

## ANALISIS KAPASITAS NOMINAL PENAMPANG DAN KINERJA STRUKTUR BETON BERTULANG DENGAN MATERIAL NON-LINEAR

Hafiz Maulana<sup>1</sup>, Jati Sunaryati<sup>2</sup>, dan Rendy Thamrin<sup>3</sup>

### ABSTRAK

Dalam kasus analisis material kondisi non-linear, modulus elastisitas hanya titik definisi pertama dari sebuah perilaku secara keseluruhan. Definisi dan analisis dalam kasus material kondisi non-linear melibatkan salah satu dari perilaku pasca leleh (plastik). Solusi numerik dari jenis masalah non-linear melibatkan pendekatan segmen non-linear pada kurva tegangan-regangan dengan serangkaian potongan segmen linier. Setiap segmen linier didekati dengan modulus tangen (ET) yang dihitung sebagai rasio tegangan dengan regangan untuk segmen baris tertentu. Perbandingan antara material kondisi linear dengan kondisi non-linear menunjukkan bahwa hasil analisis menggunakan model material non-linear memberikan hasil cukup berbeda dibandingkan model material linear. Hasil ini juga menunjukkan adanya pengaruh perubahan nilai modulus elastisitas (E) pada matriks kekakuan elemen dalam analisis. Dimana untuk model material non-linear adanya modulus elastisitas tangen (ET) yang berpengaruh dalam analisis permodelan respon non-linear pada elemen.

**Kata kunci :** model material linear, model material non-linear, modulus elastisitas (E), modulus elastisitas tangen (ET).

### 1. PENDAHULUAN

Beban ultimit seperti saat gempa, respons struktur bisa telah memasuki kondisi non-linear maka hanya analisis non-linear yang bisa memberi gambaran respons non-linear bangunan secara memadai. Dimana untuk permodelan non-linear meliputi non-linear geometri dan non-linear material (Satyarno, 2013).

Seperti diketahui, sumber dari pada non-linear sistem struktur terdiri dari dua macam, yaitu non-linear material dan non-linear geometri, sekalipun dua-duanya bisa terjadi secara bersamaan. Non-linear geometri umumnya ditimbulkan oleh topologi dan konektivitas sistem struktur, perpindahan yang hingga (*finitesimal displacement*). Non-linear material bersumber dari hubungan tegangan-regangan (*stress-strain relationship*) yang tidak bersifat proporsional, baik pada daerah elastis maupun di luar daerah elastis (elasto-plastis atau plastis sempurna). Pada penelitian ini yang akan menjadi bahasan dasar adalah aspek non-linear material.

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini akan membahas perbedaan perilaku struktur, momen nominal dan kinerja struktur dari perencanaan struktur untuk material dalam kondisi linear dan dalam kondisi non-linear. Hasil dari analisis kemudian akan diverifikasi dengan bantuan software

---

<sup>1</sup> Magister Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Andalas, bighafiz34@gmail.com

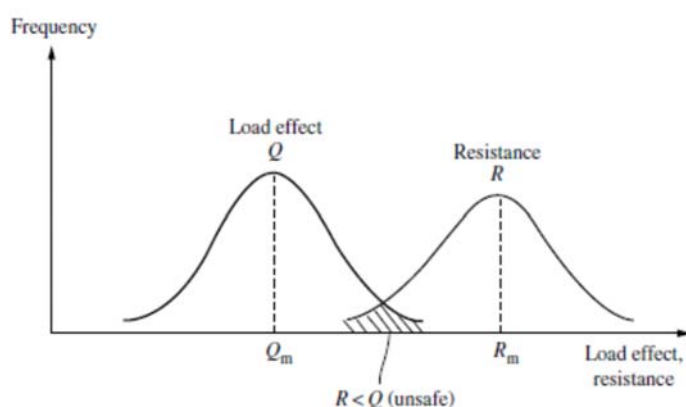
<sup>2</sup> Staf Pengajar Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Andalas, sunaryati\_jati@yahoo.com

<sup>3</sup> Staf Pengajar Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Andalas, rendy@ft.unand.ac.id

analisis penampang RCCSA v4.2. Pengaruh kondisi non-linear yang terjadi tersebut akan memberikan dampak pada design elemen struktur dan kinerja struktur.

## 2. NON-LINEAR MATERIAL

Menurut Zareh (2003), kondisi non-linear muncul ketika membahas hubungan non-linear tegangan-regangan. Untuk analisis finite element linear elastis satu-satunya hubungan tegangan-regangan didefinisikan melalui modulus elastisitas ( $E$ ). Sekarang, dalam kasus analisis material kondisi non-linear, modulus elastisitas hanya titik definisi pertama dari sebuah perilaku secara keseluruhan. Definisi dan analisis dalam kasus material kondisi non-linear melibatkan salah satu dari perilaku pasca leleh (plastik). Karakteristik material elasto-plastik under tendion ditunjukkan pada **Gambar 2.1**. Garis unloading menentukan tegangan (plastik) yang tersisa dalam sistem.



**Gambar 2.1.** Distribusi Frekuensi Beban dan Tahanan

**Gambar 2.1** (kiri) merupakan struktur yang menunjukkan perilaku softening setelah mengalami yielding. Solusi numerik dari jenis masalah non-linear melibatkan pendekatan segmen non-linear pada kurva tegangan-regangan dengan serangkaian potongan segmen linier. Setiap segmen linier didekati dengan modulus tangen (ET) yang dihitung sebagai rasio tegangan dengan regangan untuk segmen baris tertentu (**Gambar 2.1** kanan).

Menurut Satyarno (2013), pemodelan non-linear material meliputi :

- Pemodelan elemen struktur untuk memperhitungkan non-linear material dalam analisis
- Pemodelan kapasitas tampang elemen struktur (*backbone*)
- Pemodelan *hysteresis loops*

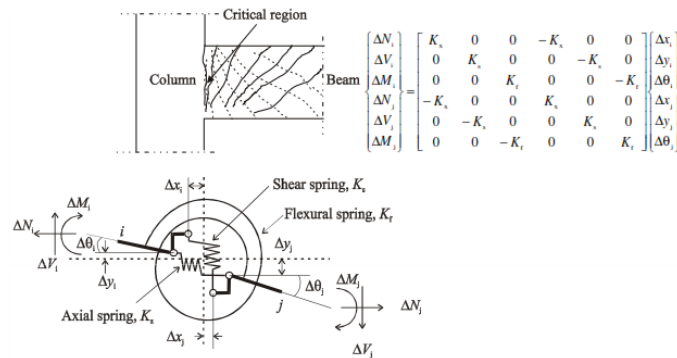
Pemodelan non-linear material pada komponen beton bertulang frame members menggunakan beberapa model, yaitu:

- Two components model* (Clough et al., 1965)
- One component model* (Giberson, 1969)
- Modified Giberson one component model* (Takayanagi et al., 1979, Thom et al., 1983)
- A compound-spring member model to represent each critical region* (Satyarno, 2000)

### 2.1. Compound-spring member model to represent each critical region (Satyarno, 2000)

Kekakuan spring geser dan spring lentur dalam elemen yang mewakili daerah kritis tidak diambil sebagai bentuk kaku sebelum terjadinya *yield*. Kekakuan spring geser dan lentur dalam model elemen spring didasarkan pada kekuatan atau pendetailan tulangan dan pre-aksial loading.

Kekakuan elastis yang mewakili daerah yang tetap elastis didasarkan pada sifat penampang. Dengan spring lentur dan geser dapat memiliki deformasi inelastis dan saling berinteraksi.



Gambar 2.2 Compound-Spring Member Model to Represent Each Critical Region

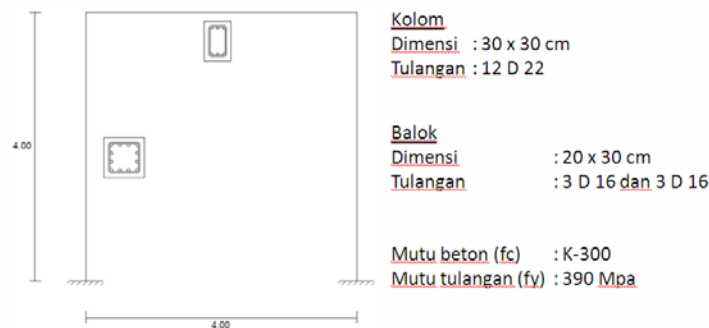
### 3. METODOLOGI PENELITIAN

Dalam penelitian ini, struktur yang digunakan portal sederhana. Dilakukan desain penampang dengan bantuan program RCCSA v4.2 untuk mendapatkan momen nominal penampang yang memenuhi prinsip *strong coloumb weak beam*. Sehingga pada penelitian ini diperoleh kondisi sendi plastis pertama yang murni pada balok.

Properties material yang digunakan dalam analisis penampang dengan RCCSA v4.2 sebagai berikut :

- a. Mutu baja tulangan : fy-390
- b. Mutu beton : K-300

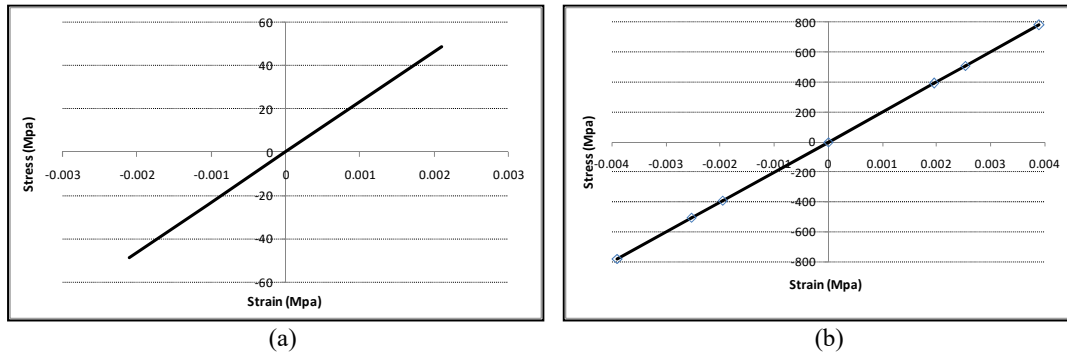
Dari hasil trial dengan program RCCSA v4.2, diperoleh penampang yang memenuhi prinsip *strong coloumb weak beam*. Dengan dimensi penampang seperti pada Gambar 3.1.



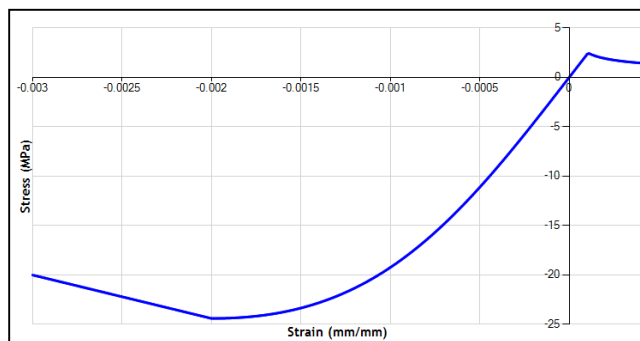
Gambar 3.1 Permodelan Portal Sederhana

Permodelan struktur pada software. Software ini merupakan software analisa struktur yang telah umum digunakan dalam teknik sipil. Permodelan dibuat 2 skenario, yaitu skenario 1 untuk material dalam kondisi linear dan skenario 2 untuk material dalam kondisi non-linear.

Permodelan pada software untuk skenario 1 dan 2 seperti pada **Gambar 3.1**, dengan properties material yang telah ditentukan. Untuk properties model material beton dan tulangan baja pada skenario 1 (linear) digunakan model seperti **Gambar 3.2**, dengan mutu beton ( $f_c'$ ) diambil dua kali lipat yaitu 48,86 Mpa (beton). Untuk skenario 2 (non-linear) digunakan model konstitutif Mander seperti pada **Gambar 3.3**. Model tersebut akan diinputkan ke fitur Nonlinear Material Data pada software.



**Gambar 3.2** Grafik Tegangan-Regangan (a) Model Linear Material Beton dan (b) Model Linear Material Tulangan Baja



**Gambar 3.3** Grafik Tegangan-Regangan Model Mander Material Beton

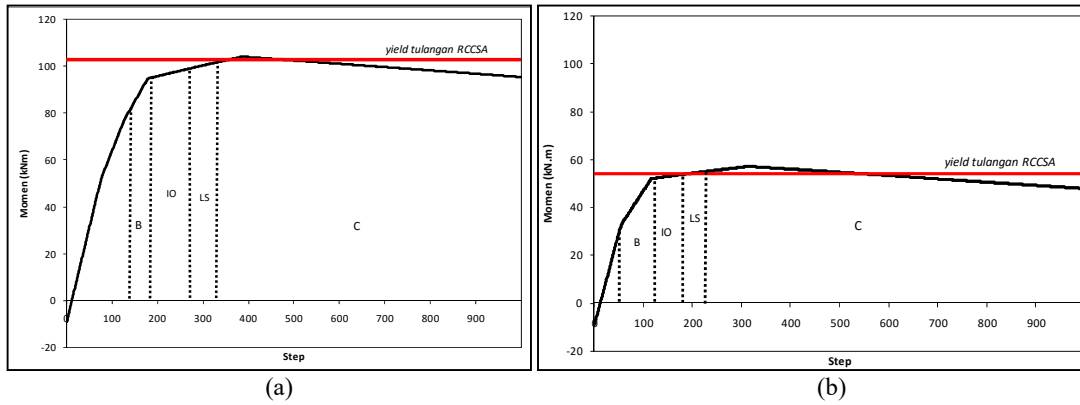
## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Analisis Penampang dengan Variasi Tipe keruntuhan

#### 4.1.1. Keruntuhan Tarik (*under-reinforced*)

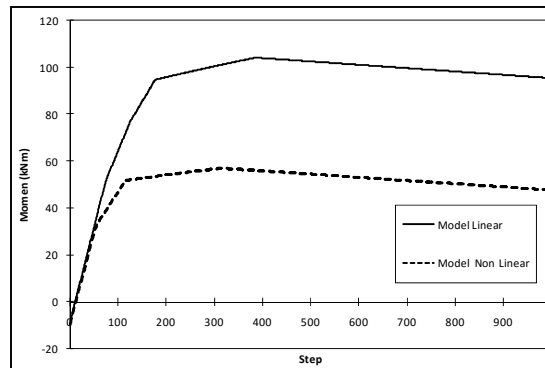
Dari hasil analisis pushover diperoleh titik-titik momen saat terjadi kondisi sendi plastis. Untuk melihat letak zone kondisi pushover dapat dilihat pada **Gambar 4.1**. Pada grafik hubungan momen-step pushover tersebut digambarkan letak titik-titik terjadinya kondisi sendi plastis. Untuk titik momen terjadinya crack pada beton, belum terjadi sendi plastis. Titik momen kondisi sendi plastis pertama (B) terjadi diantara momen crack beton dengan daerah yield tulangan pada hasil

verifikasi RCCSA v.4.2. Sedangkan saat terjadinya yield tulangan pada analisis pushover ditunjukkan pada awal titik momen kondisi sendi plasti C.



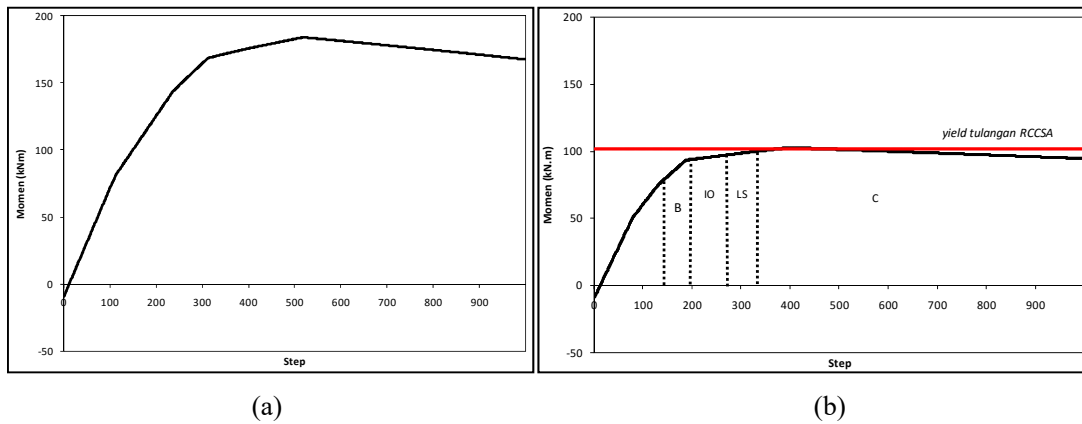
**Gambar 4.1** Grafik Hubungan Momen – Step PO dan Pembagian Zone PO dengan  $\rho < \rho_b$  (a) Model Material Linear dan (b) Model Material Non-Linear

Dengan membandingkan hasil grafik hubungan Momen – Step Pushover dari skenario 1 dan 2, diperoleh perbedaan yang signifikan pada momen ujung saat terjadinya sendi plastis seperti pada **Gambar 4.2**. Perbedaan yang terjadi dengan kondisi model material skenario 1, mutu material yang digunakan 2 (dua) kali dari mutu material skenario 2.

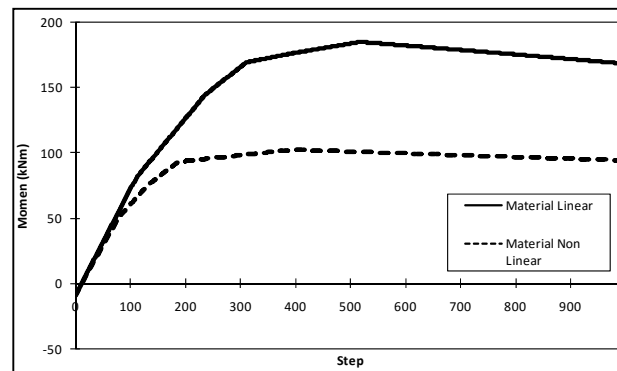


**Gambar 4.2** Grafik Hubungan Momen – Step PO dengan  $\rho < \rho_b$

#### 4.1.2. Keruntuhan Seimbang (*balanced*)



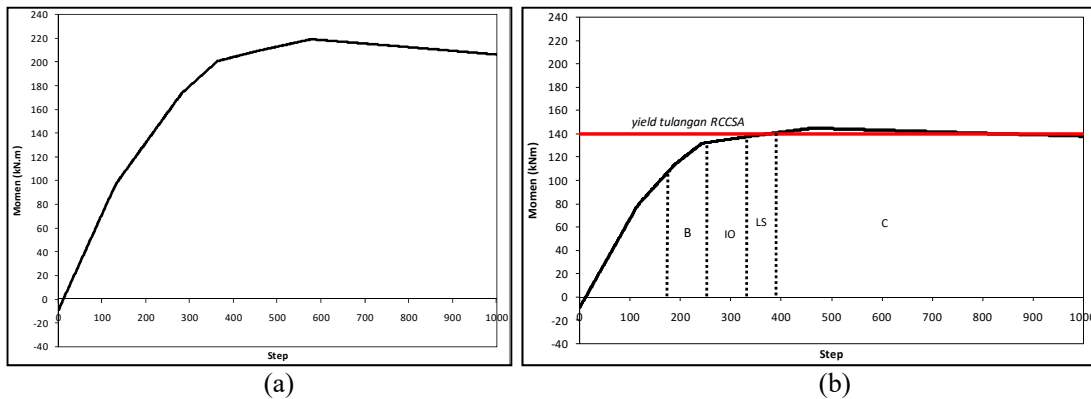
**Gambar 4.3** Grafik Hubungan Momen – Step PO dan Pembagian Zone PO dengan  $\rho \approx \rho_b$  (a) Model Material Linear dan (b) Model Material Non-Linear



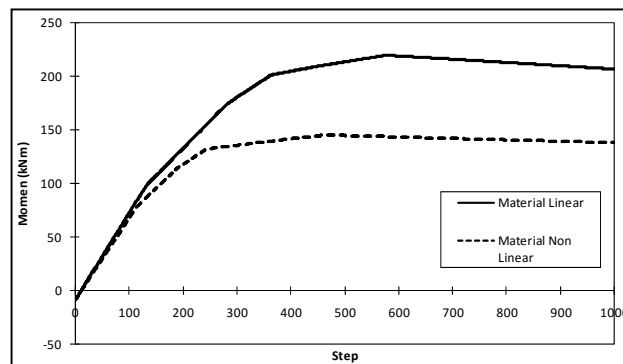
**Gambar 4.4** Grafik hubungan Momen – Step PO dengan  $\rho \approx \rho_b$

Dengan membandingkan hasil grafik hubungan Momen – Step Pushover dari skenario 1 dan 2, diperoleh perbedaan yang signifikan pada momen ujung saat terjadinya sendi plastis seperti pada **Gambar 4.4**. Perbedaan yang terjadi akibat kondisi non-linear terletak pada kondisi sendi plastis pada balok, dimana pada model material linear sendi plastis tidak terjadi. Selain itu jika dibandingkan grafik hubungan Momen – Step Pushover dari tipe keruntuhan seimbang (**Gambar 4.1**) dengan tipe keruntuhan tarik (**Gambar 4.3**), terlihat perbedaan yang dihasilkan akibat penambahan jumlah tulangan untuk mendapatkan tipe keruntuhan seimbang (*balance*). Dimana terlihat bahwa momen nominal penampang bertambah dengan penambahan jumlah tulangan. Selain itu, terjadi perubahan titik kondisi sendi plastis saat terjadinya *yield* tulangan penampang balok, dimana pada tipe keruntuhan tarik (*under-reinforced*) terjadi pada titik awal kondisi sendi plastis LS. Sedangkan pada tipe keruntuhan seimbang (*balance*), *yield* tulangan hasil RCCSA pada titik awal kondisi sendi plastis C.

### 4.1.3. Keruntuhan Tekan (*over-reinforced*)



**Gambar 4.5** Grafik Hubungan Momen – Step PO dan Pembagian Zone PO dengan  $\rho > \rho_b$  (a) Model Material Linear dan (b) Model Material Non-Linear



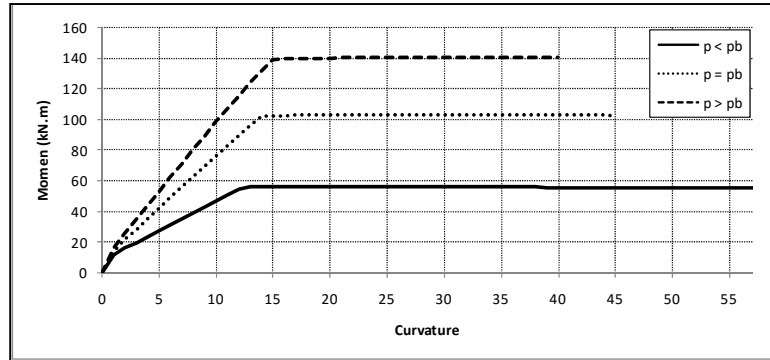
**Gambar 4.6** Grafik hubungan Momen – Step PO dengan  $\rho > \rho_b$

Dengan membandingkan hasil grafik hubungan Momen – Step Pushover dari skenario 1 dan 2, diperoleh perbedaan yang signifikan pada momen ujung saat terjadinya sendi plastis seperti pada **Gambar 4.6**. Perbedaan yang terjadi akibat kondisi non-linear terletak pada kondisi sendi plastis pada balok, dimana pada model material linear sendi plastis tidak terjadi. Selain itu jika dibandingkan grafik hubungan Momen – Step Pushover dari tipe keruntuhan tekan (**Gambar 4.5**) dengan tipe keruntuhan tarik (**Gambar 4.1**), terlihat perbedaan yang dihasilkan akibat penambahan jumlah tulangan untuk mendapatkan tipe keruntuhan tekan (*over-reinforced*). Dimana terlihat bahwa momen nominal penampang bertambah dengan penambahan jumlah tulangan. Selain itu, terjadi perubahan titik kondisi sendi plastis saat terjadinya yield tulangan penampang balok, dimana pada tipe keruntuhan tarik (*under-reinforced*) terjadi pada titik awal kondisi sendi plastis LS. Sedangkan pada tipe keruntuhan tekan (*over-reinforced*), *yield* tulangan terjadi pada titik awal kondisi sendi plastis C..

## 4.2. Kinerja Penampang

Kinerja penampang ditinjau dari grafik hubungan momen-curvature hasil analisis program RCCSA. Dengan menggunakan 3 variasi tipe keruntuhan penampang balok, diperoleh perbedaan pada kinerja penampang. Seperti yang terlihat pada grafik yang ditunjukkan **Gambar 4.7**, dengan bertambahnya jumlah tulangan pada setiap tipe keruntuhan diperoleh juga pertambahan momen nominal penampang balok. Perbedaan juga terjadi

pada tingkat kemiringan pertambahan momen setelah terjadi *crack* pada beton, dimana pada tipe keruntuhan tekan tidak terlihat jelas perbedaan kemiringan setelah terjadinya *crack*. Perubahan titik akhir *curvature* juga terjadi dengan penambahan jumlah tulangan pada penampang. Semakin bertambahnya jumlah tulangan penampang, akan mengurangi besaran *curvature* penampang tersebut. Dengan perbedaan pada titik akhir *curvature* yang diperoleh dari **Gambar 4.7**, membuktikan bahwa bertambahnya jumlah tulangan penampang akan memberikan pertambahan kapasitas penampang namun juga akan menurunkan tingkat daktilitas kurvatur penampang tersebut.



**Gambar 4.7** Grafik Hubungan Momen – Curvature Penampang Balok (Hasil RCCSA v.4.2)

Untuk persentase perubahan kapasitas momen nominal ( $M_n$ ) dan daktilitas kurvatur ( $\mu_k$ ) penampang dengan berbagai tipe keruntuhan ditunjukkan dengan data kualitatif seperti pada **tabel 4.1** berikut.

**Tabel 4.1.** Perbandingan  $M_n$  dan  $\mu_k$  untuk variasi tipe keruntuhan penampang balok

Tipe Keruntuhan	Perbandingan Terhadap	Persentase Perubahan $M_n$	Daktilitas Kurvatur ( $M_k$ )
Tarik ( <i>under-reinforced</i> )	Seimbang ( <i>balanced</i> )	83,64 %	3,56
Seimbang ( <i>balanced</i> )	Tekan ( <i>over-reinforced</i> )	37,20 %	3,21
Tekan ( <i>over-reinforced</i> )	Tarik ( <i>under-reinforced</i> )	151,94 %	2,67

### 4.3. Kinerja Struktur

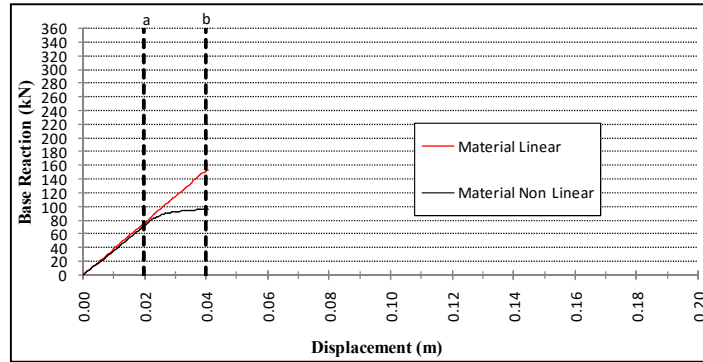
Kinerja struktur ditinjau dari grafik hubungan *base reaction - displacement* hasil analisis *pushover*. Dengan menggunakan 3 variasi tipe keruntuhan penampang balok, diperoleh perbedaan pada kinerja struktur. Untuk meninjau batasan pada kinerja struktur ini, digunakan nilai batasan drift ratio berdasarkan Aoyama (2001) dan ATC 40 (1996). Dari kedua sumber tersebut diperoleh nilai batasan *drift ratio* sebagai berikut :

1. Berdasarkan Aoyama (2001)
  - a. Level 1 (1/200) = 0,02 m (kondisi a)  
Dimana kondisi struktur beton telah mengalami *crack*, namun tulangan belum yield.
  - b. Level 2 (1/100) = 0,04 m (kondisi b)  
Struktur beton telah mengalami *crack* dan yielding pada tulangan, namun struktur belum runtuh.
2. Berdasarkan ATC 40 (1996)
  - a. Immediate Occupancy = 0,04 m (kondisi b)

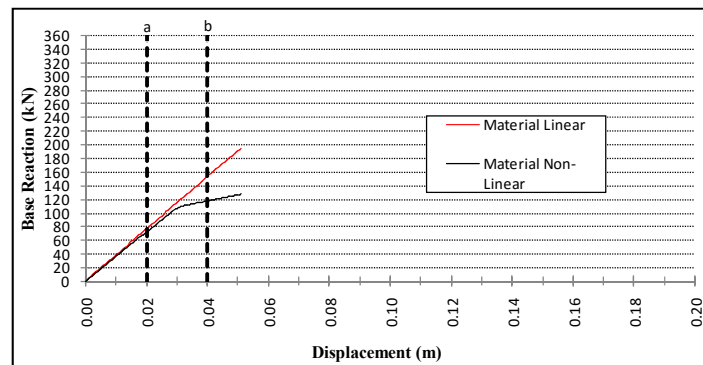


Struktur gedung masih aman, tidak mengalami kerusakan yang berarti, tidak ada resiko korban jiwa dan dapat segera berfungsi setelah terkena gempa.

- b. Damage Control = 0,06 m (kondisi c)  
Struktur gedung mulai mengalami kerusakan yang bervariasi namun tidak sampai runtuh dan resiko korban jiwa sangat rendah.
- c. Life Safety = 0,08 m (kondisi d)  
Struktur mulai mengalami kerusakan struktural namun keruntuhan total maupun parsial belum terjadi. Resiko korban jiwa rendah.
- d. Structural Stability = 0,1 m (kondisi e)  
Gedung berada dalam ambang keruntuhan total

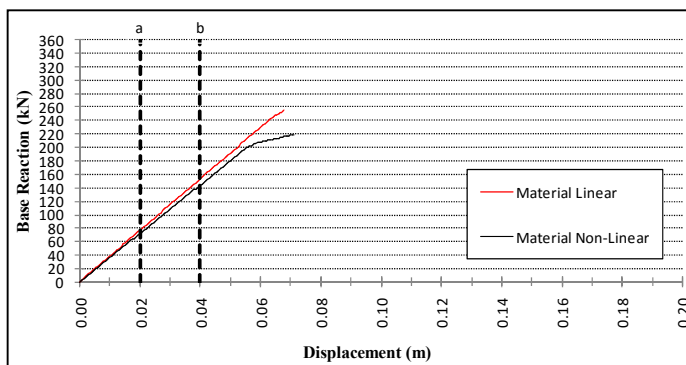


Gambar 4.8 Grafik hubungan Base Reaction – Displacement Penampang Balok dengan  $\rho < \rho_b$



Gambar 4.9 Grafik hubungan Base Reaction – Displacement Penampang Balok dengan  $\rho \approx \rho_b$

**ANALISIS KAPASITAS NOMINAL PENAMPANG DAN KINERJA STRUKTUR  
BETON BERTULANG DENGAN MATERIAL NON-LINEAR**



**Gambar 4.10** Grafik hubungan Base Reaction – Displacement Penampang Balok dengan  $\rho > \rho_b$

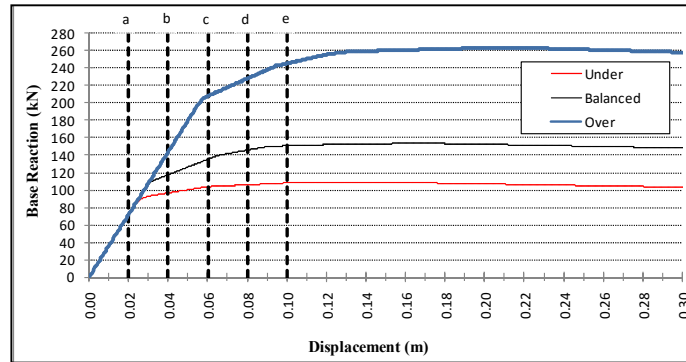
Berdasarkan hasil perbandingan grafik kinerja struktur pada **Gambar 4.7** sampai **Gambar 4.10** terlihat pengaruh perbedaan model material terhadap kinerja struktur. Dimana struktur dengan model material non-linear telah mencapai titik leleh jika dibandingkan dengan model material linear. Sehingga struktur dengan model material non-linear lebih cepat memasuki daerah plastis dibandingkan dengan model material linear.

Untuk nilai base reaction saat leleh pertama pada material non-linear diperlihatkan pada **tabel 4.2**.

**Tabel 4.2** Perbandingan Base Reaction untuk variasi tipe keruntuhan penampang balok

Tipe Keruntuhan	Model Material	Base Reaction Saat Leleh Pertama (kN)
Tarik ( <i>under reinforced</i> )	Non-Linear	94,17
Seimbang ( <i>balanced</i> )		110,28
Tekan ( <i>over reinforced</i> )		202,86

Untuk melihat kinerja struktur dengan nilai batasan *drift ratio*, model yang digunakan adalah struktur dengan model material non-linear. Dari **gambar 4.44** diperoleh untuk kondisi a, struktur dengan tipe keruntuhan *under-reinforced*, *balanced*, dan *over-reinforced* masih dalam daerah elastic. Hal ini menyatakan dengan ketiga tipe desain keruntuhan, struktur sangat aman. Untuk kondisi b, struktur dengan tipe keruntuhan *over-reinforced* masih berada dalam daerah elastic sedangkan struktur dengan tipe keruntuhan *under-reinforced* dan *balanced* telah memasuki daerah plastis. Namun batasan *drift ratio* (kondisi b) ini, struktur masih dalam keadaan aman ketika beban gempa terjadi.



**Gambar 4.11** Grafik hubungan Base Reaction – Displacement Penampang Balok Model Material Non-Linear dengan Batasan *Drift Ratio*

Untuk nilai daktilitas struktur ( $\mu_s$ ) dengan model material non-linear diperlihatkan pada **tabel 4.3**. Dari nilai daktilitas struktur tersebut diperoleh hasil yang relevan dengan nilai daktilitas curvature penampang balok dengan model material non-linear RCCSA.

**Tabel 4.3** Perbandingan  $\mu_s$  untuk variasi tipe keruntuhan penampang balok

Tipe Keruntuhan	Model Material	Daktilitas Struktur ( $\mu_s$ )
Tarik ( <i>under reinforced</i> )	Non-Linear	5,68
Seimbang ( <i>balanced</i> )		4,97
Tekan ( <i>over reinforced</i> )		3,37

## 5. KESIMPULAN

1. Dari hasil perbandingan kurva tegangan-regangan model material linear (skenario 1) dengan model material non-linear (skenario 2) didapatkan perbedaan yang signifikan.
2. Perbedaan yang dihasilkan model material non-linear terhadap perilaku struktur portal cukup terlihat pada analisis pushover (non-linear). Dimana terdapat penurunan nilai momen ujung saat terjadi titik sendi plastis jika dibandingkan dengan model material linear. Hal ini dikarenakan adanya perubahan nilai modulus elastisitas (E) pada matriks kekakuan sendi plastis elemen dalam analisis pushover pada elemen frame.
3. Untuk kinerja struktur portal model material linear dan model material non-linear, diperoleh cukup perbedaan kinerja. Dimana untuk struktur dengan model material non-linear telah mencapai titik leleh jika dibandingkan dengan model material linear.
4. Selain itu, hasil tambahan lain yang didapatkan dalam penelitian ini adalah untuk kinerja struktur portal scenario 2 yang ditinjau dengan menggunakan batasan drift ratio, diperoleh untuk kondisi a (level 1, Aoyama) struktur masih dalam keadaan elastic (sangat aman). Hal tersebut dikarenakan kondisi struktur beton telah mengalami crack, namun tulangan belum yield.

**DAFTAR KEPUSTAKAAN**

- Aisyah, Siti dan Megantara, Yoga, 2011, *Pemodelan Struktur Bangunan Gedung Bertingkat Beton Bertulang Rangka Terbuka Simetris di Daerah Rawan Gempa dengan Metoda Analisis Pushover*, Prosiding Seminar Nasional AvoER ke-3, Palembang, Indonesia.
- Aoyama, Hiroshi, 2001, *Design of Modern Highrise Reinforced Concrete Structure*, London.
- Applied Technology Council, 1997, *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings (ATC40)*, Redwood, USA.
- Azhari A.A, Firdha dan Besman S., 2012, *Analisa Plastis Pada Portal Dengan Metode Elemen Hingga*, Tesis Program Magister, Departemen Teknik Sipil, Universitas Sumatera Utara, Medan.
- Badan Standarisasi Nasional, 2002, *Standar Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung*, SNI 03-1726-2002, Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional, 2002, *Tata cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung*, SNI 03-2847-2002, Bandung.
- Badan Standarisasi Nasional, 2012, *Standar Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*, SNI 1726-2012, Jakarta.
- Dewobroto, W., 2005, "Evaluasi Kinerja Struktur Baja Tahan Gempa Dengan Analisis Pushover", *Civil Engineering National Conference : Sustainability Construction & Structural Engineering Based on Professionalism*, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Pelita Harapan.
- I L, Putu, dkk, 2009, *Buku Ajar Konstruksi Beton II*, Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hindu Indonesia, Denpasar.
- Ivančo, Vladimír, 2011, *Script Of Lectures : Nonlinear Finite Element Analysis*, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Košice, Slovakia.
- Karolina, R., 2008, *Analisa dan Kajian eksperimental Hubungan Momen- Kurvatur Pada Balok Beton Bertulang*, Tesis Program Magister, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Sumatera Utara, Medan.
- Pratikto, Pamungkas, 2009, *Gedung Beton Bertulang Tahan Gempa*, Surabaya.
- Satyarno, I., 2013, *Permodelan Nonlinear Elemen Beton Bertulang Dalam Analisis Struktur*, Shortcourse HAKI.
- Thamrin, R., 2014, *User Manual Reinforced Concrete Cross Section Analysis (RCCSA v.4.2.1)*, Padang.
- Zareh, H., 2003, *ME565 Advanced Finite Element Analysis*, Portland State University.
- Zulkifli, E., 2010, *Perencanaan Bangunan Tahan Gempa : Pelatihan Software ETABS*, Penerbit ITB, Bandung.