



UNIVERSITAS INDONESIA

**IDENTIFIKASI KERUSAKAN STRUKTUR BERDASARKAN
KARAKTERISTIK DINAMIK**

TESIS

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Magister Teknik**

**SENDI ADITYA PUTRA
0806474382**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
DEPOK
JULI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Sendi Aditya Putra

NPM : 0806474382

Tanda Tangan :

Tanggal :

ORIGINALITY DECLARATION PAGE

I hereby declare that this thesis is the result of my own work, and all the sources quoted or referenced have been stated correctly.

Name : Sendi Aditya Putra

NPM : 0806474382

Signature :

Date :

HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh:

Nama : Sendi Aditya Putra

NPM : 0806474382

Program Studi : Teknik Sipil

Judul Tesis : Identifikasi Kerusakan Struktur Berdasarkan Karakteristik Dinamik

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Yuskar Lase (.....)

Penguji : Dr-Ing. Ir. Josia Irwan R. (.....)

Penguji : Dr. Ir. Elly Tjahjono (.....)

Penguji : Mulia Orientilize, ST, M.Eng (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 06 Juli 2010

LEGITIMATION PAGE

This thesis is submitted by:

Name : Sendi Aditya Putra

NPM : 0806474382

Study Program: Teknik Sipil

Thesis Title : Strucural Damage Identification Based On Dynamic Characteristics

Has been successfully defended in front of the board of Examiners and accepted as part of the requirements to obtain an Engineering Master Degree in Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Indonesia.

BOARD OF EXAMINERS

Advisor : Dr. Ir. Yuskar Lase (.....)

Examiner : Dr-Ing. Ir. Josia Irwan R. (.....)

Examiner : Dr. Ir. Elly Tjahjono (.....)

Examiner : Mulia Orientilize, ST, M.Eng (.....)

Defined at : Depok

Date : 6th July 2010

KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur saya panjatkan bagi Tuhan Semesta Alam Allah SWT yang atas nikmat kesehatan fisik sehingga penulisan tesis ini dapat diselesaikan dengan baik. Dimana penulisan tesis ini ditujukan sebagai salah satu persyaratan untuk mencapai gelar Magister Teknik Program Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bimbingan dan dukungan dari berbagai pihak, akan mustahil penulisan tesis dapat terselesaikan. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Dr. Ir. Yuskar Lase selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu, tenaga dan pemikiran selama hampir lebih dari 6 bulan dalam proses penulisan tesis, sehingga tesis ini dapat terselesaikan.
2. Bapak Margani, Ibu Masitoh dan Gina Fitria Sari yang telah memberikan dukungan dan doa tanpa henti, terutama setelah lebih dari tujuh tahun saya meninggalkan rumah, jauh di perantauan.
3. Yohannes Arief N. Siregar (the master), teman seperjuangan dari awal hingga akhir.
4. Guru-guru dan dosen-dosen kehidupan saya selama 25 tahun saya hidup, baik formal dan non-formal. Terima kasih atas ilmu pengetahuan yang anda tularkan.
5. Sahabat-sahabat sipil FTUI angkatan 2003, 2004, 2005 dan 2006 (anak-anak kepodang).
6. Sahabat-sahabat centraliens yang selalu memberikan dukungan à distance. Pour Andrea Boneschi – Voilà, J'ai mis ton nom à ma these comme tu l'avais le même à ta these.
7. Last but you all know she's not least, Sesa Indriyanaspari. Terima kasih atas dukungan affectionate-nya selama ini. Maaf apabila disaat-saat tertentu kamu jadi nomor dua setelah tesis ini.

Akhir kata, dengan selesainya penulisan tesis ini, penulis berharap semoga tesis ini dapat memberi manfaat bagi penulis pada khususnya dan bagi pembaca

pada umumnya. Semoga Allah SWT senantiasa mencurahkan rahmat dan karunia-Nya kepada kita semua. Amin.

Depok, 06 Juli 2010

Penulis



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Sendi Aditya Putra
NPM : 0806474382
Program Studi : Teknik Sipil
Departemen : Teknik Sipil
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Tesis

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif** (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**IDENTIFIKASI KERUSAKAN STRUKTUR BERDASARKAN
KARAKTERISTIK DINAMIK**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di: Depok
Pada tanggal : 06 Juli 2010
Yang menyatakan

(Sendi Aditya Putra)



ABSTRAK

Nama : Sendi Aditya Putra
Program Studi : Magister Teknik Sipil (Struktur)
Judul : Identifikasi Kerusakan Struktur Berdasarkan Karakteristik Dinamik

Moda getar dan frekuensi natural yang merupakan karakteristik dinamik suatu sistem struktur, terbentuk berdasarkan properti fisik serta konfigurasi dari tiap komponen penyusun suatu sistem struktur. Sehingga perubahan karakteristik dinamik berarti juga perubahan pada properti fisik ataupun konfigurasi sistem struktur. Sehingga berlandaskan dari ide ini, dikembangkan suatu metode identifikasi lokasi dan tingkat kerusakan dengan memanfaatkan perubahan pada karakteristik dinamik. Pada penelitian ini salah satu metode tersebut ditampilkan, dan dilakukan beberapa simulasi dengan metode tersebut.

Metode ini mampu memberikan hasil yang akurat untuk penentuan lokasi kerusakan, namun untuk penentuan tingkat kerusakan terdapat beberapa kekurangan, yaitu dibutuhkannya data modal yang cukup banyak serta besarnya kerusakan dan banyak elemen yang diidentifikasi secara simultan memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap keakurasian hasil dari penentuan tingkat kerusakan. Selain itu untuk identifikasi tingkat kerusakan, disimpulkan bawah lokasi elemen dan fungsinya memiliki andil terhadap baik atau buruknya hasil identifikasi.

Kata Kunci : Karakteristik Dinamik, Lokasi Kerusakan, Tingkat Kerusakan

ABSTRACT

Name : Sendi Aditya Putra
Course : Structural Engineering (Civil Engineering)
Judul : Strucural Damage Identification Based On Dynamic Characteristics

Modes of vibration and natural frequencies are the dynamic characteristics of a structural system, which are formed by the physical properties and the spatial configuration of each component in a structural system. By this definition, a shift in each value of the dynamic characteristics means also that changes happen in the physical properties or the spatial configuration of the structure. Based on this idea, some methods to identify structural damage based on dynamic chracteristics are developed. In this research one of these methods is presented, and some simulations are carried out.

This method is capable to identify the damage's location with high accuracy, but there are some weaknesses on how the method identify the severity of the damage, such as; the method requires large number of modal data to identify damage severity on several elements and the amount of element identified with this method will affect drasticly the accuracy of this method. In addition, based on the simulation, the location and the function of the element identified, also affect the accuracy of the damage's severity identification method.

Keywords : Dynamic Characteristics, Damage Location, Damage Severity

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
ORIGINALITY DECLARATION PAGE.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
LEGITIMATION PAGE.....	v
KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMAKASIH.....	vi
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	viii
ABSTRAK.....	ix
ABSTRACT.....	x
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR TABEL.....	xvi
DAFTAR SIMBOL.....	xviii
1. PENDAHULUAN.....	1
1.1 LATAR BELAKANG.....	1
1.2 PERMASALAHAN.....	2
1.3 TUJUAN PENELITIAN.....	2
1.4 PEMBATASAN MASALAH.....	4
1.5 SISTEMATIKA PENULISAN.....	4
2. DASAR TEORI.....	6
2.1 TEORI DINAMIKA STRUKTUR.....	6
2.1.1 Teori Analisa Modal Untuk Sistem MDOF.....	6
2.1.2 Aplikasi Analisa Modal.....	12
2.2 KERUSAKAN PADA STRUKTUR.....	13
2.2.1 Indeks dan Skala Kerusakan.....	14

2.2.2	Index dan Skala Kerusakan Berdasarkan Parameter Modal	16
2.2.3	Pemodelan Kerusakan.....	17
2.3	TEORI IDENTIFIKASI LOKASI DAN TINGKAT KERUSAKAN STRUKTUR DENGAN MENGGUNAKAN PROPERTI MODAL.....	18
2.3.1	Identifikasi Kerusakan dan Lokasi Kerusakan Pada Struktur.....	20
2.3.2	Identifikasi Tingkat Kerusakan Pada Struktur.....	23
2.4	PENGUKURAN PROPERTI MODAL (<i>MODAL TESTING</i>).	27
2.4.1	Klasifikasi <i>Modal Testing</i>	28
2.4.2	Teori <i>Modal Testing</i>	29
2.4.3	Ekstraksi Properti Modal.....	32
2.4.4	Proses Umum Pengukuran.....	35
2.4.5	Pengukuran Dengan <i>Ambient Excitation</i>	36
2.5	METODE ELEMEN HINGGA.....	39
2.5.1	Atribut-Atribut Elemen.....	40
2.5.2	Matriks Kekakuan dan Matriks Massa Elemen Batang	42
2.5.3	Matriks Massa Terpusat.....	46
2.5.4	Transformasi Sistem Koordinat Lokal Menuju Sistem Koordinat Global.....	46
2.5.5	Matriks Kekakuan dan Massa Untuk Elemen Struktur Portal.....	51
3.	METODOLOGI PENELITIAN.....	53
3.1	MODELISASI STRUKTUR.....	53
3.1.1	Modelisasi Struktur Dengan (<i>Damaged</i>) dan Tanpa Kerusakan (<i>Undamaged</i>).....	54
3.1.2	Simulasi Yang Dilakukan.....	56
3.2	INPUT DATA.....	58
3.2.1	Dimensi Struktur.....	58
3.2.2	Properti Material.....	59
3.3	PROSEDUR ANALISA.....	59

4. ANALISA DAN HASIL.....	62
4.1 SIMULASI IDENTIFIKASI LOKASI DAN KERUSAKAN STRUKTUR (3-Bentang, 4-Tingkat Rangka 2D).....	62
4.3.3 Hasil Identifikasi Lokasi Kerusakan.....	63
4.3.4 Hasil Identifikasi Tingkat Kerusakan.....	66
4.2 SIMULASI IDENTIFIKASI TINGKAT KERUSAKAN BERDASARKAN LOKASI DAN FUNGSI ELEMEN.....	66
4.3 SIMULASI IDENTIFIKASI TINGKAT KERUSAKAN STRUKTUR DENGAN VARIASI PENAMBAHAN BENTANG DAN TINGKAT.....	72
4.3.1 Penambahan Bentang.....	73
4.3.2 Hasil Identifikasi Tingkat Kerusakan.....	81
4.3.3 Perbandingan Hasil Analisa Error Global Terhadap Penambahan Bentang dan Tingkat.....	88
4.4 SIMULASI PENGGUNAAN PASANGAN MODA YANG BERBEDA UNTUK IDENTIFIKASI TINGKAT KERUSAKAN STRUKTUR ELEMEN TUNGGAL.....	89
5. KESIMPULAN.....	102
DAFTAR REFERENSI.....	104
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Halaman

Gambar 1. Skema Proses Identifikasi Lokasi dan Tingkat Kerusakan Struktur.....	21
Gambar 2. Hubungan Nilai FRF dengan Frekuensi Natural.....	33
Gambar 3. Analisa Individual per-moda dengan FRF.....	34
Gambar 4. Skema Umum Pengukuran Dinamik.....	36
Gambar 5. Dimensi Intrinsik Elemen.....	41
Gambar 6. Elemen Batang 2 Nodal.....	42
Gambar 7. Struktur dengan 2 Elemen Batang.....	47
Gambar 8. Koordinat Lokal dan Global Elemen.....	52
Gambar 9. Struktur 3-Bentang, 4-Tingkat Rangka 2D.....	55
Gambar 10. Struktur 3-Bentang, 4-Tingkat Portal 2D.....	55
Gambar 11. Diagram Alir Proses Identifikasi Lokasi dan Tingkat Kerusakan.....	60
Gambar 12. Diagram Alir Penelitian.....	61
Gambar 13. 3-Bentang, 4-Tingkat Rangka 2D.....	62
Gambar 14. Identifikasi Lokasi Kerusakan Elemen 33.....	64
Gambar 15. Identifikasi Lokasi Kerusakan Elemen 33 dan Elemen 5.....	64
Gambar 16. Identifikasi Lokasi Kerusakan Elemen 19, Elemen 11 dan Elemen 33.....	65
Gambar 17. Struktur 3-Bentang, 4-Tingkat Portal 2D.....	67
Gambar 18. Struktur 1-Bentang, 2-Tingkat Rangka 2D.....	73
Gambar 19. Struktur 3-Bentang, 2-Tingkat Rangka 2D.....	74
Gambar 20. Struktur 8-Bentang, 2-Tingkat Rangka 2D.....	76
Gambar 21. Struktur 2-Bentang, 1-Tingkat Rangka 2D.....	81
Gambar 22. Struktur 2-Bentang, 3-Tingkat Rangka 2D.....	82
Gambar 23. Perubahan Error Global – Penambahan Bentang dan Tingkat Sistem Struktur.....	88
Gambar 24. Pasangan Moda Getar Elemen 29	94
Gambar 25. Pasangan Moda Getar Elemen 31.....	94

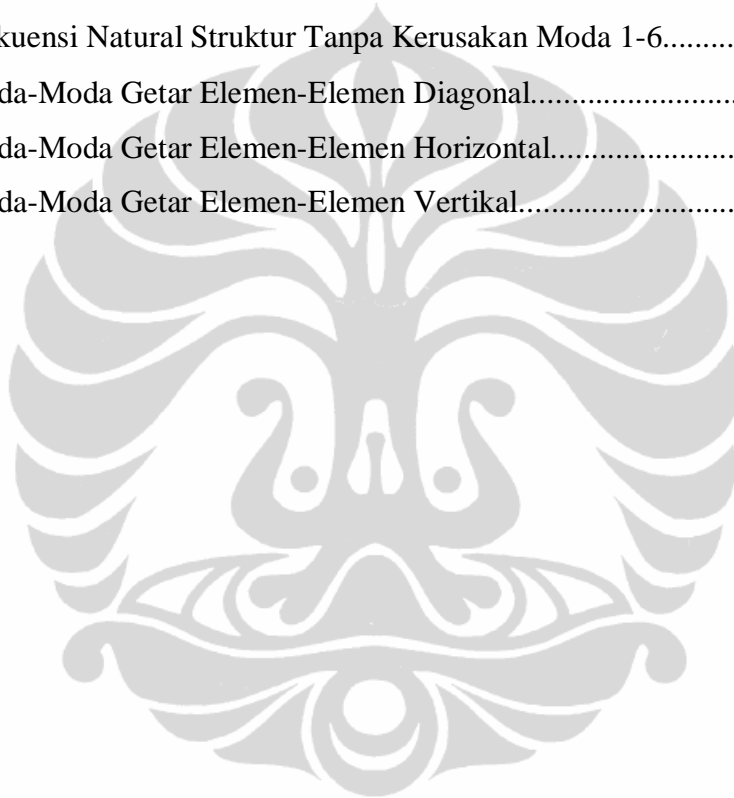
Gambar 26. Pasangan Moda Getar Elemen 32.....	95
Gambar 27. Pasangan Moda Getar Elemen 5.....	97
Gambar 28. Pasangan Moda Getar Elemen 19.....	97
Gambar 29. Pasangan Moda Getar Elemen 26.....	97
Gambar 30. Pasangan Moda Getar Elemen 1.....	99
Gambar 31. Pasangan Moda Getar Elemen 15.....	99
Gambar 32. Pasangan Moda Getar Elemen 22.....	100



DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Hasil Identifikasi Tingkat Kerusakan.....	66
Tabel 2. Error Hasil Identifikasi Tingkat Kerusakan Struktur 3- Bentang, 4-Tingkat Rangka 2D.....	68
Tabel 3. Error Hasil Identifikasi Tingkat Kerusakan Struktur 3- Bentang, 4-Tingkat Portal 2D.....	69
Tabel 4. Pengurutan Berdasarkan Lokasi-Rangka 2D.....	70
Tabel 5. Pengurutan Berdasarkan Lokasi-Portal 2D.....	70
Tabel 6. Urutan Elemen Berdasarkan Error Maksimum (Rangka 2D)....	71
Tabel 7. Urutan Elemen Berdasarkan Error Maksimum (Portal 2D).....	71
Tabel 8. Analisa Error Global Struktur 1-Bentang, 2-Tingkat Rangka 2D.....	74
Tabel 9. Analisa Error Global Struktur 3-Bentang, 2-Tingkat Rangka 2D.....	75
Tabel 10. Analisa Error Global Struktur 8-Bentang, 2-Tingkat Rangka 2D.....	77
Tabel 11. Analisa Error Global Struktur 10-Bentang, 2-Tingkat Rangka 2D.....	78
Tabel 12. Analisa Error Global Struktur 12-Bentang, 2-Tingkat Rangka 2D.....	79
Tabel 13. Analisa Error Global Struktur 14-Bentang, 2-Tingkat Rangka 2D.....	80
Tabel 14. Analisa Error Global Struktur 2-Bentang, 1-Tingkat Rangka 2D.....	81
Tabel 15. Analisa Error Global Struktur 2-Bentang, 3-Tingkat Rangka 2D.....	82
Tabel 16. Analisa Error Global Struktur 2-Bentang, 8-Tingkat Rangka 2D.....	83
Tabel 17. Analisa Error Global Struktur 2-Bentang, 10-Tingkat Rangka 2D.....	84

Tabel 18. Analisa Error Global Struktur 2-Bentang, 12-Tingkat Rangka 2D.....	85
Tabel 19. Analisa Error Global Struktur 2-Bentang, 14-Tingkat Rangka 2D.....	86
Tabel 20. Perubahan Error Global Berdasarkan Variasi Bentang dan Tingkat.....	88
Tabel 21. Error Maksimum Hasil Identifikasi dengan Pasangan Data Modal Berbeda (6 data modal).....	91
Tabel 22. Frekuensi Natural Struktur Tanpa Kerusakan Moda 1-6.....	92
Tabel 23. Moda-Moda Getar Elemen-Elemen Diagonal.....	93
Tabel 24. Moda-Moda Getar Elemen-Elemen Horizontal.....	96
Tabel 25. Moda-Moda Getar Elemen-Elemen Vertikal.....	98



DAFTAR SIMBOL

SIMBOL ROMAWI

- A : luasan penampang
- \overline{B}_n : kuantitas kompleks
- c** : matriks redaman
- C** : matriks redaman terdiagonalisasi
- C_n : komponen matriks redaman terdiagonalisasi pada moda ke-n
- D** : Elemen Diagonal
- D-L : Elemen diagonal bagian bawah
- D-M : Elemen diagonal bagian tengah
- D-U : Elemen diagonal bagian atas
- D_c : index kerusakan lokal tekan
- D_t : index kerusakan lokal tarik
- D_{element} : index kerusakan elemen (*intermediate*)
- D_{global} : index kerusakan global
- $D_n(t)$: deformasi mode ke-n untuk sistem SDOF
- e_j : margin error
- E** : modulus elastisitas
- f_c : tekan beton maksimum
- H** : Elemen Horizontal
- H-L : Elemen horizontal bagian bawah
- H-M : Elemen horizontal bagian tengah

H-U : Elemen horizontal bagian atas

$H_{pi}(\omega)$: fungsi *receptance* yang menghubungkan pembebanan pada titik i dan lendutan pada titik p

j : bilangan kompleks

\mathbf{k} : matriks kekakuan

\mathbf{K} : matriks kekakuan terdiagonalisasi

\mathbf{k}_u : matriks kekakuan kondisi tanpa kerusakan

\mathbf{k}_d : matriks kekakuan kondisi dengan kerusakan

\mathbf{k}_j^e : matriks kekakuan elemen-j

L : panjang bentang suatu elemen

\mathbf{m} : matriks massa

\mathbf{M} : matriks massa terdiagonalisasi

M_n : komponen matriks massa terdiagonalisasi pada mode ke-n

\mathbf{m}_j^e : matriks massa elemen-j

\mathbf{m}_u : matriks massa kondisi tanpa kerusakan

\mathbf{m}_d : matriks massa kondisi dengan kerusakan

m : jumlah penampang kritis

$\mathbf{p}(t)$: vektor gaya

$\mathbf{P}_n(t)$: gaya tergeneralisir untuk mode ke-n

$p_i(t)$: gaya yang bekerja pada titik i

$q_r(t)$: koordinat modal ke-r

\mathbf{q} : vektor modal koordinat

$\dot{\mathbf{q}}$: vektor kecepatan modal koordinat
 $\ddot{\mathbf{q}}$: vektor percepatan modal koordinat
 $r(t)$: suatu respon dinamik
 $r_n(t)$: nilai $r(t)$ terhadap moda ke- n
 r^{st} : respon statik akibat gaya \mathbf{s}
 \bar{r}_n : faktor kontribusi moda ke- n
 \mathbf{R}_n : vektor gaya residu berdasarkan moda ke- n
 \mathbf{R} : vektor gaya residu berdasarkan beberapa moda
 \mathbf{s} : distribusi spasial
 $T(t)$: energi kinetik
 \mathbf{u} : vektor perpindahan
 $\dot{\mathbf{u}}$: vektor kecepatan
 $\ddot{\mathbf{u}}$: vektor percepatan
 V : Elemen Vertikal
 $V-L$: Elemen vertikal bagian bawah
 $V-M$: Elemen vertikal bagian tengah
 $V-U$: Elemen vertikal bagian atas
 $V(t)$: energi regangan

SIMBOL YUNANI

Γ : matriks transformasi koordinat
 δk_j : faktor modifikasi kerusakan untuk matriks kekakuan elemen- j

δm_j : faktor modifikasi kerusakan untuk matriks massa elemen-j
 $\Delta \lambda$: vektor perubahan nilai eigen
 $\Delta \varphi_n$: perubahan moda getar pada moda ke-n akibat kerusakan
 $\Delta \mathbf{m}$: perubahan matriks massa akibat kerusakan
 $\Delta \mathbf{m}'$: perubahan matriks massa terkondensasi akibat kerusakan
 $\Delta \mathbf{k}$: perubahan matriks kekakuan akibat kerusakan
 $\Delta \mathbf{k}'$: perubahan matriks kekakuan terkondensasi akibat kerusakan
 ε_r : regangan residual
 ε_o : regangan ketika f_c
 ε_p : regangan plastis
 ε_e : regangan pada saat *yield*
 ε_{max} : regangan max (1%)
 ζ_n : rasio redaman moda ke-n
 θ : sudut antara sumbu koordinat lokal dan sumbu koordinat global
 λ_{dn} : nilai eigen untuk moda ke-n dengan kerusakan
 λ_n : nilai eigen untuk moda ke-n (tanpa kerusakan)
 ρ : densitas suatu material
 Φ : matriks moda getar
 $\varphi_{r(n)}$: moda getar ke-r(n)
 φ_{dn} : moda getar dengan kerusakan untuk moda ke-n
 φ_{in} : moda getar moda ke-n pada titik-i dimana bekerja gaya pada titik-i
 φ_{pn} : moda getar moda ke-n pada titik-i dimana bekerja gaya pada titik-i

φ'_n : moda getar ke-n terkondensasi

ω_n : frekuensi natural ke-n

