

LAMPIRAN

Lampiran 1. Program OpenSees – Model SDOF (*Baseline*)

```
# -----  
# OpenSees TCL Script - TESIS Model Struktur SDOF-NO TMD  
# -----  
# Author: Mathias Siloam Kuncoro Jati  
# Units: kN, ton, m, s  
#-----  
wipe;  
model BasicBuilder -ndm 1 -ndf 1; # Model 1D (hanya translasi horizontal), dengan 1 derajat kebebasan  
  
# -----  
# Parameter Struktur  
# -----  
set PI 3.14159265359  
set g 9.81; # Gravitasi (m/s^2)  
set M_eff 1.220; # Massa bangunan (ton)  
set k1 1532.6; # Kekakuan struktur ragam 1 (kN/m)  
set MaxIter 500;  
  
# -----  
# Definisi Node dan Boundary Condition  
# -----  
node 1 0.0; # Node dasar (fixed)  
node 2 0.0; # Node Struktur  
  
fix 1 1; # Fix di dasar (Node 1) - hanya DOF 1 (translasi horizontal)  
  
# -----  
# Massa node 2 dan node 3  
# -----  
mass 2 $M_eff; # Massa Struktur  
  
# -----  
# Material Pegas (Linear Elastic)  
# -----  
uniaxialMaterial Elastic 1 $k1; # Kekakuan Struktur  
  
# -----  
# Definisi Elemen Pegas  
# -----  
element zeroLength 1 1 2 -mat 1 -dir 1; # Pegas antara node 1 dan node 2  
  
# -----  
# Analisis Eigenvalue (untuk verifikasi saja)  
# -----  
set numModes 1; # Hitung 1 mode untuk sistem SDOF  
set eigenValues [eigen -fullGenLapack $numModes];
```

```

# Frekuensi struktur asli (tanpa TMD)
set omega1_ops [expr sqrt([lindex $eigenValues 0])]; #Frekuensi Alami Struktur

puts "Frekuensi struktur terisolasi: $omega1_ops rad/s"
puts "Frekuensi sistem terkopel - Mode 1: $omega1_ops rad/s"

# -----
# Redaman Rayleigh (Gunakan omega_s!)
# -----
set xi 0.02; # Rasio redaman 2%
set alphaM [expr 2.0*$xi*$omega1_ops]; # Gunakan frek. struktur
set betaK 0.0;
rayleigh $alphaM $betaK 0.0 0.0;

# -----
# Ground Motion Input (Gempa Horizontal) Beban Siklik Kobe
# -----
# Define time series for earthquake ground motion (accelerogram)
set dt 0.01; # Time step (s)
set numstep 14000; # Jumlah langkah
set lambdagempa 1.0; # Faktor skala percepatan gempa
set TimeSeries01 "Series -dt $dt -filePath kobe_m_acc.txt -factor $lambdagempa"; # Akselerogram gempa Kobe

# -----
# Output dan Monitoring
# -----
# Rekam perpindahan pada node 2 (struktur) dan gaya dasar node 1 (struktur)
recorder Node -file disp_SDOF_node2_NOTMD.out -time -node 2 -dof 1 disp;
recorder Node -file react_SDOF_node1_NOTMD.out -time -node 1 -dof 1 reaction;

# Rekam gaya pada elemen ZeroLength
recorder Element -file force_SDOF_NOTMD.out -time -ele 1 force; # Gaya pada element 1

# -----
# Analysis Setup
# -----
# Integrator dan sistem solusi
pattern UniformExcitation 1 1 -accel $TimeSeries01; # Pattern UniformExcitation $patternTag $dir -accel $tsTag
constraints Transformation; # Constraint transformation
numberer RCM; # DOF Numberer
system UmfPack; # System UmfPack
test NormDispIncr 1.0e-5 $MaxIter; # ConvergenceTest
algorithm NewtonLineSearch; # Algorithm NewtonLineSearch yang lebih stabil
integrator Newmark 0.5 0.25; # Time integration using Newmark $gamma $beta
analysis Transient; # Type Analysis

```

```

# Intial Variables Before Starting Dynamic Analysis
set ok 0;
set t 0;
set k 1;
set j 1;
set startTime [clock clicks -milliseconds];
set finalt [expr $numstep*$dt];
set DtAnalysis $dt;

puts "Analysis_1 k $k j $j lambda $lambdagempa Dt $DtAnalysis Tol +1.0E-05 Algoritma NewtonLineSearch"

while {$ok == 0 && $t <= $finalt} {
    set ok [analyze 1 $DtAnalysis]
    set t [getTime]
    # Update the time
    set currentTime [getTime]
}

set finishTime [clock clicks -milliseconds];
set timeSeconds [expr ($finishTime-$startTime)/1000];
set timeMinutes [expr $timeSeconds/60];
set timeHours [expr $timeSeconds/3600];
set timeMinutes [expr ($timeMinutes-$timeHours*60)];
set timeSeconds [expr ($timeSeconds-$timeMinutes*60-$timeHours*3600)];

if {$ok == 0} {
    puts "Analysis k $k j $j lambda $lambdagempa Success";
    puts "Time in hours-min-sec: $timeHours:$timeMinutes:$timeSeconds"
} else {
    puts "Analysis k $k j $j lambda $lambdagempa Failed";
    puts "Time in hours-min-sec: $timeHours:$timeMinutes:$timeSeconds"
}

puts "StartTime: $startTime"
puts "FinishTime: $finishTime"

# Clean up

```

Lampiran 2. Program OpenSees – Model 2DOF-HD1

```
# -----
# OpenSees TCL Script - TESIS 2DOF-Top Hysteresis-parallel material-HD1
# -----
#Author: Mathias Siloam Kuncoro Jati
# Units: kN, ton, m, s
# -----

wipe;
model BasicBuilder -ndm 1 -ndf 1; # Model 1D (hanya translasi horizontal), dengan 2DOF

# -----
# Parameter Struktur
# -----
set PI 3.14159265359
set g 9.81; # Gravitasi (m/s^2)
set m1 [expr 1220.0 / 1000]; # 1.22 kN-s^2/m Massa bangunan (ton)
set k1 1532.6; # Kekakuan struktur (kN/m)
set MaxIter 500;
set xi 0.02; # Rasio redaman 2%
set omega_s [expr sqrt($k1/$m1)]; # Frekuensi struktur asli (tanpa TMD)

# -----
# Parameter BoucW-en HVA
# -----
set m2 [expr 0.05*$m1]; # 0.061 kN-s^2/m Massa TMD (ton) 5% dari Massa Struktur
set alpha 0.15; # 0.15 (hardening ratio)
set omega_d [expr $omega_s*0.8]; # Frekuensi NTMD (rad/s)
set kA [expr $m2*$omega_d**2]; # Kekakuan Awal (kN/m)
set kB [expr $kA*$alpha]; # Kekakuan pasca yield (kN/m)
set k2 $kB; # Kekakuan Elastis Damper (kN/m)
set kd [expr $kA-$k2]; # Kekakuan Histerisis (kN/m)
set ko $kA; # kekakuan awal arah x (kN/m)
set n 1; # Parameter Bouc-Wen
set gamma 82.0; # Parameter Bouc-Wen
set beta 82.0; # Parameter Bouc-Wen
set Ao 1.0; # Amplitudo gaya pemulih
set deltaA 0.00; # Kontrol perubahan kekakuan tangensial
set deltaNu 0.00; # Kontrol degradasi Material
set deltaEta 0.00; # Kontrol degradasi Material
set maxIter 500;

# -----
# Definisi Node dan Boundary Condition
# -----
node 1 0.0; # Node dasar (fixed)
node 2 0.0; # Node Struktur
node 3 0.0; # Node NTMD

fix 1 1; # Fix di dasar (Node 1) - hanya DOF 1 (translasi horizontal)
```

```

# -----
# Massa node 2 dan node 3
# -----
mass 2 $m1;          # Massa Gedung
mass 3 $m2;          # Massa NTMD

# -----
# Material Pegas (Linear Elastic)
# -----
uniaxialMaterial Elastic 1 $k1; # Kekakuan Gedung

set C [expr 2.0*$xi*$omega_s*$m1]
uniaxialMaterial Viscous 2 $C 1; # redaman viskos

uniaxialMaterial Parallel 3 1 2

# -----
# Definisi Elemen Pegas (Spring)
# -----
element zeroLength 1 1 2 -mat 3 -dir 1; # Pegas antara node 1 dan node 2

# Material Damper untuk NTMD (bouch wen tanpa pinching)
uniaxialMaterial BoucWen 4 $alpha $ko $n $gamma $beta $Ao $deltaA $deltaNu $deltaEta

element zeroLength 2 2 3 -mat 4 -dir 1; # Pegas antara node 2 dan node 3

# -----
# Analisis Eigenvalue (untuk verifikasi saja)
# -----
set numModes 2; # Hitung 2 mode untuk sistem 2DOF
set eigenValues [eigen -fullGenLapack $numModes];

# Frekuensi hasil OpenSees (sistem terkopel)
set omega1_ops [expr sqrt([lindex $eigenValues 0])]; # Mode 1
set omega2_ops [expr sqrt([lindex $eigenValues 1])]; # Mode 2

puts "Frekuensi struktur terisolasi: $omega_s rad/s"
puts "Frekuensi sistem terkopel - Mode 1: $omega1_ops rad/s"
puts "Frekuensi sistem terkopel - Mode 2: $omega2_ops rad/s"

# -----
# Ground Motion Input (Gempa Horizontal) Beban Siklik Kobe
# -----
# Define time series for earthquake ground motion (accelerogram)
set dt 0.01;          # Time step (s)
set numstep 14000;    # Jumlah langkah
set lambdagempa 1.0;   # Faktor skala percepatan gempa
set TimeSeries01 "Series -dt $dt -filePath kobe_m_acc.txt -factor $lambdagempa"; # Akselerogram gempa Kobe

```

```

# -----
# Output dan Monitoring
# -----
# Rekam perpindahan pada node 2 (struktur) dan node 3 (TMD)
recorder Node -file disp_2DOF_node2_HD1.out -time -node 2 -dof 1 disp;
recorder Node -file disp_2DOF_node3_HD1.out -time -node 3 -dof 1 disp;
recorder Node -file react_2DOF_node1_HD1.out -time -node 1 -dof 1 reaction;

# Rekam gaya pada elemen ZeroLength (TMD)
recorder Element -file force_2DOF_STR_HD1.out -time -ele 1 force; # Gaya pada struktur
recorder Element -file force_2DOF_TMD_HD1.out -time -ele 2 force; # Gaya pada damper
|
# -----
# Analysis Setup
# -----
# Integrator dan sistem solusi
pattern UniformExcitation 1 1 -accel $TimeSeries01; # Pattern UniformExcitation $patternTag $dir -accel $tsTag
constraints Transformation; # Constraint transformation
numberer RCM; # DOF Numberer
system UmfPack; # System UmfPack
test NormDispIncr 1.0e-5 $MaxIter; # ConvergenceTest
algorithm NewtonLineSearch; # Algorithm NewtonLineSearch yang lebih stabil
integrator Newmark 0.5 0.25; # Back to default
analysis Transient; # Type Analysis

# Intial Variables Before Starting Dynamic Analysis
set ok 0;
set t 0;
set k 1; # Ground motion tag
set j 1; # Scaling tag
set startTime [clock clicks -milliseconds];
set finalt [expr $numstep*$dt];
set DtAnalysis $dt; # Nilai dt bisa diturunkan jika gagal

puts "Analysis_1 k $k j $j lambda $lambdagempa Dt $DtAnalysis Tol +1.0E-05 Algoritma NewtonLineSearch"

while {$ok == 0 && $t <= $finalt} {
    set ok [analyze 1 $DtAnalysis]

    if {$ok != 0} {
        puts "Reduksi time step dari $DtAnalysis ke [expr $DtAnalysis/2]"
        set tempDt [expr $DtAnalysis/2]
        set ok [analyze 1 $tempDt]
        if {$ok == 0} {
            puts "Analisis berhasil dengan dt baru: $tempDt"
            set DtAnalysis $tempDt
        } else {
            puts "Analisis gagal bahkan dengan dt $tempDt. Keluar."
            break
        }
    }

    break
}

set t [getTime]
}

set finishTime [clock clicks -milliseconds];
set timeSeconds [expr ($finishTime-$startTime)/1000];
set timeMinutes [expr $timeSeconds/60];
set timeHours [expr $timeSeconds/3600];
set timeMinutes [expr ($timeMinutes-$timeHours*60)];
set timeSeconds [expr ($timeSeconds-$timeMinutes*60-$timeHours*3600)];

if {$ok == 0} {
    puts "Analysis k $k j $j lambda $lambdagempa Success";
    puts "Time in hours-min-sec: $timeHours:$timeMinutes:$timeSeconds"
} else {
    puts "Analysis k $k j $j lambda $lambdagempa Failed";
    puts "Time in hours-min-sec: $timeHours:$timeMinutes:$timeSeconds"
}

puts "StartTime: $startTime"
puts "FinishTime: $finishTime"

# Clean up
wipe

```

Lampiran 3. Program OpenSees – Model 2DOF-HD2

```
# -----
# OpenSees TCL Script - TESIS 2DOF-Top Hysteresis-parallel material-HD2
# -----
#Author: Mathias Siloam Kuncoro Jati
# Units: kN, ton, m, s
# -----

wipe;
model BasicBuilder -ndm 1 -ndf 1; # Model 1D (hanya translasi horizontal), dengan 2DOF

# -----
# Parameter Struktur
# -----
set PI 3.14159265359
set g 9.81; # Gravitasi (m/s^2)
set m1 [expr 1220.0 / 1000]; # 1.22 kN-s^2/m Massa bangunan (ton)
set k1 1532.6; # Kekakuan struktur (kN/m)
set MaxIter 500;
set xi 0.02; # Rasio redaman 2%
set omega_s [expr sqrt($k1/$m1)]; # Frekuensi struktur asli (tanpa TMD)

# -----
# Parameter BoucW-en HVA
# -----
set m2 [expr 0.05*$m1]; # 0.061 kN-s^2/m Massa TMD (ton) 5% dari Massa Struktur
set alpha 0.15; # 0.15 (hardening ratio)
set omega_d [expr $omega_s*0.95]; # Frekuensi NTMD (rad/s)
set kA [expr $m2*$omega_d**2]; # Kekakuan Awal (kN/m)
set kB [expr $kA*$alpha]; # Kekakuan pasca yield (kN/m)
set k2 $kB; # Kekakuan Elastis Damper (kN/m)
set kd [expr $kA-$k2]; # Kekakuan Histerisis (kN/m)
set ko $kA; # kekakuan awal arah x (kN/m)
set n 1; # Parameter Bouc-Wen
set gamma 82.0; # Parameter Bouc-Wen
set beta 82.0; # Parameter Bouc-Wen
set Ao 1.0; # Amplitudo gaya pemulih
set deltaA 0.00; # Kontrol perubahan kekakuan tangensial
set deltaNu 0.00; # Kontrol degradasi Material
set deltaEta 0.00; # Kontrol degradasi Material
set maxIter 500;

# -----
# Definisi Node dan Boundary Condition
# -----
node 1 0.0; # Node dasar (fixed)
node 2 0.0; # Node Struktur
node 3 0.0; # Node NTMD

fix 1 1; # Fix di dasar (Node 1) - hanya DOF 1 (translasi horizontal)
```

```

# -----
# Massa node 2 dan node 3
# -----
mass 2 $m1;          # Massa Gedung
mass 3 $m2;          # Massa NTMD

# -----
# Material Pegas (Linear Elastic)
# -----
uniaxialMaterial Elastic 1 $k1; # Kekakuan Gedung

set C [expr 2.0*$xi*$omega_s*$m1]
uniaxialMaterial Viscous 2 $C 1; # redaman viskos

uniaxialMaterial Parallel 3 1 2

# -----
# Definisi Elemen Pegas (Spring)
# -----
element zeroLength 1 1 2 -mat 3 -dir 1; # Pegas antara node 1 dan node 2

# Material Damper untuk NTMD (Bouc-Wen tanpa pinching)
uniaxialMaterial BoucWen 4 $alpha $ko $n $gamma $beta $Ao $deltaA $deltaNu $deltaEta

element zeroLength 2 2 3 -mat 4 -dir 1; # Pegas antara node 2 dan node 3

# -----
# Analisis Eigenvalue (untuk verifikasi saja)
# -----
set numModes 2; # Hitung 2 mode untuk sistem 2DOF
set eigenValues [eigen -fullGenLapack $numModes];

# Frekuensi hasil OpenSees (sistem terkopel)
set omega1_ops [expr sqrt([lindex $eigenValues 0])]; # Mode 1
set omega2_ops [expr sqrt([lindex $eigenValues 1])]; # Mode 2

puts "Frekuensi struktur terisolasi: $omega_s rad/s"
puts "Frekuensi sistem terkopel - Mode 1: $omega1_ops rad/s"
puts "Frekuensi sistem terkopel - Mode 2: $omega2_ops rad/s"

# -----
# Ground Motion Input (Gempa Horizontal) Beban Siklik Kobe
# -----
# Define time series for earthquake ground motion (accelerogram)
set dt 0.01;          # Time step (s)
set numstep 14000;    # Jumlah langkah
set lambdagempa 1.0;   # Faktor skala percepatan gempa
set TimeSeries01 "Series -dt $dt -filePath kobe_m_acc.txt -factor $lambdagempa"; # Akselerogram gempa Kobe

```

```

# -----
# Output dan Monitoring
# -----
# Rekam perpindahan pada node 2 (struktur) dan node 3 (TMD)
recorder Node -file disp_2DOF_node2_HD2.out -time -node 2 -dof 1 disp;
recorder Node -file disp_2DOF_node3_HD2.out -time -node 3 -dof 1 disp;
recorder Node -file react_2DOF_node1_HD2.out -time -node 1 -dof 1 reaction;

# Rekam gaya pada elemen ZeroLength (TMD)
recorder Element -file force_2DOF_STR_HD2.out -time -ele 1 force; # Gaya pada struktur
recorder Element -file force_2DOF_TMD_HD2.out -time -ele 2 force; # Gaya pada damper

# -----
# Analysis Setup
# -----
# Integrator dan sistem solusi
pattern UniformExcitation 1 1 -accel $TimeSeries01; # Pattern UniformExcitation $patternTag $dir -accel $tsTag
constraints Transformation; # Constraint transformation
numberer RCM; # DOF Numberer
system UmfPack; # System UmfPack
test NormDispIncr 1.0e-5 $MaxIter; # ConvergenceTest
algorithm NewtonLineSearch; # Algorithm NewtonLineSearch yang lebih stabil
integrator Newmark 0.5 0.25; # Back to default
analysis Transient; # Type Analysis

# Intial Variables Before Starting Dynamic Analysis
set ok 0;
set t 0;
set k 1; # Ground motion tag
set j 1; # Scaling tag
set startTime [clock clicks -milliseconds];
set finalt [expr $numstep*$dt];
set DtAnalysis $dt; # Nilai dt bisa diturunkan jika gagal

puts "Analysis_1 k $k j $j lambda $lambdagempa Dt $DtAnalysis Tol +1.0E-05 Algoritma NewtonLineSearch"

while {$ok == 0 && $t <= $finalt} {
    set ok [analyze 1 $DtAnalysis]

    if {$ok != 0} {
        puts "Reduksi time step dari $DtAnalysis ke [expr $DtAnalysis/2]"
        set tempDt [expr $DtAnalysis/2]
        set ok [analyze 1 $tempDt]
        if {$ok == 0} {
            puts "Analisis berhasil dengan dt baru: $tempDt"
            set DtAnalysis $tempDt
        } else {
            puts "Analisis gagal bahkan dengan dt $tempDt. Keluar."
            break
        }
    }
}

```

```

    }
}

set t [getTime]
}

set finishTime [clock clicks -milliseconds];
set timeSeconds [expr ($finishTime-$startTime)/1000];
set timeMinutes [expr $timeSeconds/60];
set timeHours [expr $timeSeconds/3600];
set timeMinutes [expr ($timeMinutes-$timeHours*60)];
set timeSeconds [expr ($timeSeconds-$timeMinutes*60-$timeHours*3600)];

if {$ok == 0} {
    puts "Analysis k $k j $j lambda $lambdagempa Success";
    puts "Time in hours-min-sec: $timeHours:$timeMinutes:$timeSeconds"
} else {
    puts "Analysis k $k j $j lambda $lambdagempa Failed";
    puts "Time in hours-min-sec: $timeHours:$timeMinutes:$timeSeconds"
}

puts "StartTime: $startTime"
puts "FinishTime: $finishTime"

# Clean up
wipe

```

Lampiran 4. Program OpenSees – Model 2DOF-HD3

```
# -----
# OpenSees TCL Script - TESIS 2DOF-Top Hysteresis-parallel material-HD3
# -----
#Author: Mathias Siloam Kuncoro Jati
# Units: kN, ton, m, s
# -----

wipe;
model BasicBuilder -ndm 1 -ndf 1; # Model 1D (hanya translasi horizontal), dengan 2DOF

# -----
# Parameter Struktur
# -----
set PI 3.14159265359
set g 9.81; # Gravitasi (m/s^2)
set m1 [expr 1220.0 / 1000]; # 1.22 kN-s^2/m Massa bangunan (ton)
set k1 1532.6; # Kekakuan struktur (KN/m)
set MaxIter 500;
set xi 0.02; # Rasio redaman 2%
set omega_s [expr sqrt($k1/$m1)]; # Frekuensi struktur asli (tanpa TMD)

# -----
# Parameter BoucW-en HVA
# -----
set m2 [expr 0.05*$m1]; # 0.061 kN-s^2/m Massa TMD (ton) 5% dari Massa Struktur
set alpha 0.15; # 0.15 (hardening ratio)
set omega_d [expr $omega_s*1.0]; # Frekuensi NTMD (rad/s)
set kA [expr $m2*$omega_d**2]; # Kekakuan Awal (kN/m)
set kB [expr $kA*$alpha]; # Kekakuan pasca yield (kN/m)
set k2 $kB; # Kekakuan Elastis Damper (kN/m)
set kd [expr $kA-$k2]; # Kekakuan Histerisis (kN/m)
set ko $kA; # kekakuan awal arah x (kN/m)
set n 1; # Parameter Bouc-Wen
set gamma 82.0; # Parameter Bouc-Wen
set beta 82.0; # Parameter Bouc-Wen
set Ao 1.0; # Amplitudo gaya pemulih
set deltaA 0.00; # Kontrol perubahan kekakuan tangensial
set deltaNu 0.00; # Kontrol degradasi Material
set deltaEta 0.00; # Kontrol degradasi Material
set maxIter 500;

# -----
# Definisi Node dan Boundary Condition
# -----
node 1 0.0; # Node dasar (fixed)
node 2 0.0; # Node Struktur
node 3 0.0; # Node NTMD

fix 1 1; # Fix di dasar (Node 1) - hanya DOF 1 (translasi horizontal)
```

```

# -----
# Massa node 2 dan node 3
# -----
mass 2 $m1;          # Massa Gedung
mass 3 $m2;          # Massa NTMD

# -----
# Material Pegas (Linear Elastic)
# -----
uniaxialMaterial Elastic 1 $k1; # Kekakuan Gedung

set C [expr 2.0*$xi*$omega_s*$m1]
uniaxialMaterial Viscous 2 $C 1; # redaman viskos

uniaxialMaterial Parallel 3 1 2

# -----
# Definisi Elemen Pegas (Spring)
# -----
element zeroLength 1 1 2 -mat 3 -dir 1; # Pegas antara node 1 dan node 2

# Material Damper untuk NTMD (Bouc-Wen tanpa pinching)
uniaxialMaterial BoucWen 4 $alpha $ko $n $gamma $beta $Ao $deltaA $deltaNu $deltaEta

element zeroLength 2 2 3 -mat 4 -dir 1; # Pegas antara node 2 dan node 3

# -----
# Analisis Eigenvalue (untuk verifikasi saja)
# -----
set numModes 2; # Hitung 2 mode untuk sistem 2DOF
set eigenValues [eigen -fullGenLapack $numModes];

# Frekuensi hasil OpenSees (sistem terkopel)
set omega1_ops [expr sqrt([lindex $eigenValues 0])]; # Mode 1
set omega2_ops [expr sqrt([lindex $eigenValues 1])]; # Mode 2

puts "Frekuensi struktur terisolasi: $omega_s rad/s"
puts "Frekuensi sistem terkopel - Mode 1: $omega1_ops rad/s"
puts "Frekuensi sistem terkopel - Mode 2: $omega2_ops rad/s"

# -----
# Ground Motion Input (Gempa Horizontal) Beban Siklik Kobe
# -----
# Define time series for earthquake ground motion (accelerogram)
set dt 0.01;          # Time step (s)
set numstep 14000;    # Jumlah langkah
set lambdagempa 1.0;   # Faktor skala percepatan gempa
set TimeSeries01 "Series -dt $dt -filePath kobe_m_acc.txt -factor $lambdagempa"; # Akselerogram gempa Kobe

```

```

# -----
# Output dan Monitoring
# -----
# Rekam perpindahan pada node 2 (struktur) dan node 3 (TMD)
recorder Node -file disp_2DOF_node2_HD3.out -time -node 2 -dof 1 disp;
recorder Node -file disp_2DOF_node3_HD3.out -time -node 3 -dof 1 disp;
recorder Node -file react_2DOF_node1_HD3.out -time -node 1 -dof 1 reaction;

# Rekam gaya pada elemen ZeroLength (TMD)
recorder Element -file force_2DOF_STR_HD3.out -time -ele 1 force; # Gaya pada struktur
recorder Element -file force_2DOF_TMD_HD3.out -time -ele 2 force; # Gaya pada damper

# -----
# Analysis Setup
# -----
# Integrator dan sistem solusi
pattern UniformExcitation 1 1 -accel $TimeSeries01; # Pattern UniformExcitation $patternTag $dir -accel $tsTag
constraints Transformation; # Constraint transformation
numberer RCM; # DOF Numberer
system UmfPack; # System UmfPack
test NormDispIncr 1.0e-5 $MaxIter; # ConvergenceTest
algorithm NewtonLineSearch; # Algorithm NewtonLineSearch yang lebih stabil
integrator Newmark 0.5 0.25; # Back to default
analysis Transient; # Type Analysis

# Intial Variables Before Starting Dynamic Analysis
set ok 0;
set t 0;
set k 1; # Ground motion tag
set j 1; # Scaling tag
set startTime [clock clicks -milliseconds];
set finalt [expr $numstep*$dt];
set DtAnalysis $dt; # Nilai dt bisa diturunkan jika gagal

puts "Analysis_1 k $k j $j lambda $lambdagempa Dt $DtAnalysis Tol +1.0E-05 Algoritma NewtonLineSearch"

while {$ok == 0 && $t <= $finalt} {
    set ok [analyze 1 $DtAnalysis]

    if {$ok != 0} {
        puts "Reduksi time step dari $DtAnalysis ke [expr $DtAnalysis/2]"
        set tempDt [expr $DtAnalysis/2]
        set ok [analyze 1 $tempDt]
        if {$ok == 0} {
            puts "Analisis berhasil dengan dt baru: $tempDt"
            set DtAnalysis $tempDt
        } else {
            puts "Analisis gagal bahkan dengan dt $tempDt. Keluar."
        }
    }
}

```

```

        break
    }
}

set t [getTime]
}

set finishTime [clock clicks -milliseconds];
set timeSeconds [expr ($finishTime-$startTime)/1000];
set timeMinutes [expr $timeSeconds/60];
set timeHours [expr $timeSeconds/3600];
set timeMinutes [expr ($timeMinutes-$timeHours*60)];
set timeSeconds [expr ($timeSeconds-$timeMinutes*60-$timeHours*3600)];

if {$ok == 0} {
    puts "Analysis k $k j $j lambda $lambdagempa Success";
    puts "Time in hours-min-sec: $timeHours:$timeMinutes:$timeSeconds"
} else {
    puts "Analysis k $k j $j lambda $lambdagempa Failed";
    puts "Time in hours-min-sec: $timeHours:$timeMinutes:$timeSeconds"
}

puts "StartTime: $startTime"
puts "FinishTime: $finishTime"

# Clean up
wipe

```

Lampiran 5. Program OpenSees – Model 2DOF-HD4

```
# -----
# OpenSees TCL Script - TESIS 2DOF-Top Hysteresis-parallel material-HD4
# -----
#Author: Mathias Siloam Kuncoro Jati
# Units: kN, ton, m, s
# -----

wipe;
model BasicBuilder -ndm 1 -ndf 1; # Model 1D (hanya translasi horizontal), dengan 2DOF

# -----
# Parameter Struktur
# -----
set PI 3.14159265359
set g 9.81; # Gravitasi (m/s^2)
set m1 [expr 1220.0 / 1000]; # 1.22 kN-s^2/m Massa bangunan (ton)
set k1 1532.6; # Kekakuan struktur (kN/m)
set MaxIter 500;
set xi 0.02; # Rasio redaman 2%
set omega_s [expr sqrt($k1/$m1)]; # Frekuensi struktur asli (tanpa TMD)

# -----
# Parameter BoucW-en HVA
# -----
set m2 [expr 0.05*$m1]; # 0.061 kN-s^2/m Massa TMD (ton) 5% dari Massa Struktur
set alpha 0.15; # 0.15 (hardening ratio)
set omega_d [expr $omega_s*1.05]; # Frekuensi NTMD (rad/s)
set kA [expr $m2*$omega_d**2]; # Kekakuan Awal (kN/m)
set kB [expr $kA*$alpha]; # Kekakuan pasca yield (kN/m)
set k2 $kB; # Kekakuan Elastis Damper (kN/m)
set kd [expr $kA-$k2]; # Kekakuan Histerisis (kN/m)
set ko $kA; # kekakuan awal arah x (kN/m)
set n 1; # Parameter Bouc-Wen
set gamma 82.0; # Parameter Bouc-Wen
set beta 82.0; # Parameter Bouc-Wen
set Ao 1.0; # Amplitudo gaya pemulih
set deltaA 0.00; # Kontrol perubahan kekakuan tangensial
set deltaNu 0.00; # Kontrol degradasi Material
set deltaEta 0.00; # Kontrol degradasi Material
set maxIter 500;

# -----
# Definisi Node dan Boundary Condition
# -----
node 1 0.0; # Node dasar (fixed)
node 2 0.0; # Node Struktur
node 3 0.0; # Node NTMD

fix 1 1; # Fix di dasar (Node 1) - hanya DOF 1 (translasi horizontal)
```

```

# -----
# Massa node 2 dan node 3
# -----
mass 2 $m1;          # Massa Gedung
mass 3 $m2;          # Massa NTMD

# -----
# Material Pegas (Linear Elastic)
# -----
uniaxialMaterial Elastic 1 $k1; # Kekakuan Gedung

set C [expr 2.0*$xi*$omega_s*$m1]
uniaxialMaterial Viscous 2 $C 1; # redaman viskos

uniaxialMaterial Parallel 3 1 2

# -----
# Definisi Elemen Pegas (Spring)
# -----
element zeroLength 1 1 2 -mat 3 -dir 1; # Pegas antara node 1 dan node 2

# Material Damper untuk NTMD (Bouc-Wen tanpa pinching)
uniaxialMaterial BoucWen 4 $alpha $ko $n $gamma $beta $Ao $deltaA $deltaNu $deltaEta

element zeroLength 2 2 3 -mat 4 -dir 1; # Pegas antara node 2 dan node 3

# -----
# Analisis Eigenvalue (untuk verifikasi saja)
# -----
set numModes 2; # Hitung 2 mode untuk sistem 2DOF
set eigenValues [eigen -fullGenLapack $numModes];

# Frekuensi hasil OpenSees (sistem terkopel)
set omega1_ops [expr sqrt([lindex $eigenValues 0])]; # Mode 1
set omega2_ops [expr sqrt([lindex $eigenValues 1])]; # Mode 2

puts "Frekuensi struktur terisolasi: $omega_s rad/s"
puts "Frekuensi sistem terkopel - Mode 1: $omega1_ops rad/s"
puts "Frekuensi sistem terkopel - Mode 2: $omega2_ops rad/s"

# -----
# Ground Motion Input (Gempa Horizontal) Beban Siklik Kobe
# -----
# Define time series for earthquake ground motion (accelerogram)
set dt 0.01;          # Time step (s)
set numstep 14000;    # Jumlah langkah
set lambdagempa 1.0;   # Faktor skala percepatan gempa
set TimeSeries01 "Series -dt $dt -filePath kobe_m_acc.txt -factor $lambdagempa"; # Akselerogram gempa Kobe

```

```

# -----
# Output dan Monitoring
# -----
# Rekam perpindahan pada node 2 (struktur) dan node 3 (TMD)
recorder Node -file disp_2DOF_node2_HD4.out -time -node 2 -dof 1 disp;
recorder Node -file disp_2DOF_node3_HD4.out -time -node 3 -dof 1 disp;
recorder Node -file react_2DOF_node1_HD4.out -time -node 1 -dof 1 reaction;

# Rekam gaya pada elemen ZeroLength (TMD)
recorder Element -file force_2DOF_STR_HD4.out -time -ele 1 force; # Gaya pada struktur
recorder Element -file force_2DOF_TMD_HD4.out -time -ele 2 force; # Gaya pada damper

# -----
# Analysis Setup
# -----
# Integrator dan sistem solusi
pattern UniformExcitation 1 1 -accel $TimeSeries01; # Pattern UniformExcitation $patternTag $dir -accel $tsTag
constraints Transformation; # Constraint transformation
numberer RCM; # DOF Numberer
system UmfPack; # System UmfPack
test NormDispIncr 1.0e-5 $MaxIter; # ConvergenceTest
algorithm NewtonLineSearch; # Algorithm NewtonLineSearch yang lebih stabil
integrator Newmark 0.5 0.25; # Back to default
analysis Transient; # Type Analysis

# Intial Variables Before Starting Dynamic Analysis
set ok 0;
set t 0;
set k 1; # Ground motion tag
set j 1; # Scaling tag
set startTime [clock clicks -milliseconds];
set finalt [expr $numstep*$dt];
set DtAnalysis $dt; # Nilai dt bisa diturunkan jika gagal

puts "Analysis_1 k $k j $j lambda $lambdagempa Dt $DtAnalysis Tol +1.0E-05 Algoritma NewtonLineSearch"

while {$ok == 0 && $t <= $finalt} {
    set ok [analyze 1 $DtAnalysis]

    if {$ok != 0} {
        puts "Reduksi time step dari $DtAnalysis ke [expr $DtAnalysis/2]"
        set tempDt [expr $DtAnalysis/2]
        set ok [analyze 1 $tempDt]
        if {$ok == 0} {
            puts "Analisis berhasil dengan dt baru: $tempDt"
            set DtAnalysis $tempDt
        } else {
            puts "Analisis gagal bahkan dengan dt $tempDt. Keluar."
            break
        }
    }
}

```

```

    }

    set t [getTime]
}

set finishTime [clock clicks -milliseconds];
set timeSeconds [expr ($finishTime-$startTime)/1000];
set timeMinutes [expr $timeSeconds/60];
set timeHours [expr $timeSeconds/3600];
set timeMinutes [expr ($timeMinutes-$timeHours*60)];
set timeSeconds [expr ($timeSeconds-$timeMinutes*60-$timeHours*3600)];

if {$ok == 0} {
    puts "Analysis k $k j $j lambda $lambdagempa Success";
    puts "Time in hours-min-sec: $timeHours:$timeMinutes:$timeSeconds"
} else {
    puts "Analysis k $k j $j lambda $lambdagempa Failed";
    puts "Time in hours-min-sec: $timeHours:$timeMinutes:$timeSeconds"
}

puts "StartTime: $startTime"
puts "FinishTime: $finishTime"

# Clean up
wipe

```

Lampiran 6. Program OpenSees – Model 2DOF-HD5

```
# -----
# OpenSees TCL Script - TESIS 2DOF-Top Hysteresis-parallel material-HD5
# -----
#Author: Mathias Siloam Kuncoro Jati
# Units: kN, ton, m, s
# -----

wipe;
model BasicBuilder -ndm 1 -ndf 1; # Model 1D (hanya translasi horizontal), dengan 2DOF

# -----
# Parameter Struktur
# -----
set PI 3.14159265359
set g 9.81; # Gravitasi (m/s^2)
set m1 [expr 1220.0 / 1000]; # 1.22 kN-s^2/m Massa bangunan (ton)
set k1 1532.6; # Kekakuan struktur (kN/m)
set MaxIter 500;
set xi 0.02; # Rasio redaman 2%
set omega_s [expr sqrt($k1/$m1)]; # Frekuensi struktur asli (tanpa TMD)

# -----
# Parameter BoucW-en HVA
# -----
set m2 [expr 0.05*$m1]; # 0.061 kN-s^2/m Massa TMD (ton) 5% dari Massa Struktur
set alpha 0.15; # 0.15 (hardening ratio)
set omega_d [expr $omega_s*2.0]; # Frekuensi NTMD (rad/s)
set kA [expr $m2*$omega_d**2]; # Kekakuan Awal (kN/m)
set kB [expr $kA*$alpha]; # Kekakuan pasca yield (kN/m)
set k2 $kB; # Kekakuan Elastis Damper (kN/m)
set kd [expr $kA-$k2]; # Kekakuan Histerisis (kN/m)
set ko $kA; # kekakuan awal arah x (kN/m)
set n 1; # Parameter Bouc-Wen
set gamma 1100.0; # Parameter Bouc-Wen
set beta 1100.0; # Parameter Bouc-Wen
set Ao 1.0; # Amplitudo gaya pemulih
set deltaA 0.00; # Kontrol perubahan kekakuan tangensial
set deltaNu 0.00; # Kontrol degradasi Material
set deltaEta 0.00; # Kontrol degradasi Material
set maxIter 500;

# -----
# Definisi Node dan Boundary Condition
# -----
node 1 0.0; # Node dasar (fixed)
node 2 0.0; # Node Struktur
node 3 0.0; # Node NTMD

fix 1 1; # Fix di dasar (Node 1) - hanya DOF 1 (translasi horizontal)
```

```

# -----
# Massa node 2 dan node 3
# -----
mass 2 $m1;          # Massa Gedung
mass 3 $m2;          # Massa NTMD

# -----
# Material Pegas (Linear Elastic)
# -----
uniaxialMaterial Elastic 1 $k1; # Kekakuan Gedung

set C [expr 2.0*$xi*$omega_s*$m1]
uniaxialMaterial Viscous 2 $C 1; # redaman viskos

uniaxialMaterial Parallel 3 1 2

# -----
# Definisi Elemen Pegas (Spring)
# -----
element zeroLength 1 1 2 -mat 3 -dir 1; # Pegas antara node 1 dan node 2

# Material Damper untuk NTMD (Bouc-Wen tanpa pinching)
uniaxialMaterial BoucWen 4 $alpha $ko $n $gamma $beta $Ao $deltaA $deltaNu $deltaEta

element zeroLength 2 2 3 -mat 4 -dir 1; # Pegas antara node 2 dan node 3

# -----
# Analisis Eigenvalue (untuk verifikasi saja)
# -----
set numModes 2; # Hitung 2 mode untuk sistem 2DOF
set eigenValues [eigen -fullGenLapack $numModes];

# Frekuensi hasil OpenSees (sistem terkopel)
set omega1_ops [expr sqrt([lindex $eigenValues 0])]; # Mode 1
set omega2_ops [expr sqrt([lindex $eigenValues 1])]; # Mode 2

puts "Frekuensi struktur terisolasi: $omega_s rad/s"
puts "Frekuensi sistem terkopel - Mode 1: $omega1_ops rad/s"
puts "Frekuensi sistem terkopel - Mode 2: $omega2_ops rad/s"

# -----
# Ground Motion Input (Gempa Horizontal) Beban Siklik Kobe
# -----
# Define time series for earthquake ground motion (accelerogram)
set dt 0.01;          # Time step (s)
set numstep 14000;    # Jumlah langkah
set lambdagempa 1.0;   # Faktor skala percepatan gempa
set TimeSeries01 "Series -dt $dt -filePath kobe m acc.txt -factor $lambdagempa"; # Akselerogram gempa Kobe

```

```

# -----
# Output dan Monitoring
# -----
# Rekam perpindahan pada node 2 (struktur) dan node 3 (TMD)
recorder Node -file disp_2DOF_node2_HD5.out -time -node 2 -dof 1 disp;
recorder Node -file disp_2DOF_node3_HD5.out -time -node 3 -dof 1 disp;
recorder Node -file react_2DOF_node1_HD5.out -time -node 1 -dof 1 reaction;

# Rekam gaya pada elemen ZeroLength (TMD)
recorder Element -file force_2DOF_STR_HD5.out -time -ele 1 force; # Gaya pada struktur
recorder Element -file force_2DOF_TMD_HD5.out -time -ele 2 force; # Gaya pada damper

# -----
# Analysis Setup
# -----
# Integrator dan sistem solusi
pattern UniformExcitation 1 1 -accel $TimeSeries01; # Pattern UniformExcitation $patternTag $dir -accel $tsTag
constraints Transformation; # Constraint transformation
numberer RCM; # DOF Numberer
system UmfPack; # System UmfPack
test NormDispIncr 1.0e-5 $MaxIter; # ConvergenceTest
algorithm NewtonLineSearch; # Algorithm NewtonLineSearch yang lebih stabil
integrator Newmark 0.5 0.25; # Back to default
analysis Transient; # Type Analysis

# Intial Variables Before Starting Dynamic Analysis
set ok 0;
set t 0;
set k 1; # Ground motion tag
set j 1; # Scaling tag
set startTime [clock clicks -milliseconds];
set finalt [expr $numstep*$dt];
set DtAnalysis $dt; # Nilai dt bisa diturunkan jika gagal

puts "Analysis_1 k $k j $j lambda $lambdagempa Dt $DtAnalysis Tol +1.0E-05 Algoritma NewtonLineSearch"

while {$ok == 0 && $t <= $finalt} {
    set ok [analyze 1 $DtAnalysis]

    if {$ok != 0} {
        puts "Reduksi time step dari $DtAnalysis ke [expr $DtAnalysis/2]"
        set tempDt [expr $DtAnalysis/2]
        set ok [analyze 1 $tempDt]
        if {$ok == 0} {
            puts "Analisis berhasil dengan dt baru: $tempDt"
            set DtAnalysis $tempDt
        } else {
            puts "Analisis gagal bahkan dengan dt $tempDt. Keluar."
            break
        }
    }
}

```

```

        break
    }
}

set t [getTime]
}

set finishTime [clock clicks -milliseconds];
set timeSeconds [expr ($finishTime-$startTime)/1000];
set timeMinutes [expr $timeSeconds/60];
set timeHours [expr $timeSeconds/3600];
set timeMinutes [expr ($timeMinutes-$timeHours*60)];
set timeSeconds [expr ($timeSeconds-$timeMinutes*60-$timeHours*3600)];

if {$ok == 0} {
    puts "Analysis k $k j $j lambda $lambdagempa Success";
    puts "Time in hours-min-sec: $timeHours:$timeMinutes:$timeSeconds"
} else {
    puts "Analysis k $k j $j lambda $lambdagempa Failed";
    puts "Time in hours-min-sec: $timeHours:$timeMinutes:$timeSeconds"
}

puts "StartTime: $startTime"
puts "FinishTime: $finishTime"

# Clean up
wipe

```

Lampiran 7. Perhitungan Energi Terdisipasi

KURVA HISTERESIS HD1							
Waktu (s)	Gaya (KN)	Perpindahan Relatif (m)	Gaya (N)	Δi (m)	$\frac{F_{xi} + F_{xi-1}}{2}$	Energi (J)	Total Energi (J)
0.01	-3.14E-07	-6.41E-09	-3.14E-04				21.12938
0.02	-2.13E-06	-4.34E-08	-2.13E-03	-3.70E-08	-1.22E-03	4.52E-11	
0.03	-7.26E-06	-1.48E-07	-7.26E-03	-1.05E-07	-4.70E-03	4.91E-10	
0.04	-1.71E-05	-3.49E-07	-1.71E-02	-2.01E-07	-1.22E-02	2.46E-09	
0.05	-3.21E-05	-6.55E-07	-3.21E-02	-3.05E-07	-2.46E-02	7.51E-09	
0.06	-5.13E-05	-1.05E-06	-5.13E-02	-3.91E-07	-4.17E-02	1.63E-08	
0.07	-7.26E-05	-1.48E-06	-7.26E-02	-4.34E-07	-6.19E-02	2.69E-08	
0.08	-9.30E-05	-1.90E-06	-9.30E-02	-4.17E-07	-8.28E-02	3.45E-08	
0.09	-1.09E-04	-2.22E-06	-1.09E-01	-3.27E-07	-1.01E-01	3.30E-08	
0.1	-1.17E-04	-2.39E-06	-1.17E-01	-1.65E-07	-1.13E-01	1.87E-08	
0.11	-1.14E-04	-2.33E-06	-1.14E-01	5.59E-08	-1.16E-01	-6.48E-09	
0.12	-9.89E-05	-2.02E-06	-9.89E-02	3.14E-07	-1.07E-01	-3.35E-08	
0.13	-7.05E-05	-1.44E-06	-7.05E-02	5.80E-07	-8.47E-02	-4.91E-08	
0.14	-3.04E-05	-6.21E-07	-3.04E-02	8.17E-07	-5.05E-02	-4.12E-08	
0.15	1.82E-05	3.71E-07	1.82E-02	9.92E-07	-6.13E-03	-6.08E-09	
0.16	7.09E-05	1.45E-06	7.09E-02	1.08E-06	4.46E-02	4.79E-08	
0.17	1.22E-04	2.49E-06	1.22E-01	1.05E-06	9.66E-02	1.01E-07	
0.18	1.66E-04	3.39E-06	1.66E-01	9.00E-07	1.44E-01	1.30E-07	
0.19	1.98E-04	4.03E-06	1.98E-01	6.42E-07	1.82E-01	1.17E-07	
0.2	2.12E-04	4.33E-06	2.12E-01	2.92E-07	2.05E-01	5.99E-08	
0.21	2.07E-04	4.21E-06	2.07E-01	-1.14E-07	2.09E-01	-2.39E-08	
0.22	1.80E-04	3.68E-06	1.80E-01	-5.35E-07	1.93E-01	-1.03E-07	
0.23	1.35E-04	2.75E-06	1.35E-01	-9.24E-07	1.58E-01	-1.46E-07	
139.98	-5.67E-04	-2.43E-06	-5.67E-01	4.43E-06	-6.75E-01	-2.99E-06	
139.99	-3.08E-04	2.84E-06	-3.08E-01	5.27E-06	-4.37E-01	-2.31E-06	
140	-2.75E-05	8.56E-06	-2.75E-02	5.72E-06	-1.68E-01	-9.60E-07	

KURVA HISTERESIS HD2							
Waktu (s)	Gaya (KN)	Perpindahan Relatif (m)	Gaya (N)	Δi (m)	$\frac{F_{xi} + F_{xi-1}}{2}$	Energi (J)	Total Energi (J)
0.01	-4.39E-07	-6.35E-09	-4.39E-04				30.63407
0.02	-2.96E-06	-4.29E-08	-2.96E-03	-3.65E-08	-1.70E-03	6.21E-11	
0.03	-1.00E-05	-1.45E-07	-1.00E-02	-1.02E-07	-6.50E-03	6.64E-10	
0.04	-2.34E-05	-3.38E-07	-2.34E-02	-1.93E-07	-1.67E-02	3.23E-09	
0.05	-4.32E-05	-6.24E-07	-4.32E-02	-2.86E-07	-3.33E-02	9.52E-09	
0.06	-6.76E-05	-9.77E-07	-6.76E-02	-3.53E-07	-5.54E-02	1.95E-08	
0.07	-9.31E-05	-1.35E-06	-9.31E-02	-3.69E-07	-8.03E-02	2.96E-08	
0.08	-1.15E-04	-1.66E-06	-1.15E-01	-3.18E-07	-1.04E-01	3.31E-08	
0.09	-1.28E-04	-1.86E-06	-1.28E-01	-1.93E-07	-1.22E-01	2.35E-08	
0.1	-1.29E-04	-1.86E-06	-1.29E-01	-1.87E-09	-1.28E-01	2.40E-10	
0.11	-1.12E-04	-1.62E-06	-1.12E-01	2.34E-07	-1.20E-01	-2.82E-08	
0.12	-7.87E-05	-1.14E-06	-7.87E-02	4.85E-07	-9.55E-02	-4.63E-08	
0.13	-2.95E-05	-4.27E-07	-2.95E-02	7.12E-07	-5.41E-02	-3.85E-08	
0.14	3.12E-05	4.51E-07	3.12E-02	8.77E-07	8.49E-04	7.45E-10	
0.15	9.67E-05	1.40E-06	9.67E-02	9.47E-07	6.39E-02	6.06E-08	
0.16	1.59E-04	2.30E-06	1.59E-01	9.00E-07	1.28E-01	1.15E-07	
0.17	2.09E-04	3.03E-06	2.09E-01	7.29E-07	1.84E-01	1.34E-07	
0.18	2.40E-04	3.47E-06	2.40E-01	4.44E-07	2.25E-01	9.98E-08	
0.19	2.45E-04	3.55E-06	2.45E-01	7.35E-08	2.43E-01	1.78E-08	
0.2	2.22E-04	3.20E-06	2.22E-01	-3.41E-07	2.33E-01	-7.95E-08	
0.21	1.70E-04	2.46E-06	1.70E-01	-7.47E-07	1.96E-01	-1.46E-07	
0.22	9.44E-05	1.37E-06	9.44E-02	-1.09E-06	1.32E-01	-1.44E-07	
0.23	2.85E-06	4.20E-08	2.85E-03	-1.32E-06	4.86E-02	-6.44E-08	
139.92	2.49E-04	1.53E-05	2.49E-01	-5.64E-07	2.68E-01	-1.51E-07	
139.93	1.86E-04	1.44E-05	1.86E-01	-8.99E-07	2.18E-01	-1.95E-07	
139.94	1.07E-04	1.33E-05	1.07E-01	-1.14E-06	1.47E-01	-1.68E-07	
139.95	1.88E-05	1.20E-05	1.88E-02	-1.28E-06	6.31E-02	-8.07E-08	
139.96	-7.05E-05	1.07E-05	-7.05E-02	-1.29E-06	-2.58E-02	3.34E-08	
139.97	-1.52E-04	9.51E-06	-1.52E-01	-1.18E-06	-1.11E-01	1.32E-07	
139.98	-2.19E-04	8.55E-06	-2.19E-01	-9.63E-07	-1.86E-01	1.79E-07	
139.9	-2.64E-04	7.89E-06	-2.64E-01	-6.56E-07	-2.41E-01	1.59E-07	

KURVA HISTERESIS HD3							
Waktu (s)	Gaya (KN)	Perpindahan Relatif (m)	Gaya (N)	Δi (m)	$\frac{F_{xi} + F_{xi-1}}{2}$	Energi (J)	Total Energi (J)
0.01	-4.85E-07	-6.33E-09	-4.85E-04				32.14685
0.02	-3.27E-06	-4.26E-08	-3.27E-03	-3.63E-08	-1.88E-03	6.81E-11	
0.03	-1.10E-05	-1.44E-07	-1.10E-02	-1.01E-07	-7.15E-03	7.24E-10	
0.04	-2.56E-05	-3.34E-07	-2.56E-02	-1.91E-07	-1.83E-02	3.49E-09	
0.05	-4.70E-05	-6.14E-07	-4.70E-02	-2.79E-07	-3.63E-02	1.01E-08	
0.06	-7.30E-05	-9.53E-07	-7.30E-02	-3.39E-07	-6.00E-02	2.04E-08	
0.07	-9.96E-05	-1.30E-06	-9.96E-02	-3.47E-07	-8.63E-02	2.99E-08	
0.08	-1.21E-04	-1.58E-06	-1.21E-01	-2.85E-07	-1.10E-01	3.15E-08	
0.09	-1.33E-04	-1.73E-06	-1.33E-01	-1.50E-07	-1.27E-01	1.91E-08	
0.1	-1.29E-04	-1.69E-06	-1.29E-01	4.72E-08	-1.31E-01	-6.19E-09	
0.11	-1.08E-04	-1.40E-06	-1.08E-01	2.84E-07	-1.18E-01	-3.36E-08	
0.12	-6.74E-05	-8.79E-07	-6.74E-02	5.25E-07	-8.75E-02	-4.59E-08	
0.13	-1.13E-05	-1.47E-07	-1.13E-02	7.32E-07	-3.93E-02	-2.88E-08	
0.14	5.51E-05	7.18E-07	5.51E-02	8.66E-07	2.19E-02	1.90E-08	
0.15	1.24E-04	1.61E-06	1.24E-01	8.96E-07	8.94E-02	8.01E-08	
0.16	1.85E-04	2.42E-06	1.85E-01	8.05E-07	1.55E-01	1.24E-07	
0.17	2.31E-04	3.01E-06	2.31E-01	5.92E-07	2.08E-01	1.23E-07	
0.18	2.52E-04	3.29E-06	2.52E-01	2.75E-07	2.41E-01	6.63E-08	
0.19	2.43E-04	3.18E-06	2.43E-01	-1.11E-07	2.48E-01	-2.75E-08	
0.2	2.04E-04	2.66E-06	2.04E-01	-5.17E-07	2.23E-01	-1.16E-07	
0.21	1.35E-04	1.77E-06	1.35E-01	-8.89E-07	1.70E-01	-1.51E-07	
0.22	4.57E-05	5.97E-07	4.57E-02	-1.17E-06	9.06E-02	-1.06E-07	
0.23	-5.56E-05	-7.25E-07	-5.56E-02	-1.32E-06	-4.97E-03	6.57E-09	
139.9	8.07E-05	-1.47E-05	8.07E-02	1.13E-06	3.73E-02	4.23E-08	
139.91	1.54E-04	-1.38E-05	1.54E-01	9.54E-07	1.17E-01	1.12E-07	
139.92	2.07E-04	-1.31E-05	2.07E-01	6.97E-07	1.80E-01	1.26E-07	
139.93	2.38E-04	-1.27E-05	2.38E-01	3.98E-07	2.22E-01	8.84E-08	
139.94	2.44E-04	-1.26E-05	2.44E-01	8.88E-08	2.41E-01	2.14E-08	
139.95	2.29E-04	-1.28E-05	2.29E-01	-1.98E-07	2.37E-01	-4.70E-08	
139.96	1.95E-04	-1.32E-05	1.95E-01	-4.41E-07	2.12E-01	-9.35E-08	
139.97	1.48E-04	-1.39E-05	1.48E-01	-6.22E-07	1.72E-01	-1.07E-07	
139.98	9.14E-05	-1.46E-05	9.14E-02	-7.35E-07	1.20E-01	-8.79E-08	
139.99	3.17E-05	-1.54E-05	3.17E-02	-7.80E-07	6.16E-02	-4.80E-08	
140	-2.68E-05	-1.61E-05	-2.68E-02	-7.63E-07	2.43E-03	-1.86E-09	
140.01	-8.00E-05	-1.68E-05	-8.00E-02	-6.95E-07	-5.34E-02	3.71E-08	

KURVA HISTERESIS HD4							
Waktu (s)	Gaya (KN)	Perpindahan Relatif (m)	Gaya (N)	$\Delta i (m)$	$\frac{F_{xi} + F_{xi-1}}{2}$	Energi (J)	Total Energi (J)
0.01	-5.33E-07	-6.31E-09	-5.33E-04				31.50694
0.02	-3.58E-06	-4.24E-08	-3.58E-03	-3.61E-08	-2.06E-03	7.43E-11	
0.03	-1.21E-05	-1.43E-07	-1.21E-02	-1.00E-07	-7.82E-03	7.85E-10	
0.04	-2.79E-05	-3.30E-07	-2.79E-02	-1.88E-07	-2.00E-02	3.75E-09	
0.05	-5.09E-05	-6.03E-07	-5.09E-02	-2.72E-07	-3.94E-02	1.07E-08	
0.06	-7.84E-05	-9.28E-07	-7.84E-02	-3.26E-07	-6.47E-02	2.11E-08	
0.07	-1.06E-04	-1.25E-06	-1.06E-01	-3.24E-07	-9.21E-02	2.99E-08	
0.08	-1.27E-04	-1.51E-06	-1.27E-01	-2.53E-07	-1.16E-01	2.94E-08	
0.09	-1.36E-04	-1.61E-06	-1.36E-01	-1.09E-07	-1.32E-01	1.44E-08	
0.1	-1.29E-04	-1.52E-06	-1.29E-01	9.29E-08	-1.32E-01	-1.23E-08	
0.11	-1.01E-04	-1.19E-06	-1.01E-01	3.27E-07	-1.15E-01	-3.75E-08	
0.12	-5.40E-05	-6.39E-07	-5.40E-02	5.55E-07	-7.75E-02	-4.30E-08	
0.13	8.45E-06	9.98E-08	8.45E-03	7.39E-07	-2.28E-02	-1.68E-08	
0.14	7.94E-05	9.40E-07	7.94E-02	8.40E-07	4.39E-02	3.69E-08	
0.15	1.50E-04	1.77E-06	1.50E-01	8.30E-07	1.14E-01	9.50E-08	
0.16	2.08E-04	2.47E-06	2.08E-01	6.98E-07	1.79E-01	1.25E-07	
0.17	2.46E-04	2.92E-06	2.46E-01	4.49E-07	2.27E-01	1.02E-07	
0.18	2.56E-04	3.03E-06	2.56E-01	1.09E-07	2.51E-01	2.75E-08	
0.19	2.32E-04	2.75E-06	2.32E-01	-2.78E-07	2.44E-01	-6.79E-08	
0.2	1.76E-04	2.09E-06	1.76E-01	-6.61E-07	2.04E-01	-1.35E-07	
0.21	9.31E-05	1.10E-06	9.31E-02	-9.83E-07	1.35E-01	-1.32E-07	
0.22	-7.74E-06	-9.10E-08	-7.74E-03	-1.19E-06	4.27E-02	-5.09E-08	
0.23	-1.14E-04	-1.34E-06	-1.14E-01	-1.25E-06	-6.07E-02	7.61E-08	
139.9	-1.18E-04	-1.02E-05	-1.18E-01	-4.29E-07	-1.00E-01	4.30E-08	
139.91	-1.41E-04	-1.05E-05	-1.41E-01	-2.62E-07	-1.29E-01	3.39E-08	
139.92	-1.48E-04	-1.06E-05	-1.48E-01	-8.78E-08	-1.44E-01	1.27E-08	
139.93	-1.42E-04	-1.05E-05	-1.42E-01	7.46E-08	-1.45E-01	-1.08E-08	
139.94	-1.24E-04	-1.03E-05	-1.24E-01	2.12E-07	-1.33E-01	-2.81E-08	
139.95	-9.71E-05	-1.00E-05	-9.71E-02	3.15E-07	-1.10E-01	-3.48E-08	
139.96	-6.48E-05	-9.61E-06	-6.48E-02	3.82E-07	-8.10E-02	-3.09E-08	
139.97	-3.00E-05	-9.20E-06	-3.00E-02	4.12E-07	-4.74E-02	-1.96E-08	
139.98	4.71E-06	-8.79E-06	4.71E-03	4.11E-07	-1.27E-02	-5.20E-09	
139.99	3.71E-05	-8.41E-06	3.71E-02	3.84E-07	2.09E-02	8.02E-09	
140	6.55E-05	-8.07E-06	6.55E-02	3.36E-07	5.13E-02	1.72E-08	
140.01	8.85E-05	-7.80E-06	8.85E-02	2.73E-07	7.70E-02	2.10E-08	

KURVA HISTERESIS HD5							
Waktu (s)	Gaya (KN)	Perpindahan Relatif (m)	Gaya (N)	$\Delta i (m)$	$\frac{F_{xi} + F_{xi-1}}{2}$	Energi (J)	Total Energi (J)
0.01	-1.77E-06	-5.78E-09	-1.77E-03				23.63317
0.02	-1.13E-05	-3.70E-08	-1.13E-02	-3.12E-08	-6.55E-03	2.04E-10	
0.03	-3.53E-05	-1.15E-07	-3.53E-02	-7.83E-08	-2.33E-02	1.83E-09	
0.04	-7.30E-05	-2.38E-07	-7.30E-02	-1.23E-07	-5.42E-02	6.66E-09	
0.05	-1.14E-04	-3.71E-07	-1.14E-01	-1.32E-07	-9.33E-02	1.24E-08	
0.06	-1.40E-04	-4.58E-07	-1.40E-01	-8.75E-08	-1.27E-01	1.11E-08	
0.07	-1.39E-04	-4.52E-07	-1.39E-01	5.96E-09	-1.39E-01	-8.32E-10	
0.08	-1.02E-04	-3.34E-07	-1.02E-01	1.18E-07	-1.20E-01	-1.42E-08	
0.09	-3.88E-05	-1.27E-07	-3.88E-02	2.07E-07	-7.06E-02	-1.46E-08	
0.1	3.47E-05	1.13E-07	3.47E-02	2.40E-07	-2.05E-03	-4.92E-10	
0.11	9.68E-05	3.16E-07	9.68E-02	2.03E-07	6.57E-02	1.33E-08	
0.12	1.31E-04	4.28E-07	1.31E-01	1.12E-07	1.14E-01	1.28E-08	
0.13	1.32E-04	4.31E-07	1.32E-01	3.45E-09	1.32E-01	4.54E-10	
0.14	1.07E-04	3.49E-07	1.07E-01	-8.23E-08	1.20E-01	-9.83E-09	
0.15	7.08E-05	2.31E-07	7.08E-02	-1.18E-07	8.89E-02	-1.05E-08	
0.16	3.96E-05	1.29E-07	3.96E-02	-1.02E-07	5.52E-02	-5.61E-09	
0.17	2.29E-05	7.47E-08	2.29E-02	-5.45E-08	3.13E-02	-1.70E-09	
0.18	1.96E-05	6.40E-08	1.96E-02	-1.07E-08	2.13E-02	-2.28E-10	
0.19	1.98E-05	6.47E-08	1.98E-02	7.56E-10	1.97E-02	1.49E-11	
0.2	1.08E-05	3.54E-08	1.08E-02	-2.93E-08	1.53E-02	-4.50E-10	
0.21	-1.55E-05	-5.06E-08	-1.55E-02	-8.60E-08	-2.33E-03	2.00E-10	
0.22	-5.75E-05	-1.88E-07	-5.75E-02	-1.37E-07	-3.65E-02	5.00E-09	
0.23	-1.03E-04	-3.36E-07	-1.03E-01	-1.49E-07	-8.03E-02	1.20E-08	
139.86	2.47E-05	-3.37E-06	2.47E-02	-8.63E-07	1.57E-01	-1.35E-07	
139.87	-2.54E-04	-4.28E-06	-2.54E-01	-9.10E-07	-1.15E-01	1.04E-07	
139.88	-4.17E-04	-4.81E-06	-4.17E-01	-5.32E-07	-3.35E-01	1.78E-07	
139.89	-3.88E-04	-4.72E-06	-3.88E-01	9.42E-08	-4.02E-01	-3.79E-08	
139.9	-1.81E-04	-4.04E-06	-1.81E-01	6.74E-07	-2.85E-01	-1.92E-07	
139.91	1.05E-04	-3.11E-06	1.05E-01	9.36E-07	-3.82E-02	-3.57E-08	
139.92	3.37E-04	-2.35E-06	3.37E-01	7.59E-07	2.21E-01	1.68E-07	
139.93	4.07E-04	-2.12E-06	4.07E-01	2.29E-07	3.72E-01	8.54E-08	
139.94	2.84E-04	-2.52E-06	2.84E-01	-4.02E-07	3.45E-01	-1.39E-07	
139.95	2.73E-05	-3.36E-06	2.73E-02	-8.37E-07	1.56E-01	-1.30E-07	
139.96	-2.40E-04	-4.23E-06	-2.40E-01	-8.71E-07	-1.06E-01	9.26E-08	
139.97	-3.90E-04	-4.72E-06	-3.90E-01	-4.90E-07	-3.15E-01	1.54E-07	
139.98	-3.52E-04	-4.60E-06	-3.52E-01	1.25E-07	-3.71E-01	-4.62E-08	
139.99	-1.43E-04	-3.92E-06	-1.43E-01	6.81E-07	-2.47E-01	-1.68E-07	
140	1.37E-04	-3.00E-06	1.37E-01	9.15E-07	-2.95E-03	-2.70E-09	
140.01	3.55E-04	-2.29E-06	3.55E-01	7.15E-07	2.46E-01	1.76E-07	

ORIGINALITY REPORT

14%

SIMILARITY INDEX

13%

INTERNET SOURCES

9%

PUBLICATIONS

8%

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1

e-journal.uajy.ac.id

Internet Source

2%

2

Fabrizio Vestroni, Paolo Casini. "Effectiveness and optimization of a hysteretic absorber for response mitigation", Nonlinear Dynamics, 2025

Publication

<1%

3

Wei Guo, Jianzhong Li, Zhongguo Guan. "Shake Table Test on a Long-Span Cable-Stayed Bridge with Viscous Dampers Considering Wave Passage Effects", Journal of Bridge Engineering, 2021

Publication

<1%

4

123dok.com

Internet Source

<1%

5

Submitted to University of New England

Student Paper

<1%

6

opensees.berkeley.edu

Internet Source

<1%

7

repository.its.ac.id

Internet Source

<1%

8	ouci.dntb.gov.ua Internet Source	<1 %
9	hrcak.srce.hr Internet Source	<1 %
10	www.coursehero.com Internet Source	<1 %
11	Submitted to University of California, Los Angeles Student Paper	<1 %
12	Submitted to Universidad Católica San Pablo Student Paper	<1 %
13	www.cantilever.id Internet Source	<1 %
14	Huan Li, Kaiming Bi, Qiang Han, Ruisheng Ma. "A state-of-the-art review on negative stiffness-based structural vibration control", Engineering Structures, 2025 Publication	<1 %
15	Luwei Shi, Lingyun Peng, Ruhan Zhang, Yingjie Kang, Yaxi Guan, Wenzhi Li. "Optimization design and shaking table test of tuned mass damper for enhancing seismic performance in thermal power plants", Structures, 2024 Publication	<1 %
16	core.ac.uk Internet Source	<1 %
17	docplayer.info	

18

eprints.walisongo.ac.id

Internet Source

<1 %

19

www.netl.doe.gov

Internet Source

<1 %

20

physics.wm.edu

Internet Source

<1 %

21

opensees.ist.berkeley.edu

Internet Source

<1 %

22

repository.upi.edu

Internet Source

<1 %

23

Submitted to University of Adelaide

Student Paper

<1 %

24

etd.umy.ac.id

Internet Source

<1 %

25

ingenieriasismica.utpl.edu.ec

Internet Source

<1 %

26

stars.library.ucf.edu

Internet Source

<1 %

27

Mohammed Ismail, Fayçal Ikhoulane, José Rodellar. "The Hysteresis Bouc-Wen Model, a Survey", Archives of Computational Methods in Engineering, 2009

Publication

<1 %

28

Submitted to De La Salle University

Student Paper

<1 %

29

dspace.aus.edu:8443

Internet Source

<1 %

30

www.uaa.alaska.edu

Internet Source

<1 %

31

eprints.undip.ac.id

Internet Source

<1 %

32

Submitted to Udayana University

Student Paper

<1 %

33

journal.umy.ac.id

Internet Source

<1 %

34

repository.unhas.ac.id

Internet Source

<1 %

35

www.eurasianopensees.com

Internet Source

<1 %

36

Submitted to Universitas Atma Jaya
Yogyakarta

Student Paper

<1 %

37

text-id.123dok.com

Internet Source

<1 %

38

Submitted to Konsorsium Turnitin Relawan
Jurnal Indonesia

Student Paper

<1 %

39

Submitted to University Tun Hussein Onn
Malaysia

Student Paper

<1 %

40	id.123dok.com Internet Source	<1 %
41	opensees.github.io Internet Source	<1 %
42	repositorio.ufu.br Internet Source	<1 %
43	Submitted to Erasmus University Rotterdam Student Paper	<1 %
44	Submitted to University of Utah Student Paper	<1 %
45	ceej.aut.ac.ir Internet Source	<1 %
46	eprints.poltektegal.ac.id Internet Source	<1 %
47	www.vegagerdin.is Internet Source	<1 %
48	Morvarid Hajian, Reza Attarnejad. "An Introduction to New Elastic Foundation Element Developed in OpenSees: A Simplified Model to Simulate Soil-Structure Interaction", Arabian Journal for Science and Engineering, 2025 Publication	<1 %
49	Roya Bigdeli Nalbandan, Majid Delavar, Hamid Abbasi, Mohammad Reza Zaghiyan. "Model-based water footprint accounting	<1 %

framework to evaluate new water
management policies", Journal of Cleaner
Production, 2022

Publication

50	Submitted to Universitas Putera Batam Student Paper	<1 %
51	Submitted to Politeknik Negeri Bandung Student Paper	<1 %
52	asd-www.larc.nasa.gov Internet Source	<1 %
53	eprints.utm.my Internet Source	<1 %
54	eprints2.undip.ac.id Internet Source	<1 %
55	liono-thundercats.blogspot.com Internet Source	<1 %
56	repository.unsri.ac.id Internet Source	<1 %
57	Wiku Adhiwicaksana Krasna, Azmi Siddik, Nursiah Chairunnisa, Ratni Nurwidayati, Ade Yuniati Pratiwi. "Structural performance analysis using pushover analysis in high-story buildings with soft-story", AIP Publishing, 2025 Publication	<1 %
58	adoc.tips Internet Source	<1 %

59	dspace.lib.ntua.gr Internet Source	<1 %
60	ejurnal.itenas.ac.id Internet Source	<1 %
61	etd.aau.edu.et Internet Source	<1 %
62	repository.iainkudus.ac.id Internet Source	<1 %
63	repository.trisakti.ac.id Internet Source	<1 %
64	repository.unimus.ac.id Internet Source	<1 %
65	www.earth-prints.org Internet Source	<1 %
66	www.wimtv.be Internet Source	<1 %
67	Submitted to Cardiff University Student Paper	<1 %
68	dspace.uii.ac.id Internet Source	<1 %
69	etd.repository.ugm.ac.id Internet Source	<1 %
70	khazna.ku.ac.ae Internet Source	<1 %
71	repository.uin-suska.ac.id Internet Source	

<1 %

72 repository.uksw.edu
Internet Source

<1 %

73 cantilever.id
Internet Source

<1 %

74 dspace.vutbr.cz
Internet Source

<1 %

75 id.scribd.com
Internet Source

<1 %

76 jurnal.untan.ac.id
Internet Source

<1 %

77 www.jsce.ir
Internet Source

<1 %

78 www.mdpi.com
Internet Source

<1 %

79 Fikret Necati Catbas, Shamim Pakzad, Vitomir Racic, Aleksandar Pavic, Paul Reynolds.
"Topics in Dynamics of Civil Structures, Volume 4", River Publishers, 2025
Publication

<1 %

80 Shuai Li, Farshad Hedayati Dezfuli, Jing-quan Wang, M Shahria Alam. "Longitudinal seismic response control of long-span cable-stayed bridges using shape memory alloy wire-based lead rubber bearings under near-fault

<1 %

81

"Proceedings of 17th Symposium on
Earthquake Engineering (Vol. 1)", Springer
Science and Business Media LLC, 2023

Publication

<1 %

Exclude quotes

Off

Exclude matches

Off

Exclude bibliography

Off





Studi Parametrik Perilaku *Nonlinear Tuned Mass Damper* Dengan Model Bouc-Wen Menggunakan OpenSees

Mathias Siloam Kuncoro Jati*, Yoyong Arfiadi

Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Indonesia

Email: 235119743@students.uajy.ac.id*, yoyong.ar@uajy.ac.id

Abstrak

Studi parametrik ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi rasio frekuensi terhadap kinerja Nonlinear Tuned Mass Damper (NTMD) model Bouc-Wen tanpa pinching dalam mereduksi respons seismik struktur menggunakan perangkat lunak OpenSees. Penelitian dilakukan dengan time history analysis menggunakan eksitasi gempa Kobe (Stasiun Abeno) terhadap lima variasi rasio frekuensi (0,8; 0,95; 1,0; 1,05; dan 2,0). Aspek yang dianalisis meliputi, perpindahan puncak struktur, gaya geser dasar maksimum, karakteristik loop histeresis, dan kapasitas disipasi energi sistem NTMD. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi rasio frekuensi berpengaruh secara signifikan terhadap amplitudo dan fase waktu perpindahan puncak struktur. Konfigurasi dengan rasio frekuensi mendekati frekuensi natural struktur ($\alpha = 0,95$ dan $\alpha = 1,00$) memberikan kinerja optimal dengan reduksi perpindahan puncak masing-masing sebesar 44,52% dan 33,99%, serta reduksi gaya geser dasar sebesar 44,57% dan 33,82%. Pola reduksi gaya geser dasar menunjukkan kecenderungan yang sejalan dengan reduksi perpindahan maksimum. Semua konfigurasi menghasilkan loop histeresis berbentuk elips tanpa efek pinching dengan total energi disipasi berkisar antara 21,13-32,15 Joule. Penelitian ini mengkonfirmasi bahwa optimasi rasio frekuensi NTMD sangat menentukan efektivitas sistem dalam mengurangi respons dinamik struktur akibat beban seismik. Penyetelan yang tepat pada nilai mendekati frekuensi natural struktur menghasilkan performa peredaman optimal, sedangkan penyetelan yang terlalu rendah atau berlebihan menurunkan efektivitas sistem kontrol struktur.

Kata kunci: NTMD, Bouc-Wen, rasio frekuensi, OpenSees, gempa Kobe, analisis time history

Abstract

This parametric study aims to analyze the effect of frequency ratio variations on the performance of Nonlinear Tuned Mass Damper (NTMD) with Bouc-Wen without pinching model in reducing seismic response of structures using OpenSees software. The research was conducted through time history analysis using Kobe (Abeno Station) earthquake excitation with five frequency ratio variations (0.8, 0.95, 1.0, 1.05, and 2.0). The analyzed aspects include peak structural displacement, maximum base shear force, hysteresis loop characteristics, and energy dissipation capacity of the NTMD system. The results demonstrate that frequency ratio variations significantly influence the amplitude and timing of peak structural displacement. Configurations with frequency ratios approaching the natural frequency of the structure ($\alpha = 0.95$ and $\alpha = 1.00$) provide optimal performance with peak displacement reductions of 44.52% and 33.99%, respectively, and base shear reductions of 44.57% and 33.82%. The pattern of base shear reduction shows consistent trends with maximum displacement reduction. All configurations produce elliptical hysteresis loops without pinching effects, with total energy dissipation ranging from 21.13 to 32.15 Joules. This study confirms that NTMD frequency ratio optimization is crucial in determining system effectiveness in reducing dynamic structural response under seismic loading. Proper tuning at values close to the structural natural frequency yields optimal damping performance, while excessively low or high tuning reduces the effectiveness of the structural control system.

Keywords: NTMD, Bouc-Wen, frequency ratio, OpenSees, Kobe earthquake, time history analysis

Corresponding: Mathias Siloam Kuncoro Jati

E-mail: 235119743@students.uajy.ac.id



PENDAHULUAN

Indonesia terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik besar dunia yakni, lempeng Pasifik, Eurasia dan Indo-Australia. Posisi geografis ini menyebabkan Indonesia menjadi salah satu negara dengan tingkat aktivitas tektonik yang tinggi sehingga bangunan struktur rentan terhadap getaran seismik. Salah satu gempa terbesar yang pernah terjadi di Indonesia adalah gempa Aceh tahun 2004 (Mw 9,3). Gempa tersebut menyebabkan tsunami yang menghancurkan sektor konstruksi terkhusus bangunan gedung dan infrastruktur serta memakan lebih dari 300.000 korban jiwa di Asia Selatan dan Afrika (Sinadinovski, 2006).

Dalam beberapa dekade terakhir, sistem kontrol getaran pada bangunan telah menjadi salah satu pendekatan yang efektif untuk mengurangi respons dinamik struktur bangunan terhadap beban gempa. Sistem kontrol getaran diklasifikasikan menjadi kontrol aktif, kontrol pasif dan kontrol semi-aktif. Di antara berbagai sistem kontrol getaran, *Tuned Mass Damper* (TMD) menjadi salah satu perangkat pengontrol getaran pasif yang cukup sering diaplikasikan dan diteliti. TMD terdiri dari massa sekunder (1%-10% dari massa efektif struktur), pegas dan peredam (Salehizarani & Karami Mohammadi, 2019). TMD cukup efektif dalam meredam getaran dan memperkecil simpangan pada struktur bangunan. Namun, TMD dengan karakteristik linear memiliki beberapa keterbatasan dalam menangani perilaku nonlinear struktur dan sangat bergantung pada frekuensi *tuning*.

Untuk mengatasi keterbatasan TMD konvensional, beberapa peneliti mengembangkan *Nonlinear Tuned Mass Damper* (NTMD) dengan optimasi parameter dan karakteristik histeresis. Salah satu model NTMD yang banyak digunakan adalah model Bouc-Wen, yang merepresentasikan perilaku histeresis nonlinear dalam sistem dinamik dan pertama kali dikembangkan oleh Wen pada tahun 1976. Penelitian terkini menunjukkan bahwa NTMD dengan model Bouc-Wen mampu memperluas *bandwidth* operasional dibandingkan TMD linear, sehingga lebih efektif dalam menangani variasi frekuensi struktur utama (De Domenico, 2022). Selain itu, NTMD berbasis Bouc-Wen menghasilkan kurva *hysteresis pinched* yang dapat meningkatkan disipasi energi, khususnya pada amplitudo getaran rendah hingga sedang (Rathore & Biswas, 2022). Pengembangan lanjutan menunjukkan bahwa modifikasi model Bouc-Wen dapat digunakan untuk merancang sistem *dampers* hibrid yang lebih adaptif dalam mengontrol resonansi struktural (Qian et al., 2024). Kajian komprehensif terkini juga menyoroti evolusi model Bouc-Wen yang mencakup variasi fenomenologis seperti pinching, degradasi, dan histeresis asimetris, sehingga meningkatkan fleksibilitas penerapan NTMD pada kondisi struktural yang kompleks (Heredia-Pérez et al., 2025). Implementasi pada struktur terisolasi berbasis damper inertial juga membuktikan bahwa NTMD dengan model Bouc-Wen dapat memperluas aplikasi kontrol dinamis dalam berbagai kondisi eksitasi (Yue et al., 2024). Studi eksperimental lain menemukan bahwa penggunaan *hysteretic tuned mass damper* berbasis Bouc-Wen mampu memperkuat retrofitting seismik bangunan secara signifikan (Janga, 2025). Hal ini menegaskan bahwa pengembangan NTMD berbasis Bouc-Wen memberikan solusi inovatif dalam memperluas *bandwidth*, meningkatkan disipasi energi, dan mengoptimalkan kontrol getaran struktural (García et al., 2021).

Penelitian sebelumnya oleh Dirbas et al. (2024) dan Hebbar et al. (2019) telah melakukan analisis numerik TMD menggunakan perangkat lunak komersial seperti ANSYS dan MATLAB, serta melakukan validasi numerik dengan uji eksperimental. Sementara itu, Rupakhety & Elias (2020) memfokuskan penelitian pada aplikasi TMD nonlinear untuk jembatan dengan rasio massa 1%. Meskipun Janga et al. (2025) telah memodelkan *Hysteretic Tuned Mass*

Damper dalam OpenSees, perilaku TMD nonlinear tanpa *pinching* (ζ) masih belum diuji secara komprehensif dalam platform tersebut. Selain itu, penelitian oleh Vestroni & Casini (2025) memberikan dasar teoretis untuk optimasi *hysteretic absorber*, namun aplikasinya menggunakan data gempa riil dan pemodelan dalam OpenSees masih terbatas.

Selain itu, Implementasi sistem NTMD di Indonesia belum seluas di negara-negara maju meskipun manfaatnya sangat besar. Hal ini disebabkan kurangnya pemahaman terhadap performa dari TMD, terutama TMD nonlinear. Berdasarkan kesenjangan penelitian yang telah teridentifikasi, penelitian ini bertujuan untuk melakukan studi parametrik pemodelan NTMD model Bouc-Wen menggunakan pemodelan OpenSees. Secara khusus penelitian ini menyelidiki perilaku TMD nonlinear model Bouc-Wen terhadap struktur utama yang tereksitasi gempa Kobe. Hasil yang diharapkan dari penelitian ini berupa perilaku *hysteresis* dan kinerja *damper* dalam mereduksi perpindahan struktur serta gaya geser dasar.

Berdasarkan uraian pada latar belakang, permasalahan dalam penelitian ini dirumuskan menjadi empat aspek utama, yaitu: pengaruh variasi rasio frekuensi terhadap respons perpindahan struktur (*displacement-time*) akibat beban gempa Kobe; efektivitas reduksi perpindahan maksimum struktur; efektivitas reduksi gaya geser dasar maksimum; serta karakteristik kurva histeresis gaya-perpindahan relatif NTMD model Bouc-Wen pada berbagai rasio frekuensi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi rasio frekuensi terhadap respons perpindahan struktur, mengevaluasi efektivitas reduksi perpindahan maksimum dan gaya geser dasar maksimum, serta menganalisis perilaku kurva histeresis gaya-perpindahan relatif NTMD model Bouc-Wen pada berbagai rasio frekuensi akibat pembebanan dinamik gempa Kobe. Penelitian ini memiliki manfaat ganda, baik secara teoritis maupun praktis. Secara teoritis, penelitian ini berperan dalam memperdalam pemahaman mengenai perilaku NTMD model Bouc-Wen melalui analisis pengaruh variasi rasio frekuensi terhadap reduksi respons struktur, serta menyediakan prosedur pemodelan NTMD dalam OpenSees sebagai acuan metodologis bagi penelitian sejenis di masa mendatang. Di sisi praktis, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi rasio frekuensi optimal NTMD model Bouc-Wen untuk struktur yang mengalami eksitasi gempa dengan karakteristik mirip gempa Kobe, sekaligus mengungkap mekanisme disipasi energi melalui analisis perilaku histeresis, yang sangat relevan bagi pengembangan sistem proteksi gempa di wilayah rawan seismik seperti Indonesia.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini diawali dengan melakukan studi literatur secara mendalam dan komprehensif terhadap berbagai riset terdahulu yang berkaitan dengan sistem kontrol getaran TMD linear dan TMD nonlinear. Studi literatur mencakup analisis terhadap publikasi ilmiah internasional terkait analisis numerik *Tuned Mass Damper*, pengaruh rasio massa terhadap kinerja TMD, perbandingan TMD nonlinear dengan TMD linear, dan efektivitas TMD nonlinear serta implementasi pemodelan dalam platform OpenSees (*Open System for Earthquake Engineering Simulation*). Dari tinjauan pustaka, teridentifikasi bahwa riset mengenai studi parametrik *Nonlinear Tuned Mass Damper* (NTMD) dengan model Bouc-Wen masih minim, terutama dalam konteks pemodelan numerik dengan menggunakan platform OpenSees. Penelitian oleh Dirbas et al., (2024) dan Hebbbar et al., (2019) menggunakan metode numerik dengan perangkat lunak komersial seperti ANSYS dan MATLAB serta validasi numerik dengan uji eksperimental. Penelitian oleh Rupakhety & Elias, (2020) terbatas pada struktur jembatan dengan rasio massa *Nonlinear Tuned Vibration Absorber* (n-TVA) sebesar 1%.

Meskipun Janga et al., (2025) telah memodelkan *Hysteretic Tuned Mass Damper* di OpenSees dan validasi dengan pengujian meja getar, namun perilaku TMD nonlinear tanpa *pinching* (ζ) belum diuji di OpenSees.

Untuk melengkapi gap penelitian tersebut, penelitian ini menganalisis pengaruh variasi rasio frekuensi (0,8; 0,95; 1,00; 1,05; 2,00) terhadap perilaku TMD nonlinear dalam sistem 2DOF (2 *Degree of Freedom*) tanpa parameter *pinching* (ζ) dengan beban dinamik gempa Kobe berbasis OpenSees. Studi ini melanjutkan penelitian Vestroni & Casini, (2025) dengan fokus pada aplikasi praktis menggunakan rekaman gempa riil dan platform analisis OpenSees. Aspek-aspek yang dianalisis meliputi:

1. Respons perpindahan – waktu struktur ($X_1(t)$).
2. Reduksi simpangan puncak struktur ($\max|X_1|$) terhadap variasi w_2/w_1
3. Reduksi gaya geser dasar puncak ($\max|F_{base}|$) terhadap variasi w_2/w_1
4. Karakteristik disipasi energi melalui kurva histeretik gaya-perpindahan relatif peredam.

Metodologi yang diterapkan mencakup studi literatur, pengumpulan data parameter NTMD, pemodelan struktur SDOF (*Single Degree of Freedom*) dan 2DOF (penambahan *dampner*) dengan OpenSees, pemodelan numerik NTMD model Bouc-Wen, analisis dinamik (*Time History*) Gempa Kobe, analisis respons perpindahan struktur, efektifitas *dampner* dan perilaku histeresis. Pendekatan sistematis ini dirancang untuk mengidentifikasi pengaruh parameter rasio frekuensi terhadap efektivitas TMD nonlinear dalam mengontrol getaran struktural. Tahapan penelitian disusun secara terstruktur mulai dari kajian literatur hingga analisis hasil dan penarikan kesimpulan.

1. Studi literatur:
 - a. Mengumpulkan jurnal dan artikel ilmiah terkait topik analisis numerik TMD, efektivitas TMD nonlinear, pengaruh rasio massa terhadap kinerja TMD, perbandingan TMD linear dan TMD nonlinear dan pemodelan struktur menggunakan OpenSees.
 - b. Mengidentifikasi gap penelitian dari jurnal dan penelitian terdahulu sebagai dasar rumusan masalah dan tujuan penelitian.
2. Pengumpulan data parameter NTMD:
 - a. Menentukan data parameter dari penelitian (Vestroni & Casini, 2025).
 - b. Membentuk variasi parameter (dapat dilihat pada Tabel 1).
 - c. Setiap model diberikan istilah HD yaitu *Hysteretic Damper*.

Tabel 1. Parameter Rencana *Nonlinear Tuned Mass Damper*

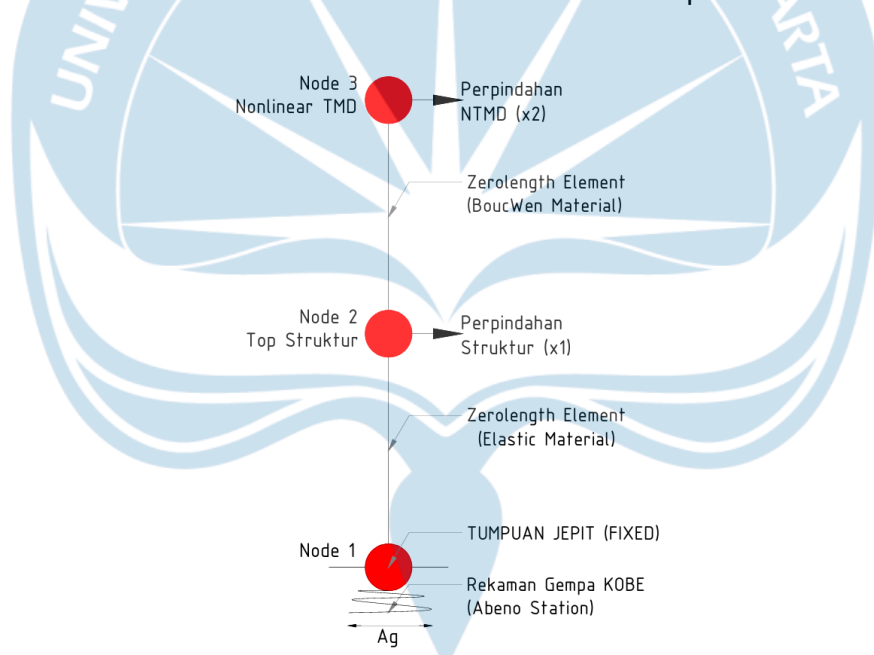
Model	HD 1	HD 2	HD 3	HD 4	HD 5	Keterangan
m1 (kg)	1220	1220	1220	1220	1220	Massa struktur
α	0,8	0,95	1,00	1,05	2,00	Rasio frekuensi
m2 (kg)	61	61	61	61	61	Massa NTMD
k1 (kN/m)	1532,6	1532,6	1532,6	1532,6	1532,6	Kekakuan struktur
kd (kN/m)	41,67	58,76	65,11	71,78	260,54	Kekakuan NTMD
KA (kN/m)	49,04	69,16	76,63	84,48	306,52	Kekakuan awal NTMD
KB (kN/m)	7,37	10,4	11,52	12,7	45,98	Kekakuan pasca-elastis NTMD
γ (1/m)	82	82	82	82	1100	Parameter Bou-Wen
xy (m)	0,0061	0,0061	0,0061	0,0061	0,00045	Perpindaan leleh

f_y (N)	299,02	421,71	467,26	515,12	139,33	Gaya leleh
γ/β	1	1	1	1	1	-
δ	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	(hardening ratio)
ζ_1	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	Rasio redaman
k_2 (kN/m)	7,37	10,4	11,52	12,7	45,98	Kekakuan elastis NTMD
ζ_2	0	0	0	0	0	Rasio redaman
ω_{1A} (Hz) Terkopel	4,35	4,92	5,05	5,14	5,47	Frekuensi mode 1
ω_{2A} (Hz) Terkopel	5,86	6,15	6,31	6,5	11,64	Frekuensi mode 2
Beban	Acc. Kobe, Japan 1/16/1995 (Mag = 6.9 Mw), Abeno Station					Beban Dinamik

Sumber: (Vestroni & Casini, 2025); diolah peneliti

3. Pemodelan struktur SDOF dan 2DOF (struktur dengan NTMD) di OpenSees:

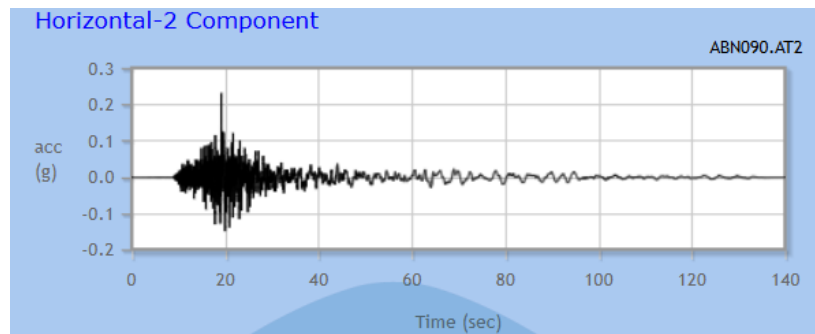
- a. Membuat skrip *Tcl* di notepad, meliputi:
 - i. Mendefinisikan node-node dengan jumlah 3.
 - ii. Mendefinisikan tumpuan dengan menggunakan tumpuan jepit (*fixed*).
 - iii. Mendefinisikan material elastik untuk node struktur seperti Gambar 1



Gambar 1. Rencana Pemodelan Struktur dengan NTMD

Sumber: Skema/pemodelan OpenSees; diolah peneliti

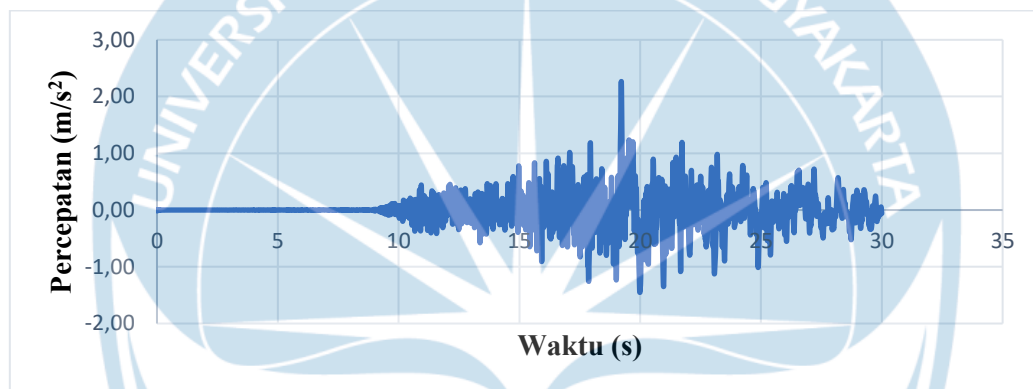
- iv. Mendefinisikan material *UniaxialMaterial* BoucWen.
 - v. Mendefinisikan *zerolength element* untuk menghubungkan NTMD dengan struktur.
 - vi. Mendefinisikan Parallel Material untuk menggabungkan 2 material antara *elastic* untuk kekakuan dan *viscous* untuk redaman struktur.
- ### 4. Analisis dinamik (*Time History Analysis*) Gempa Kobe:
- a. Mengambil data gempa di PEER *Ground Motion Database*:
 - i. Mencari daftar gempa di *database* PEER
 - ii. Memilih gempa Kobe dengan *Earthquake Magnitude* 6,9 pada stasiun Abeno, Jepang seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Riwayat Waktu Percepatan Tanah Stasiun Abeno

Sumber: PEER NGA-West2 (Gempa Kobe, Stasiun Abeno)

- iii. Mengubah file tersebut dalam bentuk Excel dan mengalikan percepatannya dengan ($9,81\text{m/s}^2$) untuk satuan m seperti Gambar 3.



Gambar 3. Percepatan Gempa Kobe Stasiun Abeno

Sumber: PEER NGA-West2; praproses data oleh peneliti

- iv. Mengubah kembali file tersebut ke dalam format .txt untuk diinput ke dalam OpenSees.
5. Studi parametrik dengan variasi rasio frekuensi:
- Mendefinisikan variasi rasio frekuensi NTMD: 0,8; 0,95; 1,00; 1,05; dan 2,00.
 - Analisis kelima model dan simpan output tiap jenis frekuensi pada file terpisah.
 - Input hasil dan olah data di perangkat lunak Ms. Excel.
6. Analisis perbandingan terhadap output dinamik struktur:
- Menganalisis respons perpindahan struktur tanpa NTMD sebagai basis
 - Membuat grafik perpindahan-waktu (*displacement-time*)
 - Menganalisis respons perpindahan maksimum dan fase waktu simpangan puncak pada struktur dengan NTMD.
 - Menganalisis besar reduksi simpangan maksimum pada kelima variasi konfigurasi model.
 - Membuat grafik variasi rasio frekuensi – reduksi simpangan puncak
 - Membandingkan efektifitas dari *damper* dalam mereduksi simpangan maksimum yang dikenai beban dinamik gempa Kobe.
 - Menganalisis besar reduksi gaya dasar maksimum pada kelima variasi konfigurasi model.
 - Membuat grafik variasi rasio frekuensi – reduksi gaya dasar puncak struktur dengan penambahan NTMD.

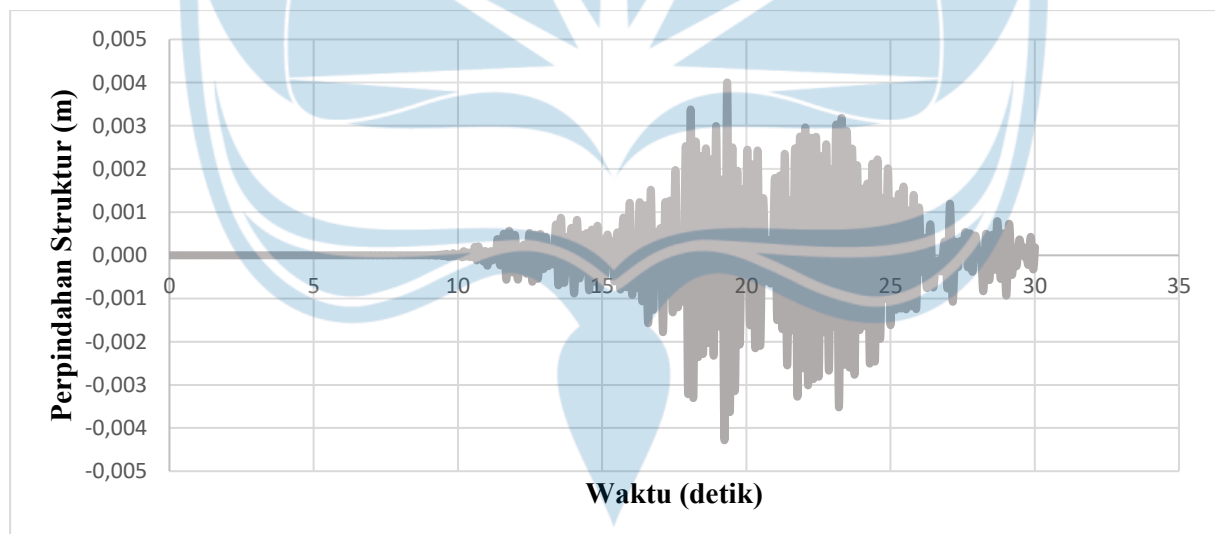
- i. Membandingkan efektifitas dari *damper* dalam mereduksi gaya dasar maksimum yang dikenai beban dinamik gempa Kobe.
 - j. Mengolah data gaya – perpindahan relatif pada *damper*.
 - k. Membuat kurva histeritik gaya - perpindahan relatif (*force-relative displacement*).
 - l. Menghitung besar energi total yang terdisipasi.
7. Kesimpulan:
- a. Merangkum pengaruh rasio frekuensi terhadap efektivitas kinerja NTMD dalam mengurangi perpindahan maksimum.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Respons Perpindahan Struktur

Respons Struktur Tanpa Damper (Baseline)

Pemeriksaan respons perpindahan struktur sangat penting untuk mengetahui kinerja seismik. Mengabaikan pemeriksaan respons perpindahan struktur dapat menyebabkan peningkatan ketidakpastian dalam gerakan tanah dan identifikasi kerusakan yang tidak akurat. Metode umum yang digunakan dalam mengevaluasi perpindahan struktural adalah *time history analysis*. Sebagai pembanding, dilakukan analisis respons struktur primer tanpa *damper* nonlinear terlebih dahulu untuk mengetahui simpangan maksimum struktur pada saat simulasi gempa berlangsung. Berdasarkan *time history analysis* terhadap eksitasi gempa Kobe, didapatkan hasil kurva simpangan terhadap waktu yang dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik Respons Perpindahan Struktur Tanpa Peredam

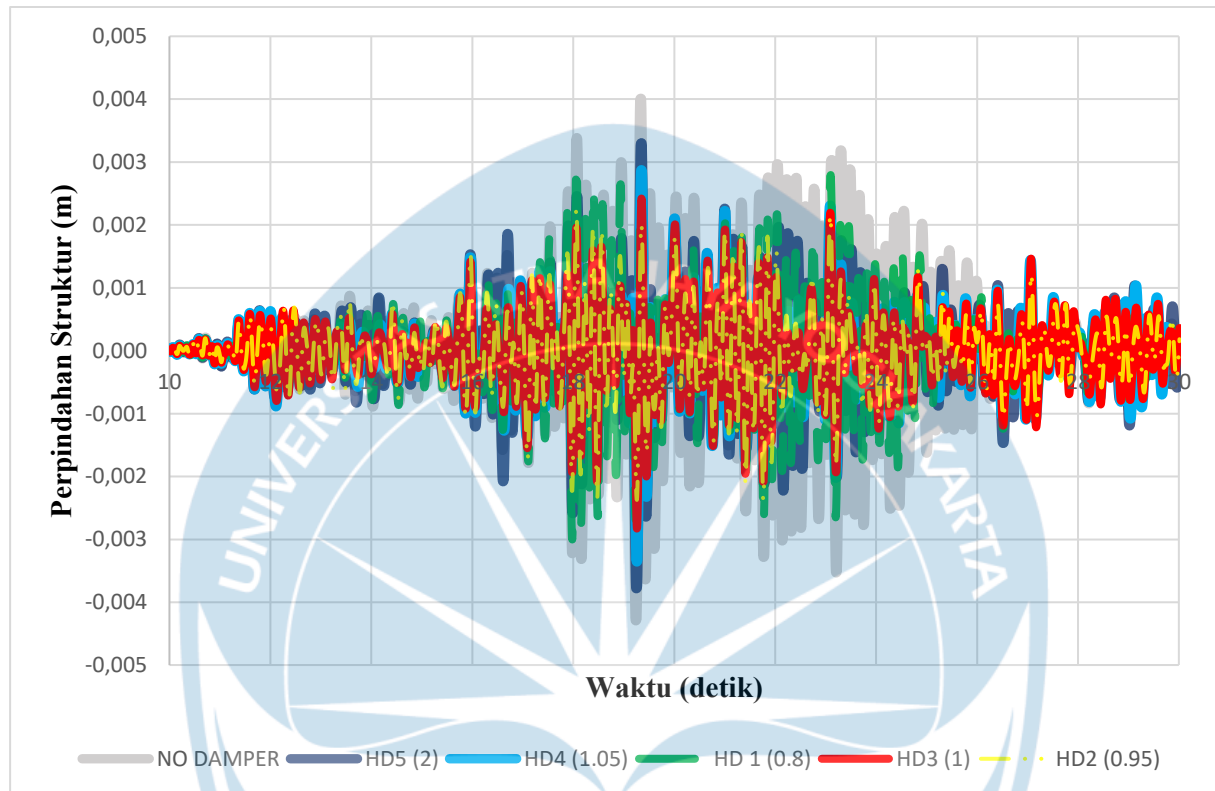
Sumber: Hasil simulasi OpenSees; diolah peneliti

Hasil analisis menunjukkan bahwa struktur primer ($m_1 = 1220$ kg, $k_1 = 1532,6$ kN/m, $\omega_1 = 35,44333$ rad/s) mengalami perpindahan maksimum sebesar $+0,004004$ m pada detik ke-19,33 dan $-0,004284$ m pada detik ke-19,24. Gaya dasar maksimum pada struktur primer sebesar $+6.57$ KN dan -6.14 KN.

Respons Struktur dengan Damper

Pada subbab ini disajikan data respons perpindahan struktur dengan penambahan NTMD untuk lima variasi rasio frekuensi (0,8; 0,95; 1,00; 1,05; 2,00). Gambar 5 menunjukkan

kurva perpindahan pada node puncak struktur yang menjadi dasar dalam membandingkan kinerja *damper*. Untuk setiap kurva respons yang dihasilkan dilakukan kajian mendalam terhadap simpangan maksimum, waktu tercapainya simpangan maksimum, dan laju peredaman.



Gambar 5. Grafik Perbandingan Respons Perpindahan Struktur

Sumber: Hasil simulasi OpenSees; diolah peneliti

Berdasarkan Gambar 5, kelima variasi menunjukkan penurunan simpangan yang cukup baik apabila dibandingkan dengan struktur tanpa peredam yang memerlukan durasi peredaman lebih lama (Lihat Tabel 2):

1. Konfigurasi HD1 ($\alpha = 0,8$) mencapai simpangan maksimum positif pada detik ke-18,06 sebesar +0,00296 m dan simpangan negatif pada detik ke-17,98 sebesar -0,003002 m.
2. Konfigurasi HD2 ($\alpha = 0,95$) menghasilkan simpangan puncak positif pada detik ke-18,06 dengan sebesar +0,002257 m dan simpangan negatif ekstrem pada detik ke-21,77 dengan besar simpangan -0,002377 m.
3. Konfigurasi HD3 ($\alpha = 1,0$) menunjukkan simpangan maksimum positif pada detik ke-19,35 sebesar +0,002421 m dan simpangan negatif puncak pada detik ke-19,26 sebesar -0,002828 m.
4. Konfigurasi HD 4 ($\alpha = 1,05$) memperlihatkan simpangan puncak positif pada detik ke-19,35 sebesar +0,002868 m dan simpangan negatif maksimum pada detik ke-19,26 sebesar -0,003349 m.
5. Konfigurasi HD 5 ($\alpha = 2,0$) memperlihatkan simpangan maksimum positif pada detik ke-19,34 sebesar +0,00330 m dan simpangan puncak negatif pada detik ke-19,25 sebesar -0,00377 m.

Tabel 2. Rekapitulasi Respons Perpindahan Puncak Struktur

Model	Beban	Simpangan maks (+) (m)	Waktu Simpangan Maks (+) (detik)	Simpangan maks (-) (m)	Waktu Simpangan Maks (-) (detik)
NO TMD		0,0040	19,33	-0,0043	19,24
HD1	Gempa Kobe Stasiun Abeno	0,0030	18,06	-0,0030	17,98
HD2		0,0023	18,06	-0,0024	21,77
HD3		0,0024	19,35	-0,0028	19,26
HD4		0,0029	19,35	-0,0033	19,26
HD5		0,0033	19,34	-0,0038	19,25

Sumber: Respons perpindahan maksimum (OpenSees); diolah peneliti

Berdasarkan Tabel 2, dapat diobservasi bahwa variasi parameter rasio frekuensi *damper* memberikan pengaruh terhadap besaran amplitudo puncak sekaligus fase waktu terjadinya simpangan maksimum. Konfigurasi dengan rasio frekuensi yang mendekati frekuensi natural struktur (HD2 dan HD3) mendemonstrasikan karakteristik respons yang lebih teratur dan mencapai kondisi stabil dengan lebih cepat. Sebaliknya, parameter *tuning* yang memiliki deviasi besar dari kondisi optimal (HD5) mengakibatkan respons struktur yang lebih besar dengan efektivitas peredaman yang kurang baik.

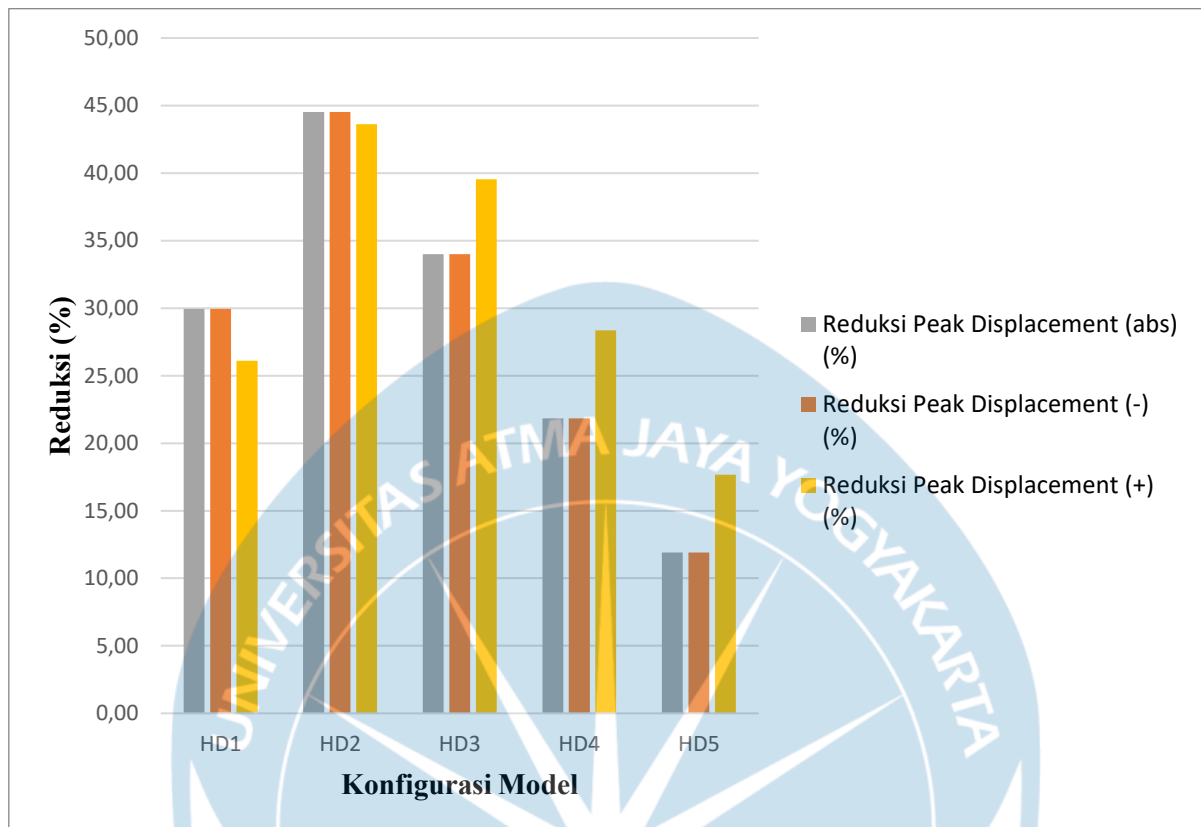
Reduksi Simpangan Puncak Struktur

Hasil analisis pengaruh implementasi NTMD dengan karakteristik histeretik terhadap pengurangan simpangan maksimum struktur akibat gempa Kobe (stasiun Abeno) pada skala 1 ($\lambda_{\text{gempa}} = 1$) disajikan dalam Tabel 3 dan Gambar 6. Struktur tanpa peredam (NO TMD) menghasilkan simpangan puncak absolut sebesar 0,0043 m, yang selanjutnya dijadikan acuan untuk menentukan persentase reduksi pada setiap variasi konfigurasi NTMD. Seluruh variasi konfigurasi NTMD yang dievaluasi (HD1–HD5) memperlihatkan kemampuan dalam mengurangi simpangan maksimum struktur bila dibandingkan dengan kondisi tanpa peredaman, meskipun dengan tingkat keefektifan yang bervariasi.

Tabel 3. Rekapitulasi Reduksi Simpangan Maksimum Struktur

Model	Beban	Simpangan maks (+) (m)	Simpangan maks (-) (m)	Simpangan maks (absolut) (m)	Reduksi Simpangan maks (+) (%)	Reduksi Simpangan maks (-) (%)	Reduksi Simpangan maks (absolut) (%)
NO TMD		0,0040	-0,0043	0,0043	0,00	0,00	0,00
HD1	Gempa Kobe Stasiun Abeno	0,0030	-0,0030	0,0030	26,09	29,94	29,94
HD2		0,0023	-0,0024	0,0024	43,62	44,52	44,52
HD3		0,0024	-0,0028	0,0028	39,54	33,99	33,99
HD4		0,0029	-0,0033	0,0033	28,36	21,83	21,83
HD5		0,0033	-0,0038	0,0038	17,66	11,90	11,90

Sumber: Reduksi simpangan maksimum; diolah peneliti

**Gambar 6. Tren Reduksi Simpangan Maksimum**

Sumber: Perhitungan dari hasil simulasi (lihat Tabel 3); diolah peneliti

Di antara lima konfigurasi yang dianalisis, HD2 menunjukkan performa paling optimal dengan pencapaian reduksi simpangan puncak absolut mencapai 44,52% (simpangan puncak absolut berkurang dari 0,0043 m menjadi 0,0024 m). Urutan berikutnya ditempati oleh HD3 dan HD1 dengan persentase reduksi masing-masing 33,99% dan 29,94%. Sementara itu, konfigurasi HD4 dan HD5 memperlihatkan tingkat keefektifan yang relatif lebih rendah, yaitu sekitar 21,83% dan 11,90%. Variasi performa di antara konfigurasi-konfigurasi tersebut kemungkinan besar dipengaruhi oleh perbedaan dalam penyetelan frekuensi dan karakteristik Bouc–Wen masing-masing peredam. Konfigurasi HD2, yang menunjukkan performa terbaik, tampaknya memiliki kombinasi frekuensi natural peredam dan karakteristik histeresis yang paling kompatibel dengan spektrum energi gempa Kobe di lokasi tersebut, sehingga mengoptimalkan transfer energi dari struktur primer ke peredam dan disipasi melalui siklus histeresis.

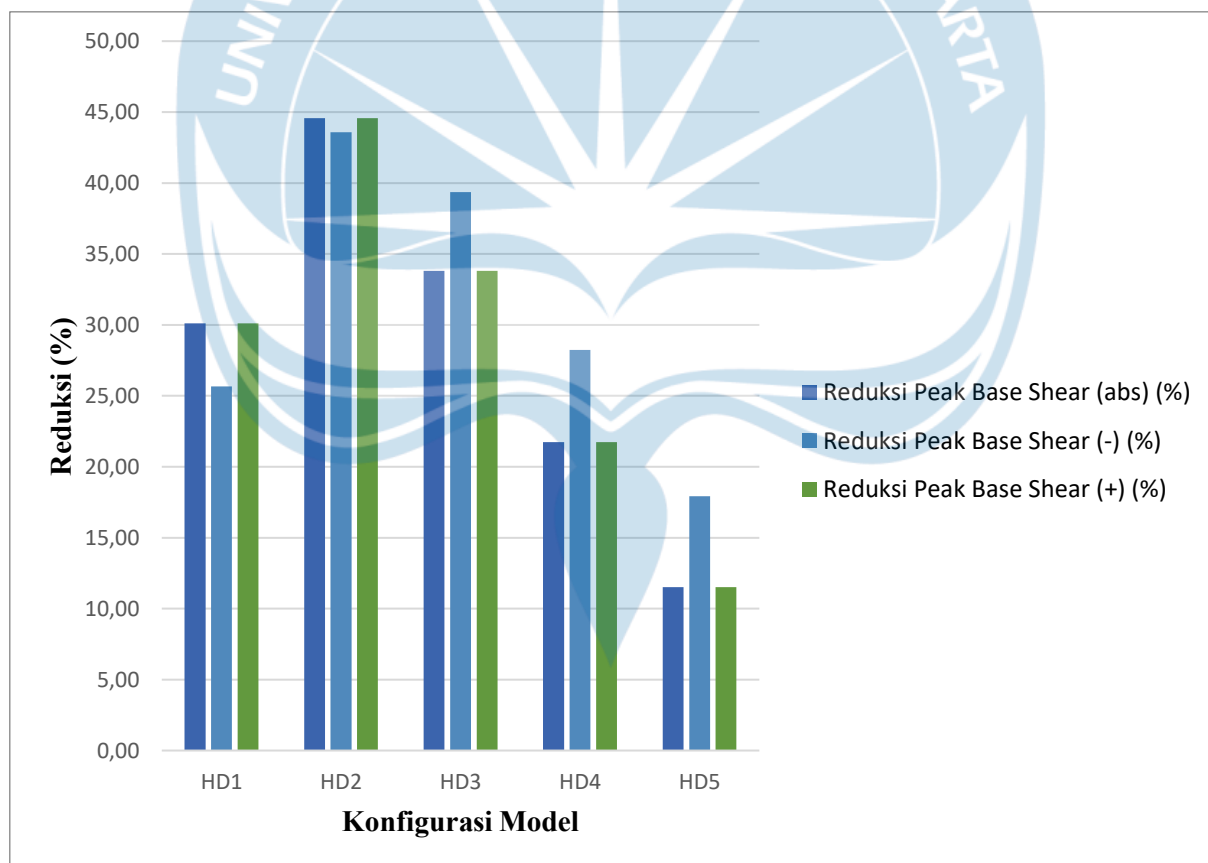
Reduksi Gaya Dasar Struktur

Dampak implementasi NTMD dengan karakteristik histeretik terhadap nilai maksimum gaya dasar struktur (*base shear*) yang diakibatkan oleh gempa Kobe (stasiun Abeno) dengan skala 1 tersajikan dalam Tabel 4 dan Gambar 7.

Tabel 4. Rekapitulasi Reduksi Gaya Dasar Maksimum Struktur

Model	Beban	Gaya dasar maks (+) (kN)	Gaya dasar maks (-) (kN)	Gaya dasar maks (absolut) (kN)	Reduksi Gaya dasar maks (+) (%)	Reduksi Gaya dasar maks (-) (%)	Reduksi Gaya dasar maks (absolut) (%)
NO TMD		6,57	-6,14	6,57	0,00	0,00	0,00
HD1	Gempa Kobe Stasiun Abeno	4,59	-4,56	4,59	30,11	25,67	30,11
HD2		3,64	-3,46	3,64	44,57	43,59	44,57
HD3		4,35	-3,72	4,35	33,82	39,35	33,82
HD4		5,14	-4,40	5,14	21,73	28,23	21,73
HD5		5,81	-5,04	5,81	11,51	17,92	11,51

Sumber: Reduksi gaya dasar maksimum; diolah peneliti



Gambar 7. Tren Reduksi Base Shear

Sumber: Perhitungan dari hasil simulasi (lihat Tabel 4); diolah peneliti

Berdasarkan Tabel 4, struktur tanpa peredam (NO TMD) menghasilkan nilai acuan sebesar 6,5658 kN yang selanjutnya digunakan sebagai basis perhitungan persentase reduksi untuk setiap variasi konfigurasi NTMD. Keseluruhan konfigurasi NTMD (HD1–HD5) mampu

mencapai penurunan nilai maksimum gaya dasar dibandingkan dengan kondisi tanpa peredam, meskipun dengan tingkat keefektifan yang bervariasi.

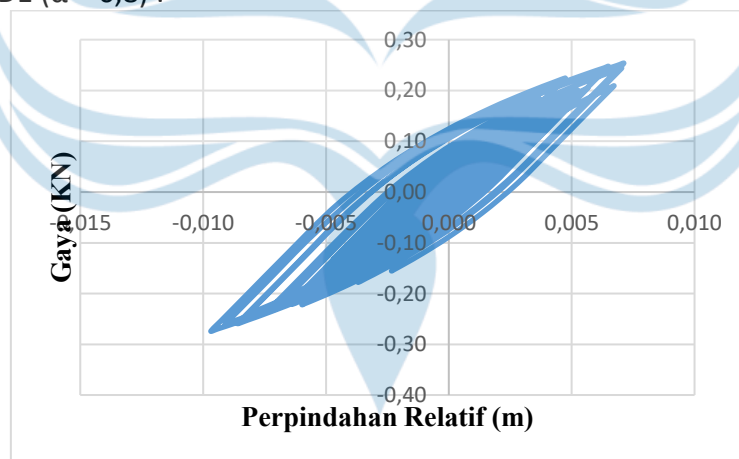
Dari aspek kuantitatif, HD2 menghasilkan penurunan nilai maksimum gaya dasar yang paling signifikan, yaitu 44,57% (nilai maksimum berkurang menjadi 3,6395 kN). Selanjutnya secara berurutan adalah HD3 (33,82%), HD1 (30,11%), HD4 (21,73%), dan HD5 (11,51%). Berdasarkan Gambar 7, urutan efektivitas ini menunjukkan kesesuaian dengan pola reduksi simpangan maksimum yang telah diobservasi pada analisis sebelumnya, walaupun terdapat beberapa fluktuasi relatif yang mengindikasikan bahwa reduksi simpangan tidak senantiasa memiliki korelasi linear dengan reduksi gaya dasar.

Konfigurasi HD2 tampaknya mampu mengoptimalkan proses transfer energi dari struktur primer ke NTMD dengan tingkat efisiensi tertinggi pada spektrum gempa Kobe. Di sisi lain, performa yang relatif kurang optimal dari HD5 (rasio frekuensi = 2,0) kemungkinan mengindikasikan bahwa penyetelan pada rasio tersebut kurang sesuai dengan rekaman gempa Kobe. Hal ini mungkin disebabkan oleh partisipasi mode kedua yang terbatas pada rentang frekuensi eksitasi gempa atau peredam beroperasi di luar zona amplitudo disipatif yang efektif.

Perilaku Histeresis Hubungan Antara Gaya dan Perpindahan Relatif

Berdasarkan hasil simulasi numerik dengan OpenSees, perilaku histeresis *damper* untuk setiap konfigurasi HD1-HD5 menunjukkan karakteristik loop yang serupa selama eksitasi gempa Kobe (Lihat Gambar 8 – 12). Kurva histeresis yang diperoleh menggambarkan hubungan nonlinier antara gaya *damper* dengan perpindahan relatif, dimana bentuk dan luas loop yang terbentuk mencerminkan kemampuan disipasi energi masing-masing konfigurasi.

1. Konfigurasi HD1 ($\alpha = 0,8$) :



Gambar 8. Kurva Histeresis Gaya-Perpindahan Relatif HD1

Sumber: Output kurva histeresis OpenSees; diolah peneliti.

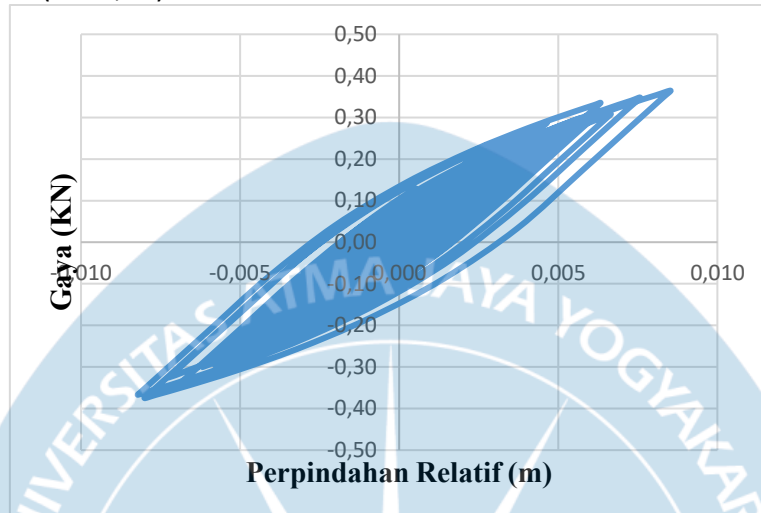
Berdasarkan Gambar 8, kurva histeresis HD1 menunjukkan loop *hysteresis* berbentuk elips yang cukup simetris dengan bentuk relatif *smooth*. Gaya maksimum pada *damper* sebesar +0,25373kN dan -0,27401kN dengan perpindahan relatif maksimum +0,00713 m dan -0,00969 m. Besar energi disipasi pada seluruh siklus dihitung dengan rumus berikut:

$$A = \sum_{i=1}^n \Delta_i \frac{f(x_i) + f(x_{i-1})}{2} \dots\dots\dots(1)$$

$$E = \sum_{i=1}^n E_i \dots\dots\dots(2)$$

Dengan, A sebagai luas kurva *hysteresis* yang menggambarkan energi disipasi. f merupakan gaya pada *damper* dan Δi adalah deformasi serta E merupakan jumlah total luas kurva *hysteresis* (Wuaten, 2022). Berdasarkan persamaan 1 dan 2, besar energi total yang terdisipasi pada *damper* selama siklus gempa 140 detik berlangsung adalah 21,1294 Joule.

2. Konfigurasi HD2 ($\alpha = 0,95$):

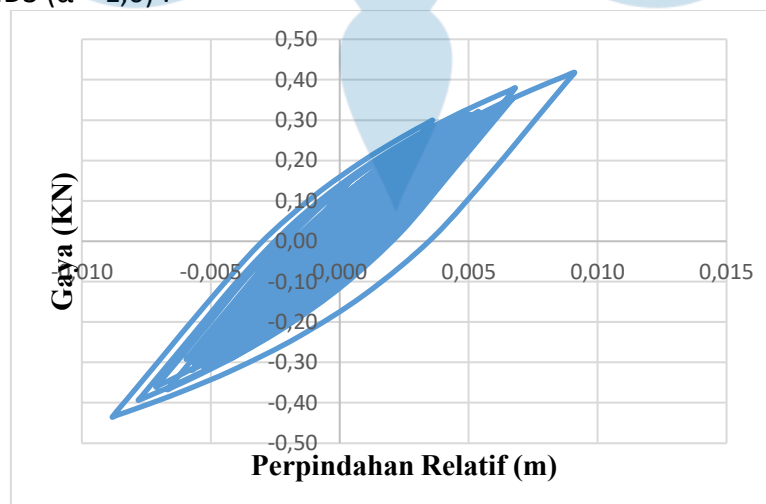


Gambar 9. Kurva Histeresis Gaya-Perpindahan Relatif HD2

Sumber: Output kurva histeresis OpenSees; diolah peneliti.

Berdasarkan Gambar 9, kurva histeresis HD2 menunjukkan bentuk elips tanpa *pinching* yang halus dengan peningkatan gaya puncak yang signifikan mencapai + 0,36453 kN dan - 0,37483 kN dengan perpindahan relatif maksimum + 0,00853 m dan -0,00822 m. Kombinasi gaya yang lebih tinggi menghasilkan loop dengan area yang lebih besar dibandingkan HD1, yang berarti kapasitas disipasi energi per siklus yang lebih besar. Besar energi total seluruh siklus selama gempa Kobe terjadi adalah 30,63407 Joule. Hal ini sejalan dengan performa HD2 yang unggul dalam mereduksi respons struktur dibandingkan HD1.

3. Konfigurasi HD3 ($\alpha = 1,0$) :

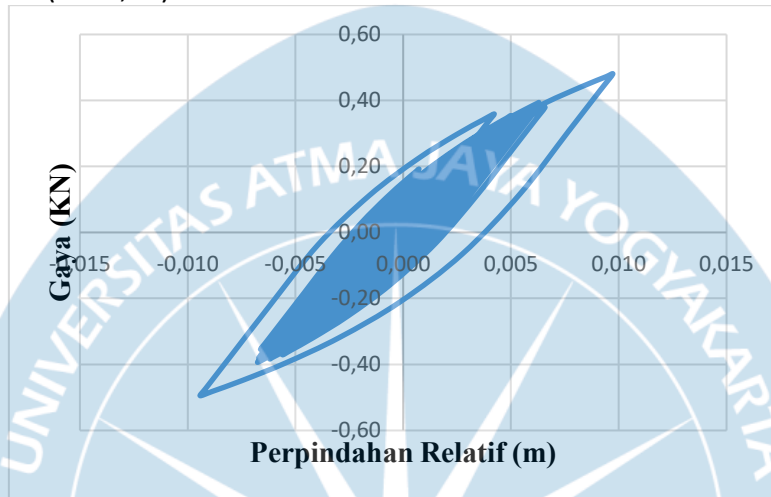


Gambar 10. Kurva Histeresis Gaya-Perpindahan Relatif HD3

Sumber: Output kurva histeresis OpenSees; diolah peneliti.

Berdasarkan Gambar 10, HD3 menghasilkan kurva berbentuk elips dengan gaya puncak sebesar +0,41818 kN dan -0,43482 kN dengan perpindahan relatif yang sedikit meningkat menjadi +0,00911 hingga -0,00882 m. Peningkatan antara perpindahan relatif dan gaya puncak menghasilkan loop histeresis dengan area yang cukup besar, sehingga potensi disipasi energi per siklus cukup tinggi. Bentuk loop yang cenderung lebih tebal mengindikasikan total energi yang terdisipasi dalam jumlah besar. Besar energi total yang terdisipasi pada *damper* selama gempa berlangsung adalah 32,147 Joule.

4. Konfigurasi HD4 ($\alpha = 1,05$) :

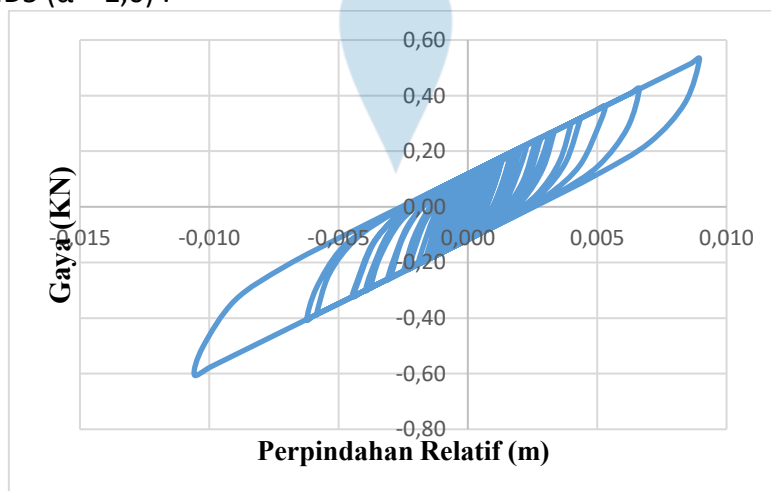


Gambar 11. Kurva Histeresis Gaya-Perpindahan Relatif HD4

Sumber: Output kurva histeresis OpenSees; diolah peneliti

Berdasarkan Gambar 11, kurva histeresis HD4 menampilkan kombinasi gaya puncak sekitar +0,48020 kN dan -0,49498 kN dengan perpindahan relatif +0,00973 m hingga -0,00942 m, yang merupakan salah satu kombinasi gaya dan *stroke* terbesar di antara seluruh konfigurasi. Loop HD4 diperkirakan memiliki area yang besar dengan karakteristik yang relatif simetris, mengindikasikan disipasi per siklus yang tinggi. Besar energi total yang terdisipasi pada *damper* selama simulasi gempa Kobe berlangsung mencapai 31,507 Joule

5. Konfigurasi HD5 ($\alpha = 2,0$) :



Gambar 12. Kurva Histeresis Gaya-Perpindahan Relatif HD5

Sumber: Output kurva histeresis OpenSees; diolah peneliti

Berdasarkan Gambar 12, HD5 menunjukkan nilai gaya dan perpindahan relatif puncak tertinggi dengan gaya maksimum +0,5302 kN, minimum -0,6046 kN, dan perpindahan relatif +0,00896 hingga -0,01057 m. Loop histeresis HD5 cenderung memiliki bentuk yang cukup ramping apabila dibandingkan dengan HD1 – HD4 dengan bentuk simetris tanpa efek *pinching*. Besar energi yang terdisipasi pada HD5 mencapai 23,6332 Joule.

KESIMPULAN

Studi parametrik ini mengevaluasi perilaku dan performa *Nonlinear Tuned Mass Damper* (NTMD) model Bouc–Wen dalam mereduksi respons seismik melalui variasi rasio frekuensi ($\alpha = 0,80; 0,95; 1,00; 1,05; 2,0$) menggunakan eksitasi gempa Kobe, dan menunjukkan bahwa penyetelan yang mendekati frekuensi natural struktur (HD2: $\alpha=0,95$ dan HD3: $\alpha=1,00$) menghasilkan amplitudo perpindahan puncak lebih kecil, peredaman osilasi pascapuncak lebih efisien, serta pola respons lebih stabil dibanding konfigurasi *undertuned* (HD1: $\alpha=0,80$) maupun *overtuned* (HD5: $\alpha=2,0$). Secara kuantitatif, reduksi perpindahan puncak absolut tertinggi dicapai HD2 sebesar 44,52%, diikuti HD3 33,99%, HD1 29,94%, HD4 21,83%, dan HD5 11,90%; pola yang sejalan terjadi pada reduksi gaya geser dasar maksimum—HD2 44,57%, HD3 33,82%, HD1 30,11%, HD4 21,73%, HD5 11,51%—menegaskan bahwa rentang *tuning* di sekitar frekuensi natural adalah yang paling efektif. Seluruh konfigurasi menghasilkan loop histeresis elips khas Bouc–Wen tanpa *pinching*, mencerminkan hubungan nonlinier gaya–perpindahan dan kapasitas disipasi energi; HD2 dan HD3 menampilkan loop “gemuk” dan halus dengan luasan relatif besar, sementara total energi terdisipasi berkisar 21,13 J (HD1) hingga 32,15 J (HD3) namun tidak selalu berbanding lurus dengan tingkat reduksi respons, sehingga optimasi rasio frekuensi dan parameter Bouc-Wen tetap menjadi kunci kinerja NTMD. Saran: untuk aplikasi dan riset lanjutan, tetapkan titik awal *tuning* pada $\alpha=0,95–1,00$ lalu lakukan penyapuan halus di sekitar frekuensi natural; evaluasi sensitivitas terhadap *mass ratio* dan *damping ratio* serta parameter Bouc–Wen; terapkan optimasi multiobjektif (mis. meminimalkan perpindahan puncak dan gaya geser dasar dengan batasan massa/energi kontrol); uji lintas-skenario input gempa (near-fault/far-field, berbagai level intensitas) termasuk kemungkinan drift frekuensi; pertimbangkan ketidakpastian properti struktur dan *soil–structure interaction*; eksplorasi konfigurasi semi-aktif/adaptif (mis. MR damper) untuk *retuning real-time*; serta lakukan verifikasi eksperimental (meja getar) dan kajian biaya–manfaat sebagai dasar pedoman desain/retrofit.

REFERENCE

- Casini, P., & Vestroni, F. (2022). Mitigation of structural vibrations of MDOF oscillators by modal coupling due to hysteretic dampers. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(19).
<https://doi.org/10.3390/app121910079>
- De Domenico, D. (2022). Optimum design of tuned mass damper with pinched hysteresis (TMD-PH) for seismic protection of structures. *Engineering Structures*, 252, 113617.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113617>
- Den Hartog, J. P. (1956). *Mechanical vibrations*. McGraw-Hill, New York.
- Dirbas, W., Diken, H., & Alnefaie, K. (2024). The effect of tuned mass damper mass ratio on wind turbine vibration mitigation. *Engineering, Technology and Applied Science Research*, 14(6), 18388–18394. <https://doi.org/10.48084/etasr.9170>

- García, V. J., López, J. R., & Martínez, A. (2021). Pendulum tuned mass damper optimization using Bouc-Wen model. *Applied Sciences*, 11(5), 2231. <https://doi.org/10.3390/app11052231>
- Hebbar, A. S., Kulal, S., Pasha, T., Samal, P., & Gourav, K. (2019). Numerical and experimental investigation of vibration isolation of three-storied building structure using tuned mass damper.
- Heredia-Pérez, M., Álvarez, D. A., & Bedoya-Ruiz, D. (2025). A state-of-the-art review of the Bouc-Wen class model of hysteresis: Origin, evolution and current state. *Archives of Computational Methods in Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s11831-025-10301-z>
- Janga, V. Y. (2025). Hysteretic tuned mass damper with bumpers for seismic retrofitting of buildings. *Journal of Sound and Vibration*. [in press]
- Janga, V. Y., Gourishetty, P. K., Carboni, B., Quaranta, G., & Lacarbonara, W. (2025). Hysteretic tuned mass damper with bumpers for seismic protection: Modeling, identification, and shaking table tests. *Journal of Sound and Vibration*, 597, 118816. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2024.118816>
- Li, G., Sun, J., & Wang, K. (2007). Research on a simplified frame column model to resist blast load. *Zhendong Yu Chongji/Journal of Vibration and Shock*, 26(1).
- Qian, R., Wang, H., & Zhang, J. (2024). Frequency-dependent Bouc-Wen modeling of magnetorheological damper. *Actuators*, 13(8), 297. <https://doi.org/10.3390/act13080297>
- Rathore, K. K., & Biswas, S. (2022). Tuned mass systems with the Bouc-Wen and a hybrid hysteresis model. In *Proceedings of the ENOC 2022*.
- Rupakhety, R., & Elias, S. (2020). Seismic vibration control of bridges with nonlinear tuned mass dampers. *Final Report, December 2020*.
- Salehizarani, A., & Karami Mohammadi, R. (2019). Optimisation of the mass and damping ratio of the tuned mass damper. *Australian Journal of Structural Engineering*, 20(3), 188–197. <https://doi.org/10.1080/13287982.2019.1622489>
- Sinadinovski, C. (2006). The event of 26th of December 2004 – The biggest earthquake in the world in the last 40 years. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4(2), 131–139. <https://doi.org/10.1007/s10518-006-9002-5>
- Vestroni, F., & Casini, P. (2025). Effectiveness and optimization of a hysteretic absorber for response mitigation. *Nonlinear Dynamics*. <https://doi.org/10.1007/s11071-025-11190-4>
- Wuaten, H. M. (2022). Disipasi energi pada kolom di jacketing dengan wire mesh dan self compacting concrete akibat beban siklik. *Cantilever: Jurnal Penelitian dan Kajian Bidang Teknik Sipil*, 11(1), 55–64. <https://doi.org/10.35139/cantilever.v11i1.136>
- Yue, Z., Chen, C., & Li, P. (2024). Multi-objective optimal design of tuned mass damper inerter for structures with nonlinear base-isolation systems. *Scientific Reports*, 14(1), 75996. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75996-9>