Penilaian kondisi jembatan dengan menggunakan frekuensi alami aktual dimaksudkan untuk penyederhanaan analisis. Analisis yang dimaksud berupa perhitungan ulang dari frekuensi alami (f_{awal}) berdasarkan dimensi dari balok/gelagar jembatan. Parameter penilaian dinamis adalah sebagai berikut:

- a. Frekuensi alami pertama (fundamental) terukur (f_{awal}) yang berasal dari rekaman getaran bebas.
- b. Kekakuan lentur (EI_{aktual}).
- c. Redaman kritis (h_{aktual}).

Penurunan frekuensi alami aktual (f_{aktual}) terhadap nilai frekuensi alami awal (f_{awal}) menunjukkan penurunan dari keutuhan struktural.

Parameter kekakuan lentur (EI) langsung terkait dengan frekuensi alami aktual. Penurunan kekakuan lentur aktual (EI_{aktual}) terhadap kekakuan lentur awal (EI_{awal})

menunjukkan penurunan kapasitas daya pikul. Peningkatan redaman kritis aktual (h_{aktual}) terhadap redaman kritis awal (h_{awal}) dari beton utuh menunjukkan tingkat kerusakan retakan.

2.5.1 Frekuensi Alamiah (*Natural Frequency*)

Ada dua tipe umum dari getaran (*vibrations*) yaitu *free vibration* dan *forced vibration*. *Free vibration* terjadi saat sebuah struktur berosilasi karena faktor-faktor internal struktur tanpa ada pengaruh gaya-gaya luar yang bekerja pada struktur. Sebaliknya *forced vibration* terjadi saat gaya-gaya eksternal terjadi pada struktur seperti gempa, angin, getaran mesin kendaraan dan lain sebagainya.

Ketika gaya luar terjadi pada struktur maka struktur akan dipaksa untuk berosilasi mengikuti getaran yang diberikan. Apabila frekuensi dari gaya external bergetar dengan besaran frekuensi yang sama dengan besaran frekuensi alamiah struktur, maka struktur tersebut akan mengalami resonansi yang menghasilkan osilasi yang besar dan berbahaya bagi struktur. Peristiwa resonansi dapat mengakibatkan struktur mengalami kegagalan (keruntuhan) seperti yang terjadi pada *Tacoma Narrows Bridge* (1940).

Dalam kondisi *free vibration*, struktur akan bergetar sesuai dengan frekuensi alamiah dari struktur itu sendiri dimana getaran tersebut dipengaruhi oleh besaran properti dinamis internal struktur. Frekuensi alamiah struktur adalah getaran yang terjadi pada suatu struktur ketika struktur tersebut tidak menerima gaya-gaya luar. Frekuensi alami struktur dipengaruhi oleh besaran properti internal struktur, yaitu kekakuan dan massa struktur.

Nilai dari frekuensi alami suatu struktur akan tetap kecuali apabila struktur tersebut mengalami perubahan pada kekakuan dan masa struktur. Kerusakan yang terjadi pada struktur akan menyebabkan degradasi pada kekakuannya. Hal ini akan mempengaruhi secara langsung pada nilai frekuensi alaminya. Dengan demikian frekuensi alami merupakan indikator yang baik terhadap kerusakan yang dialami oleh suatu sistem struktur.

Suatu struktur sederhana seperti balok *kantilever* atau balok diatas dua tumpuan sebenarnya mempunyai *infinite* DOF (derajat kebebasan yang tak hingga). Struktur tersebut dapat disederhanakan menjadi suatu sistim SDOF (*Single Degree of Freedom*) dengan menggunakan *Shape function* (fungsi bentuk). Fungsi bentuk merupakan bentuk deformasi dari suatu struktur yang bergetar, sehingga jika nilai suatu deformasi disuatu lokasi tertentu diketahui, maka dengan menggunakan fungsi bentuk tersebut dapat dicari nilai deformasi disetiap lokasi pada struktur. Dengan kata lain cukup 1 nilai deformasi yang harus dicari, penyederhanaan tersebut dikenal dengan istilah *generalized* SDOF.

Nilai masa m , kekakuan k , redaman c dan gaya luar p yang didapat dengan memasukan fungsi bentuk disebut:

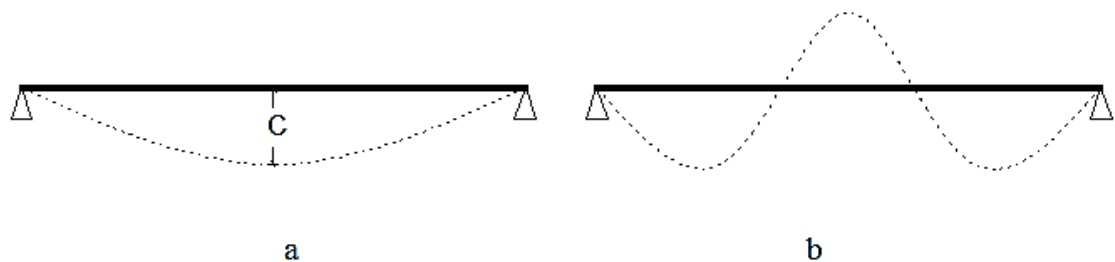
- *Generalized Massa* m^*
- *Generalized Spring Constant* k^*
- *Generalized Damping Coefficient* c^*
- *Generalized Force* p^*

Ada 2 cara untuk memodelkan stuktur MDOF menjadi SDOF dengan SSDOF yaitu Model Kontinue / *Distributed* dan Model tergumpal / *diskrit* namun dalam penelitian

kali ini untuk perhitungan manual akan digunakan Model Kontinue yang akan dijelaskan seperti berikut.

a. Menentukan *Shape Function*

Fungsi bentuk/*shape function* yang dipilih harus memenuhi syarat batas, untuk kasus balok pada dua tumpuan ada banyak sekali kemungkinan bentuk deformasi akibat gaya dinamik dan sebagainya. Tetapi untuk GSDOF diambil bentuk deformasi yang paling “dasar” atau *fundamental*.



Gambar 2.20 Contoh bentuk deformasi dari struktur balok dengan 2 tumpuan

Dalam analisa GDOF, diasumsikan bahwa deformasi dasar dari setuktur mengikuti deformasi pada gambar 2.20.a. *Shape Function* sendiri ditentukan sebagai suatu pendekatan sehingga hasil analisa juga merupakan suatu hasil pendekatan. Misalkan lendutan u di $c = z$, maka: $u(x) = \psi(x).z$ sehingga syarat batas yang harus dipenuhi adalah sebagai berikut:

$$u(x = 0) = 0 \quad \longrightarrow \quad \psi(0) = 0$$

$$u\left(x = \frac{L}{2}\right) = z \quad \longrightarrow \quad \psi\left(\frac{L}{2}\right) = 1$$

$$u(x = L) = 0 \quad \longrightarrow \quad \psi(L) = 0$$

Dari ketentuan-ketentuan diatas salah satu rumus fungsi bentuk yang memenuhi syarat batas yang ditentukan diatas adalah sebagai berikut:

$$\psi(x) = \sin \frac{\pi x}{L} \quad \rightarrow \quad \psi''(x) = -\frac{\pi^2}{L^2} \sin \frac{\pi x}{L} \dots\dots\dots (2.19)$$

b. Menurunkan Rumus Frekuensi Alamiah

Dari *shape function* diatas maka didapatkan *generalized mass* (massa tergeneralisasi) adalah sebagai berikut

$$m^* = \int_0^L m \cdot \psi^2 dx = \int_0^L m \cdot \sin^2 \frac{\pi x}{L} \cdot dx = \frac{m \cdot L}{2} \dots\dots\dots (2.20)$$

Dengan menggunakan *double differential* dari *shape function* maka *generalized stiffness* (kekakuan tergeneralisasi) adalah sebagai berikut:

$$k^* = \int_0^L EI \cdot \psi''^2 \cdot dx = \int_0^L EI \left(\frac{\pi^2}{L^2} \right)^2 \cdot \sin^2 \frac{\pi x}{L} \cdot dx$$

$$k^* = \frac{\pi^4 EI}{2L^3} \dots\dots\dots (2.21)$$

Dengan menggunakan *generalized mass* dan *generalized stiffness* yang telah didapat dari persamaan sebelumnya maka *natural circular frequency* adalah sebagai berikut:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k^*}{m^*}} = \frac{\pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}} \dots\dots\dots (2.22)$$

Dengan memasukan persamaan dari *natural circular frequency* maka didapatkan persamaan *natural period* adalah sebagai berikut:

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} = \frac{2\pi \cdot L^2}{\pi^2 \sqrt{\frac{EI}{m}}} = \frac{2L^2}{\pi \sqrt{\frac{EI}{m}}} \dots\dots\dots (2.23)$$

Karena frekuensi alamiah adalah $f = \frac{1}{T_n}$ maka, persamaan frekuensi alamiah untuk struktur jembatan adalah sebagai berikut:

$$F = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k^*}{m^*}} = \frac{1}{T_n} = \frac{\pi}{2.L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}} \dots\dots\dots(2.24)$$

Dimana :

F = Frekuensi alami teoritis (untuk moda pertama) [Hertz]

L = Panjang bentang jembatan [m]

EI = Kekakuan lentur dinamis [Kn.m²]

m = Massa jembatan [kN.det²/m]

2.5.2 Analisa Kerusakan Struktur

Frekuensi alamiah jembatan berkaitan erat dengan kondisi kerusakan struktural.

Nilai kerusakan struktural relatif adalah sebagai berikut :

$$D_{\text{relatif}} = \frac{(f_{\text{awal}} - f_{\text{aktual}})}{f_{\text{awal}}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.25)$$

Dimana:

D_{relatif} = Nilai kerusakan struktural relative.

f_{aktual} = Frekuensi alami aktual.

f_{awal} = Frekuensi alami awal saat desain.

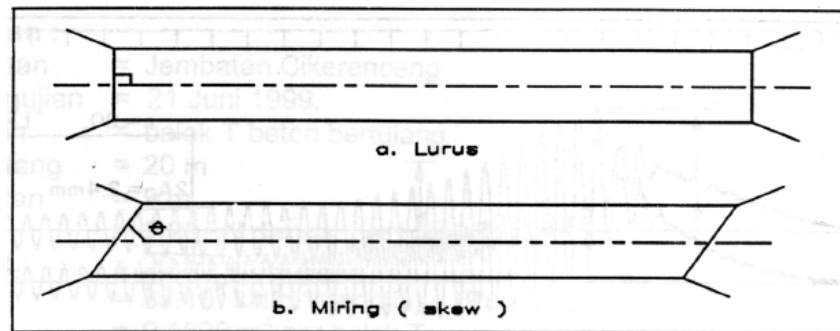
E_{dinamis} diperoleh dari rumus berikut :

$$E_{\text{dinamis,beton}} = \frac{(E_{\text{statis,beton}} + 19.10^6)}{1,25} \dots\dots\dots(2.26)$$

$$E_{\text{dinamis,baja}} = E_{\text{statis,baja}}$$

Analisis moda pertama atau analisa yang sederhana dapat dilakukan dengan rumus (2), sedangkan analisis moda lebih tinggi dan kompleks dapat dilakukan dengan bantuan program struktur analisis seperti Midas-Civil, SAB90, dan lain sebagainya.

Pada analisis noda lebih tinggi akan terlihat perbedaan perubahan bentuk untuk jembatan lurus dan jembatan miring (*skew*) seperti pada gambar 2.5. Jembatan lurus mempunyai perubahan bentuk lentur yang terpisah dari punter sedangkan jembatan miring (*skew*) mempunyai kombinasi antara lentur dan puntir.



Gambar 2.21 Jembatan (a) lurus, Jembatan (b) miring (*skew*).

Nilai penurunan kapasitas (D_{kap}) dari bangunan atas adalah sebagai berikut :

$$D_{kap} = \frac{(EI_{awal}) - (EI_{aktual})}{(EI_{awal})} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2.27)$$

Dimana :

D_{kap} = Nilai penurunan kapasitas

EI_{awal} = Kekakuan lentur awal saat desain [kN/m²]

EI_{aktual} = Kekakuan lentur aktual [kN/m²]

2.5.3 Evaluasi hasil Analisis

Penilaian kondisi bangunan atas jembatan berdasarkan kriteria yang diturunkan dari hasil penelitian seperti terlihat pada tabel 2.4. Hasil pengamatan visual juga harus diperhitungkan dalam penilaian kondisi bangunan atas jembatan.

Luas retakan dari pengamatan visual merupakan keterangan objektif dalam evaluasi rasio redaman. Kondisi retakan dapat diklasifikasi sebagai kondisi baik, cukup, buruk sesuai dengan pengamatan retak rambut, retak setempat, retak menyeluruh.

Tabel 2.4 Penilaian Kondisi Bangunan Atas Jembatan

Nilai Kondisi	Jenis Kerusakan	Nilai Kerusakan Relatif	Nilai Penurunan Kapasitas
		Drel	Dcap
Baik	Utuh	0% - 5%	0% - 10%
Cukup	Rusak Ringan (Non Struktural)	6% - 10%	11% - 20%
Sedang	Rusak Ringan (Struktural)	11% - 17%	21% - 34%
Buruk	Rusak Berat (Struktural)	18% - 20%	35% - 40%

Catatan :

- Nilai dalam tabel 2.2 berlaku untuk bahan bangunan atas yang sejenis, untuk penilaian bangunan atas komposit perlu diperhitungkan penampang sisa.
- Penilaian objektif dibantu oleh pemeriksaan visual

2.6 MIDAS – Civil

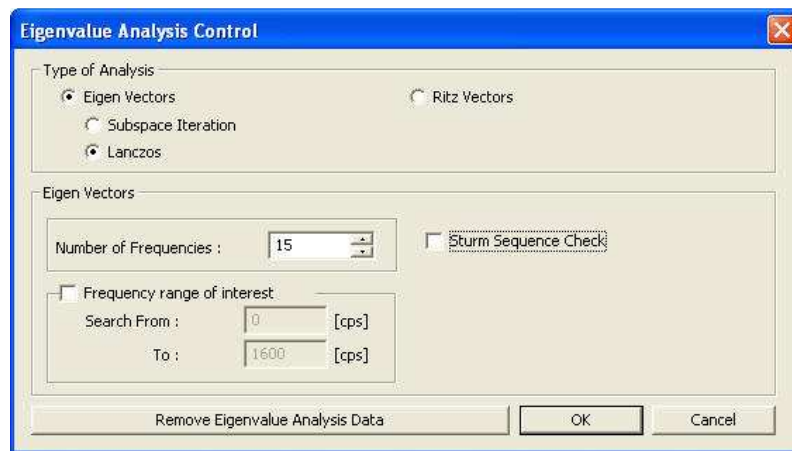
Analisa dinamis yang digunakan dalam MIDAS-Civil menggunakan *Eigenvalue Analysis Control*. Analisis ini menghasilkan parameter sifat dinamis dari struktur dengan menyelesaikan persamaan karakteristik yang terdiri dari matriks massa dan matriks kekakuan struktur. Parameter sifat dinamis yang dihasilkan dari kalkulasi menggunakan *Eigenvalue Analysis Control* adalah sebagai berikut:

- a. *Natural mode* (atau *mode shape*), parameter ini terkait dengan getaran bebas yang terjadi pada system tanpa redaman. Urutan mode menunjuk pada tingkan dimana energy yang diberikan mampu merusak struktur.
- b. *Natural Period* (atau frekuensi natural) adalah waktu yang dibutuhkan suatu struktur untuk bergetar secara bebas dalam siklus alami yang sesuai pada satu *mode* penuh.
- c. *Modal participation factor* adalah Rasio pengaruh *mode* khusus terhadap *mode* total.

Berikut adalah prosedur yang digunakan oleh MIDAS-Civil dalam menganalisa dengan menggunakan *Eigenvalue Analysis Control*, yaitu sebagai berikut:

- a. Berat diri dari unsur-unsur dalam struktur diubah menjadi massa pada menu *Structure Type*. Massa, yang tidak termasuk dalam model, dapat dimasukkan dengan menggunakan menu “*Loads to Masses*” untuk mengkonversi beban ke massa atau dengan langsung menetapkan *Nodal Masses*. Massa total dapat diperiksa pada tabel “*Mass Summary*”. Masukkan data massa dari model menggunakan berbagai fungsi yang ada dalam menu “*Model > Masses menu*”.

- b. Mengaktifkan menu “*Analysis > Eigenvalue Analysis Control*” , dan tentukan semua data yang dibutuhkan untuk melakukan analisis dari *eigenvalue* termasuk jumlah mode.
- c. Kemudian aktifkan “*Perform Analysis*” untuk memulai proses analisa data.
- d. Setelah analisis struktur berhasil diselesaikan, gunakan menu “*Results > Result Tables > Vibration Mode Shape*” atau menu “*Results > Vibration Mode Shapes*” untuk meninjau hasil dari analisa yang telah dilaksanakan.



Gambar 2.22 *Eigenvalue Analysis Control dialog box*

Gambar 2.21 diatas adalah tampilan dari *Eigenvalue Analysis Control dialog box* dimana didalamnya terdapat dua jenis analisa yang dapat dipilih untuk analisa dinamis struktur. Lebih lanjut mengenai dua jenis analisa tersebut akan dijelaskan pada sub-bab berikutnya.

2.6.1 *Eigen Vectors*

Ada dua jenis tipe analisa menggunakan *eigen vektors* yaitu *subspace iteration* dan *lanczos*. *Subspace iteration* digunakan bila langkah Iterasi perhitungan matriks digunakan untuk melakukan *eigenvalue analysis*. Metode ini efektif digunakan saat

melakukan *eigenvalue analysis* untuk sistem elemen hingga skala besar (sistem matriks besar) dan metode ini umum digunakan di kalangan insinyur. Sedangkan lanczos digunakan bila matriks tridiagonal digunakan untuk melakukan analisis *eigenvalue*. Metode ini efektif digunakan saat melakukan analisis *eigenvalue* untuk mode yang lebih rendah.

Dalam *eigenvalue analysis* parameter-parameter yang harus dimasukkan adalah sebagai berikut:

a. *Number of Frequencies*

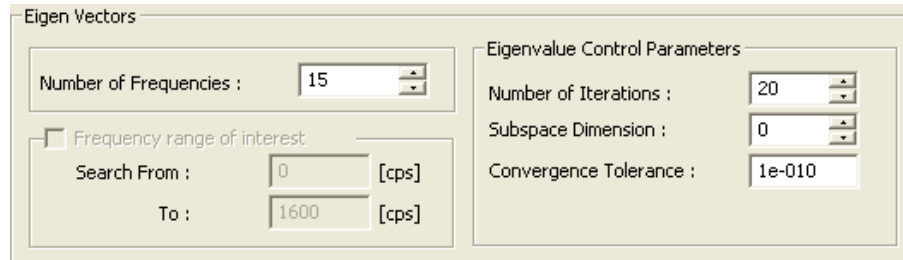
Number of frequencies merupakan masukan dari jumlah frekuensi yang ingin dianalisa oleh user, Jika Jumlah Frekuensi yang dimasukkan melebihi jumlah getaran dari *mode shape* maksimum yang dapat ditahan oleh struktur maka secara otomatis program akan melakukan analisis dengan jumlah maksimum getaran *mode shape*.

Jumlah frekuensi yang sesuai dapat diperiksa oleh jumlah faktor partisipasi modal (atau rasio akumulasi partisipasi massa). Rasio partisipasi massa merupakan rasio dari jumlah massa efektif yang sesuai dengan *mode* massa total. Secara umum, *mode* yang paling berpengaruh dianggap telah dicerminkan jika jumlah faktor partisipasi massa di atas 90%. Jika jumlah dari faktor partisipasi massa kurang dari tingkat yang diperlukan, pengguna harus meningkatkan jumlah mode.

b. *Frequency range of interest*

Frequency range of interest adalah tetapan dari nilai frekuensi yang ingin digunakan oleh user. Perhitungan dimulai dari set frekuensi rendah, dan frekuensi dihitung dalam kisaran yang ditetapkan. Jika frekuensi alami yang dihitung ternyata lebih besar dari nilai frekuensi maksimum yang dimasukkan oleh user, maka tidak ada

tambahan frekuensi yang dihitung. Hanya nilai-nilai yang lebih kecil dari frekuensi maksimum yang di input yang akan digunakan dalam analisis berikutnya.



Gambar 2.23 Jendela dari *eigenvalue analysis* menggunakan metode *eigen vectors*

c. *Eigenvalue Control Parameters*

Kontrol dari parameter *eigenvalue* mencakup jumlah maksimum iterasi, ukuran ruang bagian dan toleransi konvergensi. Parameter-parameter ini diperlukan ketika metode Iterasi Subruang digunakan untuk analisis *eigenvalue*. Metode Iterasi Subruang digunakan untuk analisis dalam MIDAS-civil hingga iterasi berlanjut sampai frekuensi relatif yang nilainya dihitung tidak melebihi toleransi konvergensi yang umumnya nilainya sebesar 1×10^{-10} . Persamaan untuk frekuensi relative adalah sebagai berikut:

$$f_r = \frac{|f_{n+1} - f_n|}{|f_{n+1}|} < 1 \times 10^{-10} \dots\dots\dots (2.28)$$

Dimana :

f_n = Frekuensi relatif pada iterasi ke n

f_{n+1} = Frekuensi relatif pada iterasi ke n+1

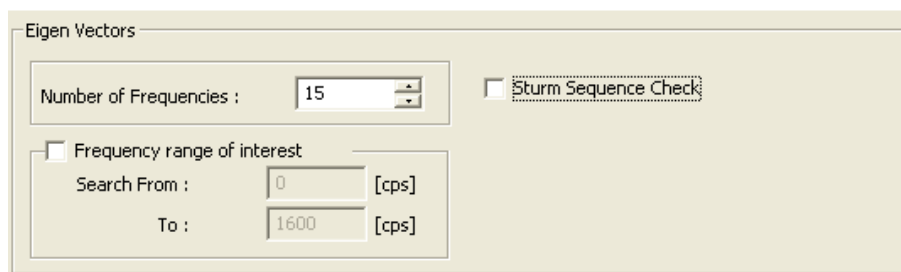
Jika frekuensi alami relatif tidak berada dalam toleransi konvergensi setelah jumlah maksimum iterasi habis, maka tidak akan dilakukan perhitungan tambahan yang

dilakukan, dan frekuensi alami yang dihitung sebelumnya digunakan untuk analisa selanjutnya.

Eigenvalue analysis dan *Buckling Analysis* tidak mungkin dilakukan secara bersamaan, analisa menggunakan Eigenvalue harus dilakukan sebelum analisa-analisa dinamis seperti *Buckling Analysis*, *Time history analysis* atau *Response spectrum analysis* dilakukan. Hal ini karena dalam analisa-analisa tersebut diperlukan parameter-parameter tertentu seperti *natural period* yang dihasilkan oleh analisa *eigenvalue*.

d. Sturm Sequence Check

Strum sequence check hanya ada pada analisa eigenvalue dengan menggunakan metode Lanczos dan berfungsi untuk mendeteksi setiap eigenvalue yang tidak teranalisa (terlewati). *Strum sequence check* dapat digunakan untuk mendapatkan semua nilai eigen dari modus yang lebih rendah tanpa ada *mode* yang hilang atau terlewati.



Gambar 2.24 Jendela dari *eigenvalue analysis* menggunakan metode *Lanczos*

2.6.2 Ritz Vectors

Berbeda dengan *natural eigenvalue modes*, analisa pembebanan yang menggunakan *ritz vector* menghasilkan hasil analisis dinamis yang lebih handal walaupun dengan menggunakan *mode* relatif lebih sedikit. Nilai yang dihasilkan oleh

ritz vector lebih mencerminkan distribusi spasial atau karakteristik pembebanan dinamis.

Dalam analisa menggunakan *Ritz Vector* parameter-parameter yang harus dimasukkan adalah sebagai berikut:

a. *Starting Load Vectors*

Starting Load Vectors digunakan untuk menentukan jenis pembebanan yang diinginkan, yang akan digunakan untuk menghasilkan vektor awal dalam perhitungan *Ritz Vectors*. Jenis pembebanan yang dimaksud dapat berupa beban statis atau gaya inersia dalam setiap arah. Langkah awal adalah dengan memasukan jumlah *load case* yang diinginkan untuk menghasilkan *Ritz Vektor*. *Load case* yang dimaksud dapat berupa beban statis ataupun *ground acceleration load* (beban percepatan tanah).

b. *Include GL-Link Force Vectors*

Include GL-Link Force Vectors digunakan untuk mengaktifkan beban yang menyebabkan deformasi elemen link umum (*General Link*) sehingga secara otomatis dimasukkan untuk menghitung vektor beban awal. Hal ini dimaksudkan untuk memastikan bahwa mode yang berhubungan dengan deformasi pada elemen *general link* dalam setiap analisis menggunakan elemen *general link*.

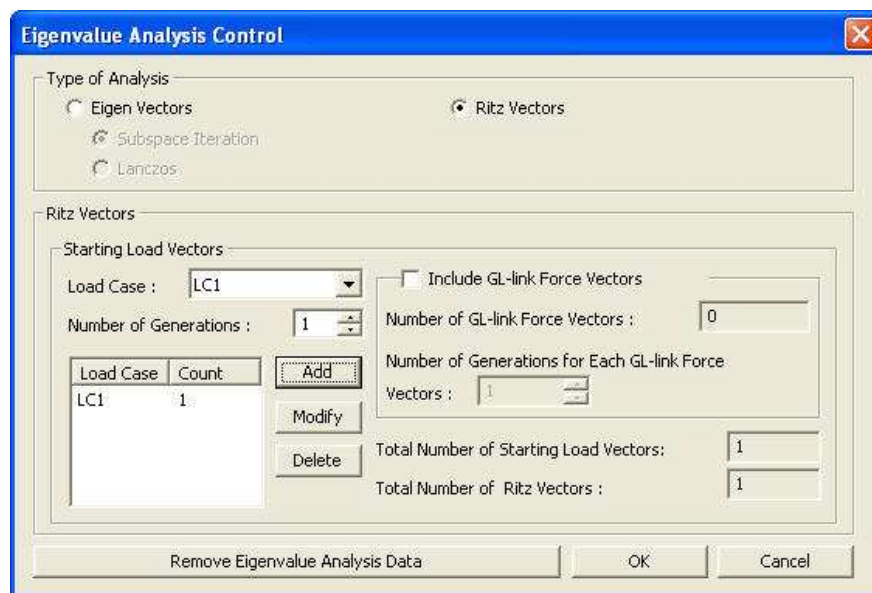
Ada dua parameter yang harus diinput bila ingin menggunakan *Include GL-Link Force Vectors*, yaitu:

- *Number of GL-Link Force Vectors*, program secara otomatis memeriksa dan menghasilkan jumlah dari *starting load vectors* yang dihasilkan oleh *general link elements* yang diinput.

- *Number of Generations for Each GL-link Force*, masukan jumlah dari *Ritz Vectors* untuk digunakan dalam setiap *GL-link load*.

c. Total Number of Ritz Vectors

Total Number of Ritz Vectors digunakan untuk menentukan jumlah dari *Ritz Vektor* yang ingin digunakan dalam analisa. Bila terjadi kasus dimana jumlah *ritz vector* yang dimasukkan oleh user untuk satu *load case* tidak dapat dihitung, maka *mode* yang kurang dihitung berdasarkan pada *load case* lain yang dipilih dalam urutan sekuensial. Ketika jumlah *Vektor Ritz* yang dihitung masih kurang dari jumlah *mode* yang ditentukan oleh pengguna bahkan setelah melakukan adopsi dari *load case* lain, maka hanya *modus* yang dapat dihitung yang digunakan untuk melakukan analisis dinamis berikutnya.



Gambar 2.25 *Eigenvalue Analysis Control dialog box*

Contents

BAB 2 TINJAUAN KEPUSTAKAAN	7
2.1 Jembatan Komposit	7
2.1.1 <i>Multi-girder bridge</i>	8
2.1.2 Ladder Deck Bridges.....	13
2.1.3 Plat Lantai	18
2.2 Sifat Bahan Material Struktur Komposit.....	19
2.2.1 Sifat Bahan Material Baja	19
2.2.2 Sifat Bahan Material Beton.....	22
2.3 Konstruksi Komposit Baja-Beton	24
2.3.1 Latar Belakang Sejarah	24
2.3.2 Aksi Komposit	25
2.3.3 Kelebihan dan Kekurangan Struktur Komposit	26
2.3.4 Lebar Efektif.	27
2.3.5 Metode Pelaksanaan Stuktur Komposit.	28
2.3.6 Kekuatan Batas Penampang Komposit.	28
2.3.7 Alat Penyambung Geser (<i>Shear Connector</i>).....	31
2.3.8 Desain dengan LRFD (Load dan Resistance Factor Design).	33
2.4 Korosi pada Baja <i>Girder</i>	34
2.4.1 Perkembangan dan Berbagai Bentuk Korosi	35
2.4.2 Lokasi dan Tingkat Korosi.....	36
2.4.3 Efek Destruktif Korosi	40
2.5 Parameter Dinamis	41
2.5.1 Frekuensi Alamiah (<i>Natural Frequency</i>).....	42
2.5.2 Analisa Kerusakan Struktur	46
2.5.3 Evaluasi hasil Analisis	47
2.6 MIDAS – Civil	49
2.6.1 <i>Eigen Vectors</i>	50

2.6.2	<i>Ritz Vectors</i>	53
-------	---------------------------	----

Gambar 2.1 Potongan melintang dari <i>multi-girder bridge</i>	8
Gambar 2.2 Jembatan <i>multi-girder</i> dengan menggunakan <i>plate girder</i>	9
Gambar 2.3 Detail dari <i>Support Bracing</i> pada ujung perletakan jembatan	10
Gambar 2.4 <i>Intermediate Bracing</i> sistem rangka segitiga dan system baja <i>chanel</i>	11
Gambar 2.5 <i>Plan-Cross Bracing</i> pada jembatan komposit.....	12
Gambar 2.6 <i>Crosshead girder</i> pada <i>multi-girder bridge</i>	13
Gambar 2.7 Potongan melintang <i>Ladder deck bridge</i>	14
Gambar 2.8 Konfigurasi <i>girder</i> yang membentuk tangga pada <i>ladder deck bridge</i>	14
Gambar 2.9 Potongan melintang perletakan tengah jembatan <i>ladder-deck</i>	16
Gambar 2.10 Potongan melintang <i>knee bracing</i> (atas) dan <i>haunched cross-girder</i>	17
Gambar 2.11 <i>Ladder deck</i> dengan menggunakan <i>cantilever girder</i>	18
Gambar 2.12 Grafik perbandingan tegantan dan regangan (Modulus Elastisitas).....	21
Gambar 2.13 Berbagai tipe bentuk struktur komposit	24
Gambar 2.14 Perbedaan lendutan struktur non-komposit dan struktur komposit.....	25
Gambar 2.15 Lebar Efektif Struktur Komposit.....	27
Gambar 2.16 Distribusi tegangan pada kapasitas momen ultimit.....	29
Gambar 2.17 Berbagai jenis <i>Shear Connector</i> dan bentuknya	32
Gambar 2.18 Korosi seragam pada permukaan baja <i>girder</i>	36
Gambar 2.19 Penampang balok <i>girder</i> yang mengalami korosi.....	36
Gambar 2.20 Contoh bentuk deformasi dari struktur balok dengan 2 tumpuan	44
Gambar 2.21 Jembatan (a) lurus, Jembatan (b) miring (<i>skew</i>).	47
Gambar 2.22 <i>Eigenvalue Analysis Control dialog box</i>	50
Gambar 2.23 Jendela dari <i>eigenvalue analysis</i> menggunakan metode <i>eigen vectors</i>	52
Gambar 2.24 Jendela dari <i>eigenvalue analysis</i> menggunakan metode <i>Lanczos</i>	53
Gambar 2.25 <i>Eigenvalue Analysis Control dialog box</i>	55

Tabel 2.1 Tegangan leleh dari baja	22
Tabel 2.2 Koefisien regresi secara numerik dari data eksperimental.....	38
Tabel 2.3 <i>Atmospheric Corrosion Rate</i> menurut NACE <i>International</i> ($\mu\text{m}/\text{Tahun}$).....	39
Tabel 2.4 Penilaian Kondisi Bangunan Atas Jembatan	48