

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kerusakan Struktur

Kerusakan struktur merupakan pengurangan kekuatan struktur dari kondisi mula-mula yang menyebabkan terjadinya tegangan yang tidak diinginkan, *displacement*, atau getaran pada struktur sehingga dapat menyebabkan terjadinya kegagalan struktur. Kerusakan struktur dapat terjadi akibat banyak faktor, antara lain bertambahnya umur material (misalnya karat), pengaruh iklim, perubahan kekakuan (timbul retak), beban berlebihan, kegagalan sambungan (misalnya baut yang lepas atau las yang hancur) dan lain-lain.

Berdasarkan Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 49 Tahun 1996 Tentang: Baku Tingkat Getaran, pengaruh kerusakan struktur adalah sebagai berikut:

- a. kerusakan pada struktur, dapat membahayakan stabilitas bangunan, atau roboh (misalnya patok kolom bisa merobohkan bangunan),
- b. kerusakan pada non struktur, tidak membahayakan stabilitas bangunan, tetapi bisa membahayakan penghuni (misalnya dinding partisi yang roboh, tidak merobohkan bangunan, tetapi bisa mencederai penghuni).

Berdasarkan pengaruh kerusakan struktur di atas, derajat kerusakan struktur dapat dikategorikan sebagai berikut:

- a. rusak ringan adalah rusak yang tidak membahayakan stabilitas bangunan dan dapat diperbaiki tanpa mengurangi kekuatannya,

- b. rusak sedang adalah rusak yang dapat mengurangi kekuatan struktur untuk mengembalikan kepada kondisi semula, harus disertai dengan tambahan kekuatan,
- c. rusak berat adalah rusak yang membahayakan bangunan dan dapat merobohkan bangunan.

2.2 Deteksi Kerusakan Struktur

Deteksi kerusakan struktur merupakan salah satu usaha perawatan struktur. Deteksi kerusakan dini perlu dilakukan untuk mengetahui kerusakan yang terjadi terhadap integritas bangunan. Dengan hasil deteksi kerusakan dini, dapat diketahui tingkat keamanan struktur dan juga usaha-usaha untuk memperbaiki struktur tersebut sebelum terjadi kegagalan struktur yang dapat menyebabkan korban jiwa dan kerugian materi.

Identifikasi mengenai kekuatan dan kerusakan struktur merupakan bidang penelitian yang cukup mendapat perhatian semenjak terjadinya bencana-bencana besar khususnya gempa bumi yang terjadi di beberapa negara di dunia. Beberapa kelompok peneliti melakukan usaha deteksi kerusakan struktur dengan mengamati perubahan frekuensi alami struktur, seperti Adam et al (1978), Cawley dan Adams (1979), Aktan et al (1994) dan Bernal dan Gunes (2000). Sejalan dengan ini deteksi kerusakan struktur dengan menggunakan ragam getaran (*mode shape*) juga banyak dilakukan misalnya oleh West (1984), Kim et al (1992), dan Liu (1995). Koh et al (1995) menggunakan perubahan dari kekakuan tingkat dari data ragam getaran untuk memprediksi kerusakan struktur rangka batang yang dikombinasikan dengan teknik kondensasi.

Shi et al. (2000a) menggunakan *incomplete modeshape* dalam mendeteksi kerusakan struktur. Selain menggunakan *incomplete modeshape*, Shi et al. (2000b dan 2002) juga menggunakan energi regangan ragam getaran (*modal strain energy*) untuk mendeteksi kerusakan struktur. Dalam usaha penelitian yang lain, metode matriks fleksibilitas juga telah digunakan untuk mendeteksi kerusakan struktur. Deteksi kerusakan struktur dengan menggunakan perubahan matriks fleksibilitas dilakukan oleh Pandey dan Biswas (1994 dan 1995). Selanjutnya Bernal (2002) mengajukan metode matriks fleksibilitas untuk mendapatkan vektor beban penentu lokasi kerusakan (VBPLK). VBPLK merupakan satu set vektor beban yang apabila dikerjakan pada lokasi sensor akan menghasilkan tegangan yang sangat kecil pada elemen yang rusak. Metode matriks fleksibilitas kemudian divalidasi dengan percobaan di laboratorium oleh Gao et al (2004).

Metode matriks fleksibilitas juga telah ditinjau secara numerik pada beberapa bentuk struktur, antara lain pada struktur rangka bidang dan portal bidang oleh Arfiadi dan Wibowo (2005), Arfiadi (2009 dan 2012) dan Saputro (2011). Dari hasil analisis yang dilakukan oleh Arfiadi (2012) tampak bahwa untuk struktur rangka bidang dengan jumlah derajat kebebasan 25, penggunaan sensor 2 buah dapat mendeteksi kerusakan batang. Sedangkan analisis yang dilakukan oleh Saputro (2011) menunjukkan bahwa metode matriks fleksibilitas dengan vektor beban penentu lokasi rusak, dapat digunakan untuk mendeteksi kerusakan semua elemen struktur baik balok maupun kolom pada portal bidang baja 6 lantai.

Pada tahun yang sama, Gunes dan Gunes (2012) mengaplikasikan metode matriks fleksibilitas secara eksperimental pada model struktur *ASCE Benchmark* dengan beberapa kasus kerusakan yang berbeda pada konfigurasi struktur *bracing* dan *non-bracing*. Hasil percobaan menunjukkan metode matriks fleksibilitas berhasil mengidentifikasi lokasi kerusakan struktur.

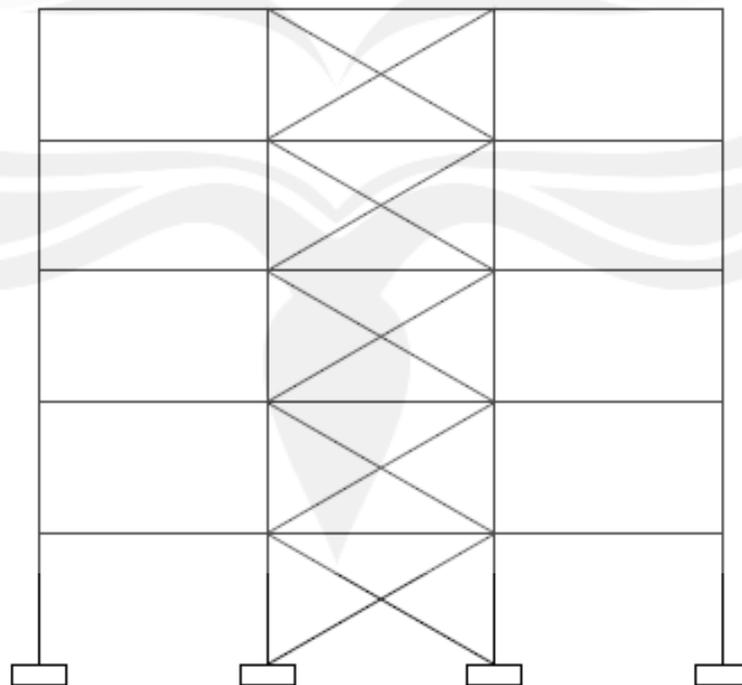
2.3 Portal Bidang Baja

Portal bidang adalah suatu struktur di mana titik kumpul, yang merupakan pertemuan batang-batang, dihubungkan secara kaku. Portal bidang biasanya merupakan bagian dari struktur tiga dimensi pada salah satu sumbu tertentu. Portal bidang terdiri dari balok dan kolom. Balok dan kolom pada portal bidang biasanya dimodelkan sebagai elemen garis (Arfiadi, 2011). Portal bidang dapat berupa portal bidang beton maupun baja. Portal baja mempunyai kelebihan pada besarnya rasio antara berat terhadap daya dukungnya namun struktur menjadi langsing sehingga kurang stabil dalam menahan beban horizontal.

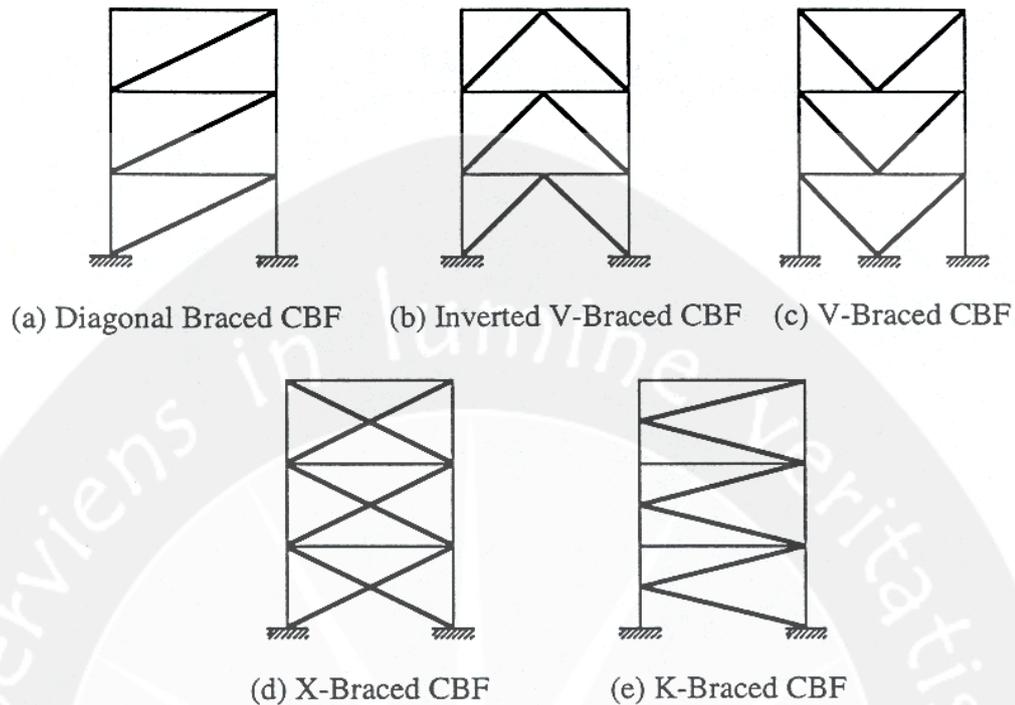
Semakin tinggi atau banyak jumlah tingkat gedung tinggi maka kestabilan lateral ini semakin menurun walaupun desain kekuatan elemen-elemen struktur sudah memenuhi kriteria perancangan. Hal ini dapat dilihat dari besarnya perpindahan lateral maksimum yang semakin meningkat secara berarti melebihi indeks simpangan lateral yang ditentukan. Usaha untuk mengurangi besarnya perpindahan lateral dan meningkatkan stabilitas lateral portal bidang baja adalah dengan menambah elemen pengaku diagonal (*bracing*) tunggal yang dipasang pada bentang tertentu ke arah vertikal.

Ada dua tipe portal baja tahan gempa, yaitu *Moment Resisting Frame* (MRF) dan *Braced Frame* (BF). *Braced frame* dibagi menjadi *Concentrically Braced Frame* (CBF) dan *Eccentrically Braced Frame* (EBF). Beberapa tipe portal baja *bracing* konsentrik yang sering digunakan pada bangunan adalah tipe *X-brace*, *Chevron brace* dan *Single diagonal*. Untuk tipe *X-brace*, pada penggunaannya dapat dipasang menyilang di setiap lantai atau menyilang melewati dua lantai yang sering disebut dengan *Two-Story X Bracing*.

Pada CBF, elemen pengaku merupakan elemen struktur yang terlemah dibandingkan dengan elemen-elemen struktur yang lain seperti kolom, balok, dan sambungan, sehingga pada saat mendesain CBF diusahakan agar tidak terjadi perilaku inelastik pada pengaku (Setiyowati dkk, 2012). Untuk kegagalan struktur yang terjadi, yang diharapkan adalah leleh pada pengaku terlebih dahulu daripada pada sambungan.



Gambar 2.1 Model Portal dengan Elemen Garis



Gambar 2.2 Tipe-tipe *Concentrically Braced Frame* (Uang et al, 2009)

2.4 Derajat Kebebasan

Derajat kebebasan atau derajat ketidaktentuan kinematik adalah jumlah perpindahan titik kumpul yang tidak tergantung dengan perpindahan lain (*independent joint displacement*) (Arfiadi, 2011). Balok-balok dan kolom-kolom pada portal bidang mengalami lenturan, sehingga gaya internal yang terjadi adalah gaya aksial (normal), gaya geser, dan momen. Pada portal bidang, titik kumpul mempunyai tiga derajat kebebasan. Untuk struktur yang mempunyai jumlah titik kumpul bebas sebesar N , maka jumlah derajat kebebasan adalah $3 \times N$ ditambah derajat kebebasan pada tumpuan sendi dan rol.

Kadang-kadang ditemui kasus dimana pada titik kumpul antar batang tidak dihubungkan secara kaku tetapi dengan suatu sendi (*pinned*). Dalam keadaan ini, ujung batang bebas berotasi sehingga momen pada ujung sendi sama dengan nol.

Namun, kompatibilitas rotasi batang dengan ujung sendi tidak ada karena rotasinya independen terhadap rotasi batang-batang yang lain. Beberapa kondisi yang mungkin terjadi untuk mengatasi masalah ini adalah dengan menganggap ujung-ujung batang dalam kondisi sendi-jepit, jepit-sendi atau sendi-sendi (Arfiadi, 2011). Matriks kekakuan batang nantinya diturunkan berdasarkan kondisi yang dipilih.

Selain perpindahan pada titik kumpul, terjadi pula perpindahan pada tumpuan. Tumpuan sendi memiliki satu perpindahan yaitu rotasi (momen) sedangkan tumpuan rol mempunyai perpindahan rotasi dan perpindahan dalam arah horizontal. Untuk tumpuan jepit tidak ada perpindahan pada tumpuan atau titik tersebut. Jumlah derajat kebebasan akan menentukan ukuran matriks pada metode matriks kekakuan.

2.5 Metode Analisis Struktur dengan Matriks

Dalam analisis struktur dengan metode matriks, dikenal ada dua metode analisis yang dilakukan yaitu metode matriks kekakuan dan metode matriks fleksibilitas. Metode matriks kekakuan atau metode perpindahan adalah metode yang didasarkan pada perpindahan sebagai faktor yang belum diketahui dan harus dihitung terlebih dahulu baru setelah itu gaya-gaya batang ditentukan. Langkah-langkah analisis pada metode matriks kekakuan sangat sistematis dan terpolah sehingga mudah diprogram dengan komputer. Secara umum langkah hitungan pada metode matriks kekakuan dapat dilakukan sebagai berikut:

1. bentuk matriks kekakuan elemen dan gaya ujung jepit,
2. bentuk matriks kekakuan dalam koordinat global,

3. selesaikan persamaan simultan untuk mencari perpindahan,
4. gaya-gaya batang dapat dihitung.

Permasalahan pada metode matriks kekakuan didasarkan pada hubungan antar variabel sebagai berikut:

- a. hubungan antara deformasi batang dan perpindahan titik kumpul (*compatibility* atau kesepadanan),
- b. hubungan antara deformasi batang dan gaya-gaya dalam (*constitutive law*),
- c. hubungan antara beban luar dan gaya-gaya dalam (keseimbangan).

Secara skematis, hubungan-hubungan tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.3. Berdasarkan Gambar 2.3 formulasi metode matriks kekakuan dapat diperoleh sebagai berikut ini (Arfiadi, 2011):

- a. dari kompatibilitas (kesepadanan) antara deformasi internal pada batang (dalam koordinat batang/lokal) dan perpindahan titik kumpul (dalam koordinat global):

$$\{u\} = [T]\{U\} \quad (2-1)$$

dengan, $\{u\}$ = deformasi internal, $[T]$ = matriks transformasi, dan $\{U\}$ = perpindahan global titik kumpul.

- b. dari hubungan antara gaya-gaya dalam dan deformasi internal (*constitutive law*):

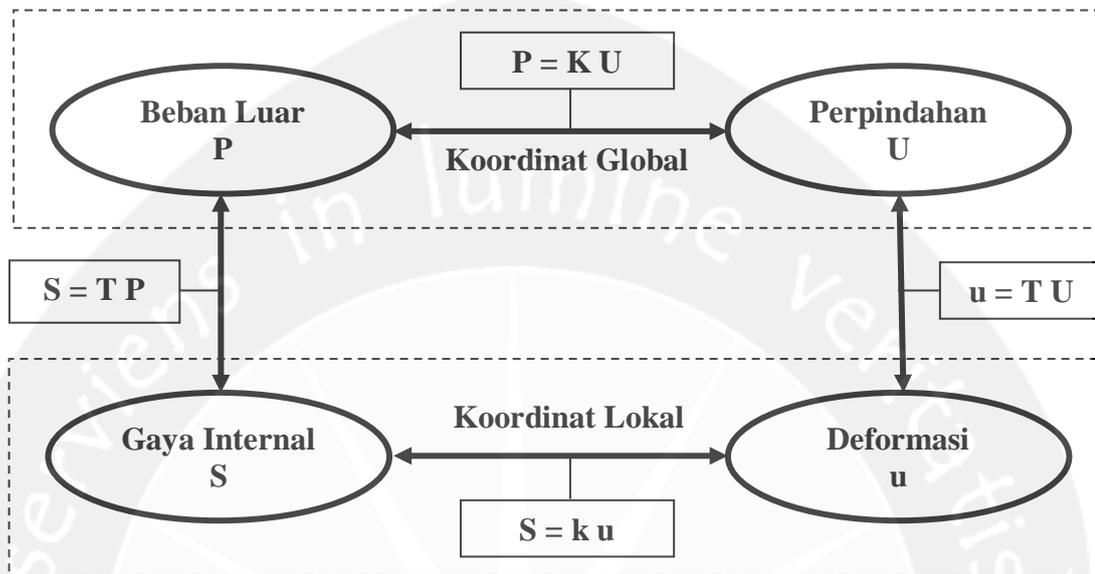
$$\{S\} = [k]\{u\} \quad (2-2)$$

dengan, $\{S\}$ = gaya internal batang, $[k]$ = matriks kekakuan batang dalam koordinat lokal, $\{u\}$ = deformasi internal.

- c. dari hubungan antara beban luar dan gaya internal (keseimbangan):

$$\{S\} = [T] \{P\} \quad (2-3)$$

dengan, $\{P\}$ = vektor beban luar dalam koordinat global.



Gambar 2.3 Hubungan dalam Analisis Struktur (Arfiadi, 1996)

Selanjutnya, persamaan (2-3) dapat ditulis menjadi:

$$\{P\} = [T]^{-1} \{S\} \quad (2-4)$$

Berdasarkan prinsip kerja luar = kerja dalam, sebagai berikut:

$$\text{Kerja luar} = \{P\}^T \{U\} \quad (2-5)$$

$$\text{Kerja dalam} = \{S\}^T \{u\} \quad (2-6)$$

diperoleh:

$$\{P\}^T \{U\} = \{S\}^T \{u\} \quad (2-7)$$

Apabila persamaan (2-1) disubstitusikan pada persamaan (2-7), maka diperoleh:

$$\{P\}^T \{U\} = \{S\}^T [T] \{U\} \text{ atau } \{P\}^T = \{S\}^T [T] \quad (2-8)$$

Dengan mentransposkan persamaan (2-8), maka diperoleh:

$$\{P\} = [T]^T \{S\} \quad (2-9)$$

Jika persamaan (2-9) dibandingkan dengan persamaan (2-4), maka terbukti bahwa matriks transformasi $[T]$ adalah matriks orthogonal, yaitu $[T]^T = [T]^{-1}$.

Selanjutnya, persamaan (2-2) disubstitusikan pada persamaan (2-9), sehingga diperoleh:

$$\{P\} = [T]^T [k] \{u\} \quad (2-10)$$

Dengan mengingat persamaan (2-1), akhirnya diperoleh hubungan:

$$\{P\} = [T]^T [k] [T] \{U\} \text{ atau } \{P\} = [K] \{U\} \quad (2-11)$$

dengan, $[K] = [T]^T [k] [T]$ (2-12)

Dalam persamaan (2-12), $[K]$ dikenal sebagai matriks kekakuan dalam koordinat global.

Formulasi-formulasi di atas menjadi dasar dalam analisis struktur dengan menggunakan metode matriks kekakuan. Formulasi tersebut berlaku umum dan dapat digunakan baik pada struktur rangka bidang maupun portal bidang (Arfiadi, 2011).

Berbeda dengan metode matriks kekakuan, metode matriks fleksibilitas atau metode gaya adalah metode yang didasarkan pada gaya (reaksi tumpuan ataupun gaya-gaya dalam) sebagai faktor yang belum diketahui sedangkan *displacement* atau perpindahan dapat diperoleh pada tahap berikutnya berdasarkan gaya-gaya yang telah diperoleh dari tahap sebelumnya.

Perbedaan dari matriks kekakuan dan matriks fleksibilitas adalah terletak pada besaran yang harus dicari terlebih dahulu, yang dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\{P\} = [K]\{U\} \quad (2-13)$$

$$\{U\} = [F]\{P\} \quad (2-14)$$

Dalam persamaan di atas, K adalah kekakuan, P adalah gaya, U adalah perpindahan dan F adalah fleksibilitas. Dari persamaan (2-13) dan (2-14), hubungan antara kekakuan dan fleksibilitas dapat dinyatakan sebagai berikut (Weaver, 1980):

$$[F] = [K]^{-1} \text{ atau } [K] = [F]^{-1} \quad (2-15)$$

2.6 Matriks Massa

Penentuan matriks massa dapat dilakukan dengan dua metode yaitu metode matriks massa terpusat (*Lumped Mass*) dan metode matriks massa konsisten (*Consistent Mass*). Analisa dinamik sistem massa yang konsisten umumnya membutuhkan usaha perhitungan yang jauh lebih besar daripada yang dibutuhkan untuk sistem massa terpusat, karena dua hal:

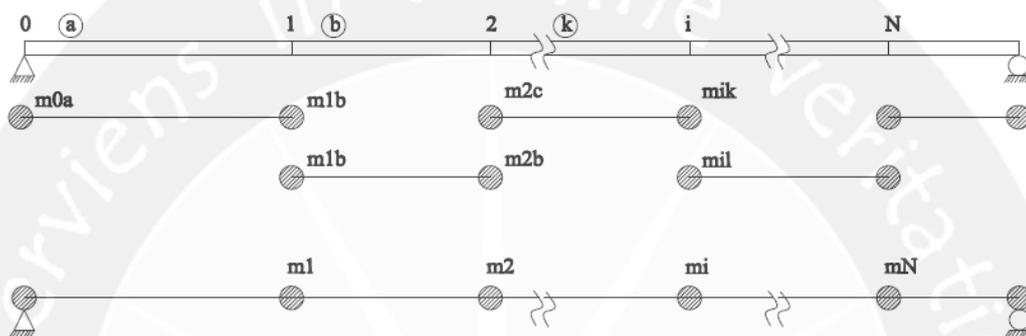
- a. matriks massa terpusat adalah matriks diagonal sedangkan matriks massa konsisten mempunyai banyak suku di luar diagonal,
- b. derajat kebebasan rotasi dapat dieliminasi pada analisis massa terpusat, sedangkan semua derajat kebebasan rotasi dan translasi harus termasuk dalam analisis massa konsisten (Clough and Penzien, 1997).

Namun, analisa dinamis dengan menggunakan matriks massa konsisten memberikan hasil yang mendekati solusi eksak dibandingkan dengan metode matriks massa terpusat.

2.6.1 Matriks Massa Terpusat (*Lumped Mass*)

Metoda yang paling mudah untuk meninjau sifat inersia untuk sebuah sistem dinamis adalah dengan menganggap bahwa massa terpusat pada koordinat nodal dimana terjadi perpindahan translasi.

Prosedur yang biasanya dipakai adalah mendistribusikan massa dari setiap elemen pada titik nodal elemen. Distribusi massa ini ditentukan dengan cara statis. Gambar 2.4 menunjukkan prosedur untuk suatu struktur tipe balok. Penyusunan matriks massa untuk seluruh struktur dilakukan dengan cara yang sederhana yaitu dengan menjumlahkan bagian massa terpusat pada koordinat nodal (Paz, 1987).



Gambar 2.4 Pengumpulan Massa pada Simpul Balok (Clough and Penzien, 1997)

Untuk sistem yang hanya derajat kebebasan translasinya yang ditetapkan, matriks massa terpusat mempunyai bentuk diagonal, untuk sistem pada Gambar 2.4 akan dituliskan dimana terdapat suku-suku sebanyak derajat kebebasan.

$$m = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_2 & \dots & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & m_3 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_i & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & m_N \end{bmatrix} \quad (2-16)$$

Suku m_{ij} di luar diagonal matriks ini hilang karena percepatan setiap titik massa hanya menimbulkan gaya inersia pada titik tersebut. Gaya inersia pada i yang disebabkan oleh satu satuan percepatan titik i jelas sama dengan massa yang terpusat pada titik tersebut.

Dengan demikian, koefisien pengaruh massa pada sistem terpusat adalah $m_{ij} = m_i$. Jika pada setiap titik simpul ditetapkan lebih dari satu derajat kebebasan translasi, massa titik yang sama akan berkaitan dengan masing-masing derajat kebebasan. Sebaliknya, massa yang berkaitan dengan setiap derajat kebebasan rotasi akan menjadi nol oleh karena asumsi bahwa massa terpusat pada titik-titik yang tidak mempunyai inersia rotasi. Tentu saja, jika massa yang kaku mempunyai inersia rotasi yang terhingga dikaitkan dengan derajat kebebasan rotasi, koefisien massa diagonal untuk derajat kebebasan tersebut akan merupakan inersia rotasi massa. Jadi matriks massa terpusat pada umumnya adalah matriks diagonal yang akan mencangkup elemen diagonal nol untuk derajat kebebasan rotasi (Clough and Penzien, 1997).

2.6.2 Matriks Massa Konsisten (*Consistent Mass*)

Pada metode matriks massa konsisten, koefisien massa dapat dievaluasi dengan cara yang sama seperti pada penentuan koefisien kekakuan elemen, sehubungan dengan koordinat nodal elemen balok. Derajat kebebasan elemen adalah translasi dan rotasi pada masing-masing ujung. Bila koefisien massa elemen-elemen struktur telah dievaluasi, matriks massa dari kumpulan elemen yang lengkap dapat ditentukan dengan tipe prosedur superposisi yang sama persis dengan yang diuraikan untuk mendapatkan matriks kekakuan dari kekakuan elemen. Biasanya matriks massa yang dihasilkan akan mempunyai koefisien yang sama dengan matriks kekakuan, yaitu terdiri dari susunan suku-suku yang bukan nol (Clough and Penzien, 1997).

Apabila matriks massa konsisten dianggap mendapat pengaruh lenturan dan aksial, maka matriks massa konsisten untuk sebuah elemen balok seragam pada koordinat lokal sebagai berikut (Paz, 1987):

$$M_c = \frac{\bar{m}L}{420} \begin{bmatrix} 140 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 22L & 0 & 54 & -13L \\ 0 & 22L & 4L^2 & 0 & 13L & -3L^2 \\ 70 & 0 & 0 & 140 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & 13L & 0 & 156 & -22L \\ 0 & -13L & -3L^2 & 0 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (2-17)$$

Untuk membentuk matriks massa konsisten sebuah elemen dalam koordinat global, langkah yang harus ditempuh sama seperti langkah untuk mendapatkan matriks kekakuan elemen dalam koordinat global.