

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Analisis Numerik *Tuned Mass Damper*

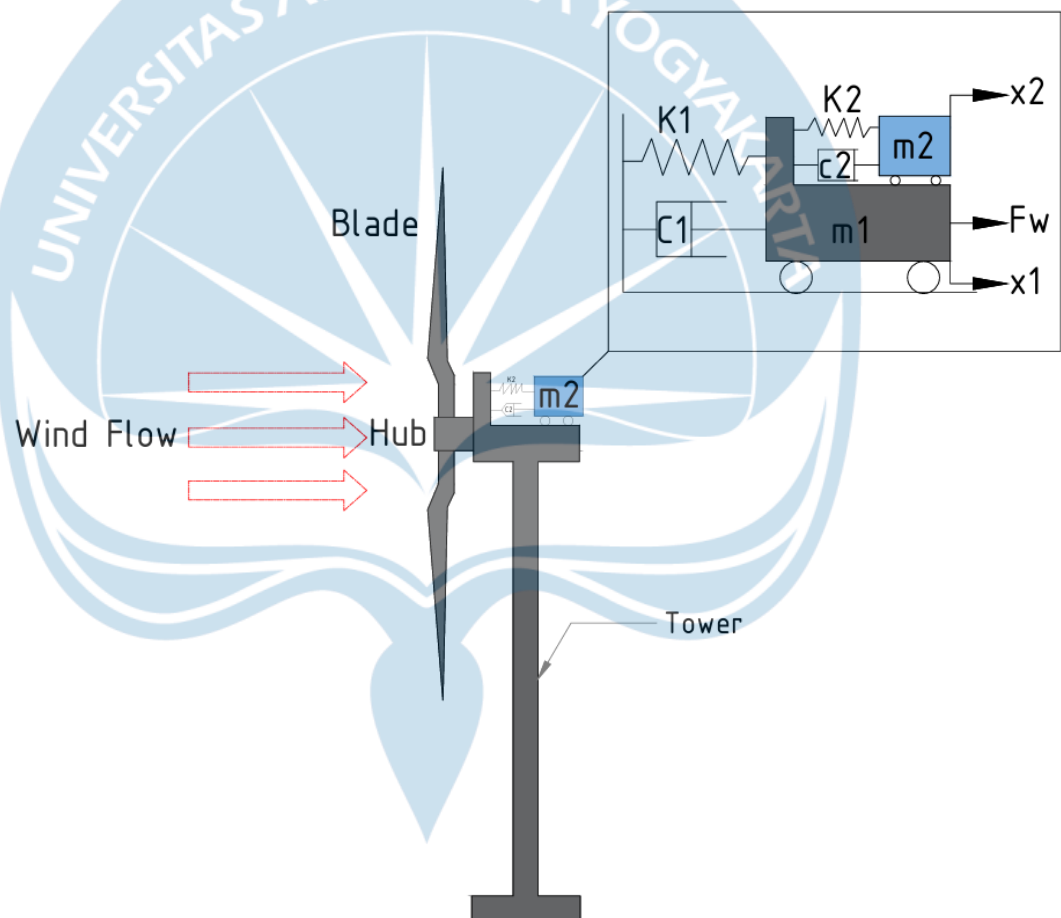
Analisis numerik mengenai *Tuned Mass Damper* (TMD) telah memberikan kontribusi signifikan dalam peningkatan stabilitas struktural berbagai sistem melalui reduksi getaran dan respons dinamik. Metode numerik memungkinkan optimasi parameter TMD seperti massa, redaman, dan kekakuan, sehingga perangkat dapat disetel pada frekuensi yang tepat untuk memaksimalkan efektivitas redaman getaran (Bathaei et al., 2020). Pendekatan secara numerik juga dapat mendemonstrasikan sistem multi derajat kebebasan (MDOF) sehingga meningkatkan kemampuan penyetelan frekuensi untuk berbagai mode getaran sekaligus.

Hebbbar A et al., (2019) mengangkat masalah getaran pada struktur bangunan 3 lantai akibat beban dinamik terkhusus pada mode pertama getaran sebesar 3 Hz sepanjang sumbu x. Getaran tersebut tentu berpotensi menyebabkan material mengalami *fatigue* dan menimbulkan resiko kegagalan struktur. Maka dari itu, dilakukan penelitian numerik TMD pada bangunan struktur 3 lantai yang dimodelkan dengan menggunakan perangkat lunak SolidWorks dan ANSYS untuk mengurangi amplitudo getaran struktur. Hasil dari penelitian tersebut, TMD dengan frekuensi 3,0665 Hz mengurangi defleksi struktur sekitar 17,414 mm menjadi 8,9685 mm. Pengujian eksperimen juga dilakukan untuk memvalidasi hasil numerik. Dari uji eksperimen terbukti bahwa reduksi respons percepatan getaran mencapai 83,722% pada frekuensi 3Hz.

2.2 Pengaruh Rasio Massa Terhadap Kinerja TMD

Rasio massa (μ) merupakan parameter fundamental dalam desain *Tuned Mass Damper* (TMD). Rasio massa didefinisikan sebagai perbandingan antara massa TMD dengan massa struktur utama. Menurut Den Hartog

(1956), parameter ini menjadi salah satu faktor penentu utama dalam efektivitas dan kinerja sistem TMD. Menurut Chey, (2007) kinerja optimal TMD hanya efektif jika massa tambahan berada dalam kisaran 0,10% hingga 1,0% dari berat struktur utama pada periode fundamentalnya (periode getar alami pertama struktur). Studi oleh Dirbas et al., (2024) mengeksplorasi pengaruh variasi rasio massa pada *Tuned Mass Damper* (TMD) terhadap efektivitas TMD dalam mengurangi getaran struktur turbin angin akibat beban angin sinusoidal dan acak yang dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Skema Aplikasi TMD pada Turbin Angin

Sumber: (Dirbas et al., 2024)

Dirbas et al., (2024) menguji empat rasio massa yang berbeda (2%, 5%, 10% dan 20%) menggunakan pendekatan pemodelan numerik MATLAB

SIMULINK untuk dua derajat kebebasan. Frekuensi TMD disetel mendekati frekuensi alami struktur yakni 7,5 rad/s. Hasil dari simulasi dengan beban angin sinusoidal menunjukkan korelasi yang signifikan antara peningkatan rasio massa dan efektivitas reduksi getaran. Secara spesifik, reduksi defleksi meningkat secara bertahap dari 30% untuk rasio massa 2%, 38% (rasio massa 5%), 49% (rasio massa 10%) dan 70% untuk rasio massa tertinggi 20%.

2.3 Efektivitas *Nonlinear Tuned Mass Damper*

Keterbatasan TMD dalam menangani kasus nonlinear akibat perpindahan besar, terutama terkait kapasitas perpindahan (*stroke*) dan ketergantungan pada frekuensi *tuning* menjadi dasar penemuan *Nonlinear Tuned Mass Damper* (NTMD). Menurut Yao et al., (2023) NTMD dirancang untuk memperluas *bandwidth* dan meningkatkan kinerja di berbagai variasi amplitudo getaran dengan memanfaatkan kekakuan nonlinear. Pengembangan NTMD dengan pegas *hysteresis* mampu menghilangkan energi melalui deformasi inelastis sehingga meningkatkan efisiensi disipasi energi tanpa memerlukan *dashpot* viskos yang mahal.

Rupakhety & Elias, (2020) melakukan penelitian untuk mengevaluasi efektivitas *Nonlinear Tuned Vibration Absorber (n-TVA)* dalam mengurangi respons seismik jembatan beton bertulang melalui pendekatan *time history analysis* dari tiga rekaman gempa (Imperial Valley, Kobe, dan Loma Prieta). Penelitian tersebut dilakukan secara numerik dengan model jembatan 3 bentang menggunakan *damper* pegas *hysteresis* dengan model Wen (1976) menggunakan persamaan berikut.

$$Fn_x = \alpha k_{nx}u + (1 - \alpha)F_{xx}Z_x \dots \dots \dots (2.1a)$$

$$Fn_y = \alpha k_{ny}v + (1 - \alpha)F_{yy}Z_y \dots \dots \dots (2.1b)$$

Dengan:

F_{xx} dan F_{yy} : gaya pemulih peredam pada sumbu x dan sumbu y

α : rasio kekakuan pasca leleh terhadap kekakuan awal

u dan v : perpindahan pada pegas

Z_x dan Z_y : komponen perpindahan *hysteresis* arah sumbu x dan sumbu y

$$u_{yield}\dot{Z}_x = A\dot{u} - \alpha|\dot{u}||Z_x|^{p-1} - \beta\dot{u}|Z_x|^p \dots\dots\dots(2.2a)$$

$$v_{yield}\dot{Z}_y = A\dot{v} - \alpha|\dot{v}||Z_y|^{p-1} - \beta\dot{v}|Z_y|^p \dots\dots\dots(2.2b)$$

Dengan:

u_{yield} dan v_{yield} : simpangan leleh pada arah sumbu x dan sumbu y

α, β, ρ , dan A : parameter tak berdimensi

ρ : parameter yang mengontrol kehalusan dari loop histeresis

α, β : parameter yang mengontrol bentuk dari loop hysteresis

Z_x, Z_y : komponen perpindahan histeretik

A : amplitudo gaya pemulih (Wen, 1976)

Parameter n-TVA yang digunakan dalam jurnal tersebut tercantum dalam Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Parameter n-TVA

Sumber: (Rupakhety & Elias, 2020)

Parameter	Simbol	Satuan	Nilai	Catatan
Rasio Massa	μ	-	0,01	Rasio massa TMD terhadap massa total jembatan
Frekuensi alami jembatan	f_1	Hz	1,86	(longitudinal & transversal)
Redaman Struktur	ζ	%	5	-
Stiffness Awal	k_x	N/m	$1,592 \times 10^7$	Stiffness awal pegas n-TVA arah longitudinal
Stiffness Awal	k_y	N/m	$1,592 \times 10^7$	Stiffness awal pegas n-TVA arah transversal
Yield Displacement	u_{yield}	m	0,184	arah longitudinal
Yield Displacement	v_{yield}	m	0,096	arah transversal
Parameter Wen (α)	α	-	-	Rasio kekakuan <i>pasca-yield</i> terhadap awal
Parameter Wen (β)	β	-	0,5	Mengontrol bentuk <i>hysteresis</i>
Parameter Wen (A)	A	-	1,0	Amplitudo gaya restorasi
Parameter Wen (p)	p	-	10	Menentukan transisi elastis-plastis

Hasil dari penelitian menunjukkan n-TVA mampu mengurangi *base shear* hingga 34% (arah transversal) dan 33,5% (arah longitudinal). N-TVA juga menurunkan perpindahan *mid-span* hingga 25% pada gempa dengan PGA tinggi, tetapi kurang efektif pada gempa rendah. Penelitian tersebut menyimpulkan bahwa kinerja dari n-TVA lebih unggul dibandingkan dengan optimal linear TVA (o-TVA) pada gempa kuat seperti gempa Kobe. Namun pada eksitasi rendah, perilaku n-TVA sama seperti o-TVA tanpa *dashpot* sehingga energi yang terdisipasi tidak optimal (Rupakhety & Elias, 2020).

Vestroni & Casini, (2025) menganalisis efektifitas penyerap *hysteresis* (HVA) berbasis model Bouc-Wen dalam mitigasi respons struktur melalui mekanisme kopling modal nonlinear dan transfer energi pada kondisi resonansi internal 1:1 dan 2:1. Vestroni membuat 5 jenis model dengan parameter struktur yang sama. Massa struktur diatur sebesar 1220 kg dengan kekakuan sebesar 1532,6 kN/m melanjutkan penelitian sebelumnya (Casini & Vestroni, 2022). Parameter HVA dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Parameter HVA

Sumber: (Vestroni & Casini, 2025)

<i>System</i>	TC1L	TC2M	TC2L	TC2H	TC1NS
$m_2(\text{kg})$	61	102	61	316	61
$K_A (\text{kN/m})$	96,5	600	300	594	120
$K_B (\text{kN/m})$	14,5	90	60	89	42
δ	0,15	0,15	0,2	0,15	0,42
$\gamma=\beta (1/\text{m})$	82	1775	1100	627	190
$x_y (\text{mm})$	6,1	0,3	0,45	0,79	2,63
$f_y (\text{N})$	588,5	169	136,4	473	315
$\omega_1 (\text{Hz})$	5,24	5,37	5,46	4,64	5,34
$\omega_2 (\text{Hz})$	6,81	12,84	11,52	8,37	7,46
ω_1/ω_2	1,3	2,39	2,11	1,8	1,4
x_2/x_1 (SysA)	3,18	1,24	1,31	1,83	2,34
x_2/x_1 (SysB)	86,9	7,61	8,81	14,6	12,6

Persamaan yang digunakan oleh (Vestroni & Casini, 2025) sebagai berikut:

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + k_1 x_1 - k_2 (x_2 - x_1) - z = -m_1 A \sin(\Omega t) \dots \dots \dots (2.3a)$$

$$m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + k_2 (x_2 - x_1) + z = -m_2 A \sin(\Omega t) \dots \dots \dots (2.3b)$$

$$\frac{dz}{dt} = \left\{ k_d - \left[\gamma + \beta \operatorname{sgn} \left(z \frac{d}{dt} (x_2 - x_1) \right) \right] |z|^n \right\} \frac{d}{dt} (x_2 - x_1) \dots \dots \dots (2.3c)$$

dengan,

$x_2 - x_1$: perpindahan relatif antara HVA dan struktur.

k_1 : kekakuan dari struktur

k_2 : kekakuan elastis HVA

γ, β, n : parameter Bouc-Wen

m_1 : massa struktur

m_2 : massa HVA

k_d : kekakuan *hysteresis* HVA

z : komponen *hysteresis*

Pemeriksaan efektifitas HVA dilakukan dengan penerapan beban harmonik dan impuls. Model sistem yang dirancang berupa sistem 2DOF dengan HVA di atas struktur utama (*Top Configuration*). Salah satu kontribusi penting penelitian ini adalah penjelasan mendalam tentang mekanisme transfer energi nonlinear. Ketika intensitas eksitasi meningkat, perpindahan relatif x terus tumbuh, didorong oleh perilaku histeretik sistem. Pertumbuhan ini menghasilkan peningkatan redaman ekuivalen yang disediakan oleh elemen histeretik, sehingga meningkatkan disipasi energi. Penelitian menunjukkan bahwa kopling nonlinear memfasilitasi redistribusi energi antara mode-mode, dengan mode kedua menjadi aktif secara dinamis dan menyerap energi. Transfer energi ini tidak hanya mengubah perilaku sistem tetapi juga menyoroti peran efek nonlinear dalam meningkatkan distribusi energi di seluruh mode dan mengurangi respons struktur primer.

2.4 Perbandingan TMD Linear dan TMD Nonlinear

Janga et al., (2025) melakukan pemodelan *Hysteretic Tuned Mass Damper* (HTMD) dengan *bumper* pada struktur bangunan 5 lantai melalui pendekatan analisis numerik berbasis OpenSees dan uji eksperimen *shaking table test*. *Shaking table test* dilakukan untuk membandingkan kinerja dan efektifitas dari 4 model *damper* yakni, HTMD, NegSV (*Negative Stiffness Vibration Isolator*), LTMD (*Linear Tuned Mass Damper*), ATMD (*Active Tuned Mass Damper*). Penelitian ini dilatarbelakangi oleh beberapa masalah seperti *detuning*, keterbatasan kinerja TMD linear pada kondisi respons nonlinear, dan kesenjangan antara penelitian TMD nonlinear yang bersifat teoritis dengan validasi model numerik melalui uji eksperimental. Penelitian ini menggunakan kawat baja standar dengan sistem penjepit *double-sliding* dan *bumper* TPU untuk menghasilkan *hysteresis pinched* dan disipasi energi tambahan.

Penelitian ini mengembangkan model Bouc-Wen dengan menggabungkan parameter *pinching* ($\zeta = 0,536$) dan *quasi-zero stiffness* ($\alpha = 0,775$). Persamaan yang digunakan oleh Janga untuk memodelkan gaya pemulihan sebagai berikut:

$$F = k_e x \left[e^{-\frac{x^2}{\alpha k}} (\alpha - 1) + 1 \right] + z \dots \dots \dots (2.4a)$$

$$\dot{z} = \{k_d h - [\gamma + \beta \operatorname{sgn}(z\dot{x})] |z|^n\} \dot{x} \dots \dots \dots (2.4b)$$

$$h = 1 - \xi e^{-\frac{x^2}{\alpha c}} \dots \dots \dots (2.4c)$$

dengan, x adalah perpindahan dan z adalah gaya *hysteresis* yang dimodelkan menurut model fenomenologis sedangkan h pada persamaan 2.4c merupakan fungsi *pinching*. (lihat Tabel 2.3)

Hasil yang dibandingkan meliputi, *peak acceleration*, *RMS acceleration*, dan *Cumulative Absolute Velocity (CAV)*. Simulasi dilakukan dengan menerapkan 19 rekaman gempa (5 buatan dan 14 alami) tanpa penskalaan amplitudo. Parameter dari *Hysteresis Tuned Mass Damper* dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Parameter HTMD

Sumber: (Janga et al., 2025)

Parameter	Simbol	Satuan	Nilai	Catatan
<i>Stiffness</i> Linear	k_e	kN/mm	0,030	–
rasio kekakuan <i>pasca-yield</i>	α	–	0,775	Mengatur transisi ke <i>quasi-zero stiffness</i>
Parameter Transisi	x_k	mm ²	14,357	Mengontrol laju perubahan <i>stiffness</i>
<i>Stiffness Hysteresis</i>	k_d	kN/mm	0,186	<i>Stiffness</i> awal komponen <i>hysteresis</i>
Parameter Hysteresis (γ)	γ	mm ⁻¹	0,01	Mengatur asimetri loop <i>hysteresis</i> (γ)
Parameter <i>Hysteresis</i> (β)	β	mm ⁻¹	1,069	Mengontrol bentuk loop <i>hysteresis</i>
Intensitas <i>Pinching</i>	ζ	–	0,536	Mengatur derajat <i>pinching</i>
Eksponen transisi	n	–	1	Menentukan transisi elastis-plastis
Ekstensi <i>Pinching</i>	x_c	mm ²	10	Mengontrol lebar area <i>pinching</i>
Rasio massa	μ	–	1,5%	Perbandingan massa HTMD dengan massa struktur
Massa TMD	–	kg	8,2	–
Massa struktur utama	–	kg	535,5	–
Frekuensi alami struktur	–	Hz	8,41	Mode pertama bangunan tanpa TMD rasio redaman 1% (eksperimental)
Kabel baja	–	mm	12	Bahan dan Dimensi Fisik untuk uji eksperimental
Panjang kabel baja	–	mm	82	Bahan dan Dimensi Fisik untuk uji eksperimental
Diameter <i>bumper</i> TPU	–	mm	22	Silinder berongga
Tinggi <i>bumper</i> TPU	–	mm	23	–
Jarak <i>Bumper</i> (Gap)	–	mm	22	–

Berdasarkan hasil uji eksperimen, *Hysteretic Tuned Mass Damper* (HTMD) menunjukkan kinerja rata-rata yang lebih baik dibandingkan *Linear*

Tuned Mass Damper (LTMD) dalam mengurangi respons seismik. Pada parameter *peak acceleration*, HTMD mencapai reduksi rata-rata sebesar 25% (nilai rata-rata: 0,75) dibandingkan LTMD yang hanya 20% (nilai rata-rata: 0,80). Bahkan, dalam kondisi terbaik, HTMD mampu mengurangi *peak acceleration* hingga 61% (nilai: 0,39), sementara LTMD hanya 32% (nilai: 0,68). Namun, HTMD memiliki risiko deteriorasi respons pada kondisi ekstrem 1,24 dan sedangkan LTMD di angka 0,94, hal ini disebabkan oleh mekanisme histeresis nonlinier dan gesekan internal yang kompleks.

Boccamazzo et al., (2020) meneliti efektivitas *Hysteresis Tuned Mass Damper* (HTMD) dalam mengurangi respons seismik struktur inelastik, khususnya pada bangunan baja *multistory* dan bangunan *masonry*. Penelitian ini berfokus pada pengembangan NTMD model Bouc-Wen yang memanfaatkan fenomena *hysteresis* dengan *pinching* untuk meningkatkan transfer energi dari struktur utama ke TMD. Pengujian dilakukan pada dua jenis struktur: (1) struktur baja dengan perilaku elastoplastik murni, dan (2) bangunan *masonry* yang mengalami degradasi kekakuan dan kekuatan.

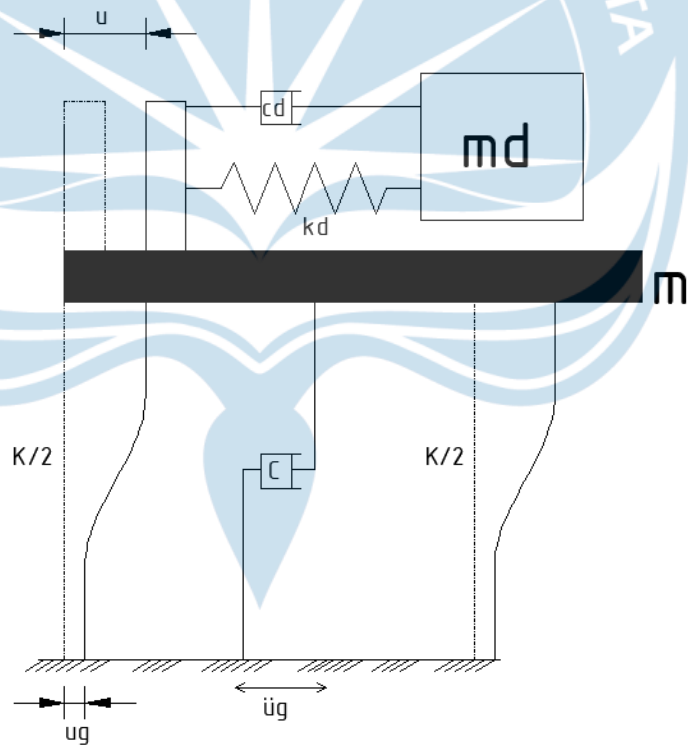
Hasil simulasi menunjukkan bahwa TMD histeresis mampu mengurangi perpindahan *Root Mean Square* (RMS) struktur baja secara berturut-turut 40%, 50%, dan 60% untuk rasio massa 1%, 2% dan 5%. Dibandingkan dengan TMD linier konvensional, TMD *hysteresis* juga menunjukkan kinerja baik, terutama untuk rasio massa kecil (1%), dengan peningkatan efektivitas hingga 20% pada kondisi gempa intensitas tinggi (SLC). Pada bangunan *masonry*, meskipun kinerja TMD histeresis menurun sekitar 15%, tetap lebih efektif daripada TMD linier, terutama untuk gempa intensitas menengah-tinggi dalam hal perpindahan RMS. TMD *hysteresis* juga mengurangi energi terdisipasi struktur *masonry* hingga 89% untuk rasio massa (μ) 1% dibanding TMD linier dalam mengurangi risiko kerusakan.

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Konsep *Tuned Mass Damper* (TMD)

Tuned Mass Damper (TMD) merupakan sistem kontrol getaran pasif yang dipasang pada struktur utama untuk mengurangi respons dinamik akibat gaya eksternal. TMD memindahkan energi dinamik dari struktur utama ke massa tambahan yang terhubung melalui pegas dan redaman (Liu et al., 2022). Komponen utama kekakuan menyediakan gaya pemulih yang diperlukan massa sedangkan redaman menghilangkan energi dan mengurangi amplitudo getaran. Ilustrasi dari TMD dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Ilustrasi TMD pada Sistem SDOF

Pada struktur SDOF dengan TMD linier, persamaan gerak dapat dituliskan sebagai bentuk matriks sistem dua derajat kebebasan seperti persamaan (3.1):

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{u}_d \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c + c_d & -c \\ -c & c_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{u}_d \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k + k_d & -k_d \\ -k_d & k_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ u_d \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -m \\ -m_d \end{Bmatrix} \ddot{u}_g + \begin{Bmatrix} f \\ f_d \end{Bmatrix} \dots (3.1)$$

Sumber: Dinamika Struktur, Yoyong Arfiadi

dengan,

m : massa struktur utama

c : koefisien redaman struktur utama

k : kekakuan pegas struktur utama.

u : perpindahan struktur utama terhadap waktu.

$\ddot{u}$: percepatan relatif struktur terhadap waktu

$\dot{u}$: kecepatan relatif struktur terhadap waktu

m_d : massa TMD

c_d : koefisien redaman TMD.

k_d : kekakuan pegas TMD.

u_d : perpindahan TMD terhadap waktu.

$\ddot{u}_d$: percepatan relatif TMD terhadap waktu

$\dot{u}_d$: kecepatan relatif TMD terhadap waktu

$\ddot{u}_g$: percepatan tanah (input gempa)

f : gaya eksitasi eksternal yang bekerja pada struktur utama.

f_d : gaya eksitasi eksternal yang bekerja pada TMD.

TMD pertama kali diperkenalkan oleh Frahm pada awal abad ke-20 untuk mengurangi getaran lambung kapal dan dikembangkan oleh Den Hartog (1956) yang menjelaskan prinsip dasar *Tuned Mass Damper* sebagai berikut: Suatu sistem massa-pegas utama dengan massa (m) dan konstanta pegas (k) menerima gaya harmonis eksternal dengan frekuensi (ω). Sistem tersebut akan bergetar dengan amplitudo yang bergantung pada resonansi ($\omega \approx \sqrt{k/m}$). Sistem tersebut diberi penambahan osilator kedua (TMD) yang terdiri dari massa tambahan (m_d) dan pegas dengan konstanta (k_d) yang nilainya jauh lebih kecil daripada sistem utama maka frekuensi alami osilator TMD adalah:

$$\omega_d = \sqrt{\frac{k_d}{m_d}} \dots \dots \dots (3.2)$$

Apabila frekuensi alami *damper* tersebut disesuaikan agar sama dengan frekuensi gaya harmonik yang bekerja maka secara teoritis massa utama akan berhenti bergetar. Biasanya penyesuaian ini dilakukan dengan mengatur massa osilator (m_d) sehingga dinamakan *Tuned Mass Damper* (TMD). Selaras dengan prinsip Den Hartog, (Hebbar A et al., 2019) juga menjelaskan prinsip kerja TMD berdasarkan pada resonansi, dimana frekuensi TMD disetel agar sesuai atau mendekati frekuensi struktur utama, sehingga energi getaran dapat terserap secara efektif dan amplitudo getaran dapat direduksi.

Dalam studinya, Den Hartog, (1956) mengatur besaran karakteristik osilator yakni, redaman dan kekakuan dari TMD untuk meminimalkan respons sistem utama (struktur gedung). Nilai-nilai optimum tersebut didapatkan dengan menggunakan rumus berikut:

$$\alpha_{opt} = \frac{1}{1+\mu} \dots\dots\dots(3.3)$$

$$\zeta_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} \dots\dots\dots(3.4)$$

$$\mu = \frac{m_d}{m} \dots\dots\dots(3.5)$$

dengan,

α_{opt} : rasio frekuensi optimum (perbandingan frekuensi *damper* (ω_d) dengan frekuensi struktur (ω))

ζ_{opt} : rasio redaman optimum dari sistem TMD

μ : rasio antara massa TMD (m_d) dengan massa total struktur (m)

Kini TMD banyak digunakan di berbagai bidang termasuk teknik sipil, kedirgantaraan, dan sistem mekanik untuk mengurangi osilasi akibat angin, respons bangunan akibat beban seismik dan beban dinamik lainnya. Dalam praktik rekayasa, *Tuned Mass Damper* (TMD) memiliki beberapa variasi desain dengan empat jenis TMD yang paling umum diterapkan adalah TMD translasi, TMD pendulum (PTMD), TMD semi-aktif (SATMD), dan TMD aktif (Hebbar A et al., 2019).

3.2 *Nonlinear* TMD dan Model Histeresis Bouc-Wen

Nonlinear TMD adalah modifikasi dari perangkat *Tuned Mass Damper* linear sebagai solusi dari keterbatasan TMD. Biasanya elemen redaman atau kekakuan dari *nonlinear* TMD dirancang dengan sifat *nonlinear* (kekakuan *nonlinear* kubik, kekakuan *quasi-zero*, gesekan kering, pegas karet, atau *hysteresis*) untuk meningkatkan efektifitas dan kinerja dari TMD. NTMD memiliki beberapa keunggulan dibandingkan TMD linear terutama dalam kemampuannya menangani rentang frekuensi dan kondisi dinamik yang lebih ekstrim. Berikut beberapa manfaat utamanya:

1. NTMD efektif pada rentang frekuensi eksitasi yang lebih luas dibandingkan TMD linear sehingga cocok untuk sistem dengan beberapa frekuensi resonansi (Tahir et al., 2013).
2. Elemen kekakuan *nonlinear* memungkinkan NTMD mempertahankan kinerja kontrol yang efektif bahkan dalam perpindahan besar (Yao et al., 2023).
3. NTMD dapat memanfaatkan mekanisme gesekan untuk pembuangan energi, yang dapat lebih efisien daripada TMD tradisional yang diredam secara viskos (Neubauer & Wallaschek, 2013).

Model Bouc-Wen diperkenalkan oleh Robert Bouc pada tahun 1967 sebagai model fenomenologis untuk mempresentasikan *hysteresis* dalam sistem dinamik. Model Bouc-Wen dirumuskan melalui persamaan diferensial yang melibatkan variabel keadaan tambahan untuk menggambarkan ketergantungan respons sistem pada riwayat input (bukan hanya input saat ini), umum ditemui pada material seperti beton bertulang, isolator seismik, atau struktur yang dikenai beban dinamik. Pada tahun 1976, model Bouc diperluas dengan memperkenalkan parameter γ , β , dan n memungkinkan fleksibilitas dalam mereproduksi berbagai bentuk *hysteresis loop*, seperti *softening* dan *hardening* (Wen, 1976). Model Bouc-Wen dikembangkan kembali oleh Baber dan Noori dengan merepresentasikan degradasi kekakuan, degradasi kekuatan serta efek *pinching* (Baber & Noori, 1986). Baber dan Noori menambahkan fungsi degradasi dan *pinching* yang

bergantung pada energi *hysteresis* yang terserap. Model ini disebut Bouc-Wen-Baber-Noori (BWBN) yang dapat diaplikasikan pada material beton retak atau isolator yang mengalami *fatigue*, dan model kompleks lainnya.

Ikhoulane et al., (2007) melakukan penelitian untuk memahami hubungan antara parameter model Bouc-Wen dan bentuk dari *hysteresis* loop. Model standar Bouc-Wen dinyatakan dalam dua persamaan yang menghubungkan input perpindahan dengan output *hysteresis* misal gaya restorasi:

$$\phi_{BW}(x)(t) = \alpha kx(t) + (1 - \alpha)Dkz(t) \dots \dots \dots (3.6)$$

$$\dot{z} = D^{-1}(A\dot{x} - \beta|\dot{x}||z|^{n-1}z - \gamma\dot{x}|z|^n) \dots \dots \dots (3.7)$$

dengan,

$\Phi_{BW}(x)(t)$: output *hysteresis* (gaya restorasi)

$x(t)$: input (perpindahan).

$z(t)$: variabel keadaan internal yang merepresentasikan histeresis.

α : rasio kekakuan *pasca-yield* terhadap *pra-yield* ($0 < \alpha < 1$).

k : kekakuan linear.

D : simpangan *yield* konstan.

A, β, γ, n : parameter yang mengontrol bentuk dan ukuran loop histeresis.

Berdasarkan *command manual* pada OpenSees wiki, kombinasi dari γ dan β menunjukkan perilaku *hysteresis softening* (pelunakan), *hardening* (pengerasan), atau *quasi-linearity* (respons hampir linear). Kurva dikatakan *softening* ketika nilai penjumlahan γ dan β lebih besar dari 0. Kurva mengalami *hardening* ketika penjumlahan γ dan β kurang dari 0 sedangkan *quasi-linearity* ketika penjumlahan γ dan β sama dengan 0. Selain itu ada parameter A dan p atau n (parameter di OpenSees) untuk mengontrol bentuk dan menentukan kelancaran transisi dari fase elastis menuju fase pasca-elastis. Keunggulan model Bouc-Wen terletak pada fleksibilitasnya untuk memproduksi berbagai perilaku *hysteresis*, mulai dari halus (*softening*) hingga mendekati bilinear, sehingga cocok untuk aplikasi dalam sistem mekanis, struktur anti-seismik, dan peredam getaran.

3.3 Respons Struktur

Menurut Li et al., (2007), konsep respons struktur mengacu pada bagaimana suatu struktur bereaksi terhadap berbagai beban dan gaya, seperti aktivitas seismik, ledakan, dan beban dinamik lainnya. Reaksi ini biasanya diukur dalam bentuk lendutan, regangan, tegangan, dan getaran. Dalam mendapatkan reaksi tersebut tentu ada hubungan antara *input-output*. Struktur dapat dianggap sebagai sistem yang menerima beban (*input*), struktur tersebut tereksitasi oleh beban yang tertransfer ke elemen struktural (proses), hingga akhirnya melepaskan beban tersebut dalam bentuk reaksi (*output*). Respons struktur dapat bersifat linear dan nonlinear tergantung proses pembebanan yang terjadi. Respons struktur nonlinear terutama di bawah beban dinamik seperti angin dan gempa tentu diperlukan analisis nonlinear untuk mempertimbangkan deformasi yang terjadi dalam kondisi tersebut. Biasanya struktur yang mengalami beban dinamik, seperti gempa atau ledakan, menunjukkan karakteristik respons yang berbeda dari beban statis.

Analisis respons struktur dapat dilakukan melalui berbagai pendekatan, salah satunya yaitu pendekatan FEA (*Finite Element Analysis*) (Martínez-Rodrigo & Filiatrault, 2015). FEA dapat memprediksi respons struktural melalui pembuatan model struktur secara terperinci dan mensimulasikan berbagai kondisi beban. Beberapa perangkat lunak FEA yang cukup populer untuk analisis struktural adalah ANSYS, Strand7, dan OpenSees. Dalam analisis numerik berbasis perangkat lunak OpenSees, *Displacement* (perpindahan), waktu (*time*), dan gaya (*force*) menjadi salah satu parameter utama dalam respons struktur. Perpindahan untuk mengukur kapasitas struktur, waktu untuk memahami perilaku struktur seiring waktu, dan gaya digunakan untuk menentukan beban yang mempengaruhi struktur.

3.4 OpenSees

OpenSees (*Open System for Earthquake Engineering Simulation*) adalah platform *open-source* berbasis elemen hingga yang dikembangkan untuk analisis struktur dan sistem geoteknik dalam konteks rekayasa gempa.

OpenSees dikembangkan oleh Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) untuk mendukung simulasi berbasis kinerja guna menilai respons sistem terhadap beban seismik (Scott & Haukaas, 2006). OpenSees (*Open System for Earthquake Engineering Simulation*) memiliki empat komponen utama yang saling terintegrasi untuk simulasi rekayasa gempa:

1. *Model Builder* : Modul ini bertugas membangun model struktural dengan membuat dan mengatur komponen seperti titik nodal (*node*), elemen struktural, properti material, beban, serta *boundary condition*. Semua objek ini kemudian diintegrasikan ke dalam domain untuk membentuk kerangka model elemen hingga (Mazzoni et al., 2006).
2. *Domain*: Sebagai penyimpanan data inti, Domain mengelola seluruh informasi terkait kondisi sistem pada setiap tahap analisis, seperti keadaan pada waktu tertentu (t) atau waktu berikutnya ($t + \Delta t$). Di sini, semua objek dari *ModelBuilder* (*node*, elemen, pola beban, dll.) disimpan dan diperbarui selama simulasi berlangsung (Mazzoni et al., 2006).
3. *Analysis*: Modul ini mengendalikan proses numerik untuk memajukan kondisi sistem dari waktu t ke $t + \Delta t$. Proses ini mencakup penggunaan *solver* (penyelesai persamaan matematis), integrator (skema integrasi waktu seperti *Newmark* atau *Hilber-Hughes-Taylor*), algoritma iterasi (misalnya *Newton-Raphson*), dan tipe analisis (*static*, dinamik, atau nonlinier) (Mazzoni et al., 2006).
4. *Recorder*: modul ini mencatat parameter-parameter kunci yang ditentukan pengguna selama analisis, seperti perpindahan nodal, deformasi elemen, atau respons material. Data ini kemudian digunakan untuk visualisasi hasil dan evaluasi kinerja struktur (Mazzoni et al., 2006).

Saat ini OpenSees digunakan sebagai aplikasi elemen hingga untuk mempelajari respons struktur terhadap berbagai bencana alam seperti angin, kebakaran, gempa bumi dan gelombang tsunami atau badai. OpenSees mampu mengatasi permasalahan terkait rekayasa struktur dengan berbagai fitur seperti:

1. Analisis elemen hingga: OpenSees menggunakan skrip dalam bahasa *Tcl* dan *Python*. OpenSees memungkinkan pemodelan struktur dengan *finite element* sehingga memudahkan pengguna dalam mendefinisikan geometri, material, dan kondisi batas.
2. Analisis nonlinear: OpenSees dirancang untuk menangani perilaku material dan struktur nonlinear seperti retak, *hysteresis*, dan plastisitas. (Kolozvari et al., 2018)
3. Simulasi seismik : OpenSees mendukung pemodelan respons dinamik struktur terhadap gempa, termasuk komputasi paralel untuk skala besar (*High-Performance Computing*). (Usmani et al., 2010)
4. Interaksi Tanah-Struktur (SSI): OpenSees mampu memodelkan interaksi tanah-struktur yang sangat penting dalam menganalisis respons seismik terhadap struktur pada tanah lunak dengan pengembangan command elemen tanah-fondasi (Hajian & Attarnejad, 2025).

Karena bersifat *open-source*, OpenSees didukung oleh komunitas global yang aktif berkontribusi dalam mengembangkan fitur dan pemecahan masalah sehingga kini OpenSees menunjukkan perkembangan pesat. Dalam manual OpenSees diberikan penjelasan terkait *commands* seperti:

1. *Model command* : perintah ini digunakan untuk membuat objek ModelBuilder. Pada model *command* terdapat command Basic Model Builder untuk membuat objek BasicBuilder (Mazzoni et al., 2006).

Sintaks: `model BasicBuilder -ndm $ndm <-ndf $ndf>`

dengan,

\$ndm: Dimensi yang dimodelkan (1, 2, atau 3).

1 = model satu dimensi (misalnya model batang aksial).

2 = model dua dimensi (misalnya model bidang).

3 = model tiga dimensi.

\$ndf: Jumlah derajat kebebasan (*degrees of freedom*) pada setiap *node* (opsional).

Jika tidak ditentukan, nilai default bergantung pada nilai ndm:

ndm=1 → ndf=1 (hanya translasi aksial).

ndm=2 → ndf=3 (dua translasi dan satu rotasi).

ndm=3 → ndf=6 (tiga translasi dan tiga rotasi).

2. *Node command*: Perintah ini digunakan untuk menciptakan titik nodal dan menentukan koordinat serta massa ke objek *node* (Mazzoni et al., 2006).

Sintaks: `node $nodeTag (ndm $coords) <-mass (ndf $MassValues)>`

dengan,

`$nodeTag`: Tag integer unik yang mengidentifikasi *node*.

`$coords`: Koordinat nodal dalam ruang (jumlah koordinat harus sesuai dengan nilai ndm).

Untuk ndm=1: satu nilai koordinat (x).

Untuk ndm=2: dua nilai koordinat (x, y).

Untuk ndm=3: tiga nilai koordinat (x, y, z).

`$MassValues`: Nilai massa nodal yang berkorespondensi dengan setiap derajat kebebasan (DOF) (opsional).

3. *Mass command*: perintah ini digunakan untuk menyusun nilai massa pada sebuah *node* yang sebelumnya telah didefinisikan dengan *node command* (Mazzoni et al., 2006).

Susunan: `mass $nodeTag (ndf $MassValues)`

dengan,

`$nodeTag`: Angka integer yang mengidentifikasi *node* tertentu yang akan diberi massa.

`$MassValues`: nilai massa yang sesuai dengan setiap derajat kebebasan pada *node* tersebut.

4. *Fix command*: perintah ini digunakan untuk menetapkan kondisi batas (*boundary condition*) pada sebuah *node* dengan cara menghilangkan derajat kebebasannya. Perintah ini berfungsi untuk menentukan apakah suatu *node* terkekang (*fixed*) atau tetap dapat bergerak bebas (Mazzoni et al., 2006).

Sintaks: `fix $nodeTag (ndf $ConstrValues)`

dengan,

`$nodeTag`: Nomor unik *node* yang akan dikenai kondisi batas.

\$dof1 \$dof2 ... \$dofN: Derajat kebebasan (DOF) yang akan di-*constraint*.

0: DOF bebas (tidak terkekang).

1: DOF terkekang (*fixed*).

5. *EqualDOF command*: perintah ini berfungsi untuk menciptakan hubungan ketergantungan atau *multi-point constraint* (MPC) antara dua *node* yang berbeda. Dengan perintah ini, derajat kebebasan (*Degree of Freedom/DOF*) dari *slave node* (cNode) dipaksa mengikuti pergerakan *master node* (rNode). Perintah ini sangat berguna untuk menghubungkan pergerakan beberapa *node* seperti pada kasus diafragma kaku, rantai *rigid* atau sambungan khusus lainnya (Mazzoni et al., 2006).

Sintaks: `equalDOF $rNodeTag $cNodeTag $dof1 $dof2 ...`

dengan,

\$rNodeTag: Nomor *node master* (*retained node*).

\$cNodeTag: Nomor *node slave* (*constrained node*).

\$dof1 \$dof2 ...: Derajat kebebasan (DOF) yang dikopel.

6. *Uniaxialmaterial command*: perintah ini berguna dalam mendefinisikan hubungan tegangan-regangan (*stress-strain*) atau gaya-deformasi (*force-deformation*) pada material *uniaxial* (satu sumbu). Perintah ini juga digunakan untuk memodelkan perilaku material yang hanya mengalami respons dalam satu arah (misalnya pada elemen *truss*, pegas, atau material dasar dalam elemen *frame*) (Mazzoni et al., 2006).

7. *Elastic Section command*: perintah ini merupakan salah satu jenis *section* dalam OpenSees yang digunakan untuk membangun objek *ElasticSection*. Objek ini merepresentasikan penampang elastik linear dengan properti material dan geometri yang tetap (Mazzoni et al., 2006).

Sintaks: `section Elastic $secTag $E $A $Iz <$Iy $G $J>`

dengan,

\$secTag: Tag unik untuk mengidentifikasi objek *section*

\$E: Modulus Young material (modulus elastisitas).

\$A: Luas penampang melintang.

\$Iz: Momen inersia kedua terhadap sumbu lokal z.

\$Iy: Momen inersia kedua terhadap sumbu lokal y.

\$G: Modulus geser.

\$J: Momen inersia torsional penampang.

8. *Elastic Beam Column Element Command*: Perintah ini digunakan untuk membangun objek elemen *elasticBeamColumn* yang merepresentasikan elemen struktural balok-kolom yang memiliki perilaku elastik linear, dimana hubungan antara gaya dan perpindahan tetap linear selama analisis berlangsung (Mazzoni et al., 2006).

Sintaks: element *elasticBeamColumn* \$eleTag \$iNode \$jNode \$A \$E \$Iz \$transfTag

dengan,

\$eleTag: Tag unik untuk mengidentifikasi objek elemen.

\$iNode, \$jNode: *Node-node* ujung elemen.

\$A: Luas penampang melintang elemen.

\$E: Modulus Young (modulus elastisitas).

\$G: Modulus geser.

\$J: Momen inersia torsional penampang.

\$Iz: Momen inersia kedua terhadap sumbu lokal z.

\$Iy: Momen inersia kedua terhadap sumbu lokal y.

\$transfTag: Pengenal untuk objek transformasi koordinat (CrdTransf) yang telah didefinisikan sebelumnya.

9. *ZeroLength Element*: perintah ini berfungsi dalam menghubungkan dua titik nodal yang berada pada lokasi yang sama (panjang nol), dimana perilaku mekanisnya ditentukan oleh material *uniaxial* pada derajat kebebasan (DOF) tertentu. (Mazzoni et al., 2006).

Sintaks: element zeroLength \$eleTag \$iNode \$jNode -mat \$matTag -dir \$dir <-doRayleigh \$rFlag> <-orient \$x \$yp>

dengan,

\$eleTag: id unik elemen.

\$iNode, \$jNode: *Node* awal dan akhir (biasanya sama/berdekatan).

-mat: daftar tag material *uniaxial* (satu material per DOF).

- dir: arah DOF yang dikaitkan dengan material (1-6).
- doRayleigh: opsional: Rayleigh damping (0=tidak, 1=ya).
- orient: opsional: vektor orientasi sistem lokal (default:global).

10. *UniaxialMaterial Boucwen* : perintah ini adalah model material uniaksial yang mensimulasikan perilaku histeresis dengan mempresentasikan degradasi kekakuan dan kekuatan serta berbagai bentuk kurva histeresis (Mazzoni et al., 2006).

Sintaks: `uniaxialMaterial BoucWen $matTag $alpha $ko $n $gamma $beta $Ao $deltaA $deltaNu $deltaEta`

dengan,

`$matTag`: id unik material.

`$alpha`: rasio kekakuan pasca-leleh terhadap kekakuan awal ($0 < \alpha < 1$).

`$ko`: kekakuan elastis awal ($ko > 0$).

`$n`: parameter ketajaman transisi elastis-inelastis (≥ 1 (semakin besar, transisi semakin tajam)).

`$gamma`: parameter bentuk *hysteresis* (kontrol *softening* dan *hardening* atau *quasi-linearitas*).

`$beta`: parameter bentuk *hysteresis* (kontrol *softening* dan *hardening* atau *quasi-linearitas*).

`$Ao`: parameter kontrol kekakuan tangen.

`$deltaA`: parameter kontrol kekakuan tangen.

`$deltaNu`: parameter kontrol degradasi material.

`$deltaEta`: parameter kontrol degradasi material.

11. *UniaxialMaterial Parallel* : Perintah ini digunakan untuk membuat objek material parallel yang terdiri dari sejumlah objek *UniaxialMaterial* yang telah dibuat sebelumnya (Mazzoni et al., 2006).

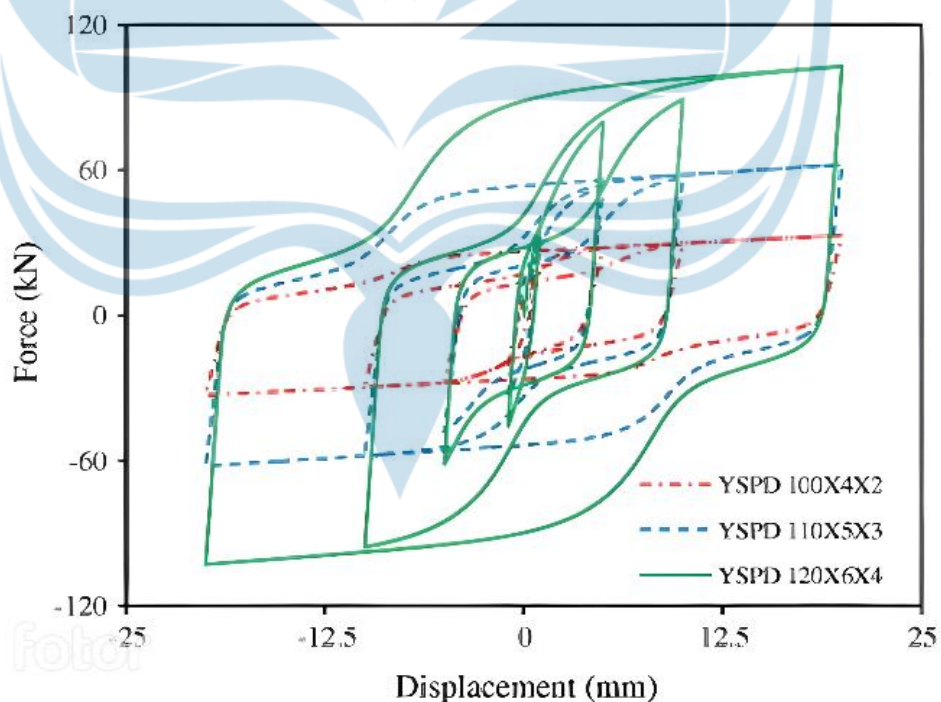
Sintaks: `uniaxialMaterial Parallel $matTag $tag1 $tag2 ...`

dengan,

`$matTag` : id unik material

`$tag1 $tag2 ...`: identifikasi bahan yang menyusun model material

Uniaxialmaterial BoucWen dan BWBN pada OpenSees selaras dengan lingkup pembahasan yang dibahas pada sub bab sebelumnya terkait *hysteresis* Bouc-Wen. Pada OpenSees Wiki material BoucWen merepresentasikan perilaku histeresis halus tanpa *pinching* dengan tetap memperhitungkan degradasi kekakuan dan kekuatan yang dikembangkan oleh Baber dan Noori (1985). Pada tahun 1986, material BoucWen diperluas kembali dengan menambahkan efek *pinching* (penyempitan *loop hysteresis*) dan degradasi kompleks. Menurut OpenSees Wiki, material BoucWen diperluas menjadi *uniaxialmaterial* BWBN oleh Baber & Noori, (1986) dan Foliente, (1995). Beberapa perbedaan dan penambahan parameter dari material BWBN seperti, pengontrol *pinching* (\$q, \$zetas, \$p, \$Shi, \$deltaShi, dan \$lambda), iterasi maksimum (\$maxIter), dan toleransi (\$tol). Hasil dari analisis BWBN biasanya membentuk kurva *hysteresis* hubungan antara *displacement-force* seperti Gambar 3.2.



Gambar 3. 2 Hubungan gaya-perpindahan Material BWBN

Sumber: https://OpenSees.berkeley.edu/wiki/index.php?title=BWBN_Material